



# **Desenvolvimento de uma Estrutura Híbrida Resistente ao Impacto para Alojamento de Baterias de Veículos Elétricos.**

Mestrado em Engenharia Automóvel

Tiago Filipe Marantes Lampreia

Leiria, setembro de 2024



# **Desenvolvimento de uma Estrutura Híbrida Resistente ao Impacto para Alojamento de Baterias de Veículos Elétricos.**

Mestrado em Engenharia Automóvel

Tiago Filipe Marantes Lampreia

Trabalho de Projeto realizado sob a orientação do Professor Doutor Sérgio Pereira dos Santos.

Leiria, setembro de 2024

# **Originalidade e direitos de autor**

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Automóvel, no ano letivo 2023/2024, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

# Agradecimentos

Um agradecimento ao meu orientador, o Professor Doutor Sérgio Pereira dos Santos, pela orientação, paciência e disponibilidade demonstradas ao longo da elaboração deste estudo, cuja dedicação contribuiu de forma determinante para o sucesso deste projeto.

Gostaria de expressar os meus profundos agradecimentos aos meus pais, pelo apoio incondicional e incentivo demonstrado ao longo de todo o meu percurso acadêmico.

Ao meu irmão, pela presença constante, e motivação nos momentos mais desafiantes, o meu sincero reconhecimento.

À Anna, pelo tempo que esteve sempre disposta a dedicar o seu apoio, compreensão, paciência e pela motivação constante nos momentos de maior dificuldade.

A todos, o meu mais sincero agradecimento.

# Resumo

Os veículos elétricos, para além de cumprirem os requisitos comuns de segurança estrutural, possuem uma necessidade que se baseia na proteção adicional ao conjunto de baterias, devido à sua perigosidade quando danificadas. Por prevenção, as práticas comuns dos fabricantes de veículos elétricos, em caso de embate de pequena intensidade, promovem a substituição completa das baterias, por razões de segurança. Esta prática tem levado à consideração da perda total do veículo acidentado e colocação das baterias no percurso de reciclagem prematuro, dado ao seu período de vida útil projetado.

Para a resolução desta problemática, desenvolveu-se uma estrutura de alojamento de baterias, com o conceito híbrido, constituído por uma duas estruturas, uma interna de elevada resistência mecânica e uma exterior atenuadora de impacto, no caso desta última, que seja permitida a sua substituição, em caso de colisão e deformação. Para alcançar esse objetivo, em termos metodológicos, foram estudados os materiais para a produção das duas estruturas, com recurso a modelação através do software “*Solidworks*” e foram implementadas simulações em software “*LS\_DYNA*”, para testagem de materiais e dos impactos nas zonas críticas do sistema híbrido de modo a determinar as capacidades destes em situações de colisão.

Dos resultados obtidos, permitiu concluir que o sistema híbrido resiste de forma eficiente a impactos laterais com velocidades até 5 Km/h. Para as restantes velocidades ocorreu deformação da estrutura supostamente “indeformável”. O impacto no plano inferior, demonstrou ser o mais vulnerável dos dois tipos estudados: Para todas as velocidades ocorre deformação significativa nessa estrutura. Contudo, os fundamentos para a implementação deste tipo de sistemas foram estabelecidos, e, com a alteração de alguns parâmetros estruturais e materiais, é evidente a potencialidade deste sistema para melhorar a sustentabilidade das baterias de alta tensão.

**Palavras-chave:** Impacto, bateria, elétrico, simulação, alojamento.

# Abstract

Electric vehicles, in addition to meeting common structural safety requirements, have an additional need for protecting their battery packs due to the risks associated with damage. As a precaution, common practices among electric vehicle manufacturers involve the complete replacement of the battery pack after minor collisions for safety reasons. This practice often results in the vehicle being declared a total loss and the premature recycling of the batteries, despite their projected service life.

To address this issue, a hybrid battery housing structure was developed, consisting of two components: an internal structure with high mechanical resistance and an external impact-absorbing structure. The latter is designed to be replaceable in the event of a collision and deformation. Methodologically, materials for both structures were studied using modelling in “*SolidWorks*” and simulations were conducted in “*LS-DYNA*” software to test the materials and the impacts on critical areas of the hybrid system to assess its performance in collision scenarios.

The results revealed that the hybrid system effectively withstands lateral impacts at speeds of up to 5 km/h. At higher speeds, deformation occurred in the supposedly “non-deformable” structure. For impacts on the underside of the system, it was found to be more vulnerable: significant deformation occurred at all speeds tested. However, the principles for implementing this type of system were established, and with adjustments to certain structural parameters and materials, the potential of this system to enhance the sustainability of high-voltage batteries is evident.

**Keywords:** Impact, battery, electric, simulation, housing.

# Índice

<b>Originalidade e direitos de autor .....</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>iv</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de siglas e acrónimos .....</b>	<b>xvi</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Organização do Relatório.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Estado da Arte .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Componentes, tipologia e posicionamento da bateria de alta tensão em veículos elétricos.....</b>	<b>3</b>
2.1.1. Componentes típicos .....	3
2.1.2. Tipologia de baterias de alta tensão.....	5
2.1.2.1. Bateria de Chumbo-Ácido.....	5
2.1.2.2. Bateria de Níquel-Cádmio.....	6
2.1.2.3. Baterias de Níquel .....	6
2.1.2.4. Baterias de Iões de Lítio .....	6
2.1.3. Posicionamento da bateria de alta tensão no veículo elétrico.....	6
<b>2.2. Sustentabilidade da bateria de alta tensão.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3. Estruturas de armazenamento de baterias de alta tensão.....</b>	<b>11</b>
2.3.1. Requisitos da Estrutura de Armazenamento de Baterias de Alta Tensão.....	11
2.3.2. Materiais utilizados na estrutura de armazenamento de baterias de alta tensão .....	12
<b>2.4. Estruturas e materiais atenuadoras de impacto.....</b>	<b>13</b>
2.4.1. Estrutura de material compósito .....	13
2.4.2. Estrutura de alumínio .....	14
2.4.3. Estrutura de espuma .....	14
2.4.4. Estrutura de <i>honeycomb</i> de alumínio.....	15
2.4.5. Estrutura de polipropileno expandido (EPP) .....	15
2.4.6. Espumas metálicas.....	16
<b>2.5. Ensaios de impacto e normalização de referência.....</b>	<b>16</b>
2.5.1. Ensaios de impacto ao nível da bateria de alta tensão .....	17

2.5.1.1.	SAE J2464:2009 .....	17
2.5.1.2.	ISO 12405-3:2014 .....	18
2.5.1.3.	FreedomCAR:2006.....	18
2.5.1.4.	UN/ECE-R100.02:2013.....	19
2.5.2.	Testes de impacto em veículos elétricos.....	20
2.5.2.1.	Teste de impacto lateral por barreira .....	21
2.5.2.2.	Teste de impacto lateral por poste .....	21
<b>2.6.</b>	<b>Referencias bibliográficas pertinentes para o estudo.....</b>	<b>22</b>
2.6.1.	Mitsubishi i-Miev estrutura de absorção de impacto na zona do batente da porta do veículo. 22	
<b>3.</b>	<b>Desenvolvimento do Conceito.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.</b>	<b>Problemas levantados .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.</b>	<b>Conceito inicial .....</b>	<b>24</b>
	.....	<b>26</b>
<b>4.</b>	<b>Construção do modelo.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.</b>	<b>Modelo de referência.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.</b>	<b>Critérios de seleção dos materiais de construção .....</b>	<b>28</b>
4.2.1.	Critérios de seleção para o material da estrutura indeformável.....	28
4.2.2.	Critérios de seleção do material para a estrutura deformável .....	29
<b>4.3.</b>	<b>Seleção do material da estrutura indeformável.....</b>	<b>30</b>
4.3.1.	Análise dos materiais propostos para a estrutura indeformável .....	30
4.3.2.	Propriedades do material da estrutura indeformável .....	32
4.3.2.1.	Fração volúmica da fibra .....	33
4.3.2.2.	Propriedades gerais.....	33
4.3.2.3.	Cálculo das propriedades específicas do laminado.....	34
<b>4.4.</b>	<b>Seleção do material da estrutura deformável .....</b>	<b>36</b>
4.4.1.	Análise dos materiais propostos para a estrutura deformável.....	37
4.4.1.	Propriedades do material da estrutura deformável .....	38
4.4.1.1.	Propriedades gerais.....	38
4.4.1.2.	Direção das células do material <i>honeycomb</i> .....	38
<b>4.5.</b>	<b>Modelação da estrutura indeformável .....</b>	<b>39</b>
4.5.1.	Chassis inferior .....	39
4.5.1.	Tampa .....	40
4.5.2.	Disposição dos componentes internos .....	42
<b>4.6.</b>	<b>Modelação da estrutura deformável.....</b>	<b>43</b>
4.6.1.	Painel estrutural de suporte ao <i>honeycomb</i> .....	43
4.6.2.	Estruturas de <i>honeycomb</i> .....	45
<b>4.7.</b>	<b>Integração entre estrutura deformável e indeformável .....</b>	<b>47</b>

<b>5.</b>	<b>Análise numérica .....</b>	<b>51</b>
<b>5.1.</b>	<b>Software de análise de elementos finitos LS_DYNA .....</b>	<b>51</b>
<b>5.2.</b>	<b>Organização da análise numérica .....</b>	<b>51</b>
<b>5.3.</b>	<b>Estudo do modelo de <i>honeycomb</i> .....</b>	<b>52</b>
5.3.1.	Comportamento típico do <i>honeycomb</i> .....	53
5.3.2.	Estratégia e parametrização de testagem .....	53
5.3.3.	Malha de elementos finitos .....	54
5.3.4.	Definição do modelo matemático do <i>honeycomb</i> “real” .....	55
5.3.5.	Definição modelo matemático do <i>honeycomb</i> “equivalente” .....	55
5.3.5.1.	Propriedades gerais .....	56
5.3.5.2.	LCA – Força de compressão na direção “T” .....	57
5.3.5.3.	LCB – Força de compressão na direção “W” .....	57
5.3.5.4.	LCC – Força de compressão na direção “L” .....	58
5.3.5.5.	Módulo de elasticidade nas direções “T”, “W” e “L” .....	58
5.3.5.6.	LCAB – Resistência ao corte na direção “T-W” .....	59
5.3.5.7.	LCBC – Resistência ao corte na direção “W-L” .....	59
5.3.5.8.	LCCA – Resistência ao corte na direção “L-T” .....	60
5.3.5.9.	Módulo de elasticidade nas direções “T-W”, “W-L” e “L-T” .....	60
5.3.5.10.	Orientação do Material .....	60
5.3.6.	Comparação entre o modelo real e modelo equivalente .....	61
<b>5.4.</b>	<b>Estudo do impacto no Sistema Híbrido .....</b>	<b>62</b>
5.4.1.	Estratégias e Parametrizações das Simulações de Impacto .....	62
5.4.1.1.	Ponto de Compressão Máxima da Estrutura de <i>Honeycomb</i> .....	64
5.4.2.	Malha de elementos finitos .....	66
5.4.2.1.	Malha para simulação de impacto lateral .....	66
5.4.2.2.	Malha para simulação de impacto inferior .....	67
5.4.3.	Definição dos Modelos de Material .....	67
5.4.3.1.	Punção .....	67
5.4.3.2.	Chassis Inferior .....	68
5.4.3.3.	Tampa .....	69
5.4.3.4.	Painel Estrutural .....	69
5.4.3.5.	Estrutura de <i>Honeycomb</i> .....	70
<b>6.</b>	<b>Análise de Resultados .....</b>	<b>71</b>
<b>6.1.</b>	<b>Resultados do Impacto Lateral .....</b>	<b>71</b>
<b>6.2.</b>	<b>Resultados do Impacto inferior .....</b>	<b>81</b>
<b>6.3.</b>	<b>Análise quantitativa dos resultados dos impactos .....</b>	<b>92</b>
6.3.1.	Deformação do <i>honeycomb</i> e chassis inferior .....	92
6.3.2.	Força resistiva do sistema híbrido .....	93
<b>6.4.</b>	<b>Limitações do sistema híbrido .....</b>	<b>93</b>
<b>6.5.</b>	<b>Limitações da análise e simulação ao sistema híbrido .....</b>	<b>94</b>

<b>7. Conclusão .....</b>	<b>96</b>
<b>8. Recomendações .....</b>	<b>98</b>

# Lista de figuras

Figura 1 - Vista explodida da Bateria de alta tensão BMW i3 (adaptado de FIA - Federation Internationale de L'Automobile, 2022).....	5
Figura 2 - Padrões de deformação para veículos convencionais (Justen & Schöneburg, Crash Safety Of Hybrid- And Battery Eletric Vehicles, 2011) .....	7
Figura 3 - Conceito de zonas de proteção de alta tensão (Justen & Schöneburg, Crash Safety Of Hybrid- And Battery Eletric Vehicles, 2011) .....	8
Figura 4 - Posicionamento da bateria de alta tensão no BMW i3 (Brunckhorst, 2016).....	9
Figura 5 - Atenuador de impacto antes e depois do impacto (Boria & Belingardi, s.d.) .....	13
Figura 6 - Atenuador de impacto <i>Formula Student</i> IA FG17 (Arifin & Gunawan, 2019) .....	14
Figura 7 - atenuador de impacto FSAE da “Fórmula Seven” (Formula Seven, 2024) .....	14
Figura 8 - Modelo de simulação do atenuador de impacto de honeycomb de alumínio (Ma Quoc, et al., 2020) .....	15
Figura 9 - Para-choques automóvel de Polipropileno Expandido (Engineered Foam Products, s.d.) .....	16
Figura 10 - Exemplo de Espuma metálica (Foammetal, s.d.).....	16
Figura 11 - Teste de impacto lateral por barreira (Euro NCAP, s.d.) .....	21
Figura 12 - Teste de impacto lateral por poste (Euro NCAP, s.d.) .....	21
Figura 13 - Sumário de Resultados (Setiawan & Salim, 2017) .....	23
Figura 14 - Proposta de sistema híbrido substituível para armazenamento de baterias de alta tensão .....	25
Figura 15 - Esquema da integração da estrutura deformável com a estrutura indeformável .....	26
Figura 16 – Estrutura de armazenamento do pack de baterias do BMW i3 2013 (EV Shop, s.d.) .....	27
Figura 17 - Vista explodida do pack de baterias do BMW i3 (adaptado de FIA - Federation Internationale de L'Automobile, 2022).....	28
Figura 18 - Tensão de cedência VS Densidade de materiais propostos para a estrutura indeformável .....	31
Figura 19 - Condutividade Térmica [W/m-K] dos materiais propostos para a estrutura indeformável.....	32
Figura 20 - Lamina com deformação longitudinal (Santos, s.d.).....	34
Figura 21 - Resistência à compressão [ <b>MPa</b> ] em função da densidade de materiais [ <b>Kg/m<sup>3</sup></b> ] de para a estrutura deformável.....	37
Figura 22 - Direção das células do <i>honeycomb</i> de alumínio (Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	39
Figura 23 – Chassis inferior do pack de baterias (Estrutura Indeformável) .....	40
Figura 24 - Vista Isométrica do chassis inferior do pack de baterias (estrutura indeformável).....	40

Figura 25 - Tampa do pack de baterias (estrutura indeformável).....	41
Figura 26 - Vista isométrica da tampa e chassis inferior da estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão (estrutura indeformável).....	41
Figura 27 – Vista de topo do Pack de baterias e os seus componentes interno .....	42
Figura 28 - Vista isométrica do pack de bateria e os seus componentes internos .....	43
Figura 29 - Vista de topo do painel estrutural de suporte ao <i>honeycomb</i> do pack de baterias (estrutura deformável).....	44
Figura 30 - Vista em corte do ponto de fixação da estrutura de <i>honeycomb</i> ao painel estrutural. ....	44
Figura 31 - Vista isométrica do painel estrutural de suporte ao <i>honeycomb</i> do pack de baterias (estrutura deformável) .....	45
Figura 32 - Vista inferior da estrutura deformável do pack de baterias .....	46
Figura 33 – Vista em corte das zonas de suporte do <i>honeycomb</i> e vista isométrica da estrutura deformável do pack de baterias.....	47
Figura 34 – Secção de corte “D-D” da vista lateral e vista isométrica do conjunto Painel Estrutural e Chassis Inferior da estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão.....	48
Figura 35 - Vista isométrica em explosão do pack de baterias com a estrutura deformável e indeformável e os seus componentes internos.....	49
Figura 36 - Modelação da geometria "real" e apresentação da geometria “equivalente”.....	52
Figura 37 – Curva de compressão típica de <i>honeycomb</i> de alumínio (Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	53
Figura 38 - Visualização da malha de elementos finitos do modelo “real” e modelo “equivalente” .....	55
Figura 39 - Força de compressão na direção "T" - <i>honeycomb</i> alumínio 3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	57
Figura 40 - Força de compressão na direção "W" - <i>honeycomb</i> alumínio 3003 (adaptado de (Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	57
Figura 41 - Força de compressão na direção "L" - <i>honeycomb</i> Alumínio 3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	58
Figura 42 - Resistência ao corte na direção “T-W” - <i>honeycomb</i> de alumínio 3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	59
Figura 43 - Resistência ao corte na direção “W-L” - <i>honeycomb</i> de alumínio 3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	59
Figura 44 - Resistência ao corte na direção “L-T” - <i>honeycomb</i> de alumínio 3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	60
Figura 45 - Gráfico Força em função do tempo dos modelos Honeycomb real (MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY) e equivalente (MAT_MODIFIED_HONEYCOMB) e o erro relativo entre curvas.....	61
Figura 46 - Posição generalizada do pack de baterias desenvolvido no BMW i3 (adaptado de Yallamotor, s.d & BMW, s.d.).....	63

Figura 47 - Deslocamento de um nó do material <i>honeycomb</i> na simulação para o modelo de material MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY .....	65
Figura 48 - Malha de elementos finitos para a simulação de impacto lateral no LS_DYNA .....	66
Figura 49 - Malha de elementos finitos para a simulação de impacto inferior .....	67
Figura 50 - Curva tensão-deformação do alumínio 5052 (Park et. al, 2019).....	69
Figura 51 - Deformação da estrutura de <i>honeycomb</i> [mm] em função do tempo de simulação [ms] (impacto Lateral) .....	72
Figura 52 – Representação ilustrativa do Deslocamento máximo [mm] da estrutura de <i>honeycomb</i> , (impacto lateral) no LS_DYNA.....	72
Figura 53 - Deslocamento do chassis inferior [mm] em função do tempo [ms] (impacto lateral). .....	73
Figura 54 – Representação ilustrativa do deslocamento absoluto [mm] do chassis inferior, (impacto lateral) no LS_DYNA.....	74
Figura 55 - Folga entre a parede interna do chassis inferior e os módulos da bateria de alta tensão (Tracejado a vermelho).....	74
Figura 56 - Deslocamento Total do chassis inferior [mm] em função do tempo da simulação [ms], (impacto lateral).....	75
Figura 57 – Energia Interna [J] em função da deformação [mm] do honeycomb, (impacto lateral). .....	76
Figura 58 – Energia Interna [J] em função da deformação [mm] do chassis inferior, (impacto lateral). .....	77
Figura 59 – Energia interna [J] em função do tempo [ms] do honeycomb e chassis inferior (impacto Lateral). .....	78
Figura 60 – Energia cinética [J] do punção em função do tempo [ms] (impacto lateral). .....	79
Figura 61 - Força Resultante [kN] em função do tempo de simulação [ms], nos nós do constrangimento (SPC) (impacto Lateral). .....	80
Figura 62 - Deformação da estrutura de <i>Honeycomb</i> [mm] em função do tempo de simulação [ms] (impacto inferior).....	82
Figura 63 – Representação ilustrativa do deslocamento máximo [mm] das estruturas de <i>honeycomb</i> (impacto inferior), no LS_DYNA.....	82
Figura 64 - Deformação do chassis inferior [mm] em função do tempo de simulação [ms] (impacto inferior). .....	83
Figura 65 – Representação ilustrativa do deslocamento máximo [mm] no chassis inferior (impacto inferior) no LS_DYNA.....	84
Figura 66 – Espaço vazio (Tracejado vermelho) em vista de corte do sistema híbrido de armazenamento da bateria de alta tensão. ....	85
Figura 67 – Energia Interna [J] em função da deformação [mm] do honeycomb (impacto inferior).....	86
Figura 68 - Energia Interna [J] em função da deformação [mm] do chassis inferior (impacto inferior).....	86
Figura 69 – Energia interna do honeycomb e chassis inferior [J] em função do tempo de simulação [ms] no impacto inferior .....	87

Figura 70 - Diferença entre áreas de impacto das simulações de impacto inferior e lateral.....	88
Figura 71 - Zonas de propagação das forças de impacto e áreas de impacto para a simulação de impacto lateral e inferior.....	88
Figura 72 - Energia Cinética do punção [J] em função do tempo de simulação [ms] para a simulação de impacto inferior.....	90
Figura 73 - Força resistiva [kN] em função do tempo em [ms] para a simulação de impacto inferior.....	91

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Benchmarking de materiais utilizados na estrutura de armazenamento de baterias de alta tensão em veículos elétricos (adaptado de Battery Design, s.d.) .....	12
Tabela 2 - Parâmetros de teste da norma SAE J2464:2009 (adaptado de Kotak et. al, 2011) .....	17
Tabela 3 - Parâmetros de teste da norma ISO 12405-3:2014 (adaptado de Kotak et. al, 2011) .....	18
Tabela 4 - Parâmetros da Norma FreedomCAR:2006 (adaptado de H. Doughty & C. Crafts, 2006) .....	19
Tabela 5 - Parâmetros da regulamentação UN/ECE-R100.02:2013 (adaptado de United Nations, 2013) .....	19
Tabela 6 - Propriedades da fibra de carbono T300 e resina Epóxi SR1500 (Fonseca, 2018) .....	33
Tabela 7 - Propriedades das camadas direcionais do laminado de fibra de carbono e matriz de epóxi .....	35
Tabela 8 - Propriedades do laminado completo de fibra de carbono com matriz de epóxi .....	36
Tabela 9 - Propriedades do <i>honeycomb</i> de alumínio 3003 da empresa "Cellbond" (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	38
Tabela 10 - Características da parafusaria utilizada na estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão	50
Tabela 11 - Propriedades gerais do Alumínio 3003 (MatWeb, s.d.) .....	55
Tabela 12 - Propriedades Gerais do <i>Honeycomb</i> de Alumínio 3003 (AL-HC-3003) (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	56
Tabela 13 - Modulo de elasticidade do <i>honeycomb</i> de alumínio AL-HC-3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	58
Tabela 14 - Modulo de elasticidade de <i>honeycomb</i> de alumínio AL-HC-3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007) .....	60
Tabela 15 - Vetor direcionais do material .....	60
Tabela 16 - Propriedades gerais MAT_020_RIGID .....	68
Tabela 17 – Propriedades Gerais do laminado completo de fibra de carbono e matriz de epóxi para o modelo MAT_059_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL .....	68
Tabela 18 - Propriedades do alumínio 5052 para o modelo MAT_024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (MatWeb, s.d.) .....	69
Tabela 19 - Análise quantitativa do impacto lateral e inferior para as velocidades de impacto estudadas no momento de imobilização do punção. ....	92

# Lista de siglas e acrónimos

AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymer
AL	Alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
BFRP	Basalt Fiber Reinforced Polymer
BMS	Battery Management System
BMW	Bayerische Motoren Werke
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
ECE	Economic Commission for Europe
EPP	Expanded Polypropylene
FSAE	Formula Society of Automotive Engineers
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
HC	Honeycomb
HVIL	High Voltage Interlock Loop
ISO	International Organization for Standardization
LSTC	Livermore Software Technology Corporation
NCAP	New Car Assessment Program
RTM	Resin Transfer Molding
SAE	Society of Automotive Engineers
SOC	State of Charge
UN	United Nations
UNY	Universidade de Nova York

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

A utilização de veículos elétricos tem vindo a aumentar substancialmente nos últimos anos. Estes veículos para além de terem de cumprir os mesmos requisitos de segurança estrutural e dinâmica dos veículos de motorizações clássicas, apresentam o desafio adicional de lidar com os requisitos e cuidados necessários para componentes de alta tensão. Entre os componentes de alta tensão do veículo elétrico o que apresenta o maior risco associado é a bateria de alta tensão, o que torna crucial garantir a sua proteção. Atualmente no mercado automóvel, poucos fabricantes disponibilizam a informação necessária para a reparação deste tipo de componentes, e em muitos casos, mesmo em situações de colisões leves a bateria é completamente substituída, levando a uma reciclagem prematura, desperdício de vida útil e um aumento dos prémios das seguradoras. Com estas consequências em mente surge a necessidade de criar uma solução que, em caso de acidente, permita efetuar a intervenção da bateria de alta tensão sem a necessidade de a substituir por completo. Essa solução passa pelo desenvolvimento de um sistema de elevada resistência interna em torno da bateria de alta tensão, que seja capaz de assegurar a proteção total dos componentes internos, e uma estrutura exterior capaz de absorver possíveis impactos, que possa ser substituída. Assim define-se a construção de uma estrutura de alojamento híbrida que combine a resistência mecânica do chassis interno de suporte aos componentes internos da bateria, com a capacidade de absorção de energia da estrutura exterior, conseguindo assim prolongar a vida útil das baterias e reduzir os custos associados a estas, provocados por sinistros.

## 1.2. Objetivos

O objetivo geral do presente estudo é desenvolver uma estrutura de alojamento de baterias de alta tensão numa composição híbrida, cuja estrutura deformável possibilite a sua substituição. Para alcançar este objetivo geral foi necessário alcançar um conjunto de objetivos específicos, dos quais:

- Desenvolvimento de uma estrutura deformável e uma estrutura indeformável, com capacidade de medição de integridade estrutural;
- O seu desenvolvimento deverá considerar a presença dos sistemas de refrigeração das baterias e componentes existentes;
- Elaborar simulações numéricas de impacto, por criação de cenários de ensaios de referência;
- Determinar os limites de energia de impacto capaz de ser suportada pela estrutura híbrida;
- Demonstração do funcionamento por realização de ensaio experimental.

## 1.3. Organização do Relatório

O presente relatório encontra-se dividido por 6 capítulos:

- **Capítulo 1:** Introdução, definição dos objetivos de estudo e organização do relatório.
- **Capítulo 2:** Estado da arte, revisão bibliográfica acerca da tipologia, componentes, materiais e posicionamento de bateria de alta tensão, normas e regulamentações de referência e a sustentabilidade da bateria de alta tensão;
- **Capítulo 3:** Levantamento da problemática e apresentação do conceito de sistema híbrido de armazenamento da bateria de alta tensão que responde a esses problemas;
- **Capítulo 4:** Definição e análise de materiais para a estrutura híbrida, mais especificamente dos principais componentes que enquadram cada uma das estruturas deformável e indeformável e modelação em “*Solidworks*” do sistema híbrido com a sua devida integração;
- **Capítulo 5:** Análise numérica com implementação de simulações em “*LS\_DYNA*” para o estudo do comportamento de alguns materiais; implementação das simulações da estrutura híbrida completa, conforme normalização de referência;
- **Capítulo 6:** Análise de resultados das simulações da estrutura híbrida; Levantamento de limitações do estudo e da análise realizada.

## 2. Estado da Arte

### 2.1. Componentes, tipologia e posicionamento da bateria de alta tensão em veículos elétricos

Atualmente, no mercado automóvel, existem milhares de modelos de veículos elétricos de diferentes construtores, o que faz com que existam pequenas diferenças entre os sistemas de armazenamento de alta tensão, variando a marca do veículo e o seu tipo de utilização. Por outro lado, os principais componentes e a sua integração permanecem bastante semelhantes nas diferentes gamas.

A bateria de alta tensão é o componente principal num sistema de alta tensão. Esta é responsável por fornecer a energia necessária aos motores elétricos para que o veículo se movimente. Nos Subcapítulos seguintes, serão explorados os diferentes tipos de bateria, os componentes que tipicamente integram este sistema e o seu posicionamento físico no interior do veículo.

#### 2.1.1. Componentes típicos

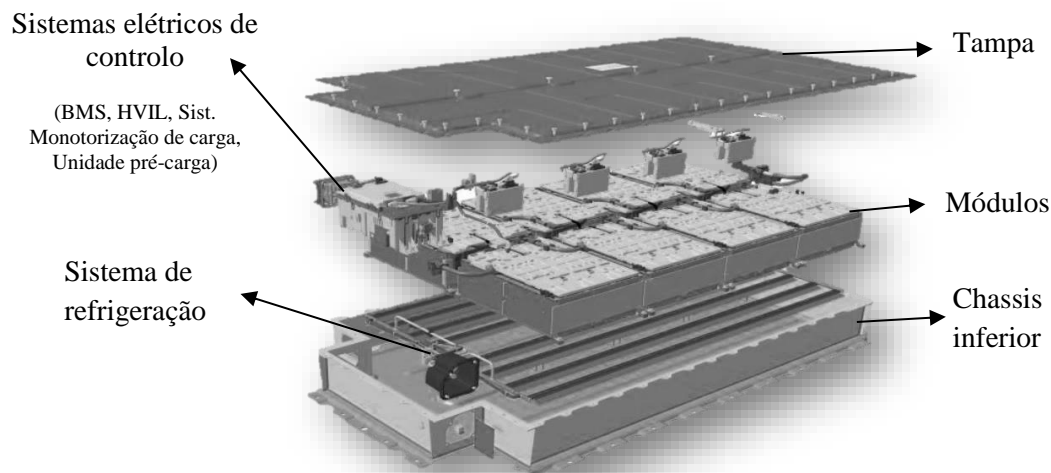
Neste subcapítulo, são descritos os tipos de componentes elétricos e estruturais que integram um sistema comum de baterias de alta tensão, assim como uma breve descrição das suas funcionalidades. Por questões de simplificação, a listagem e informação disponível acerca destes componentes, foi obtida com base numa bateria de alta tensão de veículo, modelo i3, da BMW.

- **Células:** A célula é o componente mais básico da bateria. Tipicamente, este dispositivo eletroquímico está envolvido numa estrutura de metal. Trata-se de uma unidade que armazena e liberta energia elétrica, através da conversão de energia química em energia elétrica por meio de reações químicas. O núcleo da bateria é geralmente composto por um eletrodo positivo, um eletrodo negativo, um separador e um eletrólito (Gerald, 2024);
- **Módulos:** O módulo de bateria é uma unidade constituída por várias células, utilizado para fornecer alta tensão. Para além das várias células, o módulo também é constituído por conectores, um sistema de gestão da bateria (BMS) e o seu invólucro (Gerald, 2024);
- **Sistema de Gestão da Bateria (“BMS”):** O “BMS”, do inglês “*Battery Management System*”, é o componente responsável por monitorizar a tensão, corrente, proteger eletricamente a bateria e estimar o estado da carga nas células (“*SoC*” “*State of Charge*”), promovendo assim um desempenho seguro e otimizado para a bateria. Este

também é capaz de equilibrar as cargas entre células de modo a otimizar o funcionamento da bateria (Synopsys, s.d.);

- **Sistema de Refrigeração:** O sistema de refrigeração é responsável por controlar a temperatura dos módulos e das células de modo a evitar possíveis sobreaquecimentos, permitindo que a bateria funcione de forma estável e segura. Existem dois principais tipos destes Sistemas: passivo, que utiliza o ar através de ventiladores para o arrefecimento da bateria; e ativo, que utiliza líquido de refrigeração para o arrefecimento mais eficiente da bateria (Trumony, s.d.);
- **Cablagem e Conectores:** Transportam energia de alta tensão entre os componentes da bateria e os restantes sistemas elétricos do veículo;
- **Chassis da Estrutura de armazenamento da bateria:** Elemento que proporciona a organização estrutural, proteção física e isolamento elétrico a todos os componentes que integram a bateria do veículo;
- **Tampa da Estrutura de armazenamento da bateria:** Componente estrutural responsável por isolar os componentes internos do sistema da bateria de alta tensão e, simultaneamente permitir a sua intervenção caso necessário;
- **HVIL (“High Voltage Interlock Loop”):** O *Interlock* é um circuito de segurança que monitoriza o estado dos conectores de alta tensão em veículos elétricos e híbridos, desconectando automaticamente o conector da sua fonte de alimentação, em caso de uma condição anormal (Guchen Eletronics, 2023).

Quanto à disposição que estes componentes ocupam na bateria do BMW i3, é possível verificar através da Figura 1, que esta bateria de alta tensão é constituída por 8 módulos, sendo que cada um contem 12 células de iões de lítio prismáticas de 60 Amperes ligadas em série, conectados entre si através de um sistema de controlo elétrico. Cada módulo deste modelo, contém um invólucro de alumínio projetado para proteger e dissipar o calor das células, assim como um sistema que monitoriza o seu estado individual (Muenzel, 2011).



**Figura 1 - Vista explodida da Bateria de alta tensão BMW i3 (adaptado de FIA - Federation Internationale de L'Automobile, 2022)**

Em adição aos sistemas obrigatórios para o controlo de bateria (BMS), existe um sistema de refrigeração localizado na parte inferior dos módulos. Este sistema de refrigeração ativo, bombeia um fluido próprio em torno de um circuito de tubos de alumínio, visível na Figura 1 (Muenzel, 2011).

Finalmente, os componentes que englobam este sistema, são montados sobre um chassis de alumínio, com paredes do mesmo material para proteção lateral. Por fim, a estrutura de armazenamento é envolvida por uma tampa de alumínio de modo a proteger e isolar os componentes inseridos no sistema (Muenzel, 2011).

### **2.1.2. Tipologia de baterias de alta tensão**

No atual setor automóvel, existem diferentes tipos de baterias para veículos elétricos e híbridos, apresentando características diferentes que variam com o desempenho do veículo, a autonomia e durabilidade. A principal diferença entre estas baterias é o material utilizado nas células. Segundo o “Guia de intervenção em veículos elétricos e híbridos” (Domingues, 2022) elaborado pelos bombeiros sapadores de Setúbal os tipos de baterias de alta tensão que atualmente se encontram em utilização, pela maioria dos veículos elétricos e híbridos, são os seguintes:

#### **2.1.2.1. Bateria de Chumbo-Ácido**

A utilização de baterias de chumbo-ácido em veículos elétricos e híbridos é bastante comum devido ao baixo custo e facilidade de produção, sendo esta uma tecnologia bem consolidada no setor, embora apresentem uma densidade energética inferior. Este tipo de bateria é frequentemente utilizado em

veículos elétricos pequenos, os quais apresentam algumas desvantagens, designadamente, o seu peso acrescido, a toxicidade provocada pelo chumbo e a carga relativamente lenta (Domingues, 2022).

#### **2.1.2.2. Bateria de Níquel-Cádmio**

As baterias de Níquel-Cádmio, embora apresentem um custo de produção relativamente superior, destacam-se pelo excelente desempenho em baixas temperaturas. Por outro lado, um fator crucial deste tipo de baterias é a sua capacidade de recarga que diminui progressivamente afetando assim, drasticamente, a sua vida útil (Domingues, 2022)

#### **2.1.2.3. Baterias de Níquel**

As baterias de Níquel, são opções mais ecológicas face à bateria descrita no parágrafo anterior, possuindo para sua vantagem, uma maior capacidade energética e um maior número de ciclos de vida. No entanto, necessitam de carregamentos mais lentos e apresentam uma elevada capacidade de deterioração, quando sujeitas a altas temperaturas, altas correntes de descarga e sobrecarga (Domingues, 2022)

#### **2.1.2.4. Baterias de Iões de Lítio**

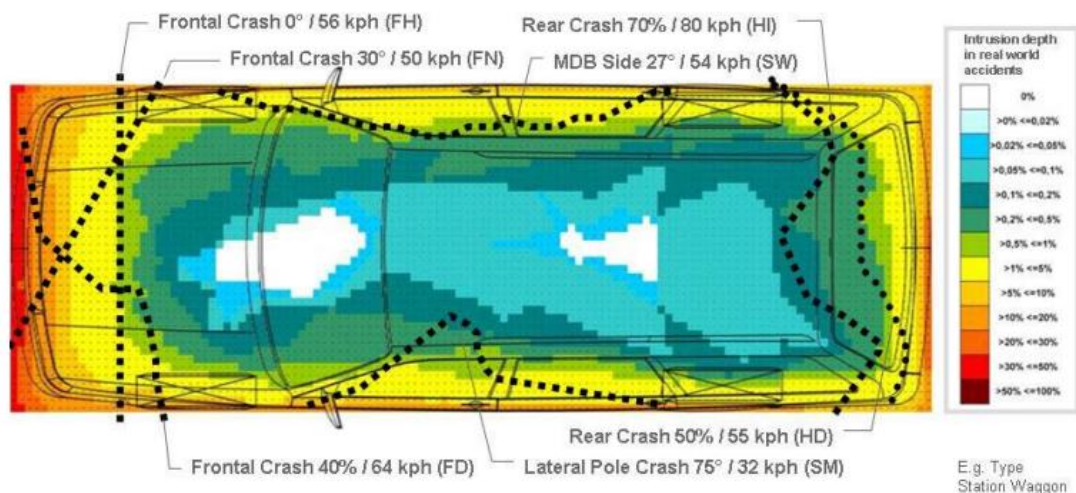
A mais recente tecnologia de armazenamento de energia em veículos elétricos e híbridos do mercado automóvel utiliza células do tipo de iões de lítio. O desenvolvimento de baterias com este tipo de material, permitiu alcançar altas energias específicas, obtendo assim uma maior eficiência e maior número de ciclos, requerendo menos manutenção, podendo oferecer um equilíbrio ideal entre o preço, a eficiência e a capacidade de armazenamento preferenciado pelos construtores. Geralmente, as dimensões destas baterias são inferiores às concorrentes, no entanto também apresentam algumas desvantagens, como por exemplo o elevado custo de produção, que embora tenha vindo a diminuir, ainda é um fator a considerar. Além disso, estes tipos de baterias são mais frágeis e encontram-se suscetíveis de explodir devido a sobreaquecimentos, existindo assim, a necessidade de serem protegidas e devidamente armazenadas. Dentro da gama de baterias de iões de lítio, existem as baterias deste tipo com o cátodo LiFeP04. Este tipo de bateria, não utiliza cobalto e o seu custo de produção é mais alto, apresentando também uma densidade energética inferior, embora apresente um maior ciclo de vida, maior estabilidade e segurança na sua utilização (Domingues, 2022).

### **2.1.3. Posicionamento da bateria de alta tensão no veículo elétrico**

A segurança do veículo elétrico, em acidentes reais, depende crucialmente da proteção eficaz de todos os componentes, em particular a bateria de alta tensão. Segundo Ott et. al (s.d.) um aspeto importante, no que diz respeito à compatibilidade estrutural e geométrica de veículos elétricos, é a

sua integração e proteção dos sistemas de alta tensão em áreas do veículo que não se encontrem sujeitas a danos provocados por acidentes graves. Outro aspeto importante, é o desenvolvimento de zonas de absorção de energia concebidas especificamente para o conceito de proteger estes componentes (Ott, et. al, s.d.).

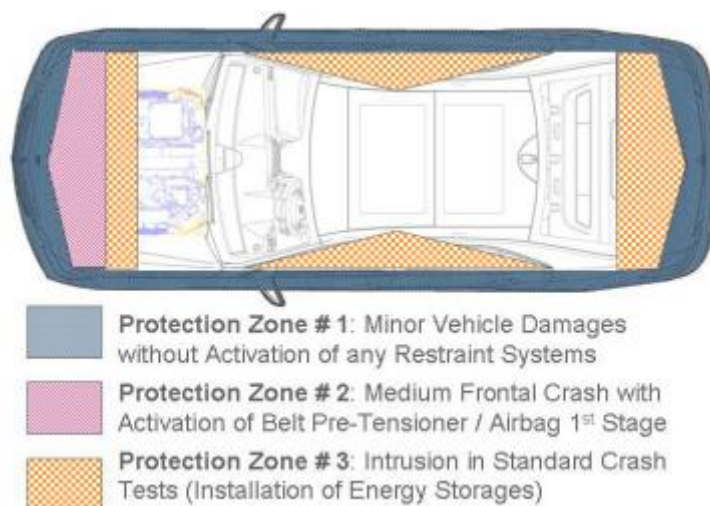
No artigo de Justen & Schöneburg (2011), foram analisados cerca de 9000 veículos de motorizações convencionais em acidentes reais, utilizando dados de um estudo aprofundado de acidentes. O resultado da pesquisa deste artigo resultou na elaboração de uma matriz de deformação que, ao ser consolidada com a frequência e gravidade dos acidentes, permitiu avaliar a probabilidade de deformação de uma bateria em diferentes tipos de colisões, ver Figura 2. Esta abordagem visa a garantir uma melhor integração das unidades de armazenamento de energia, minimizando os riscos associados aos danos em acidente (Justen & Schöneburg, 2011).



**Figura 2 - Padrões de deformação para veículos convencionais (Justen & Schöneburg, 2011)**

Os autores afirmam que a quantidade de dados existentes sobre acidentes com veículos elétricos é bastante reduzida, dado que, os resultados da Figura 2, foram providenciados de situações resultantes de colisões com veículos de motorizações convencionais. Contudo, uma vez que os veículos elétricos circulam no mesmo ambiente rodoviário que os restantes veículos a combustão, os dados apresentados na Figura 2, devem ser considerados relevantes para um estudo que envolva veículos elétricos (Justen & Schöneburg, 2011)

Com base na matriz obtida no gráfico apresentado na Figura 2, foram elaboradas pelo autor três zonas de proteção consideradas críticas: Zona de proteção 1; Zona de proteção 2; e Zona de proteção 3 (Justen & Schöneburg, 2011), ver Figura 3.

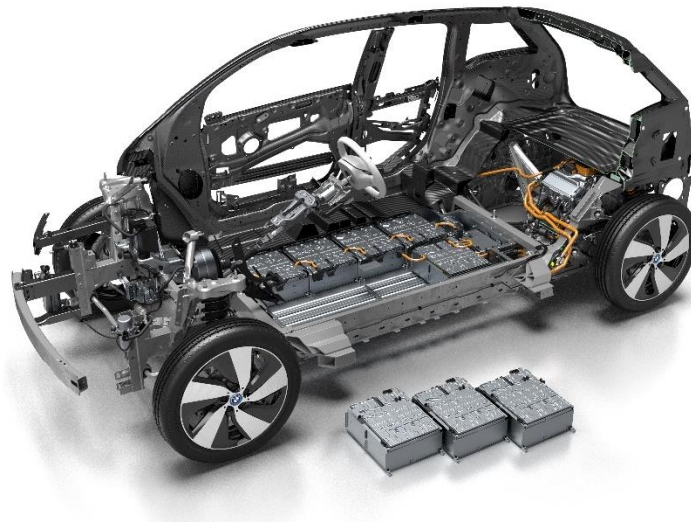


**Figura 3 - Conceito de zonas de proteção de alta tensão (Justen & Schöneburg, 2011)**

A zona de proteção 1, representada a cinzento na Figura 3, é referente à área de deformação externa. Esta área é frequentemente danificada em colisões muito pouco severas, que não requerem ativação dos sistemas de retenção (*airbag*). Esta zona, encontra-se livre de qualquer interferência com componentes de alta tensão. Caso, eventualmente exista a necessidade da colação de um componente desta natureza nesta área, deverá ser devidamente protegido e a cablagem de alta tensão deverá ser adicionalmente revestida. A zona de proteção 2, representada a cor-de-rosa na Figura 3, representa a área onde ocorre a deformação em colisões frontais severas. Esta área é caracterizada pela ativação do pré-tensor do cinto de segurança ou pelo primeiro estágio do sistema de *airbag* e exige uma proteção aprimorada contra colisões. A zona de proteção 3, a laranja na Figura 3, estas áreas são caracterizadas por sofrerem deformações quando o veículo está sujeito a testes de colisões. As restantes zonas, tipicamente, não são danificadas em testes de colisão, com uma probabilidade inferior a 2% nos casos estudados, tornando-as num local ideal para a localização de sistemas de alta tensão (Justen & Schöneburg, 2011).

A eliminação do motor de combustão convencional, permite aos veículos elétricos o desenvolvimento de novas zonas de deformação na frente do veículo, no entanto, a bateria do veículo deverá ser acondicionada em zonas mais rígidas que sejam indeformáveis em caso de colisão. Uma área óbvia, para garantir maior segurança da bateria de alta tensão, será na zona inferior do veículo dentro do habitáculo. Esta zona é ideal, pois encontra-se na célula estrutural de passageiros, que é uma zona do veículo extremamente rígida para a proteção dos seus ocupantes. Esta é constituída por elementos estruturais com rigidez suficiente, como o piso do veículo, painéis e pilares que conseguem garantir a segurança da bateria de alta tensão, quando sujeita à maioria dos impactos causados por acidentes de viação (Justen & Schöneburg, 2011).

Uma ideologia do posicionamento da bateria de alta tensão no veículo elétrico, semelhante à definida por Justen & Schöneburg (2011), terá sido utilizada como base na escolha do posicionamento da bateria de alta tensão pelo fabricante do veículo utilizado como referência no Subcapítulo 2.1.1., como é possível ver na Figura 4:



**Figura 4 - Posicionamento da bateria de alta tensão no BMW i3 (Brunckhorst, 2016)**

## **2.2. Sustentabilidade da bateria de alta tensão**

A sustentabilidade dos veículos elétricos tem gerado algumas preocupações entre os consumidores, especialmente no que diz respeito ao componente no qual este estudo se foca - a bateria de alta tensão. Estas preocupações são consequências do elevado custo de fabrico e pouca facilidade no que toca à sua manutenção.

Durante uma entrevista direcionada ao tema da sustentabilidade destes componentes o diretor de pesquisa da empresa “Thatcham Research” expressou alguma preocupação sobre os veículos elétricos envolvidos em acidentes. De acordo com o descrito na publicação da REMATEC (2024), na maioria dos casos, em que a bateria de alta tensão é danificada, não existe maneira de a reparar.

Nesta publicação, é afirmado que frequentemente os packs de baterias de alta tensão representam metade do valor monetário de um veículo elétrico, tornando a sua substituição, para a maioria dos consumidores, uma opção economicamente inviável. O convidado desta entrevista enfatizou que não se trata apenas de um problema para os consumidores, visto que, em muitos países, as baterias descartadas não são recicladas de forma atempada, podendo apresentar um risco de poluição e incêndios em armazéns (REMATEC, 2024).

Num outro artigo, que aborda o mesmo tema, a agência Reuters, procurou recolher alguns testemunhos de fabricantes automóveis no que diz respeito à possibilidade de reparação de pack de baterias de alta tensão em caso de acidente, e, se existe ou não a disponibilidade de partilha de dados para entidades externas que o pretendam reparar, obtendo os seguintes resultados:

A “Ford Motor Company” afirmou que, em casos que o exterior do veículo fique danificado, foi simplificado o processo de reparação dos módulos da bateria e melhorou-se o processo da substituição da estrutura do respetivo pack (ECO Seguros, 2023).

A “General Motors” afirma que os novos modelos de pack de bateria foram concebidos para serem reparáveis ao nível do módulo, sendo este processo significativamente menos dispendioso do que substituir o pack de baterias completo. Este fabricante afirma que permite o acesso a terceiros aos dados da bateria (ECO Seguros, 2023).

A “Nissan” afirma que os módulos das suas baterias podem ser substituídos e a sua reparação apenas pode ser realizada nos concessionários da marca com formação nestes equipamentos, que dispõem ferramentas especiais necessárias para assegurar a qualidade ou as necessidades de reparação (ECO Seguros, 2023).

A “Renault” indicou que os módulos das suas baterias podem ser reparados em “centros de baterias especialmente designados” e não respondeu à questão sobre a partilha de dados a terceiros (ECO Seguros, 2023).

A “Stellantis” declarou que não repara a bateria de alta tensão após acidentes em que os *airbags* sejam ativados e acrescentou que acredita firmemente na privacidade de dados (ECO Seguros, 2023).

A “Tesla Incorporated” foi na direção oposta com a construção do novo modelo “Y”, cujo novo pack de baterias estrutural foi descrito por especialistas como tendo “capacidade de reparação zero” (ECO Seguros, 2023).

Resumidamente, e dado a vaguidade das respostas, apesar de existir uma tentativa de alguns construtores, em modelos mais recentes, facilitarem o processo de reparação, para a grande maioria dos veículos elétricos em circulação, não existem formas de reparar ou avaliar packs de baterias ligeiramente danificados após acidentes, forçando as companhias de seguros a abater carros mesmo com poucos quilómetros que, por sua consequência, leva a um aumento dos prémios de seguros e uma diminuição do tempo de vida útil da bateria de alta tensão, prejudicando a sua sustentabilidade.

## **2.3. Estruturas de armazenamento de baterias de alta tensão**

Tendo como base a recolha de informação e os objetivos definidos anteriormente, será importante focar o esforço deste estudo no componente responsável por garantir a integridade da bateria de alta tensão: a estrutura de armazenamento.

Este Subcapítulo aborda o estado da arte relativo aos diferentes materiais, os seus respetivos requisitos e como estes se integram na construção da estrutura de armazenamento de baterias de alta tensão. Com o aumento da procura de segurança e o desempenho da bateria de alta tensão, a escolha certa dos materiais para esta estrutura tornou-se um fator crucial no seu desenvolvimento.

### **2.3.1. Requisitos da Estrutura de Armazenamento de Baterias de Alta Tensão**

Segundo o artigo de Afseth (2021), o desenvolvimento da estrutura de armazenamento de baterias de alta tensão para veículos elétricos deve atender a critérios e parâmetros estabelecidos por normas e regulamentações que cobrem aspetos relacionados com a segurança, durabilidade, desempenho e integração. Estes critérios, podem ser categorizados em quatro áreas: “isolamento”; “proteção e durabilidade”; “gestão térmica”; “segurança e integração no veículo” (Afseth, 2021).

Em relação ao isolamento, a estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão deve permanecer totalmente selada, de modo a evitar entrada de água ou detritos provenientes do exterior, ser resistente à corrosão e proteger a mesma contra possíveis interferências eletromagnéticas ao longo de toda a sua vida útil (Afseth, 2021).

A gestão térmica é o critério que garante que a bateria opere na sua temperatura ideal de funcionamento, prevenindo possíveis fugas térmicas que, por consequência, diminuem a vida útil do sistema (Afseth, 2021).

Quanto ao fator de segurança e integração, este deverá ser capaz de proteger os componentes internos contra possíveis colisões ou impactos, evitando a ocorrência de curto-circuitos (Afseth, 2021). Por outro lado, não foram encontrados valores mínimos quantitativos de força de impacto que deverão ser suportados, ou a rigidez mínima necessária que a estrutura de armazenamento da bateria deverá ter para garantir a sua proteção em situação de colisão. Para além disto, a estrutura de armazenamento deverá contribuir para a rigidez torsional do veículo, acomodar diferentes tamanhos de baterias, respeitar os limites de espaço e minimizar o peso dentro das metas de custo, mantendo sempre a máxima eficiência possível (Afseth, 2021).

Consequentemente, a escolha de materiais para a construção da estrutura de armazenamento da bateria deverá ter em conta o conjunto de fatores anteriormente mencionados. As propriedades

mecânicas do material selecionado, em situações de impacto, deverão proporcionar rigidez estrutural suficiente para proteger os componentes da bateria de alta tensão, resistir a altas temperaturas e absorver vibrações externas, tentando, simultaneamente, evitar excesso de peso. Adicionalmente, este material deve também garantir a proteção e isolamento do pack contra possíveis descargas elétricas de alta tensão. Assim como, a necessidade de isolamento e a condutividade térmica são parâmetros essenciais para garantir a proteção da bateria de alta tensão, contra o meio ambiente e manter a temperatura ideal de funcionamento no interior da mesma.

### 2.3.2. Materiais utilizados na estrutura de armazenamento de baterias de alta tensão

Com base numa análise comparativa de alguns veículos elétricos atualmente disponíveis no mercado automóvel, foi realizado um *benchmarking* dos diferentes tipos de materiais que constituem a estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão, conforme detalhado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Materiais utilizados na estrutura de armazenamento de baterias de alta tensão em veículos elétricos (adaptado de Battery Design, s.d.)**

Modelo	Materiais
Tesla Model 3	Alumínio
BMW i3	Alumínio
Jaguar I Pace	Alumínio
Audi e-tron	Alumínio
Chevrolet Bolt EV	Aço
2019 Hyundai Kawai	Alumínio + EPP para proteção interna
2019 Ford Mach-E	SMC (Sheet Moulding Compound) + Alumínio
BMW iX3	Alumínio
Nissan Ariya	Alumínio
VW ID 4	Alumínio + Reforços interiores de Alumínio
Formula E 2014-18	Fibra de Carbono
Nissan Leaf	Aço prensado

Através da análise da Tabela 1, verifica-se que o material mais relevante para a construção destes tipos de estruturas é o alumínio, seguido por alguns tipos de aço, materiais compósitos, como fibra de carbono e polímeros reforçados.

A preferência pelo alumínio entre os fabricantes automóveis, pode ser atribuída às suas combinações únicas de capacidade de resistência, durabilidade, reciclabilidade, leveza e capacidade de dissipação de calor. Comparando com alguns tipos de aço, o alumínio é um material significativamente mais

leve, possui uma boa condutividade térmica, resistência à corrosão e apresenta um custo de fabrico relativamente inferior aos restantes materiais apresentados o que, diminui o custo de produção e melhora em simultâneo o desempenho dos veículos que integram componentes com este tipo de material.

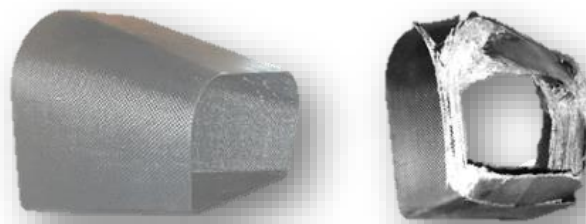
Os materiais compósitos, como a fibra de carbono, oferecem elevada rigidez e alta resistência mecânica, mas apresentam um custo e complexidade de fabricação significativamente superior ao alumínio, assim como a sua reciclagem é bastante mais complexa. Quanto aos polímeros de alta resistência, estes são materiais leves e altamente resistentes à corrosão, mas apresentam desvantagens na sua resistência mecânica e térmica. Geralmente, estes materiais são implementados em conjunto com outros para melhorar a resistência da estrutura de armazenamento de bateria.

O Aço embora seja um material altamente resistente e com um custo de fabrico relativamente baixo, são geralmente mais pesados, mais suscetíveis à corrosão e apresentam uma menor condutividade térmica, em comparação aos restantes materiais apresentados na Tabela 1.

## 2.4. Estruturas e materiais atenuadoras de impacto

### 2.4.1. Estrutura de material compósito

O uso de materiais compósitos no setor automóvel tem vindo a aumentar devido às suas vantagens de peso leve, resistência elevada, resistência à corrosão e fácil fabrico. Mais especificamente o uso de polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) para aplicações estruturais com a finalidade de absorver o impacto em situações de colisão (Boria & Belingardi, s.d.).

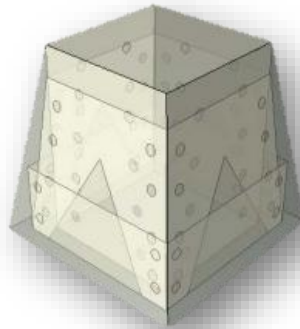


**Figura 5 - Atenuador de impacto antes e depois do impacto (Boria & Belingardi, s.d.)**

O atenuador de impacto de forma quadrada, apresentado na Figura 5, desenvolvido com este material, foi implementado num veículo de competição *Formula Student*, sendo este posicionado na parte frontal do veículo e dimensionado com as respetivas normas e regulamentações da prova.

### 2.4.2. Estrutura de alumínio

Num estudo que procura desenvolver uma estrutura de absorção de impacto para um veículo *Formula Student*, a equipa “Garuda UNY” implementou o uso de chapas de alumínio de cerca de 1 mm para a produção da peça, estudando o seu efeito com a alteração do design estrutural. As especificações técnicas deste elemento foram implementadas conforme o regulamento da prova (Arifin & Gunawan, 2019).

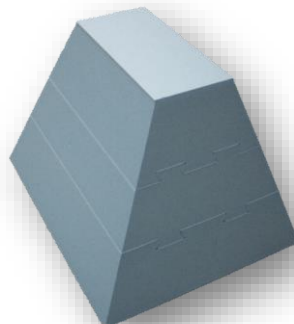


**Figura 6 - Atenuador de impacto *Formula Student* IA FG17 (Arifin & Gunawan, 2019)**

Para simular a testagem deste sistema, a equipa utilizou o software de análise de elementos finitos “Abaqus”. Os resultados da simulação de teste de impacto, demonstraram a capacidade deste tipo de design, tendo conseguido absorver 7722.25 J de energia, uma desaceleração de cerca de 28.212 G’s, respeitando assim os valores mínimos regulamentados pela prova (Arifin & Gunawan, 2019).

### 2.4.3. Estrutura de espuma

Com a finalidade de absorção de impacto, foi possível encontrar um fabricante que vende estruturas de espuma para a aplicação em veículos *Formula Student*, semelhante às estruturas apresentadas anteriormente. A “*Formula Seven*” desenvolveu um atenuador de impacto universal para aplicação neste tipo de veículos, com a utilização de “*Dow Impaxx® 700 foam*”, pesando apenas 700 gramas (Formula Seven, 2024).

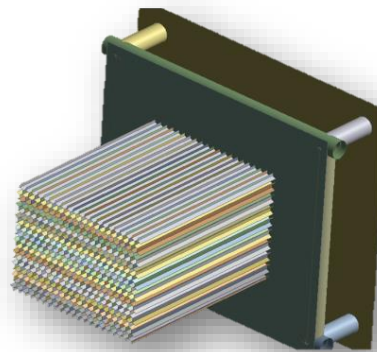


**Figura 7 - Atenuador de impacto FSAE da “*Formula Seven*” (Formula Seven, 2024)**

Apesar do peso mínimo, este atenuador de impacto encontra-se conforme os regulamentos de prova (Formula Seven, 2024), salientando a potencialidade deste material, em termos de leveza e capacidade de absorção de energia em caso de colisão.

#### **2.4.4. Estrutura de *honeycomb* de alumínio**

A abordagem para o atenuador de impacto do veículo da universidade de Ostrava, na República Checa, foi utilizar uma estrutura com uso a *honeycomb* de alumínio. Segundo os autores, a estrutura do tipo *honeycomb* apresenta diversas vantagens face a alguns materiais presentes no mercado para este tipo de aplicações, tais como: leveza; uma relação força-peso relativamente alta; e uma boa capacidade de absorção de energia. As propriedades do material foram obtidas através do fornecedor típico para estes atenuadores de impacto, a “Plascore” (Ma Quoc, et al., 2020).



**Figura 8 - Modelo de simulação do atenuador de impacto de *honeycomb* de alumínio (Ma Quoc, et al., 2020)**

#### **2.4.5. Estrutura de Polipropileno Expandido**

As Estruturas de Polipropileno Expandido (EPP) são tipicamente utilizadas no setor automóvel, devido à sua performance única em benefícios, tais como: elevada capacidade de absorção de energia; leveza; elevada funcionalidade; durabilidade; isolamento térmico; reciclabilidade; e uma excepcional relação força-peso (Knauf Industries, 2019). As aplicações neste setor incluem: bancos; para-choques; painéis de porta; entre outros.



**Figura 9 - Para-choques automóvel de Polipropileno Expandido (Engineered Foam Products, s.d.)**

#### **2.4.6. Espumas metálicas**

Fazendo parte do conjunto de materiais celulares, como o *honeycomb*, a espuma metálica é frequentemente utilizada em aplicações estruturais de alto desempenho. Dentro das vantagens deste material, destacam-se: a sua leveza; uma boa capacidade de resistir a deformações; elevada capacidade de absorção de energia; e um baixo coeficiente de expansão térmica (Inovação Tecnológica, s.d.).



**Figura 10 - Exemplo de Espuma metálica (Foammetal, s.d.)**

#### **2.5.7 Ensaio de impacto e normalização de referência**

Atualmente, todos os fabricantes de veículos elétricos devem assegurar que os seus veículos se encontram em conformidade com parâmetros de segurança mínimos, definidos pelas entidades reguladoras. Estas entidades são responsáveis por desenvolver normas e regulamentações que definem os requisitos técnicos de segurança e qualidade para qualquer tipo de produto ou serviço incorporado no veículo. No contexto da bateria de alta tensão, em veículos elétricos, existem diversas normas desenvolvidas a nível europeu e internacional que caracterizam o seu método de testagem, que garantem esses requisitos. De igual modo, será também relevante entender as normas de teste de

impacto aplicadas ao nível dos veículos elétricos, que poderão afetar o funcionamento da bateria de alta tensão.

### 2.5.1. Ensaio de impacto ao nível da bateria de alta tensão

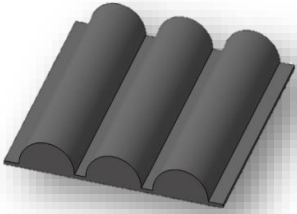
Atualmente, as normas e regulamentações de testes de impacto a baterias de alta tensão encontram-se divididas pela natureza de como o teste é conduzido: elétrico; químico; térmico; e mecânico. Para além disso, podem ser realizados ao nível da: célula; módulo; e estrutura completa, dependendo da respetiva norma ou regulamentação (Kotak et. al, 2011).

Como o objetivo deste estudo procura desenvolver uma estrutura híbrida substituível, que proteja os componentes internos da bateria de alta tensão, faz sentido focar esta recolha de informação apenas nos testes de natureza mecânica que abordam a estrutura exterior do pack de baterias. A recolha desta informação contribui para a metodologia de testagem que será utilizada no desenvolvimento deste sistema híbrido, ajudando, conseqüentemente, a caracterizar o seu comportamento quando sujeito a colisões.

#### 2.5.1.1. SAE J2464:2009

A norma “SAEJ2464:2009”, desenvolvida pela “Sociedade de Engenheiros Automóveis” (SAE), estabelece diretrizes para a realização de testes “Quase-Estáticos” a baterias de alta tensão utilizadas em veículos elétricos e híbridos, focando-se na avaliação de segurança sob condições extremas como colisões mecânicas. Os seus parâmetros são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de teste da norma SAE J2464:2009 (adaptado de Kotak et. al, 2011)

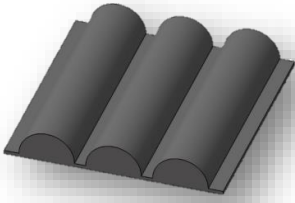
Norma SAE J2464:2009	
<b>Estado de carga da bateria (SoC)</b>	100%
<b>Posição do Punção</b>	“Zona vulnerável do pack de baterias”
<b>Dimensionamento do punção</b>	<p>O diâmetro do semicilindro deverá ser equivalente à menor dimensão do dispositivo de teste, e o número de semicilindros, incluindo o espaçamento entre eles, deve ser suficiente para cobrir toda a área.</p> 
<b>Número de amostras de teste</b>	O teste deverá ser efetuado em pelo menos dois dos três eixos geométricos (X, Y e Z)

<b>Procedimento / critério de falha</b>	Força = $1000 \times \text{Peso do Pack de bateria}$
<b>Velocidade de esmagamento</b>	5-10 mm/min

### 2.5.1.2. ISO 12405-3:2014

A norma “ISO 12405-3:2014” faz parte de um conjunto de normas internacionais que especificam parâmetros de testagem para baterias de íons de lítio implementadas em veículos elétricos e híbridos. Esta norma foca a sua avaliação de segurança no desempenho de baterias em condições operacionais reais.

**Tabela 3 - Parâmetros de teste da norma ISO 12405-3:2014 (adaptado de Kotak et. al, 2011)**

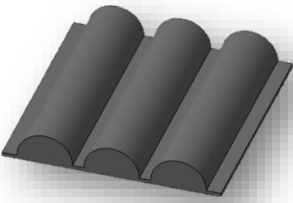
<b>Norma ISO 12405-3:2014</b>	
<b>Estado de carga da bateria (SoC)</b>	$\geq 50\%$
<b>Posição do Punção</b>	A bateria é orientada de forma semelhante à sua posição no veículo, e o eixo do cilindro do punção é disposto verticalmente em relação à bateria. O centro do punção deve estar alinhado perpendicularmente à direção do impacto.
<b>Dimensionamento do punção</b>	O comprimento do semicírculo deve ser maior que a ponta do punção por um mínimo de 50 mm de cada lado. 
<b>Número de amostras de teste</b>	Depende do número de teste de impacto no veículo
<b>Procedimento / critério de falha</b>	$100 \text{ kN} < \text{Força} < 105 \text{ kN}$ (Valor pode ser ajustado conforme valores de força previstos em testes de impacto ao nível do veículo)
<b>Velocidade de esmagamento</b>	Não é mencionado

### 2.5.1.3. FreedomCAR:2006

A norma “FreedomCAR:2006” é uma diretriz técnica desenvolvida para promover a segurança e performance de baterias de veículos elétricos e híbridos. “FreedomCAR” refere-se à iniciativa liderada pelo “Departamento de Energia dos Estados Unidos”, em conjunto com a Equipe Técnica do “United States Advanced Battery Consortium” com o objetivo de realizar testes “Quase-estáticos”

para sistemas de armazenamento de energia elétrica, de forma a obter informações necessárias para identificar, quantificar e relatar tolerâncias e potenciais questões de segurança relacionadas com o design do sistema de armazenamento de baterias elétricas (H. Doughty & C. Crafts, 2006).

**Tabela 4 - Parâmetros da Norma FreedomCAR:2006 (adaptado de H. Doughty & C. Crafts, 2006)**

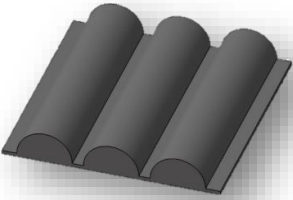
<b>Norma FreedomCAR:2006</b>	
<b>Estado de carga da bateria (SoC)</b>	100%
<b>Posição do Punção</b>	“Zona vulnerável do pack de baterias”
<b>Dimensionamento do punção</b>	<p>Raio do semicilindro deve ser 75 mm com um espaçamento de 30 mm, o comprimento da placa não é mencionado.</p> 
<b>Número de amostras de teste</b>	1
<b>Procedimento / critério de falha</b>	Deformação = 50% da força = 1000 × peso do Pack de baterias
<b>Velocidade de esmagamento</b>	Não é mencionado

#### 2.5.1.4. UN/ECE-R100.02:2013

A “UN/ECE-R100.02:2013” é uma regulamentação das nações unidas que estabelece os requisitos técnicos de segurança para sistemas de baterias e motorização de veículos elétricos e híbridos (United Nations, 2013). Esta regulamentação promove e desenvolve padrões de segurança e sustentabilidade para veículos.

**Tabela 5 - Parâmetros da regulamentação UN/ECE-R100.02:2013 (adaptado de United Nations, 2013)**

<b>Regulamentação UN/ECE-R100.02:2013</b>	
<b>Estado de carga da bateria (SoC)</b>	100%
<b>Posição do Punção</b>	“Zona vulnerável do pack de baterias”

<p><b>Dimensionamento do punção</b></p>	<p>Raio do semicilindro deve ser 75 mm com um espaçamento de 30 mm, o comprimento da placa não deve exceder os 600x600 mm.</p> 
<p><b>Número de amostras de teste</b></p>	<p>1</p>
<p><b>Procedimento / critério de falha</b></p>	<p>100 kN &lt; Força &lt; 105 kN (Pode ser aplicado forças superiores caso seja pedido pelo fabricante)</p>
<p><b>Velocidade de esmagamento</b></p>	<p>Não é mencionado</p>

### 2.5.2. Testes de impacto em veículos elétricos

No âmbito dos testes de impacto a veículos elétricos, a “Euro NCAP” (“Programa Europeu de Avaliação de Novos Automóveis”) é a entidade responsável por avaliar e padronizar o desempenho de segurança de automóveis em cenários de colisão. Esta entidade, desenvolveu um sistema de classificação que auxilia os consumidores a comparar veículos, de forma a identificar qual a escolha mais segura para o tipo de utilização pretendida. Esta classificação é determinada por uma serie de ensaios de testes de colisão que incluem: colisões frontais; laterais; traseiras; e contra postes (Euro NCAP, s.d.).

Considerando o posicionamento típico da estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão, em veículos elétricos, é relevante incorporar neste estudo os testes de impacto ao nível do veículo que afetam as zonas críticas de colisão definidas no Capítulo 2.1.3. Como tal, serão analisados todos os testes que abordam o impacto lateral: como o impacto lateral por barreira; e o impacto lateral por poste.

### 2.5.2.1. Teste de impacto lateral por barreira

Neste teste de impacto lateral, uma barreira móvel deformável, devidamente parametrizada, com cerca de  $950 \pm 20 \text{ kg}$  para simular a massa e rigidez de um veículo que, por sua vez é montada num carrinho e lançada a  $60 \pm 0.5 \text{ km/h}$  contra a lateral do veículo de teste que se encontra estacionado a angulo reto face ao eixo direcional do carrinho deformável (Euro NCAP, s.d.).



Figura 11 - Teste de impacto lateral por barreira (Euro NCAP, s.d.)

### 2.5.2.2. Teste de impacto lateral por poste

Neste teste de impacto lateral por poste, um veículo é posicionado sobre uma plataforma móvel a  $15^\circ$  da sua face perpendicular ao eixo de direção do movimento. Esta plataforma, que suporta o veículo, é lançada na direção de um poste estático parametrizado, com cerca de  $254 \pm 3 \text{ mm}$  de diâmetro. A velocidade da colisão deverá ser  $32 \pm 0.5 \text{ km/h}$  (Euro NCAP, s.d.).



Figura 12 - Teste de impacto lateral por poste (Euro NCAP, s.d.)

## 2.6. Referências bibliográficas pertinentes para o estudo

### 2.6.1. Mitsubishi i-Miev estrutura de absorção de impacto na zona do batente da porta do veículo.

O artigo da autoria de Setiawan & Salim (2017) tem como objetivo de estudo desenvolver um design preliminar de uma estrutura de resistência a impactos de modo a proteger a bateria de alta tensão, no âmbito do desenvolvimento de um carro elétrico indonésio.

Para testar a capacidade de resistência ao impacto da estrutura em estudo, foi determinado qual a zona da bateria de alta tensão mais suscetível a impactos. Visto que a bateria se encontra na parte inferior do habitáculo, foi determinado que as zonas críticas a impactos seriam todas as zonas laterais do pack. De modo a proteger esta zona mais crítica foi utilizado o teste de impacto lateral por um poste, com base na norma definida para este tipo de impacto da Euro NCAP (Setiawan & Salim, 2017).

Para proteger a zona referida anteriormente os autores recorreram a várias alternativas para tentar reduzir a deformação causada pelo impacto nas baterias. A ideia principal focou-se no desenvolvimento de uma estrutura de absorção de impacto na área do batente da porta com diversos tipos de materiais maximizando o espaço disponível. Os autores compararam três tipos diferentes de materiais para preencher o batente da porta: estrutura original do veículo sem elementos de absorção de impactos; estrutura convencional de cilindro oco; estrutura de *honeycomb* de alumínio; e estrutura com espuma de alumínio. Os sistemas, com diferentes soluções, foram comparados em termos de deformação, energia absorvida e a alteração de peso através de uma análise numérica no software LS-DYNA (Setiawan & Salim, 2017).

Com base na definição de “Greve e Fehrenbach” (Greve & Fehrenbach, 2012), que indica que o deslocamento mínimo para provocar uma falha na bateria de alta tensão é aproximadamente 23 mm. Os autores, juntamente com este critério, aplicaram um fator de segurança de 1.5 limitando este deslocamento a 15.3 mm, e definindo assim um novo critério de falha como base de comparação entre materiais de absorção de impacto (Setiawan & Salim, 2017).

<b>Alternatives</b>	<b>Absorbed Energy (kJ)</b>	<b>Maximum Battery Deformation (mm)</b>	<b>Additional Mass (kg)</b>
<b>No impact absorbers</b>	43.1	23.7	0
<b>Hollow pipes (XS)</b>	44.0	19.7	20.0
<b>Al honeycomb</b>	44.2	18.9	2.6
<b>Al foam</b>	46.0	9.4	18.8

**Figura 13 - Sumário de Resultados (Setiawan & Salim, 2017)**

Dos resultados obtidos, os autores afirmam que “para aumentar a resistência a impactos do carro elétrico contra uma colisão lateral em poste, apenas o uso de espuma de alumínio como preenchimento da estrutura do batente da porta proporcionou uma deformação da estrutura da bateria que é aceitável, inferior ao limite estabelecido de 15.3 mm” (Setiawan & Salim, 2017). Com esta informação os autores concluíram que para este modelo de veículo, tendo em conta toda a estrutura envolvente ao pack de baterias, o uso de espuma de alumínio é o material mais seguro para a proteção contra uma colisão lateral de poste. Por outro lado, foi determinado pelos autores que o uso de “uma massa adicional de 18,8 *kg*, será improvável de se implementar num pequeno carro urbano” (Setiawan & Salim, 2017).

## 3. Desenvolvimento do Conceito

### 3.1. Problemas levantados

Ao reunir informações necessárias para compreender o enquadramento teórico, realização do estado da arte e ao identificar os parâmetros essenciais para o desenvolvimento deste novo conceito híbrido para a estrutura de armazenamento de baterias de alta tensão, tornou-se evidente a existência de várias problemáticas, das quais:

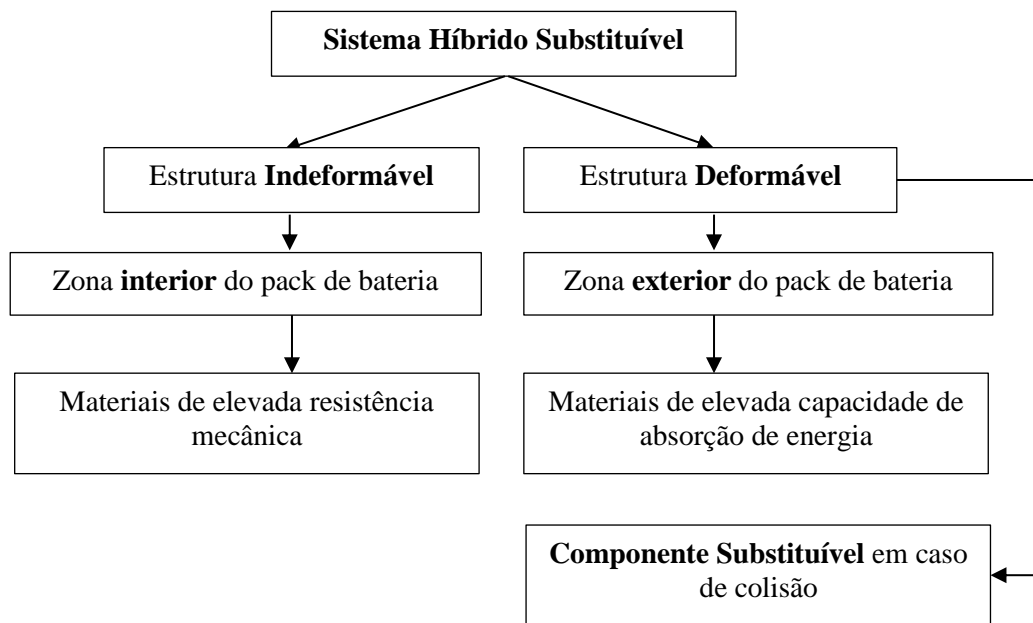
- Em casos de acidentes leves, assim que ocorra deformação da estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão é considerada como um elemento de elevado risco, requerendo a sua substituição.
- O tempo de vida útil da bateria está dependente da ocorrência de colisão.
- A intervenção na substituição da bateria é complexa e de elevado risco.
- A sustentabilidade das baterias de alta tensão não é garantida.
- Normas e regulamentos de testes de impacto a baterias de alta tensão são pouco específicas, baseadas em testes “quase-estáticos”, e bastante repetitivas.

As problemáticas levantadas anteriormente poderão ser, em parte, solucionadas com a implementação do conceito híbrido de estrutura de alojamento de baterias de alta tensão proposto no Capítulo seguinte. Por outro lado, a existência de informação repetitiva e pouco detalhada acerca dos métodos de testagem da estrutura de armazenamento de alta tensão poderão apresentar um obstáculo, podendo ser, eventualmente, necessário a realização da adaptação das mesmas, para o estudo que determinará a capacidade deste sistema de resistir a situações de impacto.

### 3.2. Conceito inicial

Atendendo à problemática, propôs-se criar uma solução que, em caso de acidente ou colisão, permita a intervenção simplificada da bateria de alta tensão, sem que exista a necessidade da sua substituição permanente, conseguindo-se, assim, melhorar a sustentabilidade deste componente evitando o desperdício da sua vida útil.

Essa solução envolve a criação de um sistema híbrido inovador, projetado para ser substituível facilmente em situações de impacto. Este sistema híbrido deverá incorporar dois principais componentes: uma estrutura deformável situada na zona externa do pack; e uma estrutura indeformável situada na zona interior do pack. A estrutura deformável deverá considerar a componente amovível, permitindo a sua substituição em caso de impacto.



**Figura 14 - Proposta de sistema híbrido substituível para armazenamento de baterias de alta tensão**

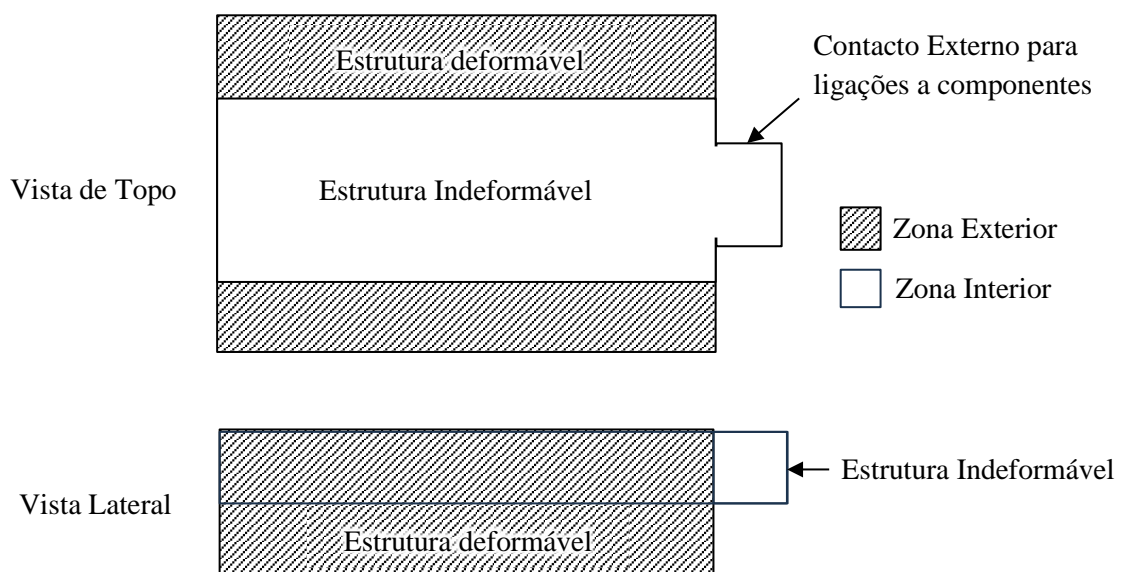
Dois dos fatores cruciais para o dimensionamento deste sistema híbrido é a definição dos principais componentes que as integram e os materiais com os quais estes serão produzidos. Para a estrutura indeformável esse componente é chassis da estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão. O desenvolvimento deste componente terá como referência a geometria de chassis de estrutura de baterias de alta tensão do BMW i3, referenciada no Subcapítulo 2.1.1., sofrendo as alterações no tipo de material escolhido e na estrutura em si, de modo a implementar as adaptações necessárias para a integração do novo sistema híbrido. Este novo chassis, que ocupará a zona interna do pack deverá ser produzido com materiais de elevada resistência mecânica com o intuito de formar uma barreira indeformável que proteja os componentes internos da bateria de alta tensão.

A estrutura deformável, situada no exterior do sistema, será desenvolvida de raiz, com o objetivo de desempenhar a sua finalidade: a absorção de energia em situação de impacto. Com esta informação, é evidente que, um ou mais componentes deste sistema, deverão utilizar materiais de elevada capacidade de absorção de energia, de modo que essa energia gerada pela colisão permita ser absorvida na totalidade por esta estrutura.

Para além disso, a integração da zona exterior, constituída pela estrutura deformável, com a interior, deverá ser elaborada de modo a facilitar a sua substituição em caso de situações de colisão.

Conforme o estudo onde foram definidas as zonas críticas do veículo, que se encontram suscetíveis a colisões, e o posicionamento da bateria de alta tensão seria ideal na zona inferior do habitáculo apresentadas no Subcapítulo 2.1.3. do estado da arte, onde foram determinadas quais as zonas do

sistema híbrido que carecem de proteção. A implementação da estrutura deformável, responsável por proteger as restantes estruturas, deverá ser realizada nas faces laterais da estrutura indeformável, pois estas encontram-se expostas a possíveis colisões na lateral do veículo, cujo, apresentado na Figura 2 do estudo presente no Subcapítulo 2.1.3., a sua intrusão é mais acentuada. Embora não tenha sido referido pelo estudo anteriormente mencionado, achou-se pertinente que a zona inferior da estrutura indeformável também fosse protegida com a estrutura de absorção de impacto, uma vez que, esta zona é das mais suscetíveis a colisões no piso do veículo, devido à sua proximidade ao solo da via pública. Tendo a definição de zonas críticas, desenvolveu-se um primeiro desenho esquemático que define o posicionamento das duas estruturas no sistema híbrido.



**Figura 15 - Esquema da integração da estrutura deformável com a estrutura indeformável**

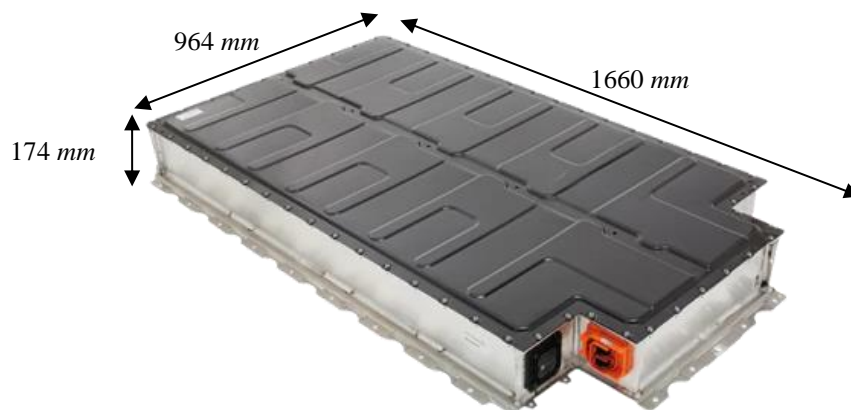
Com o conceito inicial definido, procedeu-se ao desenvolvimento do mesmo. Durante o seu seguimento serão escolhidos os respetivos materiais para as duas estruturas, será realizada a integração destas e serão definidos os respetivos componentes que as constituem, serão aplicadas as adaptações necessárias ao modelo de referência de modo que, no final, seja apresentada a modelação do sistema híbrido que será sujeita a análise da capacidade de resistir a impactos no presente estudo.

## 4. Construção do modelo

Tendo em conta o conceito descrito anteriormente, foi iniciada a construção do modelo, onde foram desenvolvidos os respetivos componentes que constituem o sistema híbrido da estrutura de armazenamento de baterias, assim como a escolha dos materiais utilizados para a sua construção através de um conjunto de critérios que serão apresentados nos Subcapítulos seguintes.

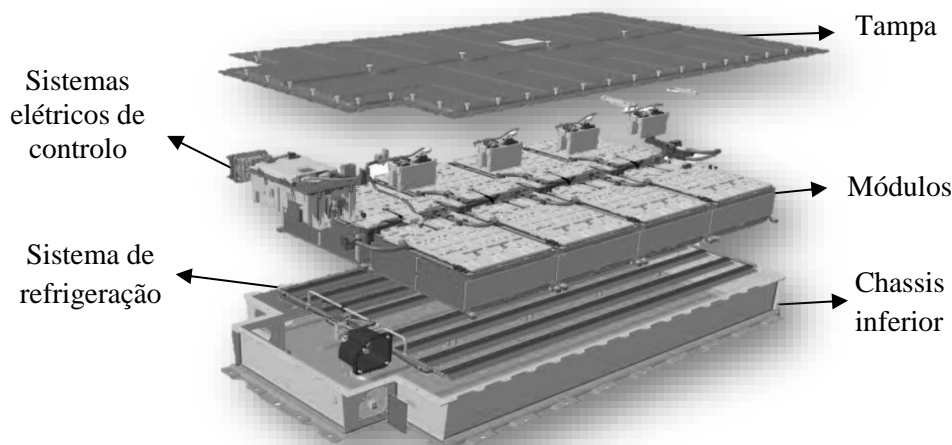
### 4.1. Modelo de referência

Como foi apresentado no Subcapítulo 3.2. Para a implementação deste novo sistema híbrido de armazenamento de baterias de alta tensão, foi utilizado como referência a estrutura de armazenamento que pertence ao BMW i3 de 2013. Este sistema utiliza originalmente uma estrutura, de armazenamento de baterias, constituída por diversas chapas de alumínio soldadas entre si e uma tampa do mesmo material.



**Figura 16 – Estrutura de armazenamento do pack de baterias do BMW i3 2013 (EV Shop, s.d.; Nigel, 2023)**

Para além da geometria exterior da estrutura de armazenamento, foi também tido em consideração o layout original dos componentes que constituem o interior do pack, incluindo o sistema de refrigeração, módulos e componentes elétricos de controlo da bateria. Visto que não existem dados e medidas específicas da posição de cada componente interno, o posicionamento na modelação final dos 8 módulos, sistema de refrigeração e o sistema elétrico de controlo tiveram apenas como base a imagem representada na Figura 17, que demonstra o pack completo e vista explodida segmentada por os diversos componentes.



**Figura 17 - Vista explodida do pack de baterias do BMW i3 (adaptado de FIA - Federation Internationale de L'Automobile, 2022)**

## **4.2. Critérios de seleção dos materiais de construção**

A escolha dos materiais envolveu a definição prévia de alguns critérios de seleção com base na necessidade de cada uma das estruturas. Após a definição destes critérios foi elaborada uma análise comparativa que permitiu escolher qual o melhor material, ou conjuntos de materiais, que melhor enquadram a finalidade da estrutura que integram.

Com base no conceito de sistema híbrido, apresentado no Capítulo anterior, e atendendo às finalidades de cada uma das estruturas, decidiu-se dividir os critérios de seleção dos materiais em duas partes: os critérios de seleção para a estrutura deformável; e os critérios de seleção para a estrutura indeformável.

### **4.2.1. Critérios de seleção para o material da estrutura indeformável**

Esta estrutura fará parte do interior da estrutura de armazenamento e funcionará como plataforma de fixação de todos os componentes que integram o sistema de baterias de alta tensão e, como tal, os critérios associados à escolha do material para a produção desta estrutura deve considerar os requisitos associados à estrutura de armazenamento de baterias de alta tensão descritos no Capítulo 2.3.1. Além destes requisitos, é crucial que o material escolhido possua propriedades que garantam à estrutura a sua indeformabilidade de modo a assegurar a proteção dos componentes internos.

Conforme o descrito anteriormente, para a escolha do material para esta estrutura foram considerados os seguintes critérios:

- **Alta resistência Mecânica** (tensão de cedência elevada): o material deve ser capaz de resistir a deformações plásticas e garantir a sua indeformabilidade em situações de impacto. Um módulo de elasticidade elevado é desejável para garantir esta rigidez;
- **Estabilidade térmica:** o material deverá manter as suas propriedades mecânicas ao longo de uma elevada gama de temperaturas e ter uma elevada condutividade térmica, de modo a facilitar a dissipação de calor do sistema;
- **Resistência à corrosão:** devido à possibilidade de exposição a ambientes agressivos como humidade e químicos, o material deverá ter uma boa capacidade de resistir à corrosão;
- **Peso reduzido:** Embora não seja prioritário, o peso deverá ser considerado de modo a evitar o seu excesso desnecessário.

#### 4.2.2. Critérios de seleção do material para a estrutura deformável

A estrutura deformável, deverá como referido no nome, deformar em caso de impacto de modo a absorver a totalidade da energia gerada e proteger a estrutura indeformável. Como tal, a escolha do material, que irá desempenhar a componente de absorção de impacto, deverá atender aos seguintes critérios:

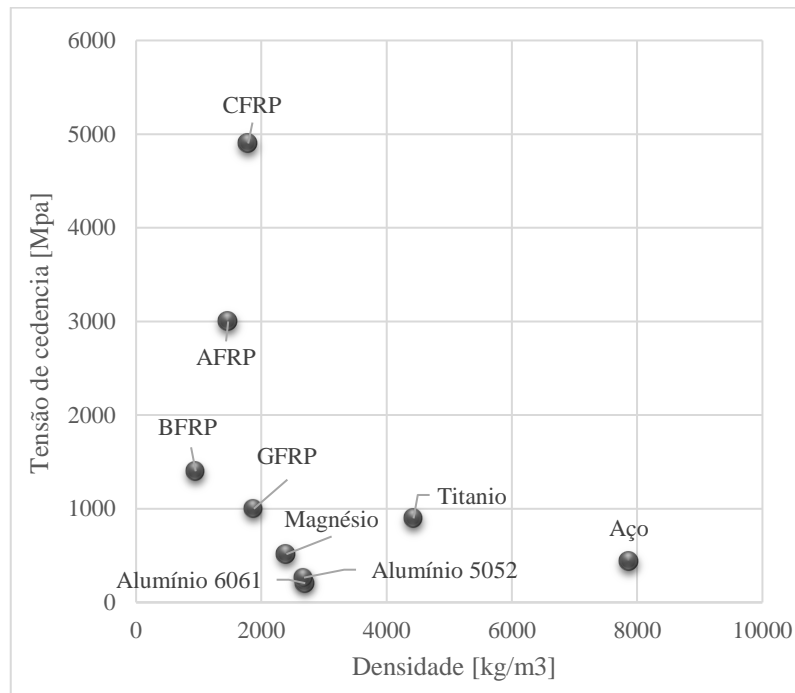
- **Alta capacidade de absorção de energia:** o material deverá deformar-se de forma controlada de forma a dissipar a totalidade da energia durante um impacto. Deve também ser suficientemente dúctil de forma a evitar fraturas e absorver a energia de impacto através da sua deformação;
- **Densidade baixa:** preferível para minimizar o peso do sistema, visto que esta estrutura será acrescida à estrutura de alojamento base;
- **Bom comportamento quando sujeito à compressão:** a absorção de energia em colisões é determinada pelo comportamento do material quando sujeito a testes de compressão.

### **4.3. Seleção do material da estrutura indeformável**

Seguindo a definição dos critérios de seleção para a escolha de materiais da estrutura indeformável, foi analisado um conjunto de materiais que atendem ao perfil desejado, tendo por base a pesquisa realizada no estado da arte e revisão bibliográfica. Dos materiais tipicamente utilizados nas estruturas de armazenamento de baterias destacam-se alguns tipos de alumínio e aço, acrescentando à lista o magnésio e o titânio, que também são materiais que se enquadram na produção de chassis automóveis. Em ambiente de competição é utilizado tipicamente para este tipo de estruturas materiais compósitos, tais como: os polímeros reforçados de fibra de carbono (CFRP); fibra de aramida (AFRP); fibra de basalto (BFRP); e fibra de vidro (GFRP). Para a análise da escolha, entre os materiais apresentados para integrar a componente principal da estrutura indeformável, foram utilizadas propriedades generalizadas de cada um destes, com base em pesquisa.

#### **4.3.1. Análise dos materiais propostos para a estrutura indeformável**

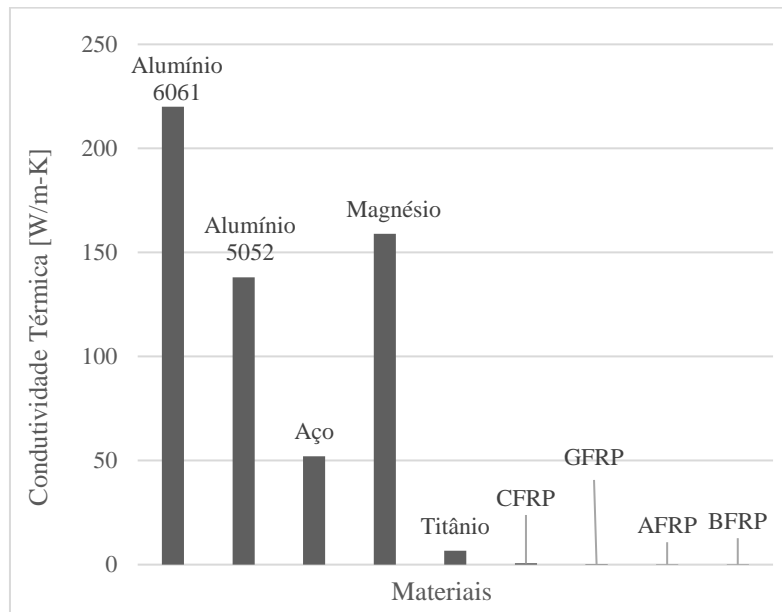
Dois requisitos definidos no Subcapítulo anterior são: a alta resistência mecânica; e peso reduzido. A maneira escolhida para caracterizar a eficiência estrutural que garante estes dois requisitos para os materiais apresentados, foi a utilização de um índice de razão específica com recurso a comparação gráfica. Desta maneira, foi permitido visualizar a relação entre a capacidade destes materiais suportarem tensões antes do ponto de deformação permanente e a massa por unidade de volume.



**Figura 18 - Tensão de cedência VS Densidade de materiais propostos para a estrutura indeformável**

Observando o gráfico da Figura 18, é compreendido que os materiais compósitos apresentam uma relação resistência-densidade superior quando comparados aos materiais ferrosos, destacando-se os compósitos de fibra de carbono, que apresentam uma densidade relativamente baixa, com uma tensão de cedência bastante superior face aos metais e aos restantes materiais do mesmo tipo.

Outro requisito referido em Capítulos anteriores é a utilização de materiais com elevada condutividade térmica que sejam capazes de dissipar o calor gerado no interior da bateria para o exterior. Deste modo, é assegurada a estabilidade térmica para o funcionamento ideal do sistema. Como tal, foi realizada uma avaliação das diferentes condutividades térmicas dos materiais propostos, conforme ilustrado na Figura 19.



**Figura 19 - Condutividade Térmica [W/m – K] dos materiais propostos para a estrutura indeformável**

A análise de dados da Figura 14, revela um comportamento já esperado, que metais como, alumínio, aço e magnésio apresentam uma condutividade térmica superior em comparação aos materiais compósitos.

Em relação à resistência à corrosão, tipicamente materiais ferrosos apresentam uma menor capacidade do que materiais compósitos. No entanto, não é descartável que possam existir impactos negativos provocados pela corrosão em materiais compósitos, devido ao seu tipo de fibra, material utilizado na sua matriz e ao ambiente a que este se encontra sujeito.

Ao custo de uma elevada condutividade térmica, deu-se preferência ao uso de materiais compósitos com uma excelente relação resistência-densidade para integrar o chassi da estrutura de armazenamento da bateria, uma vez que se trata de uma estrutura que efetivamente tem de ser capaz de não se deformar permanentemente e apresentar a melhor capacidade possível de resistir a um impacto a que seja sujeito. A desvantagem da condutividade térmica deste material, poderá ser eventualmente ultrapassada dimensionado um novo sistema de refrigeração que considere esta problemática, no entanto, o dimensionamento de um novo sistema de refrigeração não é considerado relevante para alcançar os objetivos do estudo em causa.

#### **4.3.2. Propriedades do material da estrutura indeformável**

O tipo de CFRP escolhido para o chassi inferior, principal componente da estrutura indeformável, foi um compósito laminado de fibra de carbono T300, com matriz de epóxi SR1500, tipicamente

utilizado para produção de revestimentos exteriores, ou componentes estruturais de veículos de competição.

#### 4.3.2.1. Fração volúmica da fibra

A fração volúmica é um parâmetro que é dependente do processo de fabrico utilizado. Tendo em conta que o processo de fabrico mais indicado para a produção de uma estrutura complexa, com uma geometria com ângulos retos entre faces, e que necessite de um acabamento superficial capaz de respeitar tolerâncias dimensionais para os pontos de fixação dos componentes que pertencem a este sistema, sugeriu-se utilizar o processo de moldagem por transferência de resina (RTM).

Segundo Montoro (2014), após a construção de uma peça de compósito laminado de fibra de carbono com matriz de epóxi, através do processo de fabrico RTM resultou, para a fibra de carbono em questão, uma fração volumétrica de 61.4% (Montoro, 2014).

#### 4.3.2.2. Propriedades gerais

**Tabela 6 - Propriedades da fibra de carbono T300 e resina Epóxi SR1500 (Fonseca, 2018)**

Variável	Unidade	Fibra de Carbono T300	Epóxi SR1500
Módulo de elasticidade	[GPa]	230	3.2
Modulo de corte	[GPa]	92	1.30
Densidade	[Kg/m <sup>3</sup> ]	1760	-
Coefficiente de Poisson	[GPa]	0.25	0.21
Gramagem	[g/m <sup>2</sup> ]	200	-
Fração volúmica	[%]	61.4	38.6
Espessura p/camada	[mm]	0.1851	

A orientação da fibra tem um impacto direto nas propriedades mecânicas do laminado, em termos do tipo de empilhamento, este é possível que as fibras sejam organizadas em diferentes orientações que melhorem a resistência na direção do carregamento (Neto, 2023). Como se trata de uma estrutura com diversas faces planas, uma prática comum é construir o laminado com a orientação [0/90/+45/-45]s (Neto, 2023). Este tipo de orientação, denominada “Quase Isotrópico”, quando aplicada a uma placa, consegue garantir propriedades do laminado quase-iguais no plano bidirecional onde se insere

(Rock West Composites, 2022), um fator importante considerando a geometria esperada para o chassi inferior e as forças de impacto a que este estará sujeito.

Sendo que a espessura de cada camada é  $0.1851 \text{ mm}$ , utilizando uma matriz com 16 camadas, significa que a espessura do componente principal da estrutura indeformável é de  $2.9616 \text{ mm}$ , próximo de  $3 \text{ mm}$ . O tipo de empilhamento do laminado escolhida foi a seguinte:  $[0/90/(+45/-45)_6/90/0]$ .

#### 4.3.2.3. Cálculo das propriedades específicas do laminado

Para determinar as propriedades que caracterizam o laminado descrito anteriormente, com o tipo de empilhamento definido, foi necessário recorrer a um conjunto de fórmulas derivadas do estudo da mecânica de materiais compósitos. Embora a caracterização das propriedades do laminado seja um fator importante na caracterização do material para o componente da estrutura indeformável, foi decidido apenas apresentar as fórmulas na sua forma mais reduzida, evitando assim a dedução das mesmas.

Iniciou-se as apurações destas propriedades através do cálculo das propriedades do laminado no referencial “LT” utilizando a regra das misturas, que indica que uma lamina unidirecional pode ser tratada como material ortotrópico, cujos planos de simetria são paralelos e transversos à direção da fibra. Utilizando esta regra, através da dedução dos estados de tensão-deformação aplicados pela força “F” a uma lamina (Figura 18) é possível obter as propriedades dessa lamina (representadas na matriz da Equação 1) considerando apenas a referência “LT” e que a fibra tem a orientação na direção “L” (Santos, s.d.).

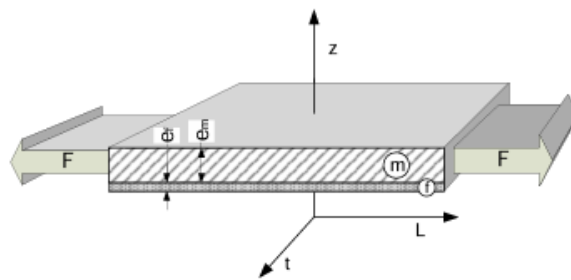


Figura 20 - Lamina com deformação longitudinal (Santos, s.d.)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} = [E_{LT}] \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

As propriedades da matriz " $E_{LT}$ " da Equação 1 são as seguintes: Módulo de Elasticidade Longitudinal (" $E_L$ ") apresentado na Equação 2; Módulo de Elasticidade Transversal (" $E_T$ "), na equação 3, Coeficiente de *Poisson* no referencial "LT" (" $v_{LT}$ "), na Equação 4, Coeficiente de *Poisson* no referencial "TL" (" $v_{TL}$ ") na Equação 5 e o Módulo de corte (" $G_{LT}$ ") na Equação 6:

$$E_L = E_f \times V_f + E_m \times V_m \quad (2)$$

$$E_T = E_m \times \left[ \frac{1}{(1-V_f) + \frac{E_m \times V_f}{E_f}} \right] \quad (3)$$

$$v_{LT} = v_f \times V_f + v_m \times V_m \quad (4)$$

$$v_{TL} = v_{LT} \times \frac{E_T}{E_L} \quad (5)$$

$$G_{LT} = G_m \times \left[ \frac{1}{(1-V_f) + \frac{G_m \times V_f}{G_f}} \right] \quad (6)$$

Obtendo a matriz " $E_{LT}$ " foi calculado a matriz " $E_{xy}$ " que representa as propriedades de cada direção da camada do laminado (: 0°; 90°; +45° e -45°) de acordo com o referencial "XY". A matriz " $E_{xy}$ " é obtida através da multiplicação da matriz de rotação, a sua transposta e a matriz " $E_{LT}$ ", ver Equação 7:

$$[E_{xy}] = [T]^T \times [E_{LT}] \times [T] \quad (7)$$

Onde a matriz de rotação em função do ângulo da direção do laminado é dado por:

$$[T(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta^2 & -2\sin\theta^2\cos\theta^2 \\ \sin\theta^2 & \cos^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & (\cos^2\theta - \sin\theta^2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Obtendo a matriz " $E_{xy}$ " para cada uma das direções foi possível obter as propriedades específicas para cada camada direcional do laminado:

**Tabela 7 - Propriedades das camadas direcionais do laminado de fibra de carbono e matriz de epóxi**

Variável	Unidade	[0°]	[90°]	[+45°]	[-45°]
$E_{\theta x}$	[GPa]	142.4500	8.1103	9.2937	9.2937
$E_{\theta y}$	[GPa]	8.1103	142.4500	9.2937	9.2937
$v_{\theta xy}$	-	0.23447	0.01334	0.4098	0.4098

$\nu_{\theta yx}$	-	0.01334	0.23447	0.4098	0.4098
$G_{\theta xy}$	[GPa]	3.2959	3.2959	7.4850	7.4850

Para determinar as propriedades do laminado completo, foi necessário aplicar o conceito de empilhamento de laminas dado pela matriz de empilhamento " $A_{ij}$ ". Esta matriz é o somatório da multiplicação do número de camadas ("n") pela espessura de cada camada ("e") e a matriz " $E_{xy}$ " de todos os ângulos direcionais, como é visível na Equação 9:

$$[A_{ij}] = \sum n_{(\theta)} \times e_{(\theta)} \times ([E_{\theta xy}])^{-1} \quad (9)$$

Por fim, para determinar a matriz que representa as propriedades do laminado completo de acordo com o referencial "XY", aplica-se a Equação 10, onde "h" é altura completa do laminado, obtendo por fim os resultados da Tabela 8:

$$[E_{xy}]_{Laminado\ completo} = \left[ \frac{1}{h} \times [A_{ij}] \right]^{-1} \quad (10)$$

**Tabela 8 - Propriedades do laminado completo de fibra de carbono com matriz de epóxi**

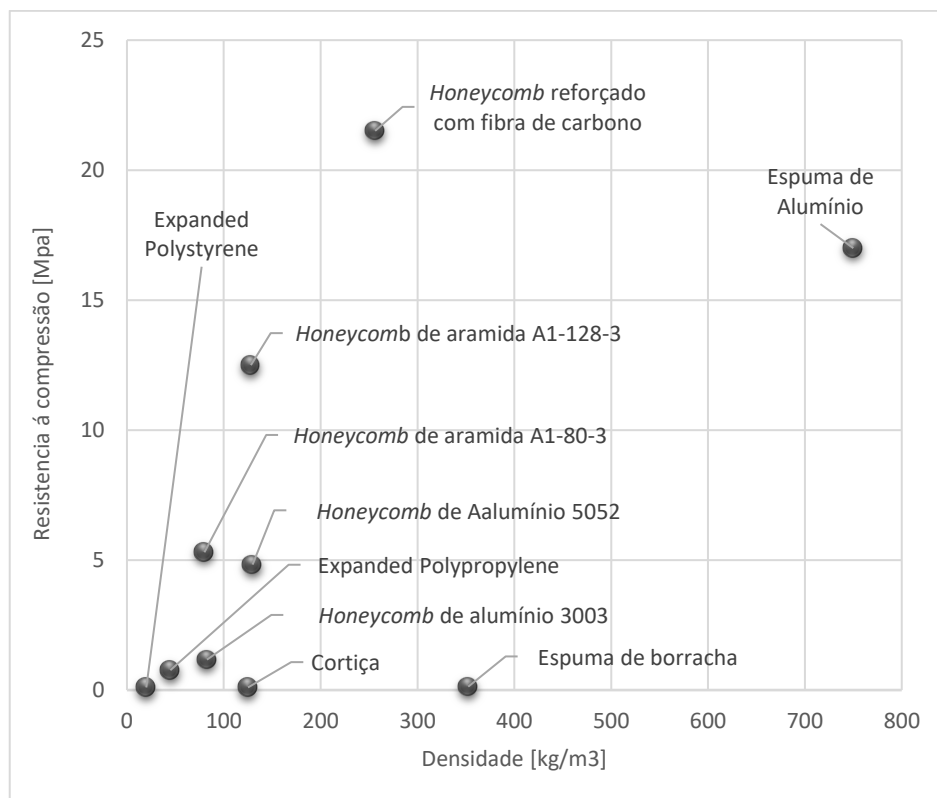
Variável	Unidade	Laminado completo
$E_{\theta x}$	[GPa]	35.8423
$E_{\theta y}$	[GPa]	35.8423
$\nu_{\theta xy}$	-	0.5355
$\nu_{\theta yx}$	-	0.5355
$G_{\theta xy}$	[GPa]	28.2965

#### 4.4. Seleção do material da estrutura deformável

Seguindo a definição dos critérios de seleção para a escolha de materiais da estrutura deformável, foi analisado um conjunto de materiais que potencialmente atendem ao perfil desejado, tendo por base a pesquisa realizada no estado da arte e na revisão bibliográfica. Dos materiais analisados encontram-se materiais celulares (estruturas do tipo *honeycomb*, cortiça), algumas espumas metálicas (Espuma de alumínio), polímeros (*Expanded Polystyrene e Expanded Polypropylene*), e elastômeros (espuma de borracha).

#### 4.4.1. Análise dos materiais propostos para a estrutura deformável

Dois dos critérios definidos no Subcapítulo anterior para a seleção deste material foram: a alta capacidade de absorção de energia; e um bom desempenho quando sujeito à compressão, uma vez que, o material escolhido, desempenhará a função de absorver impactos e dissipar a energia gerada neles. O restante critério decretou que o material deverá ter uma densidade baixa de modo que o peso do sistema não seja influenciado significativamente por este componente. Tendo estes critérios como base de análise, foi decidido realizar uma comparação entre os materiais descritos anteriormente, comparando a sua capacidade de resistir à compressão em função da densidade, ver Figura 21.



**Figura 21 - Resistência à compressão [MPa] em função da densidade de materiais [Kg/m<sup>3</sup>] de para a estrutura deformável**

Da informação presente na Figura 21, é possível concluir que, dos materiais referenciados, as estruturas do tipo *honeycomb* destacam-se na sua capacidade de resistir a cargas de compressão, com especial atenção para as estruturas constituídas de materiais compósitos, como a fibra de vidro e fibra de aramida. Esta comparação salientou uma vez mais as vantagens deste tipo de estrutura celular face a outros tipos de materiais utilizados para o mesmo propósito: leveza devido à sua baixa densidade; uma boa capacidade de absorção de energia, que resultam numa relação força-peso excelente.

Tendo em consideração a vasta quantidade de parâmetros e propriedades físicas e mecânicas necessárias para a modelação do material, bem como a disponibilidade limitada de informação obtida

via pesquisa, do contacto com empresas fornecedoras e referencias bibliográficas, tornou-se bastante desafiante basear a escolha do material apenas na sua capacidade de resistir à compressão e densidade. A decisão definitiva recaiu sobre uma estrutura do tipo *honeycomb* e dentro dos materiais dessa tipologia analisados anteriormente, que apresentou dados suficientes, com recurso a referência bibliográfica, para a modelação adequada do modelo de material no software “LS\_DYNA” foi a estrutura de *honeycomb* de alumínio 3003 (AL-HC-3003) da empresa “Cellbond”, utilizada tipicamente em barreiras deformáveis de impacto em testes de colisão.

#### 4.4.1. Propriedades do material da estrutura deformável

Devido ao constrangimento descrito anteriormente, o material escolhido para ser implementado no componente que funcionará como atenuador de impacto para a estrutura deformável será o *honeycomb* de alumínio 3003 (AL-HC-3003) produzido pela “Cellbond”. As propriedades gerais e geométricas deste material serão apresentadas nos Subcapítulos seguintes.

##### 4.4.1.1. Propriedades gerais

O *honeycomb* de alumínio 3003 (AL-HC-3003) da empresa “Cellbond” apresenta uma espessura de 0.076 mm, um tamanho de célula de 6.4 mm e uma densidade de 8.26e-08 Kg/mm<sup>3</sup> (Hellstrom & Lindblom, 2007). A ficha técnica deste material está presente em Anexo.

**Tabela 9 - Propriedades do *honeycomb* de alumínio 3003 da empresa "Cellbond" (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007)**

Variável	Unidade	<i>Honeycomb</i> Alumínio 3003 “Cellbond” AL-HC-3003
Tamanho da Célula	[mm]	6.4
Espessura	[mm]	0.076
Densidade	[Kg/mm <sup>3</sup> ]	8.260e-08
Módulo de Young	[GPa]	68.949997
Coefficiente de <i>Poisson</i>	-	0.000
Tensão de Escoamento	[GPa]	0.160

##### 4.4.1.2. Direção das células do material *honeycomb*

No que diz respeito às células de *honeycomb*, a direção que garante uma maior rigidez e capacidade de resistir à compressão é a direção ao longo do eixo “T” (Hellstrom & Lindblom, 2007)

(representado na Figura 20), ou seja, perpendicularmente aos planos das faces do *honeycomb*. Como tal, todas as faces das células do *honeycomb* de alumínio encontram-se direcionadas paralelamente à direção do impacto.

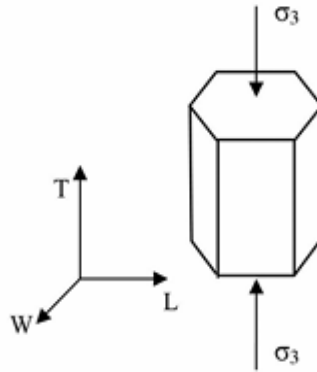


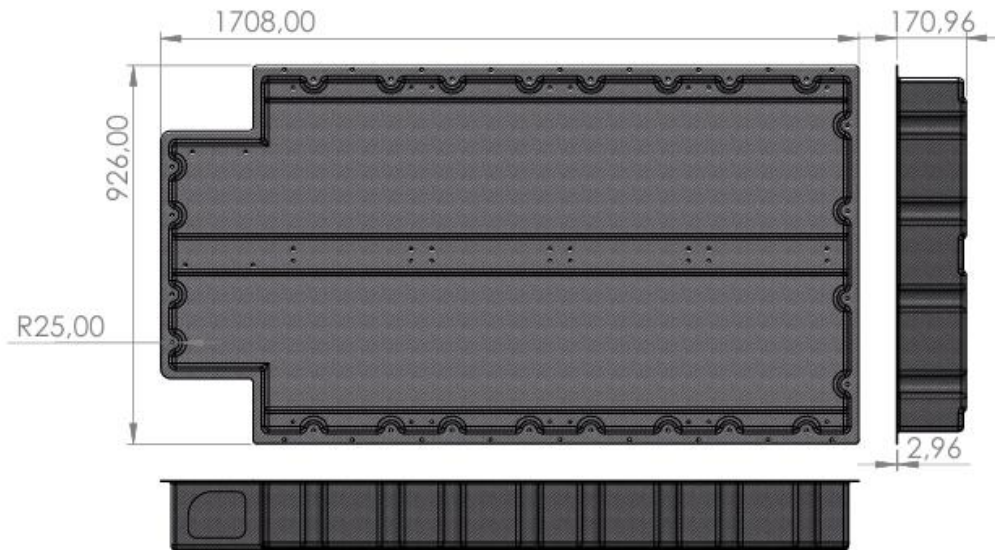
Figura 22 - Direção das células do *honeycomb* de alumínio (Hellstrom & Lindblom, 2007)

## 4.5. Modelação da estrutura indeformável

A estrutura indeformável será constituída por dois componentes principais, o chassis inferior de fibra de carbono, responsável por proteger e organizar estruturalmente todos os componentes internos do sistema e uma tampa de alumínio retirável que, em conjunto, isolam os componentes internos das baterias do ambiente exterior.

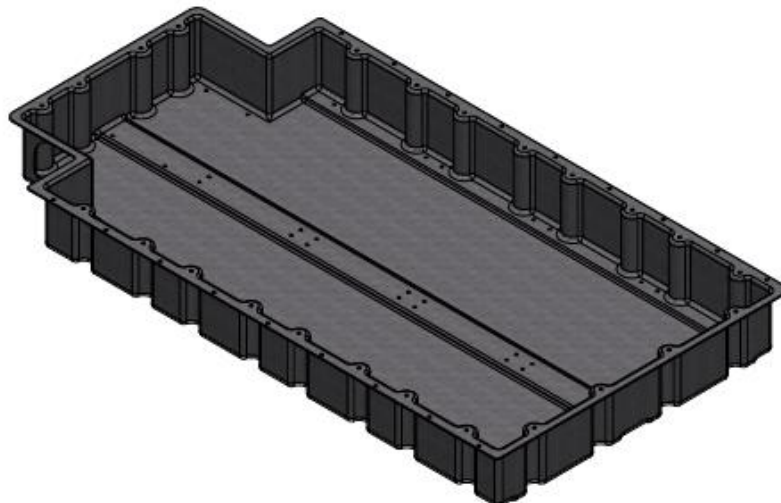
### 4.5.1. Chassis inferior

O novo chassi inferior, produzido de Fibra de Carbono T300, mantém a geometria idêntica ao modelo de referência, com uma zona retangular maior para acolher os módulos da bateria e o sistema de refrigeração e uma zona retangular menor (do lado esquerdo, na Figura 23) para o posicionamento de unidades de controlo elétricas, outros pequenos componentes do sistema e servir de ponto de ligação a componentes exteriores à bateria de alta tensão. O chassi apresenta um comprimento de 1708 mm superior à estrutura de referência (1660 mm), uma largura de 926 mm entre faces laterais inferior à estrutura de referência (964 mm), e uma altura de 170.66 mm. A alteração destas medidas originais generalizadas ocorreu devido à implementação da face de suporte às restantes estruturas no topo do chassi. Este possui uma espessura de 2.9616 mm determinado anteriormente pelo número de camadas do laminado. Nas faces laterais do chassi optou-se pela implementação de semicilindros com 25 mm de raio que ajudam a aumentar a rigidez das faces laterais do componente e providenciam em simultâneo uma localização isolada para os pontos de fixação da tampa.



**Figura 23 – Chassis inferior do pack de baterias (Estrutura Indeformável)**

Os pontos de fixação dos componentes internos, com uso a furos M7 encontram-se visíveis na zona do plano de fundo interior do modelo. Os 24 pontos de fixação, com furos M8, da tampa do sistema encontram-se implementados no interior dos semicilindros das faces laterais, como foi descrito anteriormente. Os furos M8, que se encontram mais próximo das extremidades do componente, são os pontos de fixação para a estrutura deformável. Todos estes furos são visíveis nas Figuras 23 e 24, respetivamente.

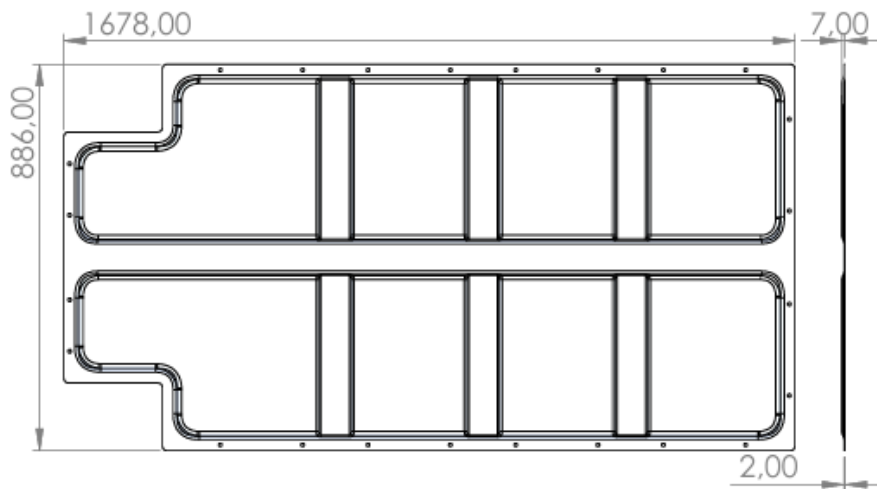


**Figura 24 - Vista Isométrica do chassi inferior do pack de baterias (estrutura indeformável)**

#### **4.5.1. Tampa**

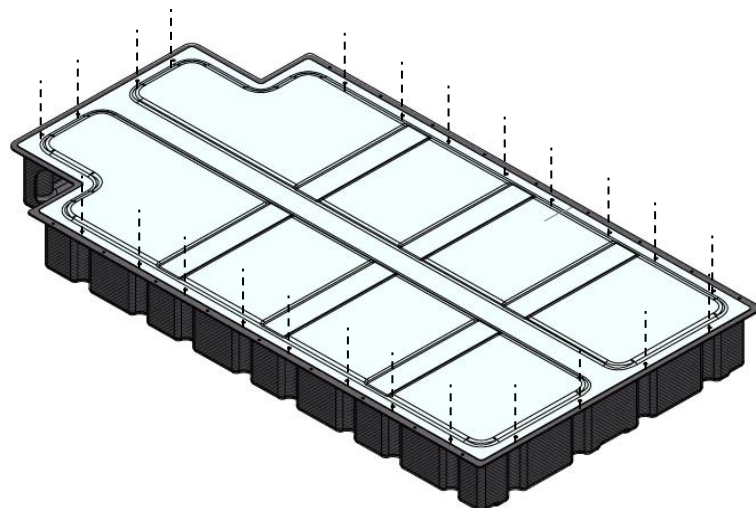
A tampa é o componente responsável por isolar os elementos posicionados no chassi inferior do ambiente externo, cumprindo a função de ser removível quando necessário. Considerando a

geometria da peça e o tipo de material comumente usado para este tipo de componente, decidiu-se que a tampa seria produzida de alumínio.



**Figura 25 - Tampa do pack de baterias (estrutura indeformável)**

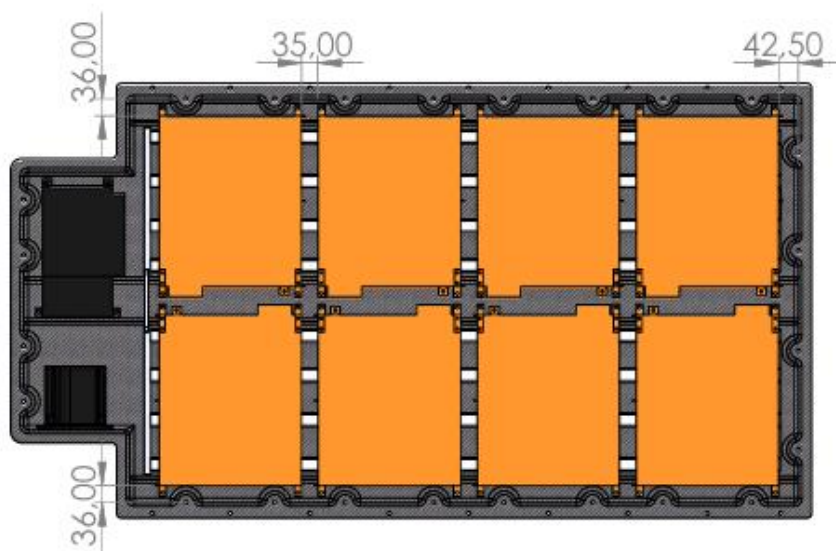
A fixação da tampa ao chassis inferior será realizada através de 24 furos M8 posicionados nas periferias que percorrem a sua silhueta. O tamanho da tampa é de 1678 mm por 886 mm, com 7 mm de altura no seu ponto mais alto e uma espessura de chapa de 2 mm. As saliências presentes no topo da tampa, encontram-se alinhadas com o posicionamento dos módulos de modo a facilitar a implementação de componentes como cabos elétricos circundantes dos módulos.



**Figura 26 - Vista isométrica da tampa e chassis inferior da estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão (estrutura indeformável)**

#### 4.5.2. Disposição dos componentes internos

Os componentes internos foram modelados de forma simplificada, com exceção aos módulos, tentando sempre preservar as suas geometrias originais, estes encontram-se representados na Figura 29 com a seguinte sinalética: Os módulos (a laranja) da autoria de Welling (2019), sistema de refrigeração (a cinzento-claro) e sistema de controlo elétrico e bomba de refrigeração (a preto). A escolha de simplificar a geometria destes componentes foi considerada pois o foco deste trabalho é a implementação da estrutura deformável e indeformável. Estes componentes internos servem apenas de referência para averiguar se a deformação causada na estrutura em impactos afeta ou não o funcionamento da bateria de alta tensão. Esta abordagem permite mais uma vez reduzir a complexidade da simulação do sistema, tentando em simultâneo manter os seus posicionamentos aproximados às disposições originais através da informação disponível.



**Figura 27 – Vista de topo do Pack de baterias e os seus componentes interno**

A maioria dos componentes (módulos e o sistema de controlo elétrico) implementados na modelação são fixos diretamente ao chassis inferior por parafusaria. Os Módulos encontram-se alinhados e distanciados 35 mm entre eles, 36 mm entre as faces lateral mais distante, 11 mm na face lateral mais próxima e 42.50 mm da face mais à direita, como é visível na Figura 27. A fixação dos restantes componentes não foi especificada pelo fabricante do modelo utilizado como referência, pelo que, consideram-se fixos ao chassis inferior por outros meios.

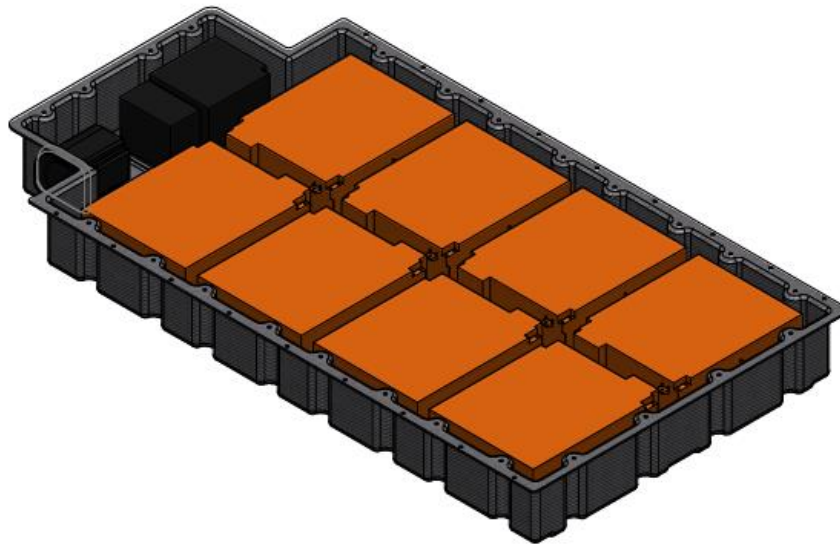


Figura 28 - Vista isométrica do pack de bateria e os seus componentes internos

## 4.6. Modelação da estrutura deformável

A estrutura deformável deverá incorporar o material definido anteriormente para a absorção de impacto: O *honeycomb* de alumínio 3003. Tipicamente este material fica fixo com recurso a chapas lisas do mesmo material. A solução encontrada para implementação destas estruturas de *honeycomb* foi desenvolver um painel estrutural que envolva o chassis inferior de fibra de carbono, onde serão aparafusadas as chapas lisas que suportam o material atenuador de impacto. A modelação deste painel estrutural de suporte teve em consideração as principais zonas críticas sujeitas a impacto: As laterais e zona inferior da estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão. Os componentes que constituem o sistema da estrutura deformável e a sua integração serão apresentados nos subcapítulos seguintes:

### 4.6.1. Painel estrutural de suporte ao *honeycomb*

O painel estrutural será fabricado através de uma chapa de alumínio prensada com cerca de 2 mm de espessura em função da sua geometria complexa. O painel estrutural representado na Figura 29 é responsável por suportar as três estruturas *honeycomb* para a absorção de impacto e fixar a estrutura deformável à estrutura indeformável. A geometria do painel estrutural com 1445 × 926 × 180 mm, apresenta saliências em todas as suas superfícies permitindo que os elementos de *honeycomb* sejam aparafusados na face exterior da placa, sem que ocorram interferências com as faces exteriores do chassis inferior, ver Figura 30.

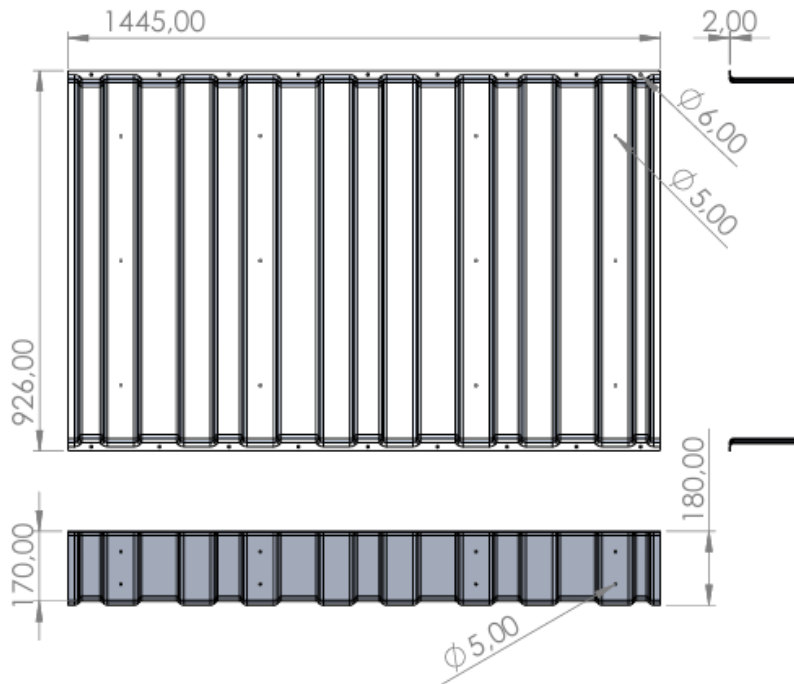


Figura 29 - Vista de topo do painel estrutural de suporte ao *honeycomb* do pack de baterias (estrutura deformável).

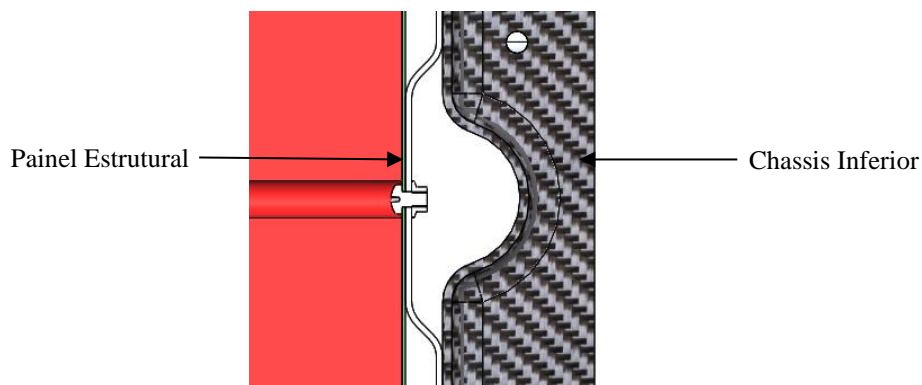
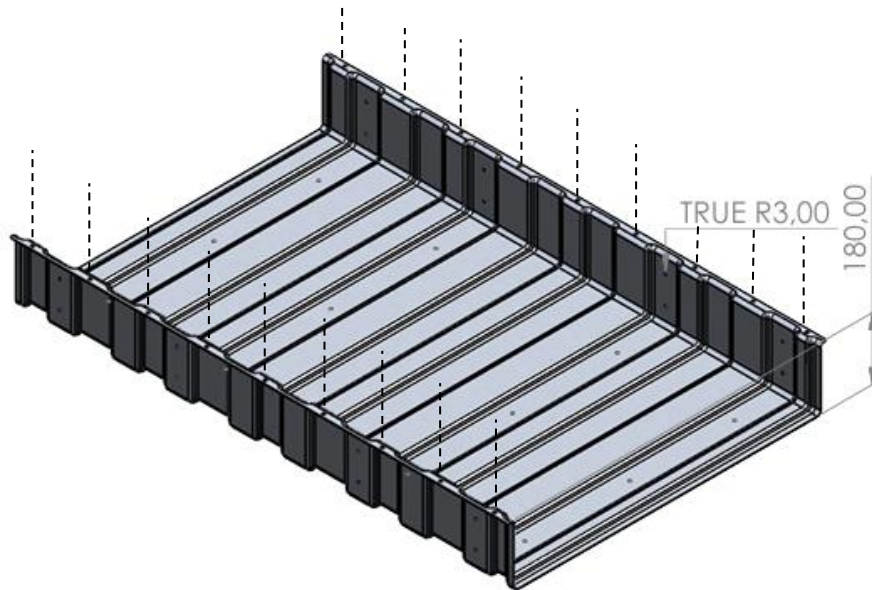


Figura 30 - Vista em corte do ponto de fixação da estrutura de *honeycomb* ao painel estrutural.

As estruturas de *honeycomb* ficarão fixas ao painel estrutural através de parafusos inseridos nos 8 furos presentes nas laterais exteriores e 12 furos presentes nas faces inferiores, como é visível na Figura 29 e 30. A ligação deste painel ao chassis inferior, ou seja, a ligação entre a estrutura deformável e indeformável é feita usando 9 parafusos que alinham com a face mais alta do chassis inferior, orientados pelas linhas de eixo apresentadas na Figura 31.

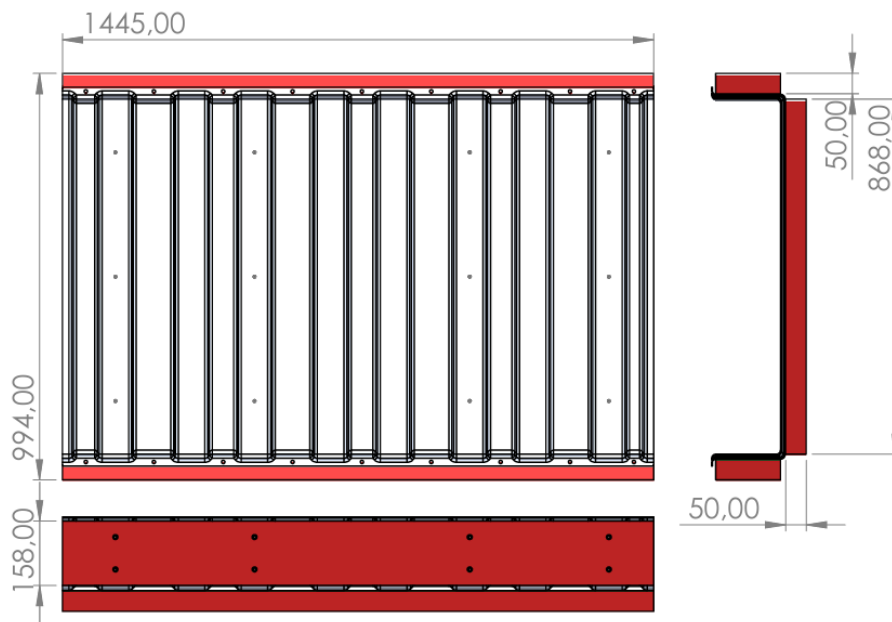


**Figura 31 - Vista isométrica do painel estrutural de suporte ao *honeycomb* do pack de baterias (estrutura deformável)**

#### **4.6.2. Estruturas de *honeycomb***

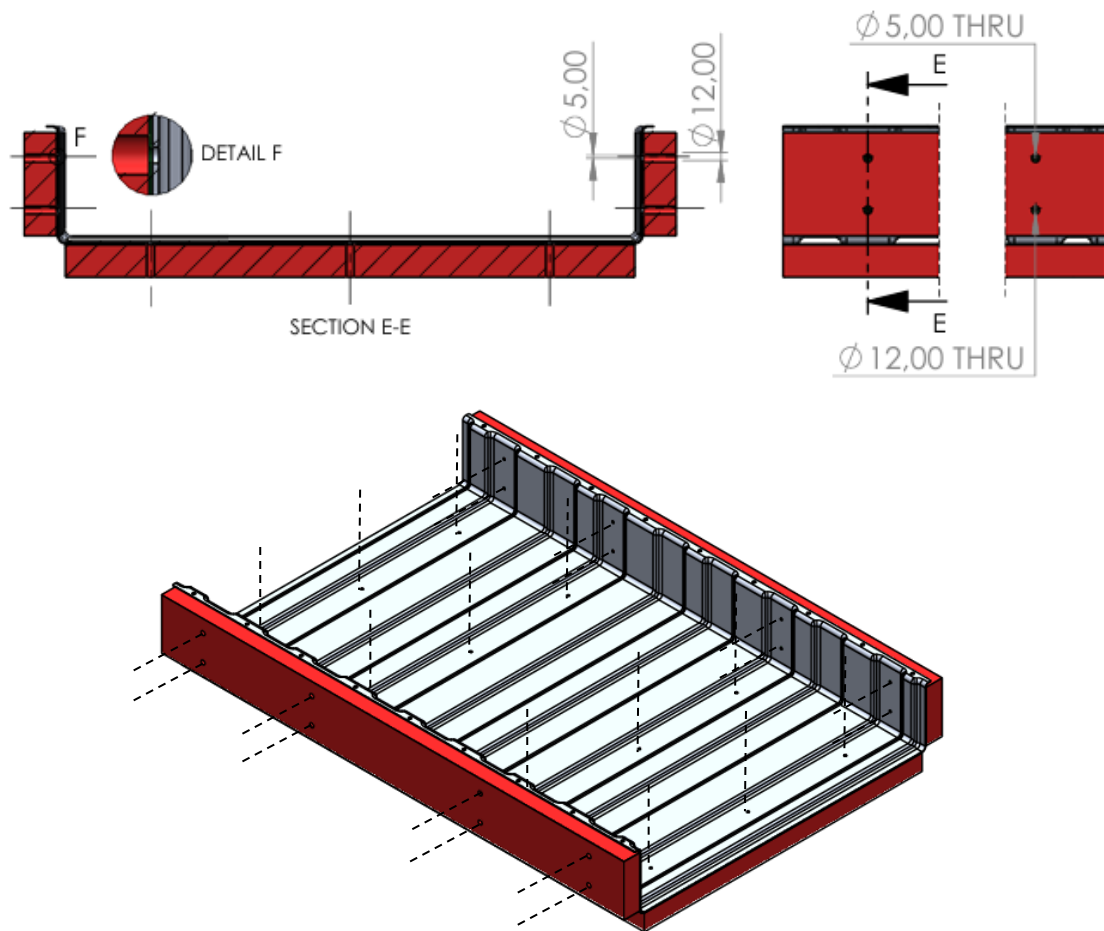
A estrutura de *honeycomb*, é constituída por uma chapa fina de alumínio que suporta o material celuloso no seu exterior. A representação do material celuloso foi geometricamente simplificada a um único solido com o objetivo de reduzir a complexidade da simulação de análise de elementos finitos. Uma modelação da geometria celular real deste material seria extremamente desafiante uma vez que, para recursos computacionais disponíveis, a sua implementação não foi executável dada a complexidade geométrica das células do *honeycomb*. A implementação da simplificação geométrica carece de alterações nos modelos matemáticos aplicados futuramente no software de análise de elementos finitos. Esta simplificação será discutida no Capítulo “5” de “Análise Numérica”.

Foi decidido que as estruturas de *honeycomb* de alumínio laterais e inferior teriam uma espessura de 50 mm e as chapas finas de suporte teriam 1 mm, onde ambas deverão percorrer todo o comprimento do painel estrutural. Estes valores poderão ser eventualmente ajustados conforme os resultados obtidos na simulação de modo a enquadrar melhor os objetivos inicialmente definidos.



**Figura 32 - Vista inferior da estrutura deformável do pack de baterias**

As estruturas de *honeycomb* encontram-se aparafusadas em 8 pontos, com furos de 5 mm de diâmetro entre cada uma das faces laterais da placa estrutural e em 12 pontos nas faces da zona inferior da placa estrutural às chapas finas de alumínio que suportam o *honeycomb* (Figura 33, detalhe “F” da secção de corte “E-E”). A direção dos furos encontra-se representada pelos eixos a tracejado preto na Figura 33. Na estrutura de *honeycomb*, para possibilitar a montagem da parafusaria, foi implementado um corte cilíndrico de 12 mm de diâmetro que percorre a espessura completa do componente na direção dos furos do painel estrutural. Esta configuração permite que o conjunto de chapa fina de alumínio e estrutura de *honeycomb* sejam substituídas, caso o impacto não deforme a placa estrutural.



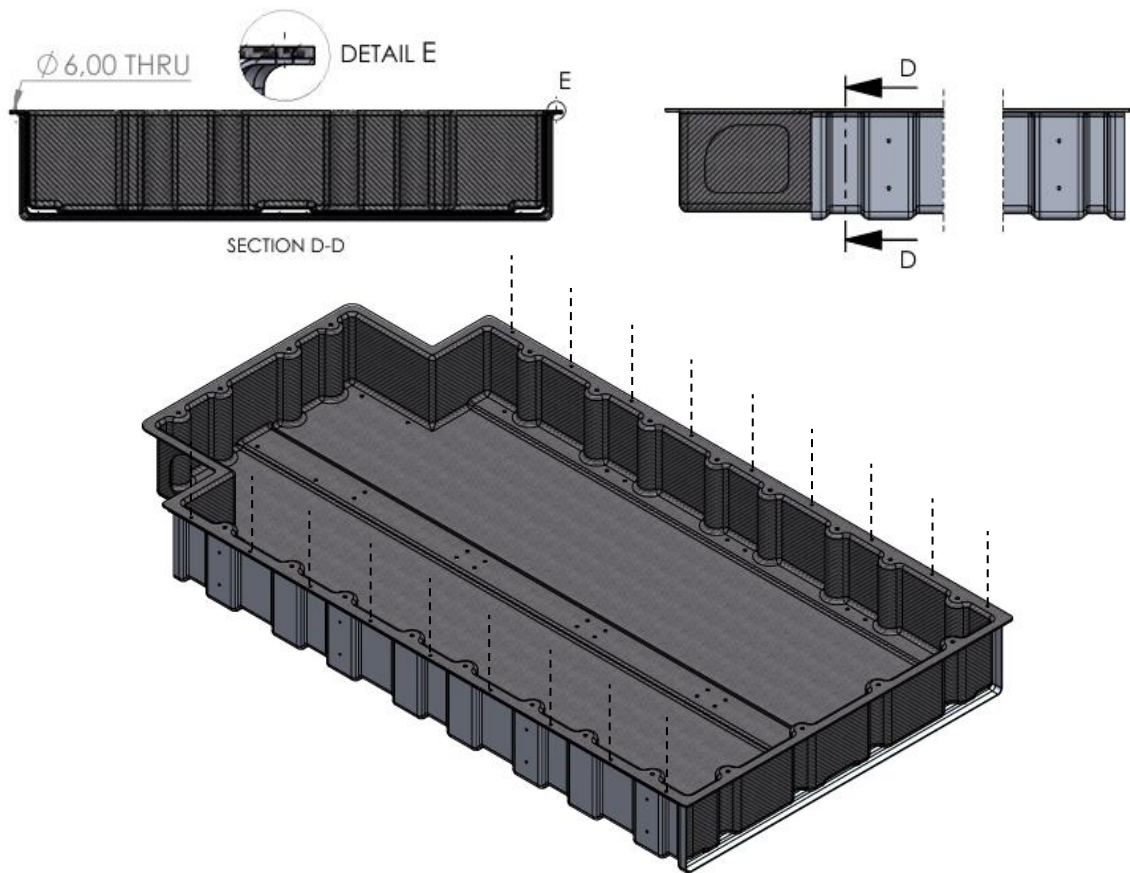
**Figura 33 – Vista em corte das zonas de suporte do *honeycomb* e vista isométrica da estrutura deformável do pack de baterias**

#### **4.7. Integração entre estrutura deformável e indeformável**

Como foi descrito anteriormente, a estrutura deformável é constituída pelo painel estrutural que acolhe as estruturas de *honeycomb*. Esta tem a funcionalidade de ser substituível implicando que este sistema não seja permanente fixo à estrutura indeformável. A estrutura indeformável é constituída pelo chassis inferior de fibra de carbono, a tampa de alumínio e os componentes internos da bateria de alta tensão.

A integração destes componentes é realizado por meio de furos com 6 mm de diametro presentes nas laterais esquerda e direitas das faces mais altas do painel estrutural e nas faces mais altas do chassis inferior (Figura 34, detalhe “E” da secção de corte “D-D”). Utilizando o conjunto parafuso e porca

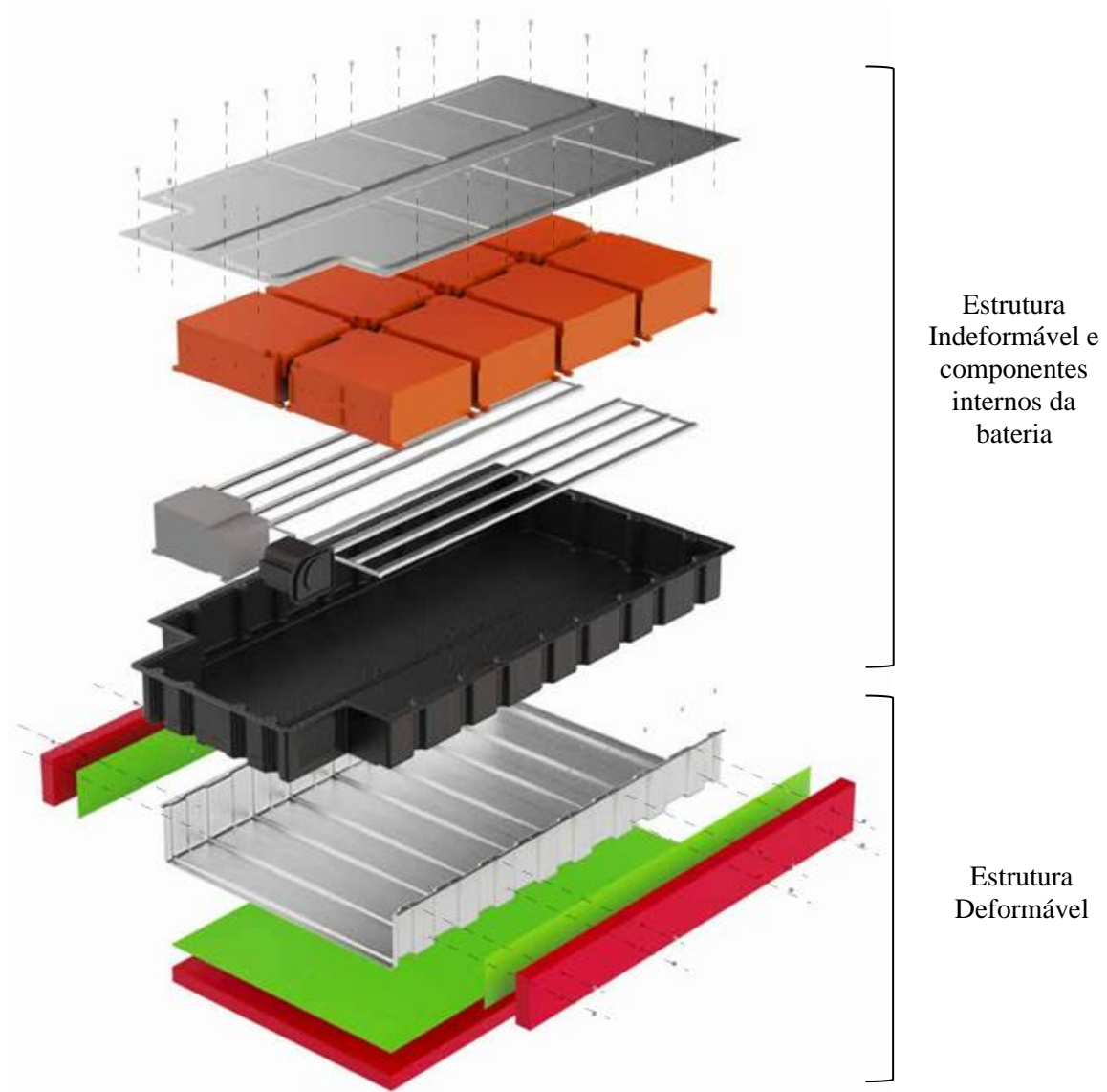
dimensionados para os furos previamente mencionados permite a desmontagem da estrutura deformável, caso seja necessário a sua substituição.



**Figura 34 – Secção de corte “D-D” da vista lateral e vista isométrica do conjunto Painel Estrutural e Chassis Inferior da estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão**

As integrações finais resultam no conjunto de componentes apresentados na Figura 35. Este conjunto e a sua integração serão utilizados para realizar a simulação do estudo de impacto, lateral e inferior descritos nos capítulos seguintes.

De cima para baixo estão representados respetivamente, a tampa de alumínio, os módulos da bateria, o sistema de refrigeração e modulo de controlo elétrico e o chassis inferior, que constituem a Estrutura Indeformável e o painel estrutural acompanhado das estruturas de *honeycomb*, que constituem a estrutura deformável.



**Figura 35 - Vista isométrica em explosão do pack de baterias com a estrutura deformável e indeformável e os seus componentes internos**

Em termos de parafusaria descrita anteriormente, utilizada para a fixação de componentes, estas encontram-se numeradas na Tabela 10, de acordo com as aplicações e funcionalidades descritas:

**Tabela 10 - Características da parafusaria utilizada na estrutura de armazenamento da bateria de alta tensão**

<b>Tipologia</b>	<b>Características</b>	<b>Utilização</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Normalização</b>
Parafuso cabeça cilíndrica com sextavado interno	M6 x 10 mm	União painel estrutural/chassis inferior	18	ISO 7380
Porca sextavada com flange	M6			ISO 4161
Parafuso cabeça cilíndrica com sextavado interno	M8 x 12 mm	União tampa/chassis inferior	24	ISO 7380
Porca sextavada com flange	M8			ISO 4161
Parafuso de cabeça cilíndrica com fenda cruzada	M5 x 6 mm	União estrutura honeycomb/painel estrutural	28	ISO 7045
Porca sextavada com flange	M5			ISO 4161

## 5. Análise numérica

### 5.1. Software de análise de elementos finitos *LS\_DYNA*

Para a testagem do sistema híbrido da estrutura de armazenamento desenvolvido anteriormente foi utilizado o software de análise de elementos finitos “*LS\_DYNA*”. Este software é capaz de simular a resposta de materiais a curtos períodos de carregamento severo. Os seus diversos conjuntos de elementos, formulações de contacto, modelos de materiais e outros tipos de controlo estão disponíveis para serem utilizados para simular modelos complexos, com um controlo detalhado de todos os aspetos do problema (*LS\_DYNA Support, s.d.*). O “*LS-DYNA*” é amplamente utilizada nas indústrias automóvel, aeroespacial, construção civil e militar.

### 5.2. Organização da análise numérica

Como foi descrito no subcapítulo “4.6.2.” ao desenvolver a modelação para a testagem do sistema híbrido, verificou-se que ao utilizar a geometria real em formato celular para a estrutura de *honeycomb* de alumínio, seria necessário um elevado desempenho computacional para implementação desta geometria em simulações de modo obter resultados precisos. Dado a limitação dos recursos computacionais disponíveis, surgiu a necessidade de encontrar uma solução equivalente para esta estrutura, que se aproximasse do resultado original. Por conseguinte, tornou-se necessário realizar um estudo para definir um novo modelo de material para a nova geometria equivalente, que represente o comportamento típico da estrutura de *honeycomb* de alumínio.

Após o desenvolvimento e implementação fiável da geometria equivalente para o material responsável para a absorção de energia durante o impacto, resta apenas definir os modelos de materiais dos restantes componentes do sistema híbrido que melhor representam os materiais que os constituem, tendo em conta os dados apresentados no Capítulo 4.5.

Tendo todos os modelos de material definidos para todos os componentes do sistema híbrido da estrutura de armazenamento da bateria resta apenas definir estratégias com base na informação existente, para a implementação de simulações de impacto às laterais e zona inferior do sistema híbrido de armazenamento da bateria de alta tensão, que consigam caracterizar a capacidade de este sistema resistir a impactos.

### 5.3. Estudo do modelo de *honeycomb*

O estudo do material de *honeycomb* tem dois objetivos principais: O primeiro é obter e comparar o comportamento típico deste material; O segundo será desenvolver um modelo equivalente que reduza significativamente o desempenho computacional e os recursos necessários, tentando manter o seu comportamento o mais fiável possível ao comportamento da estrutura real para que este possa ser implementado na simulação da estrutura híbrida.

A solução para a criação de um modelo equivalente, que tenha a capacidade descrita anteriormente, passa por implementar o *honeycomb* de alumínio numa modelação mais simplificada. Inicialmente a estrutura de *honeycomb* foi implementada em formato “SHELL” criado com a sua geometria celulosa original. A geometria do modelo equivalente foi reduzida a um sólido que representa a área ocupada pelas células originalmente definidas.

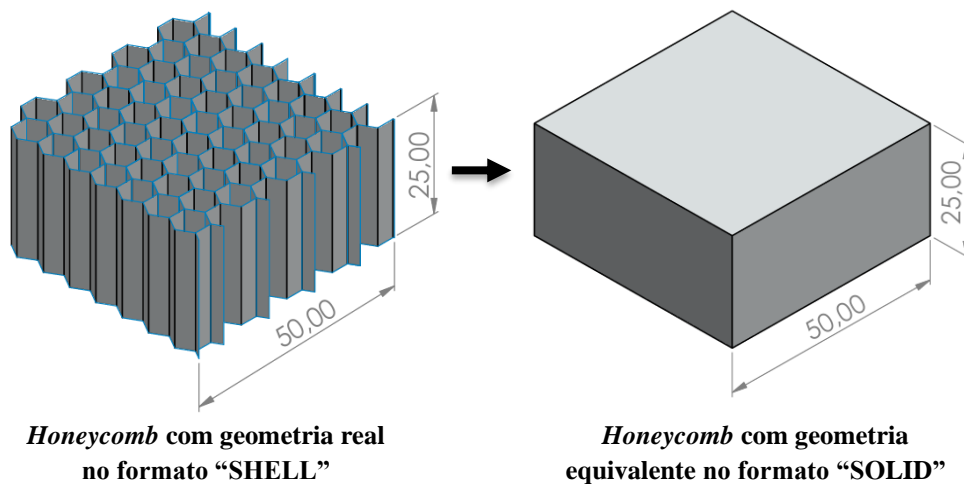


Figura 36 - Modelação da geometria "real" e apresentação da geometria "equivalente"

Da lista de modelos de materiais para implementar na simulação que melhor define o comportamento deste material, no software “*LS\_DYNA*”, para a nova geometria simplificada no formato “SOLID” destacou-se o modelo “*MAT\_126\_MODIFIED\_HONEYCOMB*”. Este modelo de material é tipicamente utilizado para representar o comportamento anisotrópico de materiais como espuma esmagável de *honeycomb* de alumínio e pode ser implementado em elementos no formato “SOLID”.

Definido o modelo matemático que representará a estrutura de *honeycomb* equivalente, foi necessário definir qual o modelo matemático para a estrutura celulosa original. Tendo em conta a composição geométrica real do material, um modelo de material tipicamente utilizado para a definição do comportamento elástico-plástico do alumínio é o “*MAT\_024\_*

PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY”. Este modelo é definido com base na curva de tensão arbitrária em função da deformação do material em estudo.

### 5.3.1. Comportamento típico do *honeycomb*

Para ajudar a compreender, e verificar a veracidade dos resultados obtidos, foi utilizado o gráfico da Figura 37 que demonstra o comportamento típico de uma estrutura de *honeycomb* de alumínio quando sujeito à compressão.

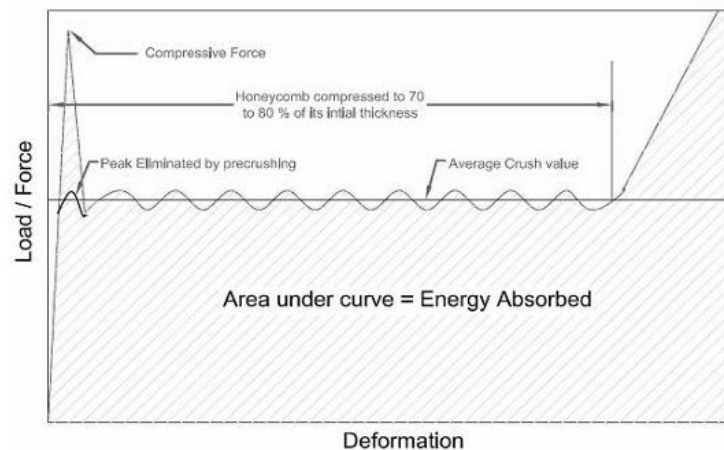


Figura 37 – Curva de compressão típica de *honeycomb* de alumínio (Hellstrom & Lindblom, 2007)

No gráfico é possível visualizar que a curva de compressão típica para estruturas de *honeycomb*, inicia com um pico de força. Este pico é a força que ocorre devido à resistência inicial da estrutura e pode ser eliminado através de um processo chamado pré esmagamento. Este processo permite que o material adote um comportamento mais linear. Durante o percorrer da deformação predominantemente plástica dos favos de mel do *honeycomb*, a força de compressão mantém-se estável até que este seja comprimido cerca de 70-80% da sua espessura. Esta fase é onde a estrutura absorve a maior parte da energia, com a força de compressão mantendo-se relativamente constante à medida que a deformação aumenta. O final da curva mostra um aumento acentuado da força de compressão. Esta alteração de declive significa que ocorreu um aumento crescente da rigidez à medida que o material é totalmente compactado.

### 5.3.2. Estratégia e parametrização de testagem

A norma de testagem do sistema de *honeycomb* de alumínio, tipicamente utilizada por fabricantes de materiais desta natureza é a ASTM D7336. Este teste normalizado é utilizado para determinar as propriedades de absorção de energia estáticas de materiais de estruturas do tipo *honeycomb* (ASTM International, s.d.).

O teste consiste em submeter o material celuloso do tipo *honeycomb* a uma força compressiva uniaxial, perpendicular ao plano das faces (ASTM International, s.d.). A força é transmitida ao material por meio de placas de esmagamento (250 x 250 mm) (Bonanno et. al, 2017) conectadas à máquina de teste. A força compressiva é aplicada além da força de falha inicial, de modo que o esmagamento ocorra continuamente ao longo de todo o comprimento da estrutura *honeycomb*. Por fim os dados da experiência são registados (ASTM International, s.d.). O teste poderá realizar-se a diversas velocidades de deslocamento (5 mm/min; 10 mm/min; 20 mm/min; 50 mm/min) (Bonanno et. al, 2017). O material de teste, segundo a norma, deverá ter uma altura mínima de 25 mm e uma largura mínima de 25 mm (ASTM International, s.d.).

Para a implementação deste teste normalizado na simulação foi utilizado uma “RIGID WALL” que percorre a espessura do material a uma velocidade de 10 mm/min. Os modelos de *honeycomb* utilizados nesta simulação, apresentam 50 mm de largura nas suas laterais e 25 mm de espessura. A base de ambos os modelos foi fixa em todos os eixos direcionais e rotacionais através da função “SPC”.

### **5.3.3. Malha de elementos finitos**

A modelação da geometria do modelo “real” de *Honeycomb* de alumínio 3003 foi construída com base nos parâmetros geométricos apresentados no subcapítulo “4.4.1.1”, com uma malha com 130084 elementos no formato “SHELL”. A estrutura do modelo equivalente do *Honeycomb* de foi definida na geometria simplificada com uma malha com 500000 elementos no formato “SOLID”. Os resultados da criação destas malhas encontram-se apresentadas na figura 38.

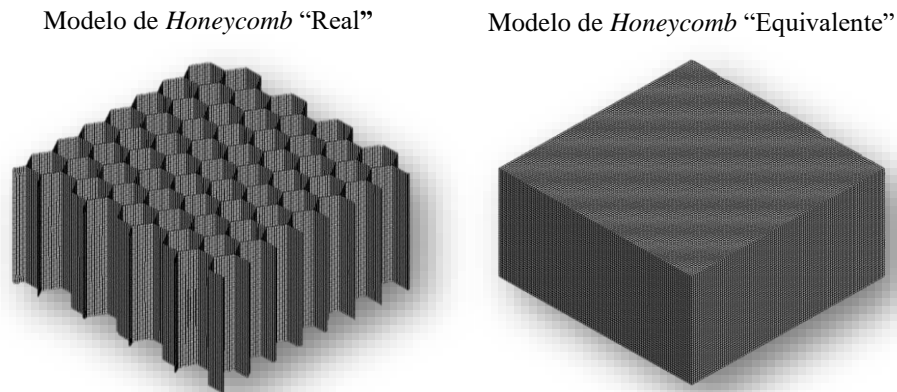


Figura 38 - Visualização da malha de elementos finitos do modelo “real” e modelo “equivalente”

#### 5.3.4. Definição do modelo matemático do *honeycomb* “real”

Como foi descrito anteriormente o modelo de material “MAT\_024\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY” será utilizado para definir a estrutura de *honeycomb* com a sua geometria real. Este modelo foi desenvolvido utilizando as propriedades do alumínio 3003, implementadas no software LS\_DYNA no seguinte formato:

Tabela 11 - Propriedades gerais do Alumínio 3003 (MatWeb, s.d.)

Variável LS-DYNA	Descrição	Alumínio 3003
RO	Densidade [ $Kg/mm^3$ ]	2,73e-06
E	Modulo de Young [ $GPa$ ]	68.900002
PR	Rácio de <i>Poisson</i>	0.33
SIGY	Tensão de escoamento [ $GPa$ ]	0.186

#### 5.3.5. Definição modelo matemático do *honeycomb* “equivalente”

O modelo de material, MAT\_126\_MODIFIED\_HONEYCOMB, será utilizado para definir a estrutura de *honeycomb* com a geometria simplificada, com os seus elementos no formato “SOLID”. Para definir este modelo foram utilizadas as propriedades gerais que representam o *honeycomb* alumínio 3003 (AL-HC-3003) definidas pelo fabricante Cellbond (s.d.) assim como as suas curvas características do comportamento deste material à compressão e quando sujeito a tensões de corte nos três eixos direcionais. Estas propriedades foram implementadas no software LS\_DYNA no seguinte formato:

### 5.3.5.1. Propriedades gerais

Tabela 12 - Propriedades Gerais do *Honeycomb* de Alumínio 3003 (AL-HC-3003) (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007)

Variável LS-DYNA	Descrição	<i>Honeycomb</i> AL-HC-3003
RO	Densidade [ $Kg/mm^3$ ]	8,26e-08
E	Modulo de Young [ $GPa$ ]	68.949997
PR	Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.0
SIGY	Tensão de escoamento [ $GPa$ ]	0.160
VF	Volume relativo no qual o <i>modified_honeycomb</i> está completamente compactado [%]	0.4
MU	Coefficiente de Viscosidade do material	0.05

As direções definidas nos próximos subcapítulos, seguem o referencial direcional da Figura 22, apresentado no subcapítulo 4.4.1.2.

### 5.3.5.2. LCA – Força de compressão na direção “T”

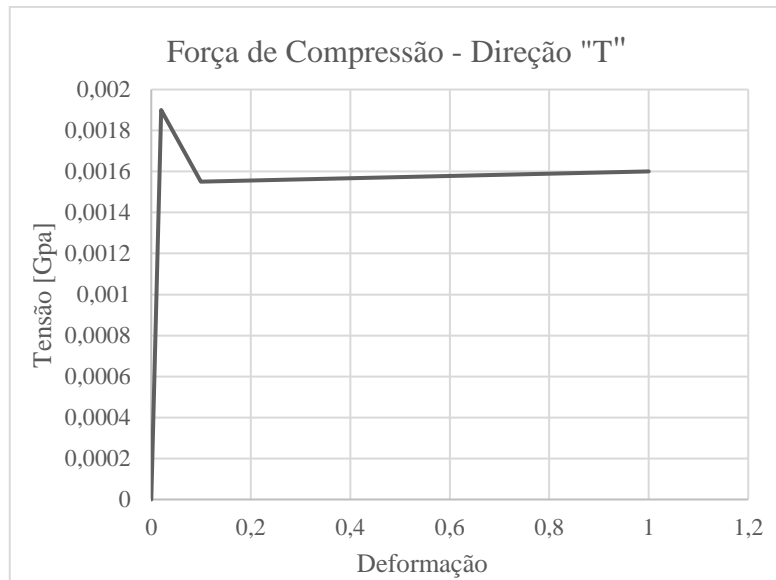


Figura 39 - Força de compressão na direção "T" - *honeycomb* alumínio 3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007)

### 5.3.5.3. LCB – Força de compressão na direção “W”

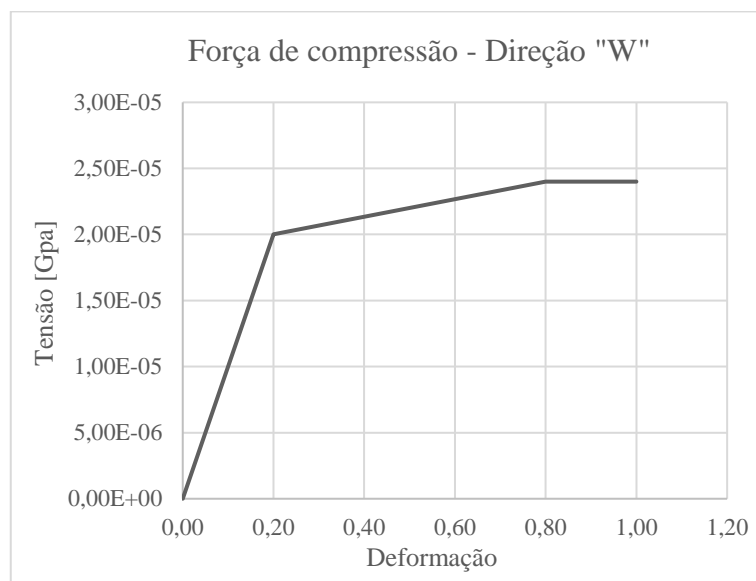


Figura 40 - Força de compressão na direção "W" - *honeycomb* alumínio 3003 (adaptado de (Hellstrom & Lindblom, 2007)

#### 5.3.5.4. LCC – Força de compressão na direção “L”

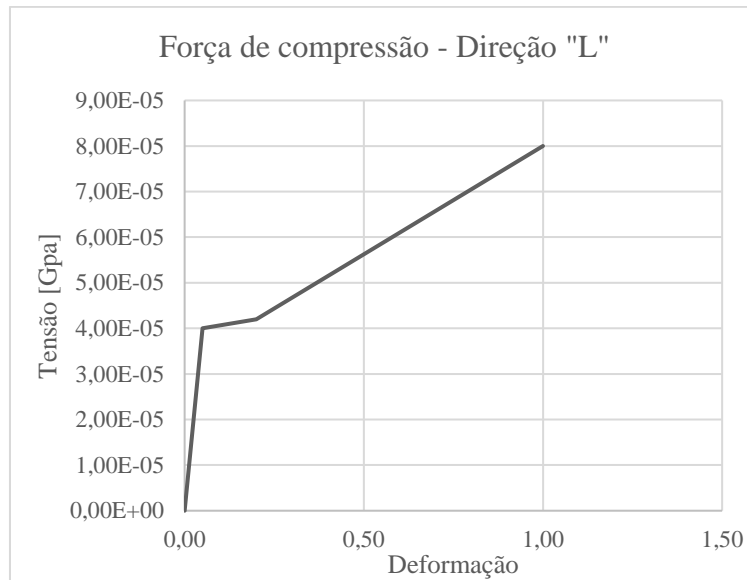


Figura 41 - Força de compressão na direção "L" - *honeycomb* Alumínio 3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007)

#### 5.3.5.5. Módulo de elasticidade nas direções “T”, “W” e “L”

Tabela 13 - Módulo de elasticidade do *honeycomb* de alumínio AL-HC-3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007)

Variável LS-DYNA	<i>Honeycomb</i> AL-HC-3003
EAAU [GPa]	1.020
EBBU [GPa]	0.340
ECCU [GPa]	0.340

### 5.3.5.6. LCAB – Resistência ao corte na direção “T-W”

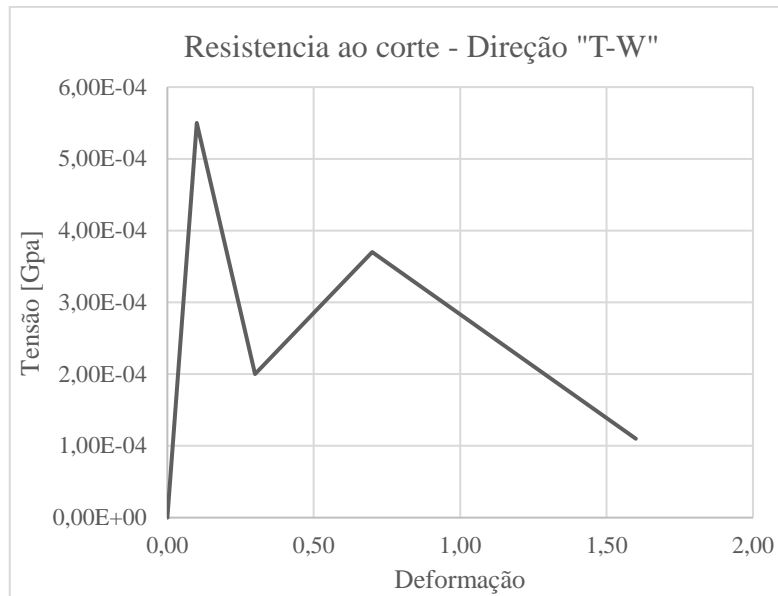


Figura 42 - Resistência ao corte na direção “T-W” - *honeycomb* de alumínio 3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007)

### 5.3.5.7. LCBC – Resistência ao corte na direção “W-L”

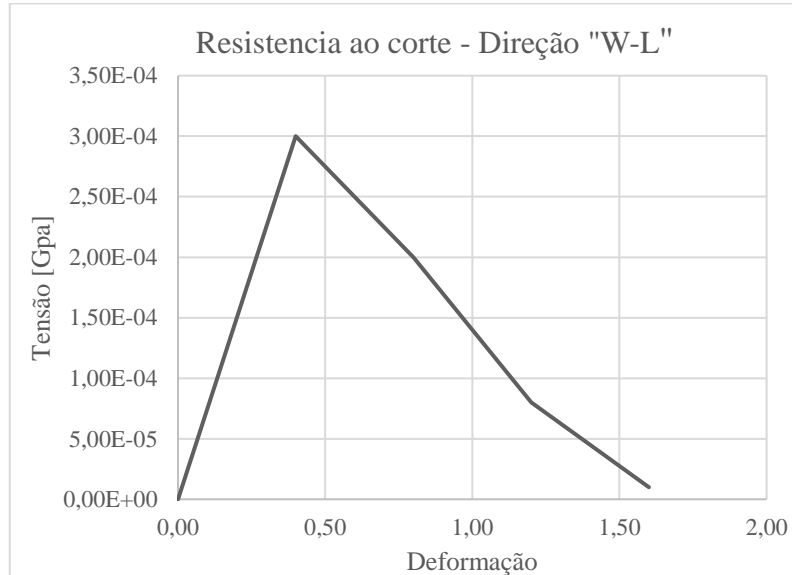


Figura 43 - Resistência ao corte na direção “W-L” - *honeycomb* de alumínio 3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007)

### 5.3.5.8. LCCA – Resistência ao corte na direção “L-T”

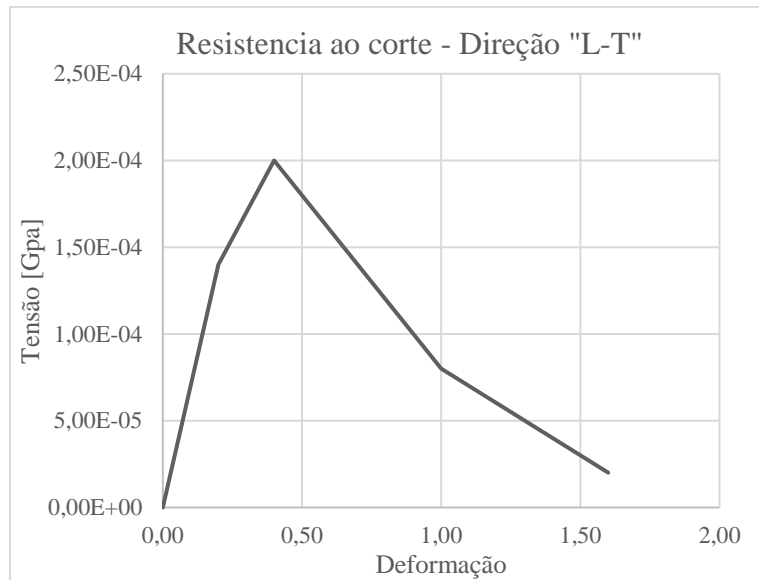


Figura 44 - Resistência ao corte na direção “L-T” - *honeycomb* de alumínio 3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007)

### 5.3.5.9. Módulo de elasticidade nas direções “T-W”, “W-L” e “L-T”

Tabela 14 - Modulo de elasticidade de *honeycomb* de alumínio AL-HC-3003 (adaptado de Hellstrom & Lindblom, 2007)

Variável LS-DYNA	<i>Honeycomb</i> AL-HC-3003
GABU [GPa]	0.434
GBCU [GPa]	0.214
GCAU [GPa]	0.434

### 5.3.5.10. Orientação do Material

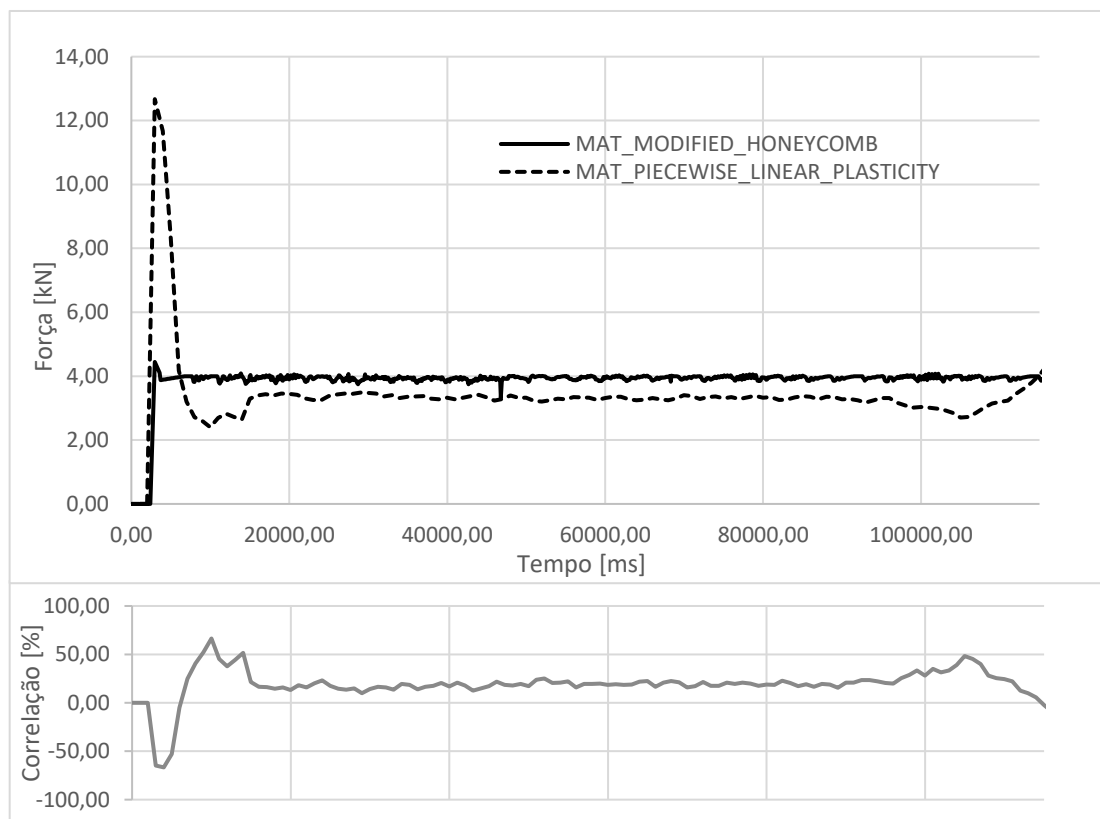
Os vetores direcionais, indicam a direção das faces das células. Para a simulação em questão encontram-se paralelas ao eixo de direção da compressão “Z”, tendo sido definidas do seguinte modo:

Tabela 15 - Vetor direcionais do material

Vetor	A1	A2	A3	D1	D2	D3
Valor	0	0	1	0	1	0

### 5.3.6. Comparação entre o modelo real e modelo equivalente

Neste subcapítulo é apresentada uma análise detalhada da correlação entre resultados da simulação computacional dos testes de compressão dos dois modelos de simulação de materiais, o MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY (modelo com a geometria real) e o MAT\_MODIFIED\_HONEYCOMB (modelo com a geometria equivalente). O gráfico da Figura 45 demonstra a relação entre a força de compressão e o tempo de simulação para ambos os modelos ao longo de um teste de compressão seguindo a norma ASTM D7336.



**Figura 45 - Gráfico Força em função do tempo dos modelos Honeycomb real (MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY) e equivalente (MAT\_MODIFIED\_HONEYCOMB) e a correlação entre curvas**

Ao analisar os gráficos da Figura 44, conclui-se que utilizando a geometria real em conjunto com o modelo de material “MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY” os resultados aproximam-se melhor à curva de comportamento típico à compressão deste material, conforme apresentada no Subcapítulo 5.3.1.

A curva da geometria equivalente apresenta uma força de compressão média semelhante à do modelo real, com uma diferença inferior a 17%. No entanto, o pico inicial e o comportamento final

apresentam as maiores divergências com uma discrepância superior a 40%, em ambas posições. Estes resultados evidenciam que, embora tenham sido implementadas as devidas propriedades detalhadas do material, a reprodução do comportamento deste material para uma geometria simplificada, utilizando o modelo de material "MAT\_126\_MODIFIED\_HONEYCOMB" apresenta algumas dificuldades uma vez que, a geometria real celular do *honeycomb* influencia fortemente o seu comportamento quando sujeito a este tipo de testes.

O ajuste de parâmetros de controlo de simulação, como a configuração "HOURGLASS", a função de contacto "AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE" e definições temporais de "Timestep" e "TERMINATION\_TIME", foram fundamentais para aproximar a curva do modelo equivalente à do modelo real. Após um conjunto de 24 iterações de simulação foi possível alcançar a curva mais próxima dos resultados do modelo real, presentes na Figura 45.

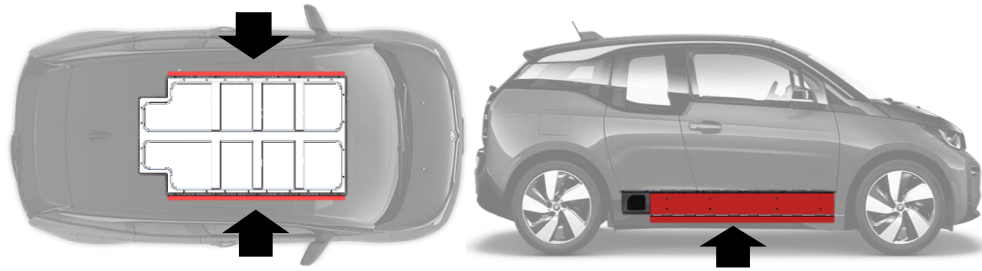
Embora o comportamento inicial e final da curva do modelo equivalente não representem na sua totalidade o comportamento típico deste material, por outro lado, a parte intermediária demonstrou, conforme esperado, o comportamento linear que caracteriza o *honeycomb* em situação de compressão. Assim, o uso do modelo equivalente é justificado principalmente pela simplificação da geometria desta estrutura que é imprescindível para ajudar na redução dos recursos computacionais necessários para desenvolver as simulações para o sistema híbrido completo.

## **5.4. Estudo do impacto no Sistema Híbrido**

Neste Subcapítulo, serão definidas as estratégias e a parametrização necessária para executar as simulações do sistema híbrido de armazenamento da bateria de alta tensão completo, ou seja, a união entre a estrutura indeformável e a estrutura deformável.

### **5.4.1. Estratégias e Parametrizações das Simulações de Impacto**

De acordo com o que foi estabelecido no subcapítulo "2.1.3" do estado da arte, a simulação de impacto no sistema híbrido da estrutura de armazenamento de baterias deverá ocorrer nas zonas mais críticas determinadas pela análise do posicionamento da bateria e ocorrências de colisões em automóveis. Estas zonas correspondem ao posicionamento do material atenuador de impacto da estrutura deformável, ver Figura 46.



**Figura 46 - Posição generalizada do pack de baterias desenvolvido no BMW i3 (adaptado de Yallamotor, s.d; BMW, s.d.)**

Tendo em conta o objetivo de avaliar a capacidade de absorção de energia do sistema híbrido desenvolvido, as simulações serão implementadas com base em testes de natureza dinâmica. Neste âmbito a carga é aplicada de forma rápida e com alta intensidade, para simular situações de impacto.

Tipicamente os testes dinâmicos são aplicados ao nível do veículo. A simulação com a implementação do sistema de armazenamento de baterias de alta tensão num chassis de um veículo acrescentaria uma vertente realista à análise de desempenho deste sistema. No entanto, essa implementação aumentaria consideravelmente a complexidade da simulação, que consequentemente aumentaria os recursos computacionais necessários para as executar, acrescentando também a dificuldade de desenvolver uma modelação fidedigna do veículo utilizado como referência.

A alternativa para este problema foi a implementação de um teste de impacto dinâmico ao nível da bateria de alta tensão, adaptando informações dos testes de impactos normalizados ao nível do veículo e dos testes “quase-estático” ao nível da bateria, estudados anteriormente.

Como tal, o método de testagem utilizado será uma adaptação das normas e regulamentações de impactos ao nível da bateria de alta tensão e ao nível do veículo previamente descritas: O objeto de impacto (punção) será geometricamente igual ao utilizado pela norma UN/ECE-R100.02:2013, presente no estado da arte, visto que esta dispõe a maior quantidade de informação da sua construção. O seu peso será de 950 kg, um peso normalizado atribuído com base nas características do carrinho de colisão utilizado no impacto lateral por barreira da “EURONCAP”.

Em relação ao impacto lateral, o eixo do cilindro do punção é disposto verticalmente em relação à bateria, numa zona de impacto crítica como é indicado pela norma “ISO 12405-3:2014”. Seguindo o mesmo critério, para o impacto no plano inferior, o eixo do cilindro é disposto horizontalmente em relação a bateria.

De modo a estudar os limites de energia de impacto que são suportadas pelo sistema, e compreender os seus efeitos nos componentes que o integram, foi decidido iniciar o teste dinâmico com uma velocidade impacto do punção relativamente baixa ( $2.5 \text{ Km/h}$ ), que será aumentada em incrementos,

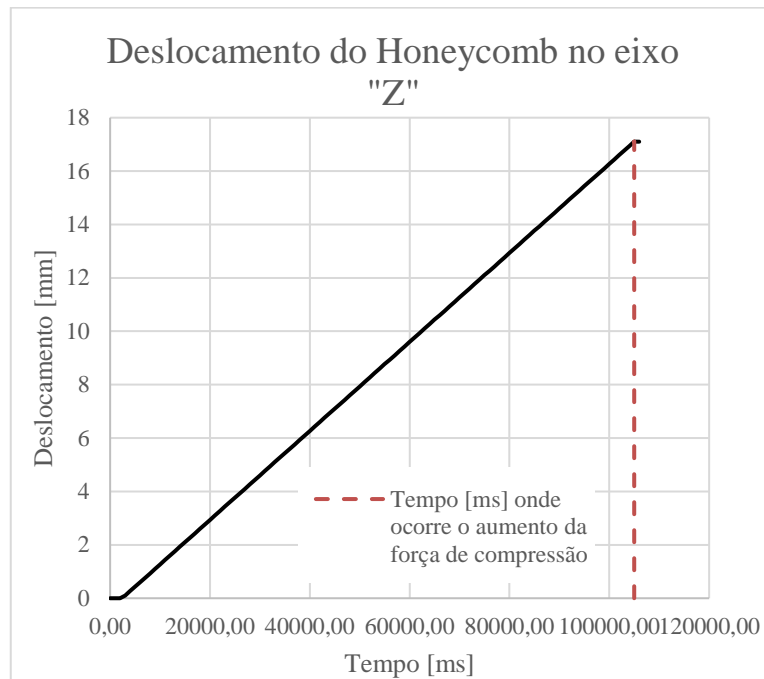
avaliando os seus resultados ao longo de cada um dos incrementos até que seja atingido o critério limitante.

O critério limitante para o número de simulações, foi definido com base no momento onde ocorre a máxima compressão da estrutura deformável. Sabendo que, a ocorrência de deformação no chassi inferior da estrutura indeformável não é desejada, pois poderá pôr em causa os componentes internos do sistema e o objetivo de, em caso de colisão, apenas ser necessário a substituição da estrutura deformável, a deformação neste componente poderá, de certa forma, ser prevista pelo material de absorção de impacto (*honeycomb*) da estrutura deformável através do seu ponto de compressão máxima, dado o posicionamento entre os dois componentes. Este critério é aprofundado no subcapítulo seguinte. As simulações individuais terminam quando o punção fica totalmente imobilizado.

#### **5.4.1.1. Ponto de Compressão Máxima da Estrutura de *Honeycomb***

O ponto de compressão máximo da estrutura de *honeycomb* é um parâmetro que permite entender e prever, o comportamento da estrutura deformável. Este ponto é determinado pelo deslocamento máximo da estrutura de *honeycomb* até ao incremento da força de compressão após o comportamento linear da curva do material quando sujeito à compressão. Este valor é estabelecido de acordo com o referido no subcapítulo “5.2.1.1”.

Para determinar esse deslocamento foi retirado o momento temporal onde acontece o incremento na força de compressão na curva de compressão do modelo real das estruturas de *honeycomb* estudadas no subcapítulo “5.2.5”. Com recurso ao gráfico da Figura 45, obtido da mesma simulação do subcapítulo referido anteriormente, foi possível medir o deslocamento até ao ponto de compressão máxima:



**Figura 47 - Deslocamento de um nó do material *honeycomb* na simulação para o modelo de material MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY**

Do gráfico da figura 45 (presente no subcapítulo 5.3.6.) e considerando o que foi descrito anteriormente, o material encontra-se totalmente comprimido quando chega aos 104990 *ms* da simulação. Este instante foi registado no gráfico da figura 47. Com esta informação foi obtido o deslocamento de 17.1 *mm* ( $S_f$ ). Sabendo a espessura inicial ( $S_i$ ) do material, é possível determinar através da equação 11, a percentagem volúmica de deformação que ocorre no material até atingir esse ponto máximo de compressão.

$$P_{Def.} = \frac{S_f \times 100}{S_i} (=) \quad (11)$$

$$(=) P_{Def.} = \frac{0.0171 \times 100}{0.025} = 68.4 \%$$

Tendo em conta a espessura do material definida para o desenvolvimento da modelação estrutura deformável apresentada no subcapítulo “4.6.2”, e sabendo que o material se encontra totalmente comprimido quando percorrer 68.4% do seu volume, é possível, utilizando novamente a equação 11, determinar a deformação ( $\Delta_s$ ) até ao ponto limite de compressão para a nova espessura da estrutura de *honeycomb*.

$$\Delta_s = S_i \times \frac{P_{Def.}}{100} (=)$$

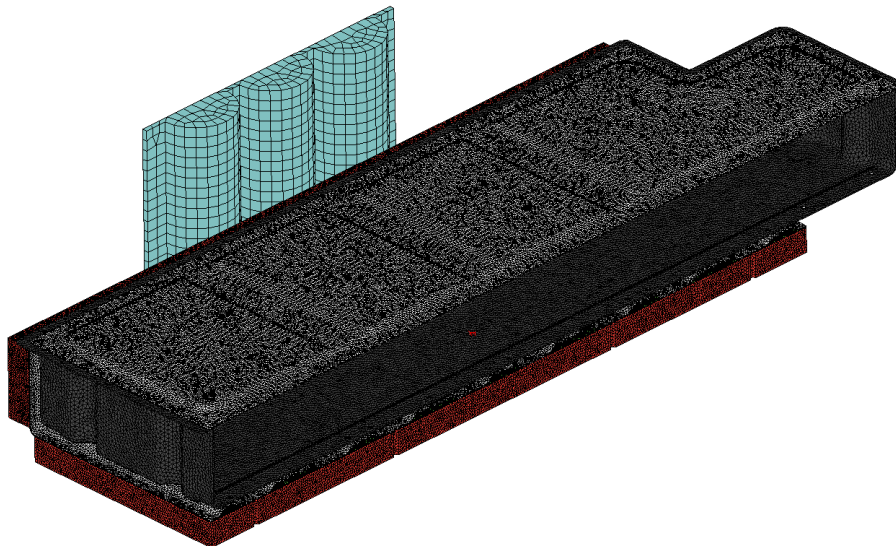
$$(=) \Delta_s = 50 \times \frac{68.4}{100} = 34.2 \text{ mm}$$

Tendo este limite definido e, sabendo o que este representa em situação de compressão, se a deformação causada por um impacto ultrapassar este ponto compressão máxima, significa que, teoricamente, existirá a possibilidade de ocorrência de deformações nos componentes adjacentes à estrutura de *honeycomb*.

## 5.4.2. Malha de elementos finitos

### 5.4.2.1. Malha para simulação de impacto lateral

Mantendo o objetivo de simplificar a simulação e reduzir o uso de recursos computacionais, e sabendo simultaneamente que os componentes estruturais do pack de bateria são simétricos, decidiu-se representar apenas metade deste para as simulações de impacto lateral e retirar todos os componentes internos. Assim, o impacto lateral será realizado exclusivamente numa das faces laterais do pack, assumindo assim que o comportamento será idêntico no lado oposto.



**Figura 48 - Malha de elementos finitos para a simulação de impacto lateral no LS\_DYNA**

O punção utiliza uma malha com 2496 elementos em formato “SHELL”. O chassis inferior e os restantes elementos como a tampa, o painel estrutural, a estrutura de *honeycomb* e a chapa que a suporta, utilizam cada um uma malha no formato “SOLID”, cujo total são 2540853 elementos. O sistema encontra-se constringido, através da função “SPC”, em todas as direções e rotações nos nós das faces de corte dos elementos apresentados. Foram definidos também, “GENERALIZED WELDS” nos nós próximos aos furos para fixação de componentes, simulando a sua união.

### 5.4.2.2. Malha para simulação de impacto inferior

Para a simulação do impacto inferior, mantendo o mesmo objetivo de simplificar a simulação, foram retiradas as estruturas de *honeycomb* lateral uma vez que estas ficariam fora do plano de impacto delimitado pelo punção. Semelhante ao descrito no Subcapítulo anterior, os componentes internos foram removidos com base no mesmo princípio. Para esta direção de impacto o sistema não é simétrico, como tal os componentes presentes na simulação serão representados na sua totalidade.

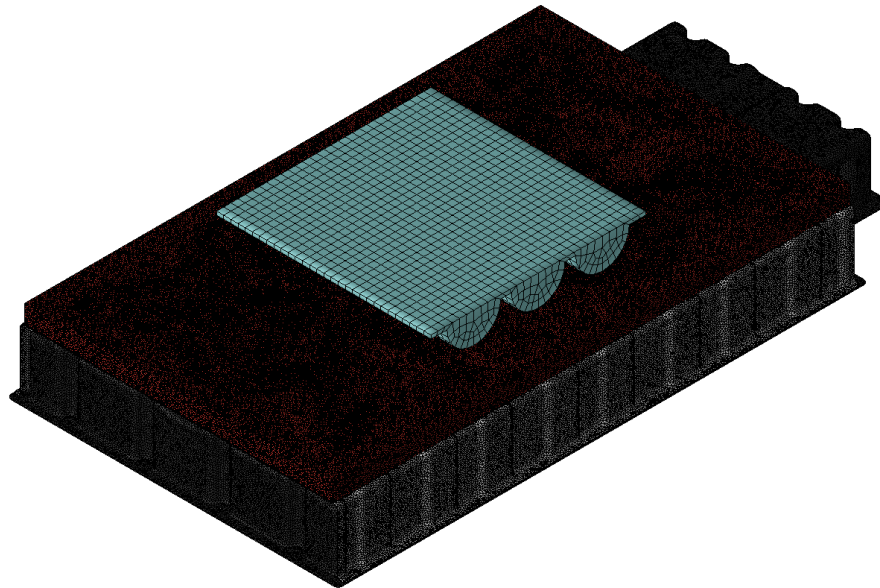


Figura 49 - Malha de elementos finitos para a simulação de impacto inferior

O tipo de elementos da malha e a definição de “GENERALIZED WELDS”, mantiveram-se iguais conforme os critérios referidos no subcapítulo anterior, variando apenas o posicionamento dos nós de constrangimento, que neste caso foram implementados na face de topo do chassis inferior. Devido à utilização de componentes completos o número de elementos da malha aumentou para 5485139, que por consequência, aumentará também o tempo necessário para executar a simulação.

### 5.4.3. Definição dos Modelos de Material

#### 5.4.3.1. Punção

Como o punção tem a função de colidir com o sistema híbrido de armazenamento do pack de baterias, a escolha do modelo matemático deverá representar as características de um material permanente rígido. O modelo que representa esse comportamento é o “MAT\_020\_RIGID”. Este modelo é capaz de garantir a estatura de componente rígido indeformável. O valor da densidade foi definido conforme o volume do punção de modo que o punção pesasse os 950 kg definidos anteriormente. Estes parâmetros foram definidos, no LS\_DYNA conforme a Tabela 16:

**Tabela 16 - Propriedades gerais MAT\_020\_RIGID**

Variável LS-DYNA	Descrição	Valor
RO	Densidade [ $kg/mm^3$ ]	5.004e-04
E	Módulo de Young [ $GPa$ ]	200
PR	Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.3

### 5.4.3.2. Chassi Inferior

O material compósito escolhido para o chassi inferior foi definido no Subcapítulo 4.3.2. Dos modelos de material em LS\_DYNA que representam o comportamento de compósitos para elementos no formato “SOLID” destacou-se o “MAT\_059\_COMPOSITE\_FAILURE\_SOLID\_MODEL”. Segundo o manual do software, a utilização deste modelo de material diferencia-se por disponibilizar uma abordagem robusta do comportamento de falha em compósitos laminados. Os parâmetros apresentados na Tabela 17, representam as propriedades do laminado completo, com os seus cálculos apresentados em anexo.

**Tabela 17 – Propriedades Gerais do laminado completo de fibra de carbono e matriz de epóxi para o modelo MAT\_059\_COMPOSITE\_FAILURE\_SOLID\_MODEL**

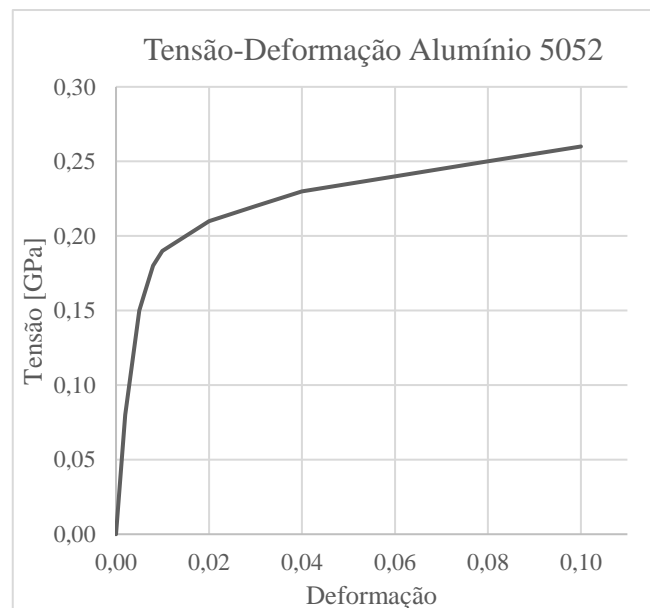
Variável LS-DYNA	Descrição	Laminado completo
RO	Densidade [ $Kg/mm^3$ ]	1.760e-06
EA	Modulo de <i>Young</i> [ $GPa$ ] direção A	35.8423
EB	Modulo de <i>Young</i> [ $GPa$ ] direção B	35.8423
EC	Modulo de <i>Young</i> [ $GPa$ ] direção C	35.8423
PRBA	Coefficiente de <i>Poisson</i> direção A	0.5355
PRCA	Coefficiente de <i>Poisson</i> direção B	0.5355
PRCB	Coefficiente de <i>Poisson</i> direção C	0.5355
GAB	Tensão de corte direção AB	28.2965
GBC	Tensão de corte direção BC	28.2965
GCA	Tensão de corte direção CA	28.2965

### 5.4.3.3. Tampa

A tampa do sistema será produzida de através de uma chapa de alumínio 5052. O modelo de material em LS\_DYNA que é tipicamente utilizado para a representação do comportamento deste material é o “MAT\_024\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY”. Este foi definido com as seguintes propriedades:

**Tabela 18 - Propriedades do alumínio 5052 para o modelo MAT\_024\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY (MatWeb, s.d.)**

Variável LS_DYNA	Descrição	Alumínio 5052
RO	Densidade [ $kg/mm^3$ ]	2.680e-06
E	Modulo de <i>Young</i> [GPa]	70.3
PR	Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.33
SIGY	Tensão de cedência [GPa]	0.193



**Figura 50 - Curva tensão-deformação do alumínio 5052 (adaptado de Park et. al, 2019)**

### 5.4.3.4. Painel Estrutural

O material do painel estrutural será também alumínio 5052. Como foi descrito no subcapítulo anterior, o modelo que tipicamente representa este tipo de material é “MAT\_024\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY”, sendo partilhadas as propriedades mecânicas para ambos os componentes.

#### **5.4.3.5. Estrutura de *Honeycomb***

O modelo de material utilizado para definir o comportamento do material *honeycomb*, será o "MAT\_126\_MODIFIED\_HONEYCOMB". Este modelo foi descrito no “subcapítulo 5.2.5.1”, para a simulação que caracterizou o comportamento deste material em testes de compressão para a geometria simplificada.

As chapas finas de alumínio de suporte ao *honeycomb* foram definidas com o modelo de material “MAT\_024\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY” com as propriedades iguais às do alumínio 3003 apresentadas no “subcapítulo 5.2.4.1.”, para a simulação que caracterizou o comportamento deste material em testes de compressão para a geometria real do *honeycomb*.

## 6. Análise de Resultados

### 6.1. Resultados do Impacto Lateral

No subcapítulo “5.3.1.1.” foi definido o ponto máximo de compressão da estrutura de *honeycomb*. Este ponto determinou que, estando o *honeycomb* no seu estado de máxima compressão, a sua capacidade de absorção de energia no domínio plástico atinge o pico, indicando que o material ficou, após este ponto, totalmente compactado. Este comportamento implica que, para uma situação de impacto em que a energia não seja totalmente absorvida pela estrutura de *honeycomb*, e que provoque uma deformação para além desse ponto de compressão máxima, certamente ocorrerão deformações nos componentes adjacentes. Este comportamento, para o estudo em causa, é um fator delimitante na análise da capacidade de absorção de impacto da estrutura deformável.

Das simulações desenvolvidas do impacto lateral foi obtida a deformação absoluta em milímetros para a estrutura de *honeycomb*, quando sujeita a diferentes tipos de velocidades de impacto. As simulações foram realizadas com incrementos de  $2.5 \text{ Km/h}$ , inicializando em  $2.5 \text{ km/h}$ , até que os resultados da deformação do *honeycomb* ultrapassassem esse ponto estabelecido, de onde se obteve as curvas da Figura 51. A medição desta deformação foi obtida através do nó de maior deslocamento, uma vez que a deformação é uma medida relativa que se encontra diretamente relacionada ao deslocamento absoluto em função do comprimento inicial da estrutura. Para esta situação de impacto controlado, aplicado ao longo de um eixo direcional (“Z”), assume-se que o deslocamento desta face, representa a deformação total acumulada na direção de impacto. Como foi descrito anteriormente, as simulações para cada velocidade terminaram quando o punção ficou totalmente imobilizado

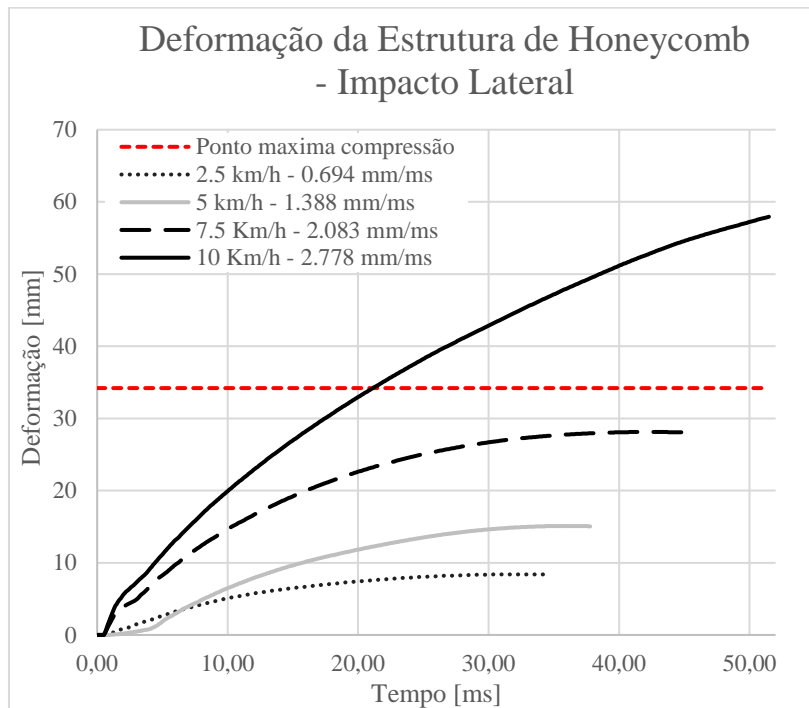


Figura 51 - Deformação da estrutura de *honeycomb* [mm] em função do tempo de simulação [ms] (impacto Lateral)

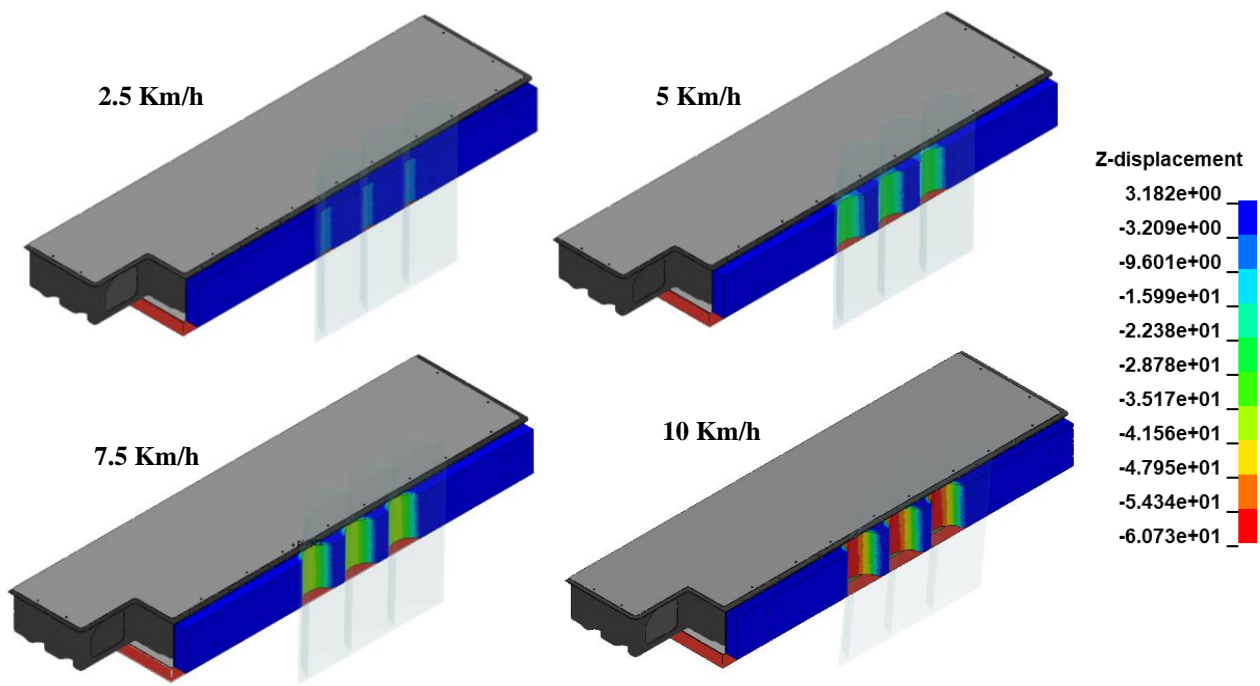
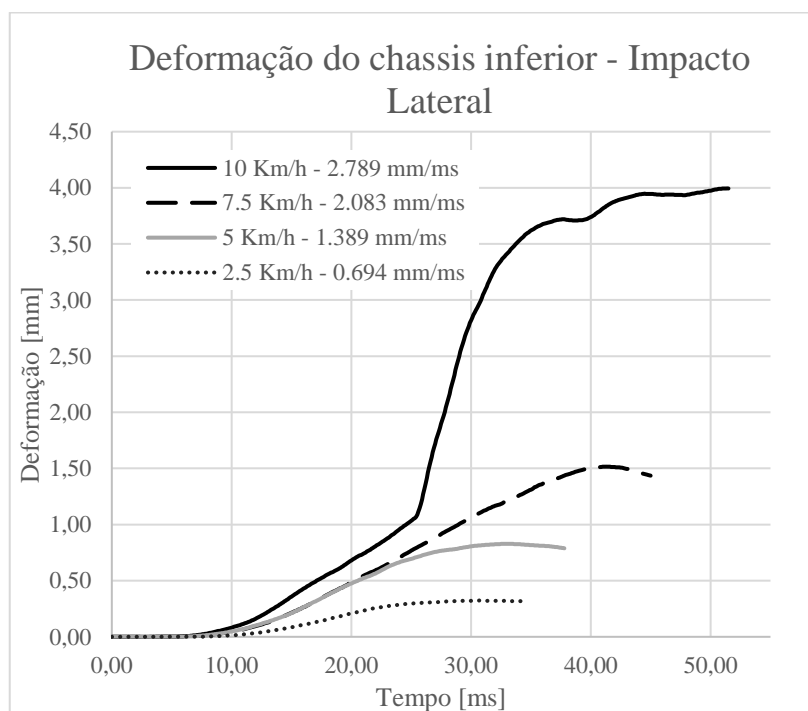


Figura 52 – Representação ilustrativa do Deslocamento máximo [mm] da estrutura de *honeycomb*, (impacto lateral) no LS\_DYNA.

Das velocidades de impacto aplicadas ao punção é possível visualizar, no gráfico da Figura 51 que para 10 Km/h, a deformação da estrutura de *honeycomb* ultrapassa o ponto de compressão máxima e provoca um deslocamento para além da sua espessura inicial, que afetará os componentes adjacentes. O componente adjacente que carece de uma análise detalhada à sua deformação é o chassis inferior, uma vez que este é responsável pelo isolamento e posicionamento dos componentes internos da bateria de alta tensão, onde a sua deformação não é desejável.

De maneira a confirmar esse comportamento, recorreu-se à medição do deslocamento dos nós das faces laterais interiores do chassis, mais próximos dos componentes internos (Semicilindros), para todas as velocidades de impacto estudadas, obtendo o gráfico da Figura 53.



**Figura 53 - Deslocamento do chassis inferior [mm] em função do tempo [ms] (impacto lateral).**

A ilustração da Figura 54, demonstra o deslocamento absoluto do chassis inferior no eixo direcional "Z", com o seu valor máximo presente nas faces laterais planas e não nas faces do semicilindros, daí existir uma diferença entre os valores apresentados no gráfico da Figura 52.

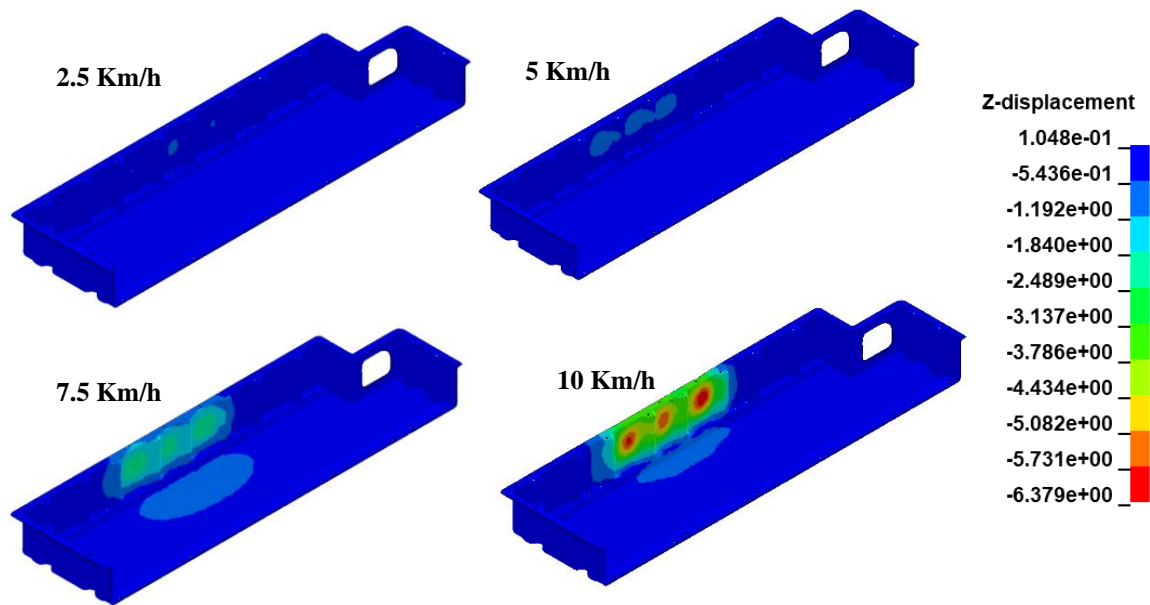


Figura 54 – Representação ilustrativa do deslocamento absoluto [mm] do chassi inferior, (impacto lateral) no LS\_DYNA.

O facto de ocorrer deformação no chassi inferior, implica que o *honeycomb* não teve a capacidade de dissipar a totalidade da energia de impacto, propagando-a para os componentes adjacentes. Sabendo que a energia cinética do embate é convertida em trabalho de deformação, no gráfico da Figura 53 é possível observar o momento (aos 25 ms) em que a energia do impacto é transmitida com maior intensidade para o chassi inferior provocando um aumento acentuado do declive até atingir um planalto de deformação máxima de 3.89 mm. Contudo, esta deformação máxima não alcança a posição dos componentes internos, devido ao espaço vazio entre a parede interna do chassi inferior e os módulos.

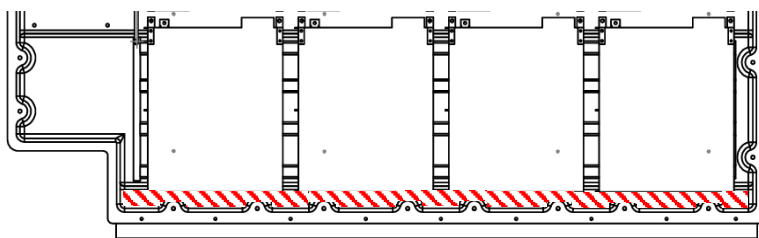
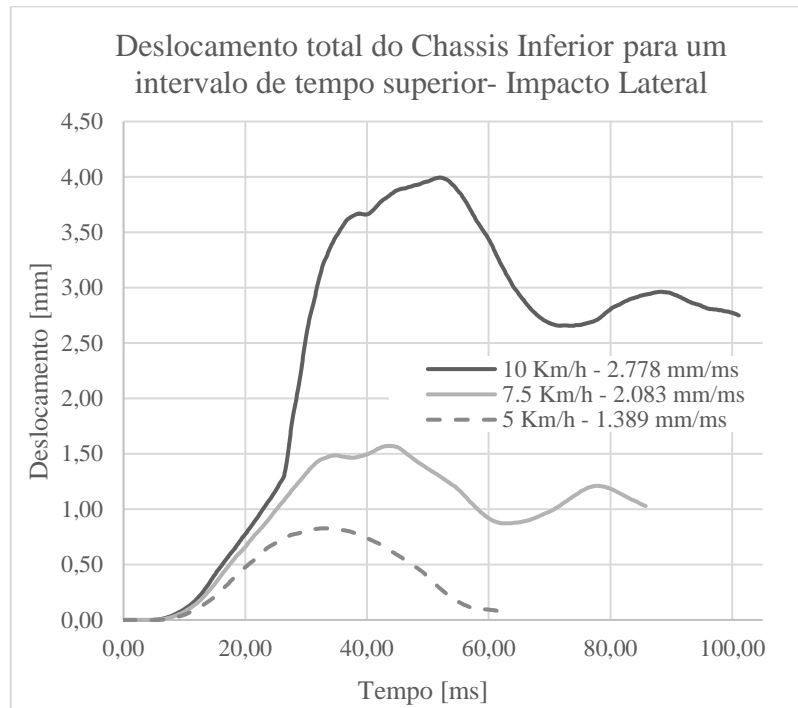


Figura 55 - Folga entre a parede interna do chassi inferior e os módulos da bateria de alta tensão (Tracejado a vermelho).

De modo a permitir compreender melhor a deformação no chassi inferior, repetiram-se as simulações das velocidades mais altas, desta vez sem a limitação de terminar quando o punção atinge uma energia cinética nula até que, para a velocidade de impacto estudada, não ocorresse deformação plástica no componente. Analisando os resultados das velocidades mais elevadas, para além do limite

anteriormente estabelecido, parte desta deformação máxima é para ambas as velocidades de impacto, recuperada devido às propriedades no domínio elástico do material que o constitui. No entanto o domínio elástico é ultrapassado, alcançando o domínio plástico, onde a deformação se torna permanente. Este comportamento pode ser observado nos resultados do deslocamento do chassis inferior com maior tempo de simulação, apresentado na Figura 56:



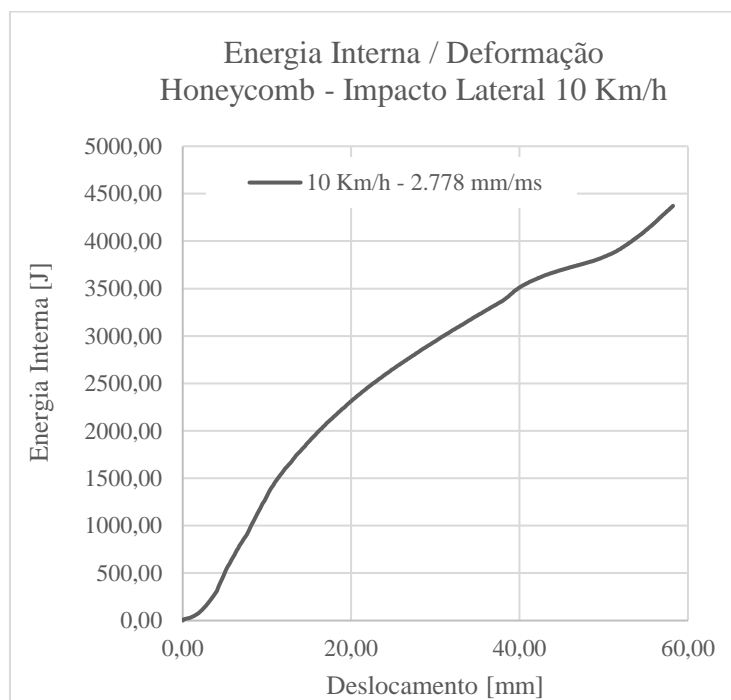
**Figura 56 - Deslocamento Total do chassis inferior [mm] em função do tempo da simulação [ms], (impacto lateral).**

Para a velocidade de impacto de 10 *Km/h*, numa fase inicial, o deslocamento aumenta rapidamente de forma quase-linear, representando um comportamento elástico, onde o material poderá ter capacidade de voltar à sua forma original caso a carga seja removida. Contudo, nesta situação, a carga continua a ser aplicada, e a partir dos 40-50 *ms*, o deslocamento atinge um platô e diminui ligeiramente até estabilizar novamente próximo dos 2.80 *mm*. No domínio plástico a estrutura sofre deformações irreversíveis, evidenciadas pela estabilização próxima dos 2.80 *mm*, o que indica que o limite elástico do material foi excedido. A curva da deformação para a velocidade de impacto de 7.5 *Km/h* descreve um comportamento semelhante. Para a velocidade de impacto de 5 *Km/h*, o comportamento da estrutura ocorreu exclusivamente no domínio elástico, permitindo que o material se aproxime da sua posição inicial.

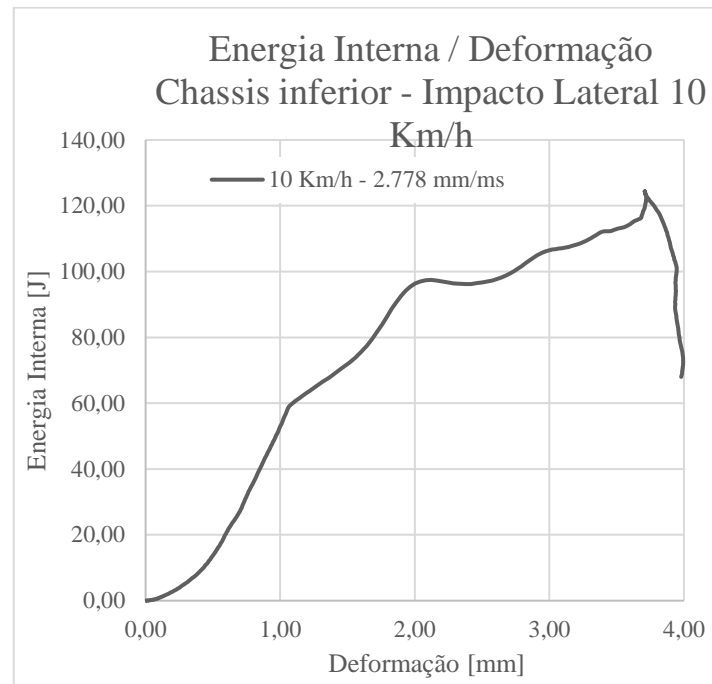
Para todas as velocidades de impacto existem deslocamentos ligeiros na estrutura do chassis. Este comportamento poderá estar relacionado pelo facto de que, embora a estrutura de *honeycomb* apresente a capacidade de absorver a maioria da energia gerada na colisão de forma eficiente e não

se deformar para além do seu ponto de compressão máximo, esta não elimina a existência de eventuais tensões residuais que acabam por ser transmitidas para os componentes adjacentes, chegando a deformar ligeiramente o chassi inferior, mesmo para velocidades de impacto mais baixas.

Quando um objeto colide com uma estrutura, a sua energia cinética é, em grande parte, convertida em energia interna manifestada na forma de deformação nos componentes sujeitos à colisão. Uma análise da energia interna dos dois principais componentes que envolvem estas estruturas ajudam a entender a capacidade de absorção de energia do sistema híbrido. Estas podem ser vistas com recurso ao gráfico da Figura 57, Figura 58, respetivamente, e uma visão sobre uma escala temporal na Figura 59:



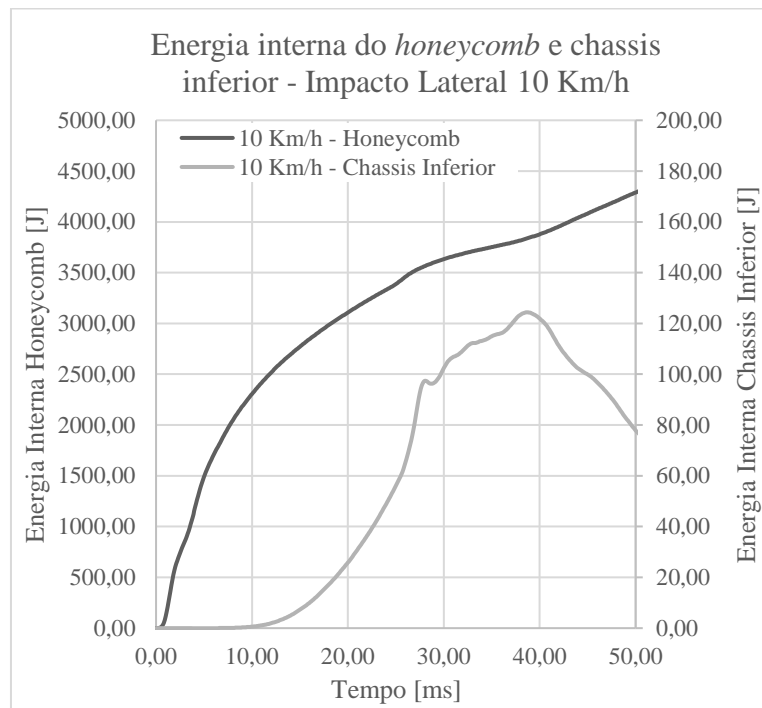
**Figura 57 – Energia Interna [J] em função da deformação [mm] do *honeycomb* (impacto lateral).**



**Figura 58 – Energia Interna [J] em função da deformação [mm] do chassi inferior (impacto lateral).**

Na Figura 57, a energia interna do *honeycomb* apresenta inicialmente um declive mais acentuado, diminuído gradualmente à medida que a deformação acontece, atingido um pico de 4371 J e uma deslocamento máxima de 58 mm. A ocorrência de deformação no chassi inferior indica que este absorveu parte da carga de impacto do punção. Este processo resulta num aumento da energia interna do chassi inferior que ocorre com uma diferença de 12 ms após o aumento de energia interna do *honeycomb* (Figura 59). A curva deste componente sofre um aumento de energia interna

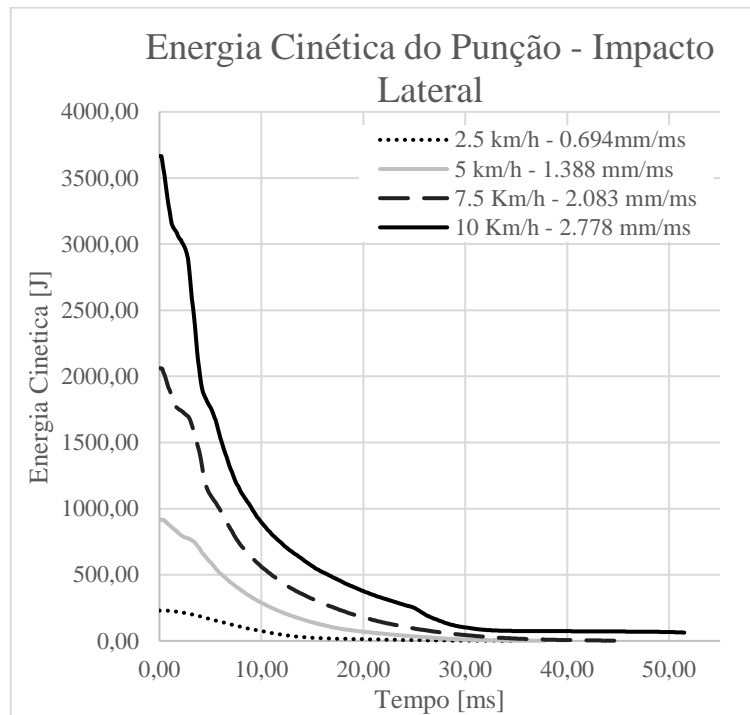
relativamente linear até ao pico de 124 J. Após este pico ocorre uma queda abrupta que sugere que o material não consegue suportar mais o impacto, resultando numa deformação permanente.



**Figura 59 – Energia interna [J] em função do tempo [ms] do honeycomb e chassi inferior (impacto Lateral).**

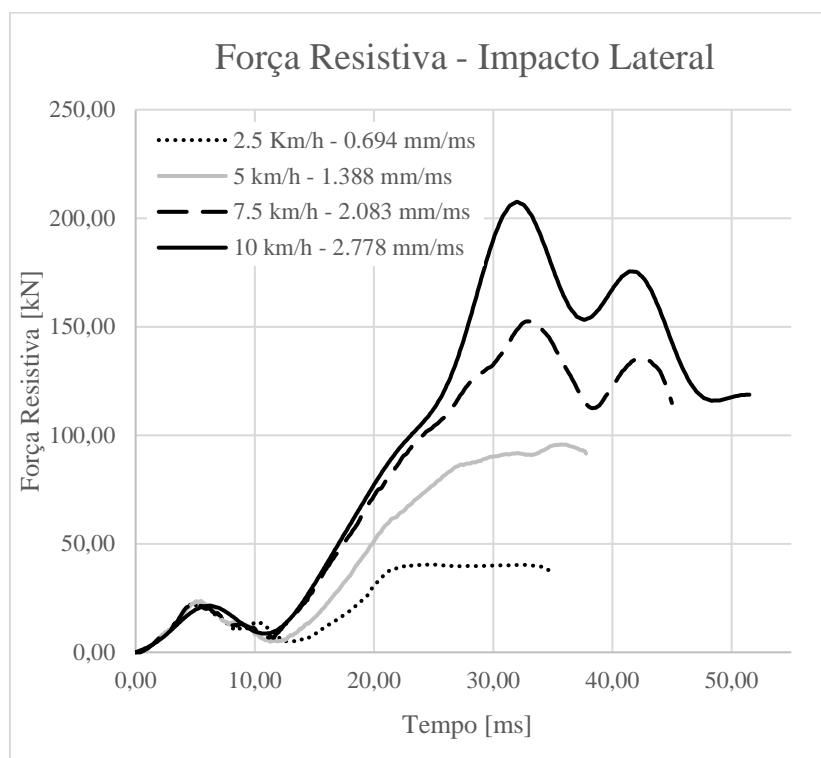
O facto de que a energia interna do chassi inferior permanece praticamente nula, durante os 12 milissegundos após o impacto inicial na estrutura, assim como as diferenças entre valores de energia interna serem bastante reduzidas para o chassi inferior, confirma que, a maioria da energia está a ser absorvida pelo *honeycomb* e apenas após este atingir seu ponto de compressão máxima é que ocorre um aumento na energia interna do chassi, sinalizando o início da sua deformação.

O comportamento da energia cinética do punção é inversamente proporcional ao aumento da energia interna nos componentes onde provoca deformação. A energia cinética do punção durante o impacto é transferida para a estrutura deformável na forma de trabalho mecânico. Essa transferência de energia, faz com que a sua velocidade diminua progressivamente, o que consequentemente diminui a energia cinética (Figura 60) à medida que ocorre deformação plástica dos favos de mel da estrutura de *honeycomb*, e eventualmente para a deformação dos componentes adjacentes, até que atinja os 0 J, significando que o punção ficou imobilizado.



**Figura 60 – Energia cinética [J] do punção em função do tempo [ms] (impacto lateral).**

Esta absorção de energia cinética resulta numa força resistiva por parte da estrutura que sofreu colisão. A força resistiva numa situação de impacto representa a força total que atua sobre o sistema híbrido em resposta ao impacto, ou seja, quanto maior for a energia cinética inicial aplicada ao punção maior será a força resistiva da estrutura híbrida. No gráfico da Figura 61, é possível visualizar as forças resistivas do sistema híbrido completo, causadas pelo impacto para as diferentes velocidades em análise. Estas foram medidas nos nós de constrangimento definidos pela função “SPCFOURC”



**Figura 61 - Força Resultante [kN] em função do tempo de simulação [ms], nos nós do constrangimento (SPC) (impacto Lateral).**

Para velocidades mais altas a energia cinética é superior e a estrutura que sofreu colisão deforma-se num menor espaço de tempo, o que resulta em picos de força resistiva mais elevados. À medida que a energia cinética tende para 0 J, a força resistiva tende a estabilizar para as velocidades mais baixas e a diminuir para as mais altas. Isto acontece, pois, os componentes do sistema híbrido já absorveram a maior parte da energia de impacto e o movimento residual é mínimo.

Efetivamente os picos de força resistiva representam a maior resistência momentânea que o material oferece contra o impacto, antes de ceder. No gráfico da Figura 61 é evidente para todas as velocidades, que entre os 0 e 10 ms, ocorre um primeiro pico de força resistiva. Este representa a resposta inicial da estrutura deformável. Neste intervalo a energia cinética do punção começa a ser transferida para a estrutura, resultando numa rápida elevação da força resistiva.

Nos picos subsequentes, ao intervalo de tempo referido anteriormente, existe a ocorrência de oscilações (mais evidentes para 7.5 Km/h e 10 Km/h). Estas flutuações na força resistiva originam da reação do sistema híbrido à colisão, onde alguns materiais, nomeadamente as estruturas de alumínio que suportam o *honeycomb* e o chassis inferior possuem um comportamento elástico. O facto de o sistema híbrido apresentar uma estrutura com múltiplas camadas de diferentes tipos de material, poderá estar associado á oscilação que ocorre após o pico da força resistiva, devido á interação entre estes componentes no momento da colisão.

## 6.2. Resultados do Impacto inferior

Como foi definido no subcapítulo “5.3.1.1.”, para esta simulação foi mais uma vez, tido em conta o ponto máximo de compressão do *honeycomb* como fator delimitante para o número de simulações. As simulações individuais terminaram quando o punção ficou imobilizado, ou seja, quando atingisse uma energia cinética nula.

Das simulações realizadas, visualizou-se que para a deformação da estrutura de *honeycomb*, as diferenças de resultados entre curvas do deslocamento eram bastante pequenas entre as duas primeiras velocidades quando sujeita a incrementos de  $2.5 \text{ Km/h}$ . Com esta informação, decidiu-se que a partir da segunda iteração seria ajustado o incremento de velocidade para o dobro, de modo a reduzir o número de simulações necessárias até que a deformação na estrutura de *honeycomb* atingisse o seu ponto máximo de compressão.

Para as simulações de impacto inferior, foram obtidos os resultados da deformação plástica na estrutura de *honeycomb* de alumínio através da medição do nó de maior deslocamento da face exterior do *honeycomb*, semelhante à simulação do impacto lateral, obtendo o gráfico da Figura 62.

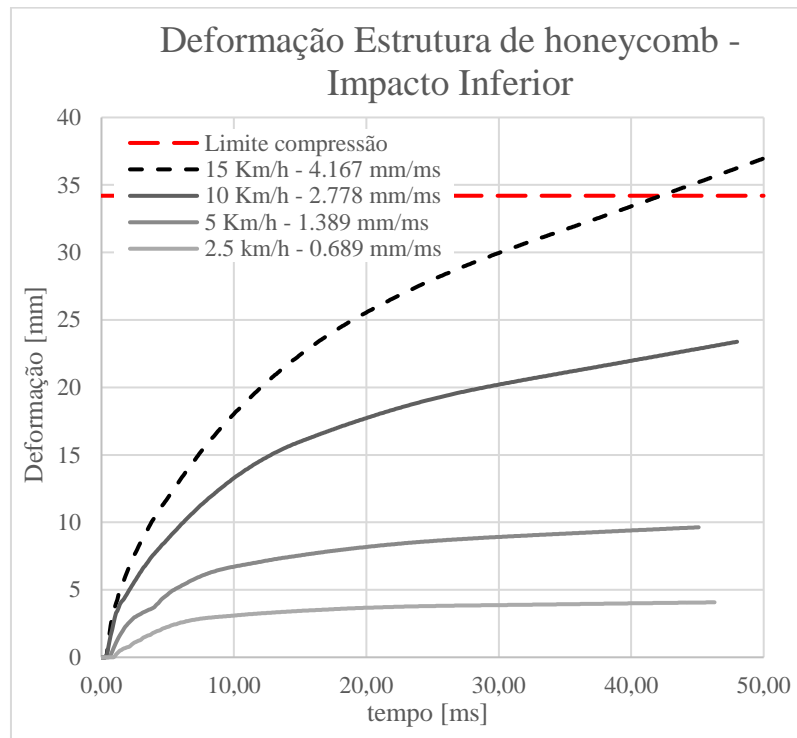


Figura 62 - Deformação da estrutura de *Honeycomb* [mm] em função do tempo de simulação [ms] (impacto inferior).

O deslocamento absoluto da estrutura de *honeycomb* no eixo direcional “Z”, para as diferentes velocidades de impacto, pode ser visualizada na ilustração da Figura 63:

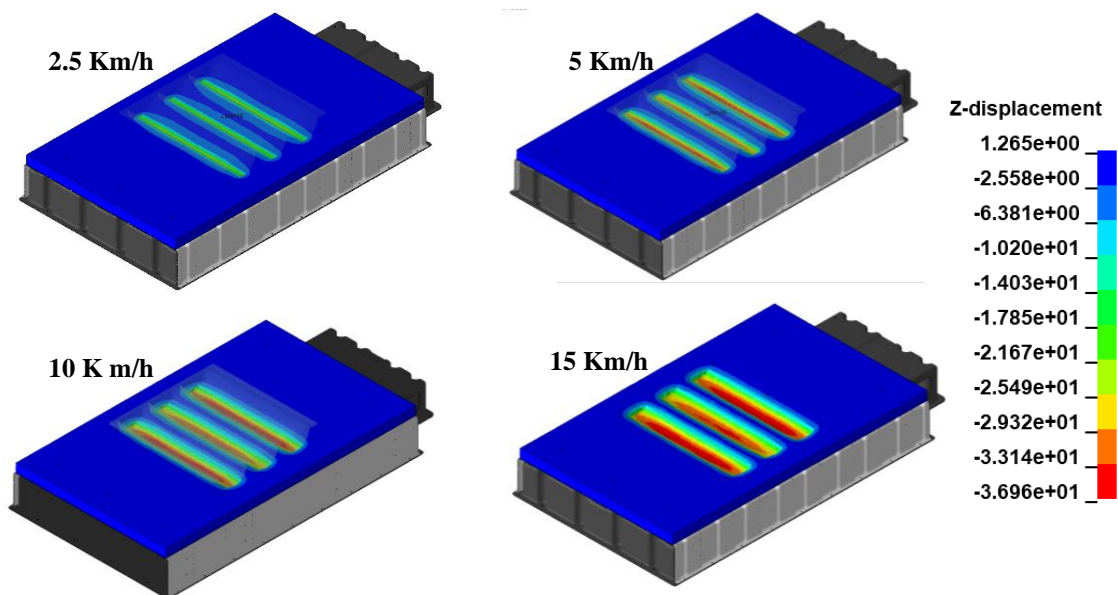
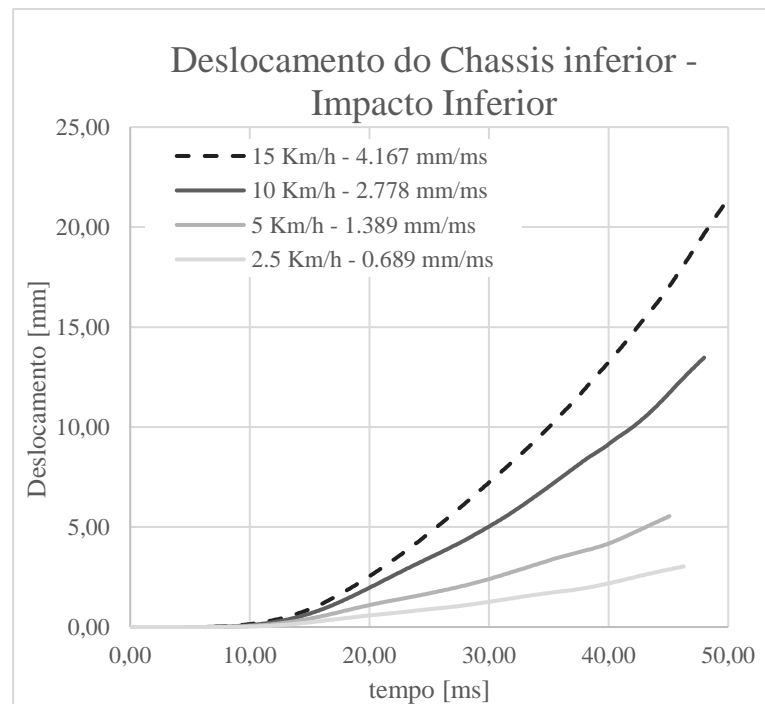
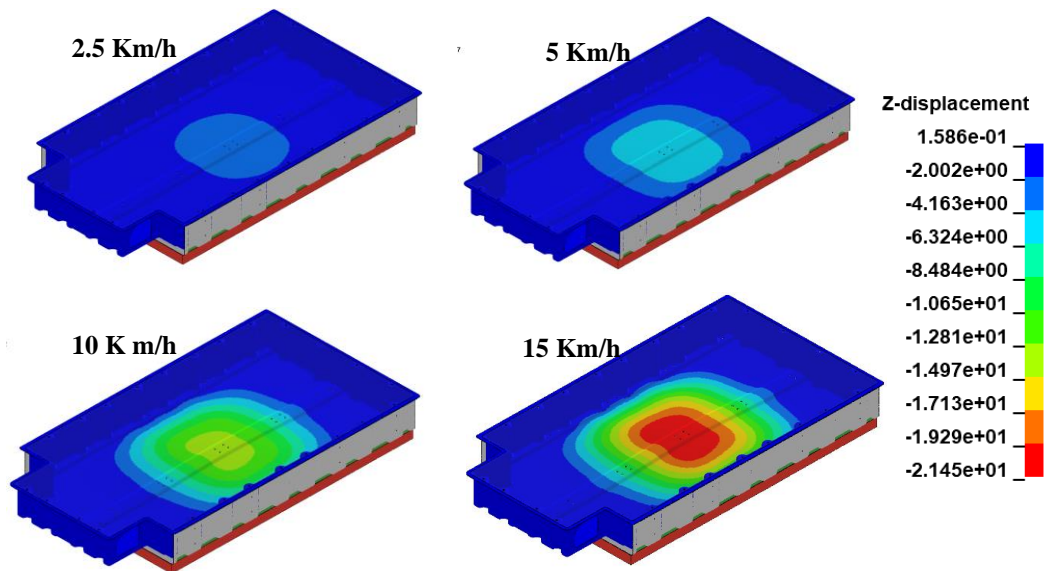


Figura 63 – Representação ilustrativa do deslocamento máximo [mm] das estruturas de *honeycomb* (impacto inferior), no LS\_DYNA.

Nas figuras anteriores é possível observar que para velocidade de impacto de 15 Km/h, a estrutura de *honeycomb* deslocou-se para além do seu estado de compressão máxima. Este comportamento sugeria um resultado semelhante ao do impacto lateral, onde se obteve deformação acentuada dos componentes adjacentes à estrutura deformável, com especial atenção ao chassis inferior, quando a deformação gerada pelo impacto ultrapassasse esse respetivo limite. No entanto, observando os resultados das deformações ao nível do chassis inferior (Figura 64, e na representação ilustrativa da Figura 65), estas apresentam valores de deslocamento máximos muito mais elevados face aos resultados no impacto lateral.



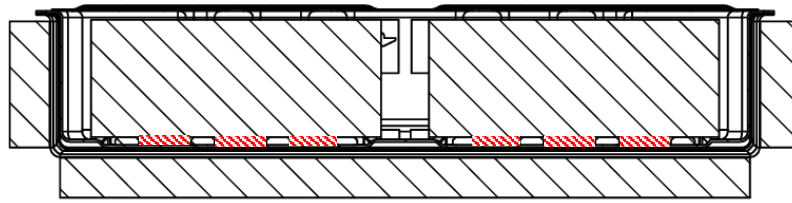
**Figura 64 - Deformação do chassis inferior [mm] em função do tempo de simulação [ms] (impacto inferior).**



**Figura 65 – Representação ilustrativa do deslocamento máximo [mm] no chassi inferior (impacto inferior) no LS\_DYNA.**

Na simulação de impacto inferior, existe uma deformação total significativa do chassi inferior para todas as velocidades de impacto estudadas. Para impacto para a velocidade de 15 Km/h, no chassi inferior, não ocorre um aumento espontâneo do declive na curva de deformação no ponto onde é transmitida a energia residual que não foi absorvida pela estrutura deformável, indicando uma transferência de energia entre componentes menos notável e mais suave.

A existência de componentes, como os módulos e o sistema de refrigeração, diretamente fixos ao plano de fundo do chassi inferior, não permitem a sua deformação, ver Figura 66. O facto deste plano de fundo do chassi inferior se deformar, seja no domínio elástico ou plástico, mesmo para velocidades inferiores, põe em causa os componentes internos do sistema e por consequência, o correto funcionamento da bateria de alta tensão.



**Figura 66 – Espaço vazio (Tracejado vermelho) em vista de corte do sistema híbrido de armazenamento da bateria de alta tensão.**

Analisando especificamente o comportamento do *honeycomb* e do chassis inferior para a velocidade de impacto de 15 Km/h, cujo punção conseguiu deformar esta estrutura até ao seu ponto máximo de compressão, é possível aprofundar as razões que provocam as diferenças no comportamento entre o impacto lateral e inferior.

Semelhante ao referido no subcapítulo anterior, numa colisão a energia cinética do punção é convertida em energia interna, manifestada na forma de deformação nos componentes que foram sujeitos á colisão. De modo a compreender melhor a capacidade de absorção de energia deste sistema para impactos aplicados ao plano inferior, foi elaborada uma análise da energia interna dos dois principais componentes do sistema híbrido, com recurso aos gráficos da Figura 67, Figura 68 e a linha temporal das energias internas na Figura 69.

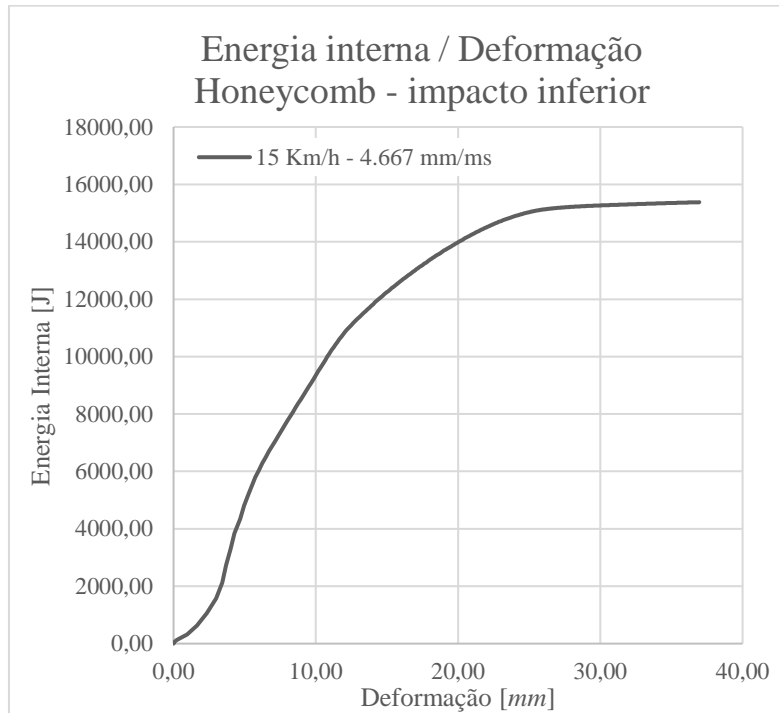


Figura 67 – Energia Interna [J] em função da deformação [mm] do *honeycomb* (impacto inferior).

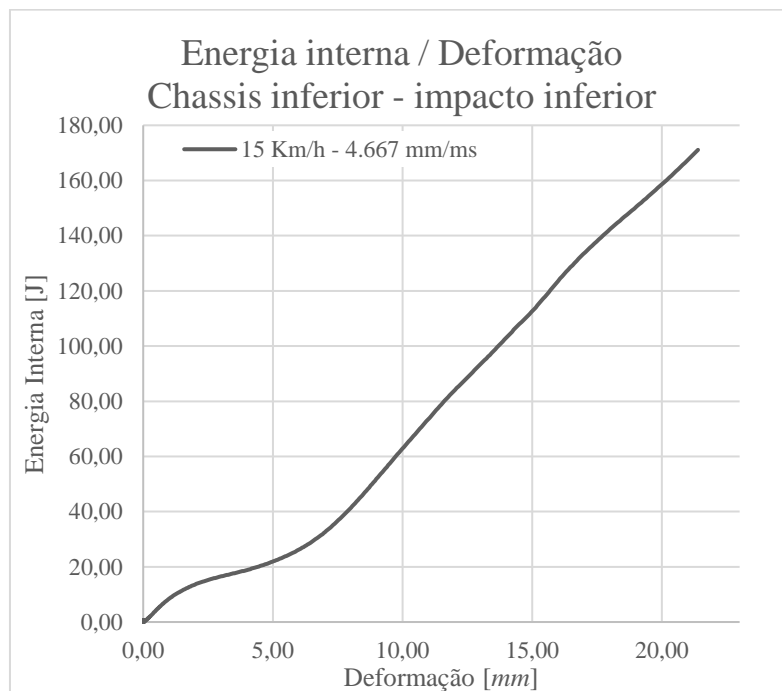
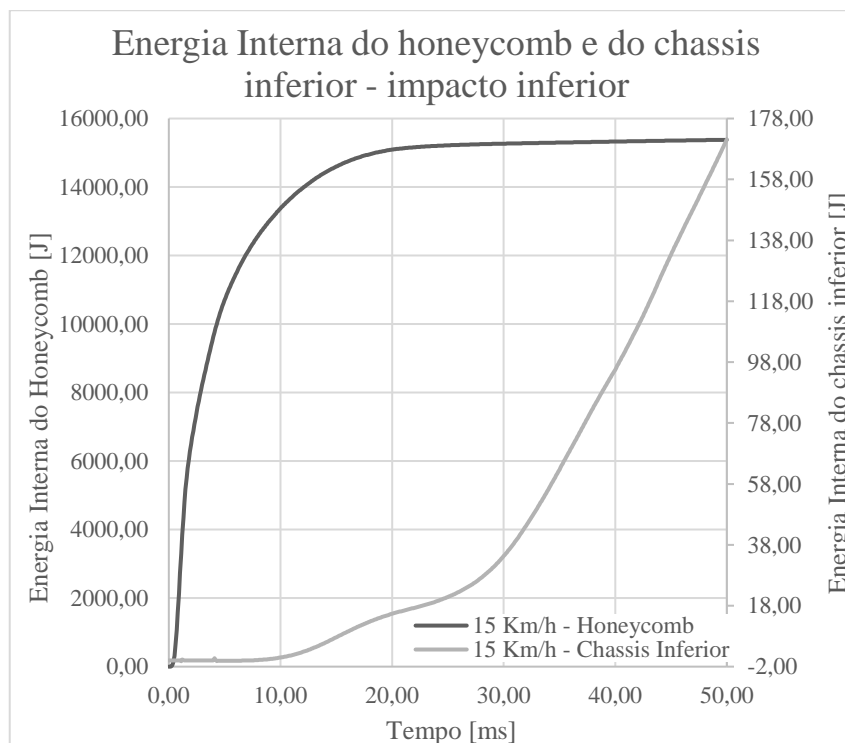


Figura 68 - Energia Interna [J] em função da deformação [mm] do chassis inferior (impacto inferior).

No gráfico da Figura 67, os valores máximos de energia interna acumulada para a estrutura de *honeycomb* são bastante superiores face ao impacto lateral, com comportamentos de curvas semelhantes. No gráfico da figura 68, a curva do chassis inferior apresenta inicialmente um declive mais acentuado face ao impacto lateral tornando-se praticamente linear até atingir um pico de 171 J,

também superior aos valores para o mesmo componente, quando sujeito ao impacto na direção lateral.

Em relação à escala temporal dos acontecimentos, estas permanecem semelhantes, com uma diferença de cerca de 12 ms entre aumentos de energia interna, ou seja, entre os momentos de início de ocorrência de deformação (Figura 69). Como foi referido anteriormente, a principal diferença quando comparados ao impacto lateral, tanto para o *honeycomb* como para o chassis inferior, são os valores máximos absolutos da energia interna e deformação e os comportamentos gerais da curva.

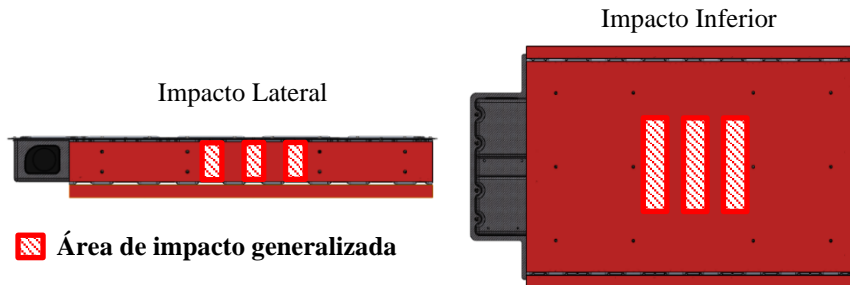


**Figura 69 – Energia interna do *honeycomb* e chassis inferior [J] em função do tempo de simulação [ms] no impacto inferior**

Esta diferença de resultados poderá ser justificada por um conjunto de 3 fatores:

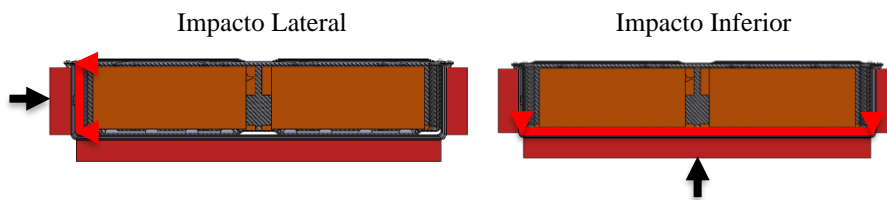
O primeiro, e mais obvio, será a diferença entre as velocidades entre as simulações analisadas, que faz com que a energia cinética do punção, que é proporcional ao quadrado da velocidade, aumente 50 % quando comparado ao impacto para a velocidade de 10 Km/h. Essa energia cinética foi absorvida, em forma de deformação, pelo sistema híbrido, resultando numa curva com valores de energia interna mais elevados.

O segundo, estará relacionado com a diferença entre a área de impacto. Quando o impacto ocorre numa área maior, constituída do mesmo material, este apresentará uma capacidade de absorção de energia superior a uma área de impacto inferior. Isto acontece porque existe uma maior quantidade de material e um maior volume disponível para ocorrer deformação. Essa diferença é visível na Figura 70:



**Figura 70 - Diferença entre áreas de impacto das simulações de impacto inferior e lateral**

A terceira razão, será a diferença na maneira como é transferida energia para o chassi inferior. Para o impacto inferior a energia absorvida pelo chassi é muito mais pronunciada e apresenta valores de deformação superiores, indicando que o *honeycomb* não conseguiu dissipar toda a energia gerada na colisão. A razão por detrás deste acontecimento relaciona-se com distância de afastamento dos suportes do chassi inferior no seu plano inferior (A vermelho na Figura 70) que propagam as forças causadas pelo impacto. Esta distância superior faz com que o plano de fundo do sistema seja mais suscetível à flexão tendo em conta a zona onde ocorre o impacto. Para ajudar a entender este conceito observa-se a Figura 71, com um esquemático do estudo para os dois tipos de impacto:



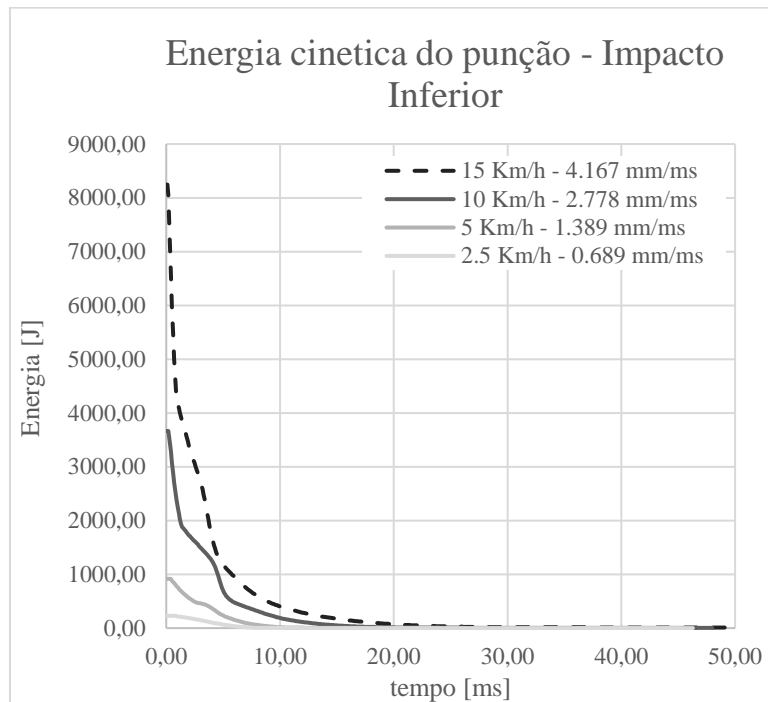
**Figura 71 - Zonas de propagação das forças de impacto e áreas de impacto para a simulação de impacto lateral e inferior**

Analisando o problema no plano bidimensional (2D), como é demonstrado na figura anterior, sabe-se que quando uma carga é aplicada no centro de uma barra que esteja apoiada em ambas as extremidades, são geradas forças internas que originam momentos fletores ao longo de todo o comprimento da barra. Este momento fletor é maior no ponto onde a carga é aplicada, pois a distância da carga em relação aos pontos de apoio é máxima. Sabendo que o momento fletor é diretamente

influenciado por essa distância, à medida que o comprimento dessa barra aumenta, o momento fletor aumenta proporcionalmente. O ponto onde ocorre esse momento é o ponto de maior flexão da barra. Para um plano 3D, idêntico ao plano de fundo do chassi inferior, a situação é semelhante, onde ao ser aplicado uma força, é gerado tensões que causam a deformação máxima nesse ponto. Resumidamente, à medida que o comprimento do plano aumenta, a sua deflexão máxima também aumenta, fazendo com que planos mais compridos como o plano de fundo do chassi inferior, sejam mais suscetíveis à flexão, apresentando uma maior deformação quando comparado a planos mais curtos como a face lateral do chassi inferior.

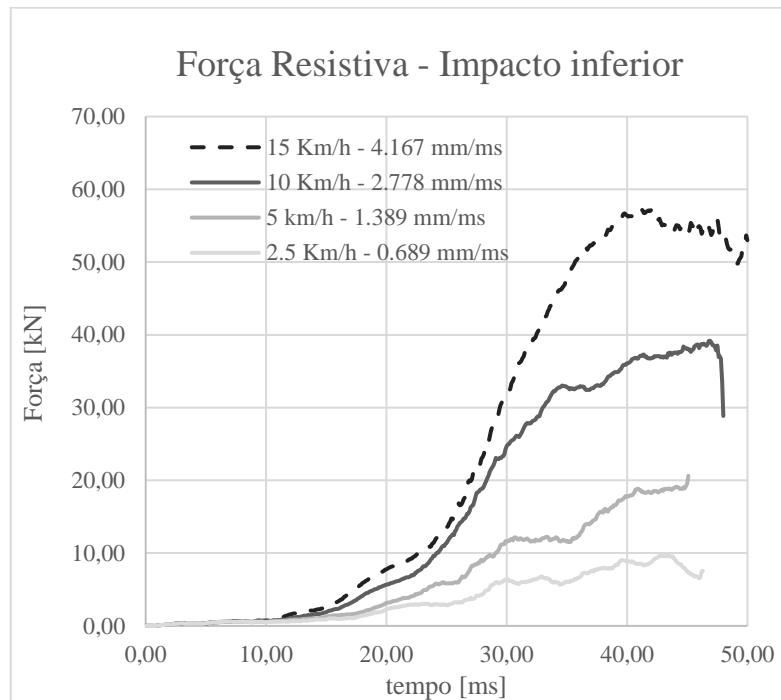
A ocorrência de um aumento de energia interna com um declive mais acentuado no componente da estrutura indeformável, acontece principalmente pela falta de existência de suporte no local de impacto, provocando uma deflexão mais acentuada do sistema híbrido. Em termos de eficiência, a estrutura de *honeycomb* consegue, dadas as circunstâncias, absorver a maior parte da energia cinética do impacto. No entanto, devido à ausência de um suporte adequado na zona de impacto, parte dessa energia é transferida mais rapidamente para os componentes adjacentes, em especial para o chassi inferior. O chassi, que é composto por fibra de carbono com alta rigidez e resistência, consegue absorver o restante da energia do impacto. Essa transferência de energia permite ao chassi inferior, suportar a carga residual e imobilizar completamente o punção.

Este comportamento faz com que a energia cinética do punção seja absorvida de forma mais eficiente, ou seja com um declive ligeiramente mais acentuado e num intervalo de tempo inferior, quando comparado ao gráfico da Figura 60, do Subcapítulo 6.1., da simulação de impacto lateral, no entanto, esta eficiência não representa um comportamento positivo para a funcionalidade do sistema, ver Figura 72.



**Figura 72 - Energia Cinética do punção [J] em função do tempo de simulação [ms] para a simulação de impacto inferior**

Como a força resistiva é resultante da absorção de energia pelo sistema híbrido, e sabendo que, de forma geral, essa absorção ocorre de maneira mais eficiente, é possível observar, no gráfico da Figura 73, uma diminuição dos valores máximos da força resistiva. Estes valores máximos representam o momento onde a maior parte da energia cinética do punção já foi dissipada pelo sistema híbrido.



**Figura 73 - Força resistiva [kN] em função do tempo em [ms] para a simulação de impacto inferior**

Na situação de impacto inferior, uma análise global demonstra que parte da energia gerada pelo impacto é dissipada com auxílio da deformação que ocorre nos componentes adjacentes ao *honeycomb*. Isto significa que o desempenho das faces laterais da estrutura deformável enquadra melhor os objetivos da capacidade de resistir a impactos sem a deformação de componentes adjacentes à estrutura deformável, mesmo para velocidades de impacto inferiores, e que, dado o desempenho da zona inferior desta estrutura, criou-se uma zona de possível vulnerabilidade quando sujeita a este tipo de impactos. Desta forma é garantida a proteção dos componentes internos da bateria de alta tensão apenas para a direção de impacto lateral.

### 6.3. Análise quantitativa dos resultados dos impactos

De forma a visualizar análise anterior de forma quantitativa foi construída a Tabela 19, onde são apresentados os valores máximos de cada uma das variáveis analisadas que caracterizam os limites da capacidade de absorção de energia da estrutura híbrida para as velocidades de impacto estudadas.

**Tabela 19 - Análise quantitativa do impacto lateral e inferior para as velocidades de impacto estudadas no momento de imobilização do punção.**

Velocidade de impacto [Km/h]	Impacto Lateral			Impacto Inferior		
	Deslocamento <i>Honeycomb</i> [mm]	Deslocamento máximo do chassis [mm]	Força Resistiva S. Híbrido [kN]	Deslocamento <i>Honeycomb</i> [mm]	Deslocamento máximo do chassis [mm]	Força Resistiva S. Híbrido [kN]
2.5	8.40	0.32	40.65	4.07	3.03	9.03
5	15.06	0.86	95.71	9.63	5.54	20.62
7.5	28.12	1.44	152.57	Não implementado		
10	58.23	3.89	207.61	23.38	13.47	39.19
15	Não implementado			36.96	21.40	57.27

#### 6.3.1. Deformação do *honeycomb* e chassi inferior

O deslocamento do *honeycomb*, representada na Tabela 19, é maioritariamente plástica devido às características do material. Como foi referido no início do Subcapítulo 6.1. a deformação deste componente foi obtida através da medição do nó de maior deslocamento no momento de impacto. Como é esperado, para ambos os impactos, a deformação do *honeycomb* aumenta com a velocidade do punção, no entanto, é visível que esta é significativamente superior para o impacto lateral. Para os impactos a 10 Km/h, estudadas para os dois tipos de impacto, a deslocação máxima deste componente do impacto na direção lateral é de 58.23 mm, enquanto para o impacto inferior esse valor diminui para os 23.38 mm. Sabendo que a espessura do material de alumínio é igual para as duas direções, esta diferença é justificada pelas desigualdades geométricas das estruturas, como: A área de impacto; a distância da zona de impacto aos pontos de apoio das estruturas do sistema híbrido; e a existência de colunas cilíndricas nas faces laterais que melhoram a sua rigidez estrutural.

Observando os valores do deslocamento máximo do chassi interior, é visível que estes, semelhante ao comportamento anterior, também aumentam conforme a velocidade de impacto aumenta. Para a situação de impacto lateral em específico, este deslocamento foi medido na face do chassi mais próxima aos componentes internos, com o objetivo de avaliar se este os atingia ou não. Para todas as velocidades de impacto lateral, nenhum componente foi atingido, no entanto, como foi visto no Subcapítulo 6.1., para as velocidades de impacto mais altas (10 Km/h e 7.5 Km/h) existe a

ocorrência de deformação permanente no chassi inferior, o que poderá ser suficiente para garantir a necessidade de substituição da bateria. Para velocidades de impacto inferiores a 5 *Km/h* a deformação no chassi inferior ocorre exclusivamente no domínio elástico, possibilitando ao componente de recuperar a sua geometria original, cumprindo o seu objetivo de garantir a proteção total da bateria de alta tensão, pois a deformação final é nula.

Para a situação de impacto na zona do plano inferior, o chassi também sofre deformação com valores ligeiramente superiores ao do impacto lateral. Por exemplo, para 10 *Km/h* o deslocamento máximo é de 13.47 *mm*, um valor consideravelmente maior do que os 3.89 *mm* de impacto lateral. Esta diferença torna evidente a vulnerabilidade do plano de fundo do chassi inferior uma vez que qualquer deformação que ocorra neste ponto da estrutura entrará em contacto direto com os componentes internos da bateria. Como o plano de fundo do chassis inferior é responsável pela fixação dos componentes, não existe margem para que ocorra deformação neste componente sem colocar em causa os componentes internos. Isto significa que para todas as velocidades de impacto estudadas, a implementação da estrutura deformável para proteção da estrutura indeformável não foi bem-sucedida, requerendo alterações futuras.

### **6.3.2. Força resistiva do sistema híbrido**

Analisando os valores de força resistiva máxima para cada um dos impactos, é possível visualizar que para o impacto lateral as forças resistivas geradas são muito superiores às do impacto inferior nas mesmas velocidades. Para o impacto lateral a 10 *Km/h* a força resistiva máxima é de 207.606 *kN*, enquanto para o impacto inferior essa força é apenas 39.190 *kN*. Este comportamento sugere que o sistema híbrido oferece uma maior resistência sob impacto lateral, mais uma vez a evidenciando a vulnerabilidade gerada pela deformação das estruturas do sistema híbrido para impactos no plano inferior.

## **6.4. Limitações do sistema híbrido**

Tendo em conta as observações apresentadas anteriormente, em conjunto com a análise realizada nos Subcapítulos 6.1. e 6.2., foram permitidas identificar algumas limitações no sistema híbrido desenvolvido.

Para todas as velocidades de impacto estudadas é evidente a ocorrência de deformação no chassi inferior. O chassi inferior é o componente principal na estrutura indeformável, e como o seu nome indica não deverá deformar-se. Para as simulações de impactos laterais apenas para as velocidades mais altas (10 *Km/h* e 7.5 *Km/h*) ocorre deformação permanente do chassi inferior, indicando que

o sistema, para velocidades iguais ou superiores a estas, ficará vulnerável a impactos da mesma natureza, pondo em causa o seu objetivo principal.

Nas simulações do impacto inferior, tendo em conta os resultados da deformação do chassi da estrutura indeformável e o posicionamento dos componentes internos nesse local, evidencia-se, como foi referido anteriormente, uma zona vulnerável do sistema híbrido. Como tal, existe a necessidade da implementação de soluções, que melhorem a integridade estrutural nesta zona. Estas melhorias poderão estar associadas à escolha de diferentes materiais, alterações da espessura, ou ao desenvolvimento de uma estrutura interna no sistema que reduza a deflexão na zona onde ocorreu o impacto. No tópico dos materiais, existe a possibilidade da alteração do tipo de *honeycomb* de alumínio utilizado no plano inferior. Um dos fatores que provoca uma transferência de energia prematura para os componentes adjacentes à estrutura deformável é a rigidez do *honeycomb* utilizado. A rigidez é influenciada diretamente pela densidade relativa deste material. Ajustando esta densidade, ou seja, ao aumentar o tamanho das células ou reduzir a espessura das suas paredes, possivelmente resultará numa maior capacidade de absorção de energia durante o impacto.

Considerando que o objetivo deste sistema é ser implementado num veículo elétrico, a inclusão de uma estrutura deformável ao redor da estrutura principal de armazenamento da bateria de alta tensão, exige ajustes no design do veículo para acomodar o espaço extra, sem que a sua adaptação comprometa outros aspetos do veículo.

## **6.5. Limitações da análise e simulação ao sistema híbrido**

Considerando os fatores limitantes da simulação inicialmente implementados, como a deformação do *honeycomb* além do ponto de compressão máxima e o momento de imobilização do punção, tornou-se necessário, durante este estudo, interpretar alguns resultados para além do tempo de simulação limitado pelas restrições previamente mencionadas. Embora as implementações destas limitações tenham reduzido significativamente a exigência computacional para a realização das simulações, em interações futuras deste trabalho, deverá ter-se em conta uma definição mais assertiva, de forma a garantir a uma análise uniforme dos resultados para todas as simulações implementadas.

Outra limitação da análise realizada foca-se na interpretação dos resultados para situações de colisão em veículos elétricos. Como as simulações de impacto foram realizadas diretamente contra o sistema híbrido de armazenamento da bateria de alta tensão, não existe maneira de prever o comportamento deste, para situações de impacto ao nível do veículo. Isso ocorre porque não foram encontrados exemplos de valores teóricos ou reais que correlacionassem a deformação no veículo, em caso de colisão, com a percentagem da energia de impacto que é transmitida à estrutura de armazenamento

da bateria de alta tensão. Por consequência, a análise da capacidade de absorção de energia deste sistema ficou limitada apenas aos resultados dos dois tipos de impacto estudados, e ao comportamento destes materiais quando sujeita a estes.

Além disso, no desenvolvimento dos modelos de material para as simulações, uma definição dos parâmetros mecânicos com recurso a ensaios experimentais aumentaria a credibilidade dos resultados. Realizar ensaios experimentais para obter esses parâmetros diretamente dos materiais estudados seria vantajoso, pois evitaria a dependência de referências bibliográficas ou de informações fornecidas por fabricantes, que foram limitadas ou em casos, imprecisas.

## 7. Conclusão

O presente estudo teve como objetivo principal o desenvolvimento de um uma estrutura de armazenamento de baterias de alta tensão que assegurasse a proteção dos seus componentes em caso de impacto, e que conseguisse minimizar a sua perda total para estes casos, permitindo a manutenção do conjunto sem existir a necessidade de uma substituição precoce.

Para tal, foram analisadas as principais tendências no design deste tipo de sistema de armazenamento de baterias de alta tensão, foram recolhidos os métodos atuais de testagem parametrizados e foi compreendido o estado atual da sustentabilidade em caso de colisão. Com base nos conhecimentos adquiridos, foi desenvolvido um novo conceito de sistema híbrido para o armazenamento de baterias de alta tensão. O desenvolvimento deste conceito envolveu uma análise criteriosa dos materiais que melhor se adequam às funcionalidades de cada estruturas, assim como o desenvolvimento de modelos equivalentes que ajudaram a diminuir os recursos computacionais utilizados nas simulações. Adicionalmente, foram desenvolvidas e implementadas as metodologias de testagem para simulações de impacto e testagem do *honeycomb* no software LS\_DYNA, visando determinar, respetivamente, o comportamento do material e os limites capacitivos deste novo sistema. Os resultados obtidos nas simulações de impacto do sistema híbrido evidenciam algumas vulnerabilidades nas estruturas desenvolvidas, sendo especialmente critica a situação para o impacto inferior.

Para o impacto lateral, e para as velocidades de impacto estudadas (até 10 Km/h), a deformação do sistema híbrido completo, não chega a comprometer diretamente os componentes internos da bateria de alta tensão. Por outro lado, ocorre uma situação inconveniente: Para as velocidades de impacto mais elevadas, 7.5 e 10 Km/h, o chassis inferior da estrutura indeformável sofre deformação plástica de  $\pm 1.10\text{ mm}$  e  $\pm 2.80\text{ mm}$  respetivamente. Esta deformação poderá ser suficiente para alguns construtores, justificarem a substituição total da bateria de alta tensão, por isso, para o impacto lateral e para as características do tipo de impacto estudadas, apenas para as velocidades até 5 Km/h, é cumprido o objetivo de proteger a estrutura indeformável. Para o impacto inferior, o sistema é ainda mais vulnerável, ocorrendo para todas as velocidades de impacto (de 2.5 Km/h a 15 Km/h) uma deformação máxima significativa no chassis inferior da estrutura indeformável que afeta diretamente os componentes internos da bateria de alta tensão devido aos seus posicionamentos.

Apesar os resultados obtidos, não é de descartar a eventual potencialidade deste sistema, uma vez que o estudo aborda o impacto de um punção com peso idêntico a um veículo de pequeno porte diretamente na estrutura da bateria. Para uma situação de colisão em um acidente de viação, parte da

força de impacto será absorvida pelo chassis do veículo, podendo eventualmente reduzir as chances de deformação no sistema híbrido.

Em conclusão, este trabalho contribuiu para o desenvolvimento de soluções que procuram mitigar as problemáticas identificadas na sustentabilidade das baterias de alta tensão de veículos elétricos em situação de colisão, e que, de forma alguma inspire novos estudos focados no desenvolvimento de novos conceitos de proteções estruturais à bateria de alta tensão que consigam promover práticas mais sustentáveis na eletrificação automóvel.

## 8. Recomendações

Sugere-se, portanto, segundo os resultados obtidos, que em trabalhos futuros seja explorado formas de melhorar a integridade do sistema de absorção de impacto (estrutura deformável), com recurso a alterações de geometria, reforços nas estruturas implementadas, ou até a alteração de alguns materiais utilizados, de modo que, para as situações de impacto estudadas seja garantida a integridade da estrutura indeformável e dos componentes internos da bateria de alta tensão.

É recomendado também, a realização de uma análise mais abrangente dos materiais utilizados nas duas estruturas, com ênfase particular às características do material de atenuação de impacto, o *honeycomb*. A limitação de dados disponíveis, tanto de fabricantes quanto referências bibliográficas, das propriedades dos materiais para implementação nos modelos de material no software LS\_DYNA, cria a necessidade da realização de estudos mais aprofundados, incluindo ensaios experimentais para adquirir essas propriedades, que são fundamentais para garantir simulações mais precisas, permitindo a escolha de material com base nas suas características e não apenas pela sua disponibilidade.

Ademais, seria fundamental validar a capacidade deste sistema híbrido em situações reais. Deste modo sugere-se o desenvolvimento de novas simulações dinâmicas ao nível do veículo elétrico completo, com a integração do sistema híbrido. Dado a elevada capacidade computacional exigida para as simulações implementadas neste estudo, é recomendável para estas novas simulações, a utilização de equipamentos computacionais que sejam mais eficientes de modo a reduzir eventuais erros e diminuir o tempo despendido na sua execução.

## Bibliografia

- Afseth, A. (02 de 2021). *Aluminum Battery Enclosure Design*. Obtido de Center For Automotive Research: <https://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2021/02/Aluminum-Battery-Enclosures-Constellium-February-2021-FINAL.pdf>
- Arifin, Z., & Gunawan, S. (2019). Design and Testing Impact Attenuator of Formula SAE FG17 Garuda UNY Car.
- ASTM International. (s.d.). ASTM D7336/D7336M-16. *Standard Test Method for Static Energy Absorption Properties of Honeycomb Sandwich Core Materials*.
- Battery Design. (s.d.). *Battery Pack*. Obtido em 23 de Setembro de 2024, de <https://www.batterydesign.net/pack/>
- BMW, R. (s.d.). *2019-BMW-i3*. (BMW) Obtido em 10 de Setembro de 2024, de <https://www.rallyebmw.com/bmw-models/2019-bmw-i3/>
- Bonanno, A., Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., & Palomba, G. (9 de Setembro de 2017). AIAS 2017 International Conference on Stress Analysis. *Aluminum honeycomb sandwich for protective structures of earth moving machines*.
- Boria, S., & Belingardi, G. (s.d.). Composite impact attenuator with shell and solid modelling.
- Brunckhorst, P. (02 de 05 de 2016). *PressClub Global · Article*. Obtido de Bmw Group: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0259480EN/more-range-high-level-dynamic-performance:-bmw-i-expands-its-model-range-for-the-bmw-i3-bmw-i3-94-ah-with-more-powerful-battery-delivers-a-range-of-up-to-200-kilometres-under-everyday-conditions>
- Cellbond. (s.d.). *Frontal Offset Barrier*. Obtido de Cellbond: <https://www.cellbond.com/products/deformable-crash-test-barriers/frontal-offset-barrier/>
- Domingues, D. (14 de fevereiro de 2022). GUIA DE INTERVENÇÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS ELÉTRICOS. *GUIA DE INTERVENÇÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS ELÉTRICOS*, p. 8.
- ECO Seguros. (20 de março de 2023). *Sapo*. Obtido de Eco Seguros: Seguradoras pressionam fabricantes de automóveis elétricos: <https://eco.sapo.pt/2023/03/20/seguradoras-pressionam-fabricantes-de-automoveis-eletricos/#:~:text=%E2%80%9CEstamos%20a%20comprar%20carros%20el%C3%A9tricos,bateria%20ap%C3%B3s%20uma%20pequena%20colis%C3%A3o%E2%80%9C>.

- Engineered Foam Products. (s.d.). *Bumper Cores*. Obtido em 22 de junho de 2024, de <https://www.engineeredfoamproducts.com/products/bumper-cores/>
- Euro NCAP. (s.d.). *About Euro NCAP*. Obtido de euroncap: <https://www.euroncap.com/en/about-euro-ncap/>
- EV Shop. (s.d.). *42kWh BMWi3 battery Pack*. Obtido em 11 de julho de 2024, de <https://evshop.eu/en/batteries/298-bmwi3-42kwh-battery-pack.html>
- FIA - Federation Internationale de L'Automobile. (08 de novembro de 2022). *FIA Region I - Expert study on guidance and recommendations regarding electric vehicle propulsion battery end-of-life policies*.
- Foammetal. (s.d.). *Espuma Metálica*. Obtido em 24 de Setembro de 2024, de <https://pt.foam-metal.net/fe-foam/metal-foam.html>
- Fonseca, L. F. (Setembro de 2018). *Técnicas de reparação de compósitos laminados em estruturas de veículos – Avaliação numérica e experimental*.
- Formula Seven. (2024). *Formula SAE Standard Impact Attenuator Type 12*. Obtido de Formula Seven: <https://www.formula-seven.com/shop-products/impact-attenuator-t-12/>
- Gerald. (23 de Fevereiro de 2024). *How to Distinguish Battery Cells, Battery Modules, And Battery Packs?* Obtido de UfineBattery: <https://www.ufinebattery.com/blog/how-to-distinguish-battery-cells-battery-modules-and-battery-packs/>
- Greve, L., & Fehrenbach, C. (Setembro de 2012). *Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells*.
- Guchen Electronics. (16 de Junho de 2023). *Everything You Want to Know about High Voltage Interlock Loop*. Obtido de Guchen Electronics: <https://www.guchen-connector.com/blog/industry-blog/hvil.html>
- H. Doughty, D., & C. Crafts, C. (Agosto de 2006). *FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications*.
- Hellstrom, J., & Lindblom, A. (2007). *Development of Simulation Model of an ODB*.
- Inovação Tecnológica . (s.d.). *Espuma sintática é forte, flexível e absorve impactos*. Obtido em 24 de Setembro de 2024, de <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=espuma-metalica-sintatica&id=010170150728>

- Justen, R., & Schöneburg, R. (24 de 3 de 2011). *CRASH SAFETY OF HYBRID- AND BATTERY ELECTRIC VEHICLES* .
- Knauf Industries. (10 de setembro de 2019). *Como o polipropileno expandido está mudando o setor automotivo?* Obtido em 24 de junho de 2024, de <https://knaufautomotive.com/pt-br/como-o-polipropileno-expandido-esta-mudando-o-setor-automotivo/>
- Kotak, B., Kotak, Y., Brade, K., Kubjatko, T., & Schweiger, H.-G. (16 de Setembro de 2021). *Battery Crush Test Procedures in Standards and Regulation: Need for Augmentation and Harmonisation*.
- LS\_DYNA Support. (s.d.). *Getting started with LS-DYNA*. Obtido de dynasupport: <https://www.dynasupport.com/tutorial/getting-started-with-ls-dyna>
- Ma Quoc, P., Krzikalla, D., Mesicek, J., Petru, J., Smiraus, J., Silva, A., & Poruba, Z. (7 de Setembro de 2020). On Aluminum Honeycomb Impact Attenuator Designs for Formula Student Competitions. *Symmetry in Mechanical Engineering II*.
- MatWeb. (s.d.). *Aluminium 3003-H18*. Obtido de MatWeb: [https://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=91c99440833341fc8fbc1d26149bc35e](https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=91c99440833341fc8fbc1d26149bc35e)
- MatWeb. (s.d.). *Aluminum 5052-H32*. Obtido de MatWeb: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=96d768abc51e4157a1b8f95856c49028&ckck=1>
- Montoro, S. R. (2014). *NFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO POR RTM NO VOLUME DE VAZIOS EM COMPÓSITOS CARBONO/EPÓXI*.
- Muenzel, V. (Setembro de 2011). *Evaluation and Refinement of Measurement Procedures for High-Voltage Energy Storage Systems of Production Electric Vehicles*.
- Neto, A. d. (Novembro de 2023). *Estudo de Impacto em Materiais Compósitos Avançados – Avaliação numérica e experimental em perfis tubulares* .
- Nigel. (12 de 12 de 2023). *2013 BMW i3*. Obtido de Battery Design: <https://batterydesign.net/bmw-i3-2/>
- Ott, J., Thomson, R., Léost, Y., Abert, M., & Yao, J. (s.d.). *Recommendations and Guidelines for battery Crash Safety and Post-Crash Safe Handling*.
- Park, J.-W., Kim, J., & Kang, B.-S. (15 de Agosto de 2019). *metals. Development on a Prediction Model for Experimental Condition of Flexibly Reconfigurable Roll Forming Process*.

- REMATEC. (21 de Fevereiro de 2024). *Crashed electric cars: what happens to the batteries?* Obtido de Rematec: <https://www.rematec.com/news/equipment-and-parts/crashed-electric-cars>
- Rock West Composites. (13 de outubro de 2022). *How Fiber Direction Influences Tube And Plate Properties*. Obtido de rockwestcomposites: <https://markets.rockwestcomposites.com/how-fiber-direction-influences-tube-and-plate-properties/>
- Santos, S. (s.d.). Estruturas de Veículos. *Mecânica dos Materiais Compósitos*. Leiria.
- Setiawan, R., & Salim, M. R. (Novembro de 2017). Journal of Engineering and Technological Sciences. *Crashworthiness Design for an Electric City Car against side pole impact*, pp. 1-18.
- Synopsys. (s.d.). *What is a Battery Management System?* Obtido de <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>
- Trumony. (s.d.). *Explorar os tipos de sistemas de arrefecimento de baterias: Guia completo*. Obtido de Trumony : <https://www.trumonytechs.com/pt/tipos-de-sistemas-de-arrefecimento-de-baterias/>
- United Nations. (15 de Junho de 2013). *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train*.
- Welling, R. (6 de Maio de 2019). *i3 battery*. Obtido de grabcad: <https://grabcad.com/library/i3-battery-1>
- Yallamotor. (s.d.). *BMW i3 2019 120 Ah*. Obtido em 10 de setembro de 2024, de <https://uae.yallamotor.com/new-cars/bmw/i3/2019/120-ah>



## **Anexos**

## Anexo A – Cálculo das Propriedades do Laminado

### Espessura total do laminado e Empilhamento:

[0/90/(+45/-45)<sub>6</sub>/90/0]

$$Esp_{\cdot camada} = \frac{Gramagem}{\rho_F \times V_F} = \frac{200}{1760000 \times 0.614} = 1.851 \times 10^{-4} m = 0.1851 mm$$

$$Esp_{\cdot total} = 16 \times 0.1851 = 2.9616 mm$$

$$E_L = E_F \times V_F + E_m \times V_m = 230 \times 0.614 + 3.2 \times 0.386 = 142.455$$

$$E_T = E_M \times \left[ \frac{1}{(1 - V_F) + \frac{E_m}{E_F} \times V_F} \right] = 3.2 \times \left[ \frac{1}{(1 - 0.614) + \frac{3.2}{230} \times 0.614} \right] = 8.111$$

$$v_{LT} = v_f \times V_f + v_m \times V_m = 0.21 \times 0.386 + 0.25 \times 0.614 = 0.235$$

$$v_{TL} = v_{LT} \times \frac{E_T}{E_L} = 0.235 \times \frac{8.111}{142.455} = 0.0134$$

$$G_{LT} = G_m \times \left[ \frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_f} \times V_f} \right] = 1.301 \times \left[ \frac{1}{(1 - 0.614) + \frac{1.301}{92} \times 0.614} \right] = 3.296$$

### Propriedades da camada individual para 0°

Para  $\theta_0 = 0$

$$E_{LT} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{v_{TL}}{E_T} & 0 \\ \frac{v_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{142.4552} & -\frac{0.0134}{8.1106} & 0 \\ \frac{0.2346}{142.4552} & \frac{1}{8.1106} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3.2958} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 7.0198 \times 10^{-3} & -1.6460 \times 10^{-3} & 0 \\ -1.6460 \times 10^{-3} & 0.1233 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3034 \end{bmatrix}$$

$$E_{\theta x} = 8.1103$$

$$E_{\theta y} = 142.4552$$

$$v_{\theta_{xy}} = 0.01335$$

$$v_{\theta_{yx}} = 0.2346$$

$$G_{\theta_{xy}} = 3.2958$$

**Definição da matriz de rotação e a sua transversa para os restantes ângulos:**

**Para  $\theta_1 = 90 \frac{\pi}{180}$**

$$[T(\theta_1)] = \begin{bmatrix} \cos 90 \frac{\pi}{180} & \sin 90 \frac{\pi}{180} & -2 \sin 90 \frac{\pi}{180} \cdot \cos 90 \frac{\pi}{180} \\ \sin 90 \frac{\pi}{180} & \cos 90 \frac{\pi}{180} & 2 \sin 90 \frac{\pi}{180} \cdot \cos 90 \frac{\pi}{180} \\ \sin 90 \frac{\pi}{180} \cdot \cos 90 \frac{\pi}{180} & -\sin 90 \frac{\pi}{180} \cdot \cos 90 \frac{\pi}{180} & \left( \cos 90 \frac{\pi}{180} - \sin 90 \frac{\pi}{180} \right) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[T(\theta_1)]^T = \begin{bmatrix} \cos 90 \frac{\pi}{180} & \sin 90 \frac{\pi}{180} & \sin 90 \frac{\pi}{180} \cdot \cos 90 \frac{\pi}{180} \\ \sin 90 \frac{\pi}{180} & \cos 90 \frac{\pi}{180} & -\sin 90 \frac{\pi}{180} \cdot \cos 90 \frac{\pi}{180} \\ -2 \sin 90 \frac{\pi}{180} \cdot \cos 90 \frac{\pi}{180} & 2 \sin 90 \frac{\pi}{180} \cdot \cos 90 \frac{\pi}{180} & \left( \cos 90 \frac{\pi}{180} - \sin 90 \frac{\pi}{180} \right) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Para  $\theta_2 = 45 \frac{\pi}{180}$**

$$[T(\theta_2)] = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & -1 \\ 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0.5 & -0.5 & 0 \end{bmatrix} \quad [T(\theta_2)]^T = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

**Para  $\theta_3 = -45 \frac{\pi}{180}$**

$$[T(\theta_3)] = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & -1 \\ -0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \quad [T(\theta_3)]^T = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

**Propriedades das camadas individuais para os diferentes ângulos:**

$$[T]^T \times [E_{LT}] \times [T] = [E_{xy}]$$

Para  $\theta_1 = 90 \frac{\pi}{180}$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 7.0198 \times 10^{-3} & -1.646 \times 10^{-3} & 0 \\ -1.646 \times 10^{-3} & 0.123 & 0 \\ 0 & 0 & 0.303 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 0.1233 & -1.6460 \times 10^{-3} & 0 \\ -1.6460 \times 10^{-3} & 7.0198 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0.3034 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$E_{\theta x} = 8.1103$$

$$E_{\theta y} = 142.4552$$

$$v_{\theta xy} = 0.01335$$

$$v_{\theta yx} = 0.2346$$

$$G_{\theta xy} = 3.2958$$

Para  $\theta_2 = 45 \frac{\pi}{180}$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & -1 \\ 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0.5 & -0.5 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 7.0198 \times 10^{-3} & -1.646 \times 10^{-3} & 0 \\ -1.646 \times 10^{-3} & 0.123 & 0 \\ 0 & 0 & 0.303 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 0.1076 & -0.0441 & 0.0581 \\ -0.0441 & 0.1076 & 0.0581 \\ 0.0581 & 0.0581 & 0.1336 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$E_{\theta x} = 9.2937$$

$$E_{\theta y} = 9.2937$$

$$v_{\theta xy} = 7.4850$$

$$v_{\theta yx} = 0.4098$$

$$G_{\theta xy} = 0.4098$$

Para  $\theta_3 = -45 \frac{\pi}{180}$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & -1 \\ -0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 7.0198 \times 10^{-3} & -1.646 \times 10^{-3} & 0 \\ -1.646 \times 10^{-3} & 0.123 & 0 \\ 0 & 0 & 0.303 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 0.1076 & -0.0441 & -0.0581 \\ -0.0441 & 0.1076 & -0.0581 \\ -0.0581 & -0.0581 & 0.1336 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$E_{\theta x} = 9.2937$$

$$E_{\theta y} = 9.2937$$

$$v_{\theta xy} = 7.4850$$

$$v_{\theta yx} = 0.4098$$

$$G_{\theta xy} = 0.4098$$

**Definir as propriedades do laminado completo:**

$$[A_{ij}] = \sum n_{(\theta)} \times e_{(\theta)} \times ([E_{\theta xy}])^{-1}$$

$$\begin{aligned} [A_{ij}] &= 2 \times 0.1851 \times ([E_{LT}])^{-1} + 2 \times 0.1851 \times ([T_1]^T \times [E_{LT}] \times [T_1])^{-1} \\ &+ 6 \times 0.1851 \times ([T_2]^T \times [E_{LT}] \times [T_2])^{-1} \\ &+ 6 \times 0.1851 \times ([T_3]^T \times [E_{LT}] \times [T_3])^{-1} \\ &= 0.370 \times \begin{bmatrix} 8.1358 & 1.9077 & 0 \\ 1.9077 & 142.9015 & 0 \\ 0 & 0 & 3.2960 \end{bmatrix} \\ &+ 0.370 \times \begin{bmatrix} 142.9015 & 1.9077 & 0 \\ 1.9077 & 8.1358 & 0 \\ 0 & 0 & 3.2960 \end{bmatrix} \\ &+ 1.112 \times \begin{bmatrix} 41.8262 & 35.2338 & -33.5118 \\ 35.2338 & 41.8262 & -33.5118 \\ -33.5118 & -33.5118 & 36.6323 \end{bmatrix} \\ &+ 1.112 \times \begin{bmatrix} 41.8262 & 35.2338 & 33.5118 \\ 35.2338 & 41.8262 & 33.5118 \\ 33.5118 & 33.5118 & 36.6323 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 148.8184 & 79.6738 & 5.0800 \times 10^{-6} \\ 79.6738 & 148.8184 & 5.0800 \times 10^{-6} \\ 5.0800 \times 10^{-6} & 5.0800 \times 10^{-6} & 83.8080 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [E_{xy}]_{\text{Laminado completo}} &= \left[ \frac{1}{h} \times [A_{ij}] \right]^{-1} \\ &= \left[ \frac{1}{2.9616} \times \begin{bmatrix} 148.8184 & 79.6738 & 5.0800 \times 10^{-6} \\ 79.6738 & 148.8184 & 5.0800 \times 10^{-6} \\ 5.0800 \times 10^{-6} & 5.0800 \times 10^{-6} & 83.8080 \end{bmatrix} \right]^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 0.02790 & -0.01494 & -7.8566 \times 10^{-10} \\ -0.01494 & 0.02790 & -7.8566 \times 10^{-10} \\ -7.8566 \times 10^{-10} & -7.8566 \times 10^{-10} & 0.03534 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$E_{\theta x} = 35.842$$

$$E_{\theta y} = 35.842$$

$$v_{\theta xy} = 28.297$$

$$v_{\theta yx} = 0.5355$$

$$G_{\theta xy} = 0.5355$$

---

## Anexo B – Propriedades do *honeycomb* de alumínio

Este tipo de *honeycomb* é desenvolvido pela Cellbond (s.d.) para a produção de barreiras moveis deformáveis para testes de impacto a veículos automóveis para as empresas EuroNCAP, IIHS e NHTSA.

O alumínio escolhido é utilizado, no elemento de para-choques (*bumper element*) da barreira movel deformável, e apresenta as seguintes propriedades:

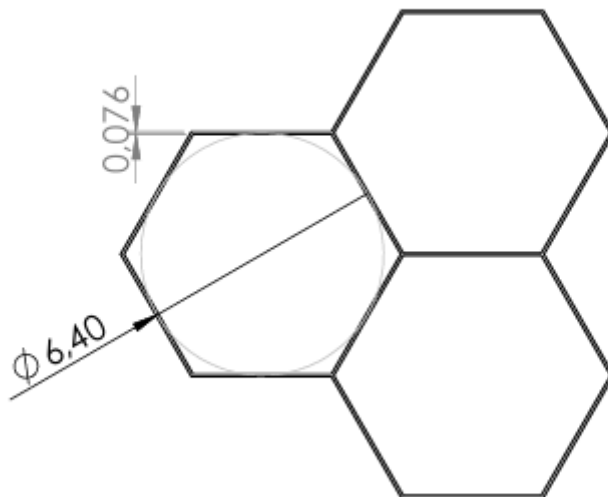
### **Bumper Element – Aluminium *Honeycomb* – “Cellbond”**

**Material:** Alumínio 3003 (BS 1470)

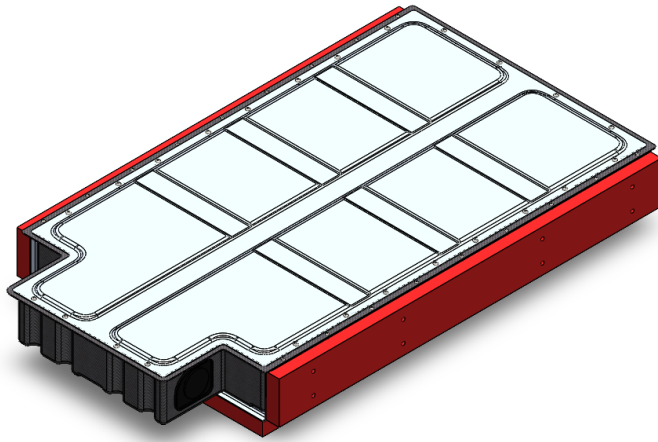
**Espessura do favo:**  $0.076 \text{ mm} \pm 15 \%$

**Tamanho da Célula:**  $6.4 \text{ mm} \pm 20 \%$

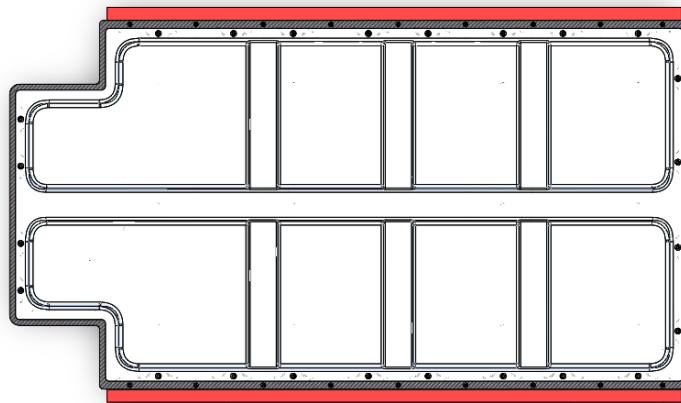
**Densidade:**  $82.6 \text{ kg/m}^3 \pm 20 \%$



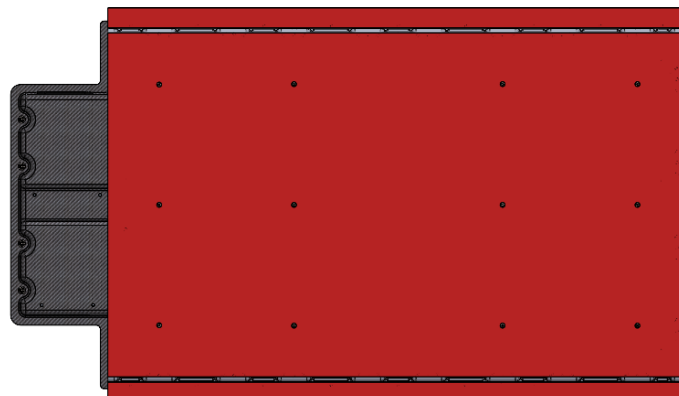
## Anexo C – Modelação do Sistema Híbrido



Vista Isométrica



Vista de topo



Vista inferior



Vista Lateral



Vista de Frente