

Otimização da performance técnica e económica de um produto de pavement energy harvesting pela adoção de novos materiais

José João Mendes Ribeiro Maia

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Teresa Duarte

Orientador na empresa: Eng. Francisco Duarte



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro 2021

“Strive for greatness”.

LeBron Raymone James

Resumo

A presente dissertação visa cumprir os objetivos propostos pela empresa Pavnext, cujo produto principal é um equipamento de *energy harvesting*, capaz de interagir com os veículos, reduzindo a sua velocidade. O desafio proposto foi o de otimizar economicamente esse mesmo produto, denominado Next-Road 1.0, pela adoção de novos materiais.

Primeiramente, procedeu-se à análise económica e concetual do modelo da Pavnext, de forma a aferir quais seriam os aspetos críticos do produto. Essa análise permitiu identificar os processos de fabrico e materiais que encareciam o Next-Road 1.0. Desta forma, delinearam-se estratégias, com base na implementação de novos processos de fabrico em série e seleção de materiais, de forma a reduzir os custos de produção do produto. De acordo com as estratégias adotadas, foram idealizadas alternativas aos aspetos críticos determinados, concebendo, assim, um novo produto, o Next-Road 2.0.

A seleção de materiais para os componentes do novo modelo teve por base um estudo das propriedades mecânicas que se consideraram importantes para as aplicações em questão, bem como a consulta de empresas especialistas na área de injeção de plásticos. Em seguida, foram realizadas simulações de resistência aos componentes projetados, com o objetivo de aferir se estes, concebidos nos materiais selecionados, resistiriam às solicitações impostas, tendo sido efetuados com sucesso. No entanto, será necessário testar a durabilidade dos componentes, com recurso a ensaios de fadiga.

Paralelamente à fase de seleção de materiais e validação dos componentes, iniciou-se o contacto com a indústria, de maneira a validar a viabilidade de produção das peças projetadas, orçar os moldes necessários à sua produção e confirmar os preços das matérias primas selecionadas. Desta forma, foi possível determinar o custo de produção do Next-Road 2.0 e compará-lo com o da versão 1.0.

Os resultados obtidos foram positivos, visto que foi possível a diminuição do custo de produção do Next-Road. No entanto, dado o elevado investimento que é necessário realizar em moldes de injeção, a solução concebida só compensará, em relação à atual, para volumes de produção na ordem dos 4551 produtos Next-Road 2.0. Assim, são apresentadas nesta dissertação algumas sugestões que visam otimizar a versão concebida, como propostas de trabalhos futuros.

Palavras-chave: Otimização económica, Seleção de materiais, Moldação por injeção, Polímeros reforçados, Custos de produção, Industrialização.

Optimization of the technical and economic performance of a pavement energy harvesting product by adopting new materials

Abstract

Pavnext company set the objectives for the present work with a focus on its main product, an energy harvesting technology that offers the capability of interacting with vehicles through velocity reduction. The challenge proposed consisted of economically optimizing the Next-Road 1.0 product, through the adoption of alternative materials.

The first stage of the project was focused on the conceptual and economic analysis of Pavnext's model in order to identify critical aspects of the product. The result of this analysis provided a perspective on the manufacturing processes and materials that mostly contributed to an increased cost of the Next-Road 1.0 production. This phase was the starting point to define new strategies combining the introduction of new manufacturing processes and the selection of alternative materials, with the objective of reducing production costs. The strategies adopted resulted in alternative approaches to address the critical aspects previously identified, leading to the conception of a new product, the Next-Road 2.0.

The materials selection process for the new model components was supported by a study on mechanical properties considered of significant relevance for the project, and inputs gathered from specialized companies in the plastic injection industry. Furthermore, resistance testing was performed on the design product components in order to evaluate their viability under the imposed tests using the alternative material proposed. The overall testing execution was successful. However, further validation will be required to assert the durability of the product components through the execution of fatigue testing.

During the material selection and testing phases, there were contacts exchanged with industry representatives in order to validate the feasibility of the design product components, cost estimate the required molds for the production process, and compare market prices for the selected raw materials. As a result of this effort, it was possible to determine the production cost of Next-Road 2.0 and compare it with version 1.0.

The results obtained were positive considering the achievement of the Next-Road production cost decrease. However, taking into consideration the significant investment required for injection moulding, the proposed solution will only be viable over the existing if applied at a large-scale level. Henceforth, this work presents alternative approaches to optimize the new conceptualized product version that may be explored in future research.

Keywords: Economic optimization, Material selection, Injection Moulding, Fiber-Reinforced Polymers, Manufacturing costs, Industrialization.

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação e a conclusão do mestrado integrado não teria sido possível sem incentivo e suporte de determinadas pessoas, às quais gostaria de agradecer.

Aos meus pais, pelas excelentes condições que me proporcionaram ao longo da vida, pela preocupação, afeto e procura constante por me disponibilizar os melhores meios para o sucesso no período académico. Um enorme “obrigado”.

À minha irmã, pelos momentos de descontração e diversão, por todas as experiências vividas, pela paciência e por sempre acreditar em mim.

Às minhas avós e à Ni, porque sempre me mimaram.

À professora Teresa Duarte, pela sua orientação cuidada, disponibilidade e resolução de problemas que foram surgindo.

Ao engenheiro Francisco Duarte, por me ter proporcionado o meu primeiro contacto com o mundo do trabalho e indústria, partilha de conhecimento e profissionalismo.

Aos professores Marco Parente e Albertino Arteiro, pelo auxílio prestado nas suas áreas de especialização.

Ao João Pedro e ao Eduardo Barreto, pela procura em ajudar e partilha de conhecimento.

Ao Nuno Alexandre, amigo e parceiro de trabalho, pelas horas de lazer, pelo apoio e espírito de entreajuda.

Ao meu grupo de amigos nascido na FEUP, pelos momentos incríveis que passamos ao longo destes anos, desde as partidas de futebol, passando pelas tardes na AE, terminando nos jantares no 3D.

Ao meu grupo de primos sportinguistas #jesuisbinôt, pelos momentos de felicidade que vivemos e que ainda iremos viver.

Aos meus amigos do 3D, Gugu e Miguel, bem como ao Zé Nuno, meus companheiros eternos, que viveram toda esta experiência académica comigo. Pelas memórias desde tenra idade, apoio e amizade. Tudo o que a memória me permite recordar, tem a presença deles.

À Cris, pelo apoio incondicional, ajuda e motivação ao longo destes meses. Um “obrigado” pelo carinho, por me ter feito crescer, pelos momentos de felicidade mesmo quando algo não correu bem. Um “obrigado” pelo que ainda está por chegar.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento da dissertação e motivação	1
1.2	A empresa Pavnext	1
1.3	O produto Next-Road.....	2
1.3.1	A evolução do produto	2
1.3.2	O produto Next-Road 1.0	3
1.3.3	Escala de desenvolvimento do produto -TRL	6
1.4	Objetivos da dissertação	6
1.5	Planeamento do projeto.....	7
1.6	Método seguido no projeto	8
1.7	Estrutura da dissertação	8
2	Introdução teórica	11
2.1	Processos de fabrico utilizados nos produtos	11
2.1.1	Maquinagem.....	11
2.1.2	Extrusão	12
2.1.3	Moldação por injeção de plásticos	13
2.2	Seleção de materiais	15
2.2.1	Motivos para a seleção de materiais.....	16
2.2.2	Método para a seleção de materiais	16
2.3	Materiais estudados.....	21
2.3.1	Ligas de alumínio	21
2.3.2	Materiais poliméricos.....	23
2.3.3	Materiais compósitos.....	27
2.4	Materiais utilizados no Next-Road 1.0	31
2.5	Software de simulação: SolidWorks® Simulation	31
2.5.1	SolidWorks® Simulation.....	31
2.5.2	Critério de falha utilizado.....	35
3	Estudo económico e concetual dos sistemas Next-Road 1.0	37
3.1	Análise de custos.....	38
3.1.1	Investimento em matrizes de extrusão.....	39
3.1.2	Custos de produção das unidades S_R e S_G – unitário e em série.....	40
3.1.3	Custo e influência de cada conjunto	42
3.1.4	Top-10 componentes/processos com maior custo.....	43
3.2	Componentes estruturais vs. funcionais	46
3.3	Next-Road 1.0 em contexto real	47
3.4	Análise final ao produto: possíveis otimizações	48
4	Next-Road 2.0: Alternativas idealizadas e implementadas	49
4.1	Considerações iniciais	49
4.1.1	Processos de fabrico.....	49
4.1.2	Materiais.....	50
4.1.3	Design dos componentes e éticas a cumprir	50
4.2	Materialização do novo produto.....	51
4.2.1	Módulo interior.....	51
4.2.2	Conjunto Tampa.....	65
4.2.3	Conjunto Caixa.....	69
5	Next-Road 2.0: Seleção de materiais	71
5.1	Seleção de materiais para componentes com funções de resistência a cargas	72
5.1.1	Componentes pertencentes ao C_T	74
5.1.2	Componentes pertencentes ao C_{MI}	75
5.2	Seleção de materiais para componentes com funções de guiamento e deslizamento	79

6	Next-Road 2.0: Validação dos novos componentes	81
6.1	Considerações iniciais	81
6.2	Materiais testados	81
6.3	Critério de falha de Von Mises: pressupostos assumidos	83
6.4	Solicitação dos componentes	83
6.4.1	Face superior dos guias verticais	84
6.4.2	Restantes elementos	85
6.5	Testes à resistência dos componentes (simulações)	88
6.5.1	Guias verticais – Topo	89
6.5.2	Cantoneira	91
6.5.3	Alojamento para as molas horizontais	92
6.5.4	Parte superior do Patim	94
6.5.5	Chapa de fixação das molas	96
6.5.6	Guias verticais – Lateral	97
6.6	Simulações: conclusões	99
7	Comparação entre as versões pré-industrial e industrial	101
7.1	Custos de produção das três variantes	102
7.1.1	Implementação de novos processos e seleção de materiais	102
7.1.2	Quantidade de componentes	103
7.2	Investimento em moldes e produção em série	104
7.2.1	Break-even point do produto Next-Road 2.0	104
7.2.2	BEP dos conjuntos tampa e módulo interior	106
7.3	Next-Road 2.5 – proposta de trabalho futuro	108
7.4	Next-Road 3.0 – proposta de trabalho futuro	110
8	Conclusão e propostas de trabalhos futuros	115
9	Referências	117
	ANEXO A: Bill of materials do Next-Road 1.0	119
	ANEXO B: Componentes estruturais vs. funcionais	121
	ANEXO C: Next-Road 2.0 – ilustrações técnicas	123
	ANEXO D: Ficha técnica do PA66 GF50	127
	ANEXO E: Relatório de uma das simulações realizadas ao Guia Vertical – Topo (PA6 GF30)	130

Siglas:

ADM – Advanced Machining Processes;

BOM – Bill of Materials;

BEP – Break-Even Point;

C – Componente;

CEO - Chief Executive Officer;

CNC – Controlo Numérico Computorizado;

C_C – Conjunto Caixa;

C_{MI} – Conjunto Módulo Interior;

C_T – Conjunto Tampa;

C_{MP} – Custos Matéria Prima;

E – Módulo de Young/elasticidade

E_G – Elementos de Geração;

E_R – Elementos de Redução;

E_{TC} – Elementos de Tronco Comum;

FSGV – Face Superior Guias Verticais;

FC – Fator de Conversão;

FS – Fator de Segurança;

FM – Fornecedor de Matrizes;

POM – Poliacetal;

P – Processo;

S_G – Sistema de Geração;

S_R – Sistema de Redução;

TRL – Technology Readiness Level;

UPTEC – Parque da ciência e tecnologia da Universidade do Porto;

σ_e – Tensão limite elástico;

σ_{eq} – Tensão equivalente de Von Mises;

$\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão máxima.

Índice de Figuras:

Figura 1 - Logótipo da Pavnext (In https://www.ipn.pt/incubadora/empresa/322 . Acedido em 24 nov., 2020).....	1
Figura 2 - Ideologia do produto Next-Road (In https://www.pavnext.com/aplicacoes/?lang=pt-pt . Acedido em 24 nov., 2020)	2
Figura 3 - Protótipo Alpha da Pavnext (In https://beira.pt/portal/noticias/covilhanense-cria-pavimento-inovador-que-reduz-velocidade-automovel/ . Acedido em 10 jan., 2020).....	3
Figura 4 - Representação do Next-Road 1.0 e respetivos conjuntos (Adaptado de (Neves 2019))	4
Figura 5 - Vista de cima de 4 unidades Next-Road, e respetivas dimensões	7
Figura 6 - Sequência de trabalho	7
Figura 7 - Processo de extrusão de ligas de alumínio (In https://www.infoescola.com/engenharia/extrusao/ . Acedido em 4 dez., 2020)	12
Figura 8 - Evolução do custo unitário do componente extrudido consoante o volume da série de produção (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 4 dez., 2020)	13
Figura 9 - Evolução do custo unitário do componente injetado consoante o volume da série de produção (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 6 dez., 2020)	14
Figura 10 - Organização dos materiais (In https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Materiaalkunde_1_slides_chapter2.pdf . Acedido em 8 dez., 2020)	15
Figura 11 - Diagrama Módulo de Young-Densidade de Ashby (In https://www.grantadesign.com/education/students/charts/ . Acedido em 13 fev., 2021).....	17
Figura 12 - Barra de ferramentas do GRANTA EduPack 2020 (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020).....	18
Figura 13 - Seleção da base de dados para o estudo (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020)	18
Figura 14 - Menu "Tree Stage" do software GRANTA EduPack 2020 (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020).....	18
Figura 15 - Menu "Limit" do software GRANTA EduPack 2020 (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020).....	19
Figura 16 - Condições de fronteira impostas para a seleção de materiais (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020).....	20
Figura 17 - Diagrama Densidade-Módulo de Rutura para auxílio da seleção de um material para o caso hipotético (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020)	21
Figura 18 - Classificação dos termoplásticos segundo a sua estabilidade térmica (Adaptado de https://www.piedmontcmg.com/contract-manufacturing-capabilities/plastics-machining/ . Acedido em 19 dez., 2020).....	24
Figura 19 - Valores típicos da massa volúmica dos metais e suas ligas e dos termoplásticos (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 20 dez., 2020).....	25
Figura 20 - Valores típicos do módulo de elasticidade dos metais e suas ligas e dos termoplásticos (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 20 dez., 2020).....	26
Figura 21 - Valores típicos da tenacidade à fratura dos metais e suas ligas e dos termoplásticos (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 20 dez., 2020)	26

Figura 22 - Classificação dos materiais compósitos (Adaptado de (Silva, Alves et al. 2013))	27
Figura 23 - Orientação das fibras nas matrizes dos compósitos (In https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fiber-reinforced_composites_tipology.svg . Acedido em 28 dez., 2020)	28
Figura 24 - Materiais isotrópicos vs. materiais anisotrópicos (In https://www.knowwhy.com/difference-between-isotropic-and-anisotropic/ . Acedido em 3 fev., 2021)	28
Figura 25 - Influência do comprimento da fibra nas propriedades mecânicas dos compósitos (In https://www.plasticomp.com/long-fiber-benefits/ . Acedido em 29 dez., 2020)	29
Figura 26 - Valores típicos do módulo de elasticidade de alguns termoplásticos, termoplásticos reforçados e ligas de alumínio (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 29 dez., 2020)	30
Figura 27 - Estudos possíveis de realizar no SolidWorks® Simulation	32
Figura 28 - Árvore de simulação	32
Figura 29 - Opção para a seleção do material	33
Figura 30 - Opção para a seleção do tipo de apoio	33
Figura 31 - Representação das solicitações	34
Figura 32 - Representação de um componente, segundo discretizações distintas	34
Figura 33 - Resultados obtidos através das simulações	35
Figura 34 - Gráfico Tensão x Deformação (Adaptado de https://en.wikipedia.org/wiki/Stress%E2%80%93strain_curve . Acedido em 4 fev., 2020)	35
Figura 35 - Interação entre o C_T e o C_{MI}	51
Figura 36 - Deslizamento do Patim sobre os Carris	52
Figura 37 - Vista explodida do Patim 2.0. Dimensões aproximadas: 230x270x75 [mm]	54
Figura 38 - Parte inferior do Patim 2.0	54
Figura 39 - Parte superior do Patim 2.0	55
Figura 40 - Cantoneira, elemento pertencente ao Patim 2.0	55
Figura 41 - Placa Base 2.0. Dimensões aproximadas: 1100x320x90 [mm]	57
Figura 42 - Face inferior da Placa Base 2.0	58
Figura 43 - Vista explodida do C_{MI} , pertencente ao Next-Road 2.0	59
Figura 44 - Guia central. Dimensões aproximadas: 70x40x53 [mm]	60
Figura 45 - Guia lateral. Dimensões aproximadas: 180x20x50 [mm]	60
Figura 46 - Alojamento para uma mola horizontal	61
Figura 47 - Chapa pertencente ao alojamento para as molas. Dimensões aproximadas: 75x40x20 [mm]	61
Figura 48 - Chapa de fixação das molas ao Patim 2.0. Dimensões aproximadas: 270x60x40 [mm]	62
Figura 49 - Sistema de sincronização	62
Figura 50 - Montagem do sistema de sincronização	63
Figura 51 - Chapa de fixação do sistema de sincronização. Dimensões aproximadas: 120x45x25 [mm]	63

Figura 52 - Batentes de borracha. Dimensões aproximadas (esquerda para a direita): 75x15x50, 75x15x20 [mm]	64
Figura 53 - Conjunto Tampa 2.0. Dimensões aproximadas: 1130x340x120 [mm]	66
Figura 54 - Metade superior do C_T	66
Figura 55 - Metade inferior do C_T	67
Figura 56 - Mecanismo de descida do C_T (vista em corte).....	68
Figura 57 - Seleção de materiais: Preço x Massa volumica (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020).....	72
Figura 58 - Seleção de materiais: Preço x Módulo de elasticidade (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020).....	74
Figura 59 - Restrições impostas na seleção de materiais para os elementos do Patim 2.0 (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020).....	76
Figura 60 - Lista de materiais selecionáveis (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020).....	76
Figura 61 - Seleção de materiais: Tensão limite elástico x Módulo de elasticidade (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020)	77
Figura 62 - Seleção de materiais: Preço x Resistência à compressão (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020).....	77
Figura 63 - Preço x Tenacidade à fratura (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020).....	78
Figura 64 - Transmissão da carga à face superior dos guias verticais.....	84
Figura 65 - Acoplamento cantoneira x bielas, visto em corte	85
Figura 66 - Solicitação sobre a cantoneira 2.0.....	86
Figura 67 - Solicitação sobre o alojamento para as molas horizontais.....	86
Figura 68 - Patim 2.0	87
Figura 69 - Tensão máxima de Von Mises gerada no topo de um guia vertical, para um tamanho de malha de 1 mm.....	89
Figura 70 - Topo dos guias verticais: Tensão máxima x Tamanho da malha (PA6/PA66)	90
Figura 71 - Topo dos guias verticais: Deslocamento máximo x Tamanho da malha (PA6/PA66)	90
Figura 72 - Tensão máxima de Von Mises gerada na cantoneira, para um tamanho de malha de 0,75 mm.....	91
Figura 73 - Cantoneira: Tensão máxima x Tamanho da malha (PA6/PA66).....	91
Figura 74 - Cantoneira: Deslocamento máximo x Tamanho da malha (PA6/PA66)	92
Figura 75 - Tensão máxima de Von Mises gerada no alojamento das molas, para um tamanho de malha de 0,75 mm.....	92
Figura 76 - Alojamento: Tensão máxima x Tamanho da malha (PA6/PA66)	93
Figura 77 - Alojamento: Deslocamento máximo x Tamanho da malha (PA6/PA66).....	93
Figura 78 - Tensão máxima de Von Mises gerada na parte superior do Patim, para um tamanho de malha de 1 mm.....	94

Figura 79 - Tensão máxima de Von Mises gerada na parte superior do Patim, para um tamanho de malha de 1 mm (vista de baixo).....	94
Figura 80 - Parte superior do Patim: Tensão máxima x Tamanho da malha (PA6/PA66).....	95
Figura 81 - Parte superior do Patim: Deslocamento máximo x Tamanho da malha (PA6/PA66)	95
Figura 82 - Tensão máxima de Von Mises gerada na chapa de fixação, para um tamanho de malha de 0,75 mm	96
Figura 83 - Chapa de fixação das molas: Tensão máxima x Tamanho da malha.....	96
Figura 84 - Tensão máxima de Von Mises gerada na lateral do guia vertical, para um tamanho de malha de 1 mm.....	97
Figura 85 - Lateral dos guias verticais: Tensão máxima x Tamanho da malha (PA6/PA66) ..	98
Figura 86 - Lateral dos guias verticais: Deslocamento máximo x Tamanho da malha (PA6/PA66)	98
Figura 87 - BEPs do produto Next-Road 2.0.....	105
Figura 88 - BEP do C_{MI}	107
Figura 89 - BEP do C_T	108
Figura 90 - Constituição do Next-Road 2.5.....	109
Figura 91 – C_{MI} do Next-Road 2.5	109
Figura 92 - Restrições impostas na procura de novos materiais (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 13 fev., 2020)	110
Figura 93 - Materiais resultantes: Preço x Módulo de elasticidade (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 13 fev., 2020)	111
Figura 94 - Next-Road 2.0. Dimensões aproximadas: 1200x350x150 [mm].....	124
Figura 95 – C_{MI} 2.0.....	124
Figura 96 - Vista inferior do C_T	125
Figura 97 - Tampa injetada.....	125
Figura 98 - Biela + Casquilhos	126
Figura 99 - Auxiliar de fixação.....	126
Figura 100 - Elemento de guiamento	126

Índice de Tabelas:

Tabela 1 - Constituição da variante S_R do Next-Road 1.0.....	5
Tabela 2 - Constituição da variante S_G do Next-Road 1.0	5
Tabela 3 - Descrição da escala TRL (Adaptado de (Neves 2019))	6
Tabela 4 - Ligas de alumínio trabalhadas e de fundição (Adaptado de (Silva, Alves et al. 2013))	22
Tabela 5 - Valores típicos do módulo de elasticidade de alguns termoplásticos, termoplásticos reforçados e ligas de alumínio (Adaptado de (Ansys 2020))	30
Tabela 6 - Número de componentes "new", "standard" e totais nos sistemas S_G e S_R	38
Tabela 7 - Custo das matrizes de extrusão	39
Tabela 8 - Presença dos componentes extrudidos em cada sistema	40
Tabela 9 - Influência dos componentes extrudidos no custo total de cada sistema.....	40
Tabela 10 - Custo unitário das unidades S_G e S_R em função das variáveis "s/ matriz" e "c/ matriz", para diferentes séries de produção	41
Tabela 11 - Diluição do valor das matrizes em função de diferentes séries de produção	41
Tabela 12 - Custo unitário de cada conjunto em função dos sistemas S_G e S_R	42
Tabela 13 – Peso económico de cada um dos conjuntos em cada um dos sistemas	43
Tabela 14 - Lista dos dez componentes/processos com maior custo no sistema de geração ...	44
Tabela 15 - Lista dos dez componentes/processos com maior custo no sistema de redução ...	44
Tabela 16 - Peso dos componentes críticos no custo final de cada um dos sistemas.....	45
Tabela 17 - Peso do pós-processamento de alguns componentes no custo final de cada um dos sistemas.....	45
Tabela 18 - Componentes mais solicitados e respetivas propriedades mecânicas a analisar ...	73
Tabela 19 - Valores de referência das propriedades a analisar (liga AW 6063 T6) (Adaptado de (Ansys 2020))	73
Tabela 20 - Propriedades dos principais materiais seleccionáveis (Adaptado de (Ansys 2020))	78
Tabela 21 - Propriedades dos materiais selecionados (Adaptado de (Ansys 2020)).....	80
Tabela 22 - Propriedades do PA6 GF30, introduzidas no <i>software</i> de simulação (Adaptado de (Ansys 2020))	82
Tabela 23 - Propriedades do PA66 GF50, introduzidas no software de simulação	82
Tabela 24 - Carga exercida em cada componente solicitado.....	88
Tabela 25 - Valores da tensão limite elástico dos materiais testados.....	89
Tabela 26 - Valores de tensão e deslocamento máximos relativos a cada componente (malha mais fina)	99
Tabela 27 - Valores da massa volúmica e custo dos materiais que constituem a versão 2.0 .	101
Tabela 28 - Custo de produção unitário de cada um dos produtos.....	102
Tabela 29 - Comparação económica entre dois componentes das versões 1.0 e 2.0.....	103

Tabela 30 - Número de elementos das três versões do produto Next-Road.....	103
Tabela 31 - Comparação entre o investimento em matrizes necessárias à produção dos componentes dos produtos Next-Road.....	104
Tabela 32 - Investimento em matrizes e custo unitário do produto para cada versão do Next-Road.....	105
Tabela 33 - Investimento em matrizes para a produção do C_{MI} e custo do conjunto, para cada versão do produto	106
Tabela 34 - Investimento em matrizes para a produção do C_T e custo do conjunto, para cada versão do produto	107
Tabela 35 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade e tensão limite elástico dos materiais (Adaptado de (Ansys 2020))	111
Tabela 36 - Valores da massa volúmica e custo dos materiais de possível implementação na versão 3.0 (Adaptado de (Ansys 2020))	112
Tabela 37 - Comparação entre o custo de produção do modelo 1.5 com os possíveis modelos 3.0	112
Tabela 38 - BEPs dos possíveis modelos 3.0	112
Tabela 39 - Modelo a produzir em função do volume da série de produção	113

1 Introdução

1.1 Enquadramento da dissertação e motivação

O presente documento finaliza a especialização “Produção, Conceção e Fabrico” do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

No contexto mencionado surge então o tema desta dissertação: Otimização da performance técnica e económica de um produto de *pavement energy harvesting* pela adoção de novos materiais.

Este projeto foi desenvolvido em colaboração com a empresa Pavnext (logótipo na Figura 1), tendo sido realizada no primeiro semestre do ano letivo 2020/2021 sob a orientação da Professora Teresa Duarte e do Engenheiro Francisco Duarte, CEO da Pavnext.

O realizar da dissertação numa empresa sempre foi uma prioridade, por todos os benefícios que traz, nomeadamente a possibilidade de transição entre a vida académica e o primeiro emprego. Aliado a isto, este foi um tema que se revelou muito interessante, dado o desafio que é utilizar os conhecimentos que foram sendo adquiridos ao longo do mestrado integrado num contexto real e inovador.



Figura 1 - Logótipo da Pavnext (In <https://www.ipn.pt/incubadora/empresa/322>. Acedido em 24 nov., 2020)

1.2 A empresa Pavnext

A Pavnext é uma empresa inovadora em fase embrionária (*Start Up*), sediada na UPTEC, no Porto, com filial em Coimbra. O seu principal objetivo é o desenvolvimento de pavimentos tecnológicos, visando a segurança rodoviária e o desenvolvimento sustentável das cidades. O produto principal, Next-Road, é um equipamento para aplicação na superfície dos pavimentos urbanos, que, com base num sistema eletromecânico, reduz a velocidade dos veículos que por lá circulam, aproveitando assim a energia cinética destes para gerar energia elétrica. A redução de velocidade ocorre sem recurso a qualquer ação do condutor e não causa o elevado impacto no veículo que se faz notar nas lombas convencionais. A energia convertida poderá ter diferentes fins: iluminação das vias, passadeiras ou semáforos, carregamento de meios de transporte elétricos ou injeção na rede elétrica. Para além disso, os produtos da Pavnext destacam-se igualmente na aquisição de dados de tráfego e energéticos, devido à grande componente eletrónica que apresentam (UPTEC 2020).

Em suma, este produto é capaz de produzir e armazenar energia elétrica a partir da energia cinética dos veículos, reduzindo assim a sua velocidade, e gerar dados acerca do tráfego de determinadas zonas urbanas ao longo do dia. Tudo isto contribui para uma maior segurança e controlo rodoviários e para a transformação das urbanizações em cidades inteligentes e autossustentáveis.

A Figura 2 representa tudo até aqui agora descrito: a energia cinética de um veículo a ser aproveitada para gerar energia elétrica, enquanto que a sua velocidade sofre uma redução constante.



Figura 2 - Ideologia do produto Next-Road (In <https://www.pavnext.com/aplicacoes/?lang=pt-pt>. Acedido em 24 nov., 2020)

1.3 O produto Next-Road

Nesta secção, será analisado com maior detalhe o principal produto da Pavnext. Desta forma, será descrita a evolução que este sofreu até ao mais recente protótipo da empresa: o Next-Road 1.0. Em seguida, explicar-se-á como é constituído esse mesmo produto, bem como o seu princípio de funcionamento. Finalmente, situa-se o Next-Road 1.0 numa escala que mede a maturidade dos produtos, designada por *Technology Readiness Level* (TRL).

1.3.1 A evolução do produto

Como foi referido, a unidade Next-Road é um produto de aplicação nos pavimentos rodoviários urbanos, que tem como objetivo retirar velocidade aos veículos, gerando energia elétrica.

Logicamente, qualquer produto que se pretenda desenvolver e colocar no mercado tem de passar por várias fases preliminares. Uma delas é a conceitualização e desenvolvimento de um protótipo. Na Figura 3 é possível visualizar o protótipo Alpha, o primeiro da empresa. Esta versão permitiu ao produto da Pavnext atingir o nível 5 da escala TRL (detalhada na secção 2.1.1).



Figura 3 - Protótipo Alpha da Pavnext (In <https://beira.pt/portal/noticias/covilhanense-cria-pavimento-inovador-que-reduz-velocidade-automovel/>. Acedido em 10 jan., 2020)

Após uma série de testes e otimizações, foi desenvolvido pela empresa a versão Beta. O nível TRL 6 foi atingido com o desenvolvimento e respetivos testes deste protótipo.

No início da presente dissertação, já havia sido desenvolvida uma versão mais avançada do produto, a qual se designa por Next-Road 1.0. Este produto foi o resultado de um projeto de dissertação desenvolvido por José Ricardo Neves, em parceria com a Pavnext, designado por “Desenvolvimento e Implementação de uma Metodologia para Industrialização de um Produto de Energy Harvesting” (Neves 2019).

A versão em questão foi concebida tendo como objetivo a realização de um projeto piloto, que consiste na aplicação de quarenta unidades do produto Next-Road num contexto real. Este projeto irá ser realizado em conjunto com a Câmara Municipal de Matosinhos, visando atingir o nível 7 da escala TRL, não sendo este, no entanto, o objetivo da presente dissertação.

Para a sua produção, foram contactadas várias empresas na área da extrusão de ligas de alumínio. Assim, o produto Next-Road 1.0 foi concebido de maneira a que a grande maioria dos seus componentes pudessem ser extrudidos, tornando possível a produção em série. No entanto, dada a necessidade de validação tecnológica deste produto em ambiente relevante, e devido ao elevado investimento inicial necessário para as matrizes de extrusão, a versão prototipada presente na empresa foi quase toda ela produzida com recurso a processos de maquinagem.

Para facilitar a leitura e compreensão dos dados, designar-se-á por Next-Road 1.0 a versão mais recente concebida pela Pavnext e por Next-Road 2.0 a versão do produto concebida no decorrer desta dissertação.

1.3.2 O produto Next-Road 1.0

Idealizado para uma fase de pré-industrialização, o Next-Road 1.0 é o produto mais recente da empresa Pavnext.

Aquando do início da dissertação, este produto apresentava duas variantes distintas:

- Sistema de Redução (S_R) – modelo que tem como objetivo principal a redução da velocidade dos veículos;
- Sistema de Geração (S_G) – modelo que, além da redução da velocidade dos veículos, converte a energia cinética destes em energia elétrica.

As duas unidades, S_R e S_G , estão divididas nos mesmos três conjuntos/módulos, de maneira a facilitar a montagem. A descrição de cada um deles é apresentada abaixo:

- Conjunto “Módulo interior” (C_{MI}) – alberga todos os componentes responsáveis pelos mecanismos e pela geração de energia;
- Conjunto “Tampa” (C_T) – função de contactar com o “exterior”, constituído por elementos que contactam com o veículo, elementos estruturais e de isolamento, e elementos de guiamento;
- Conjunto “Caixa” (C_C) – constituído por elementos com funções de estrutura, suporte e isolamento.

O produto Next-Road 1.0, bem como cada conjunto referido são apresentados na Figura 4. O C_{MI} não está representado, uma vez que está envolvido pelos C_T e C_C .

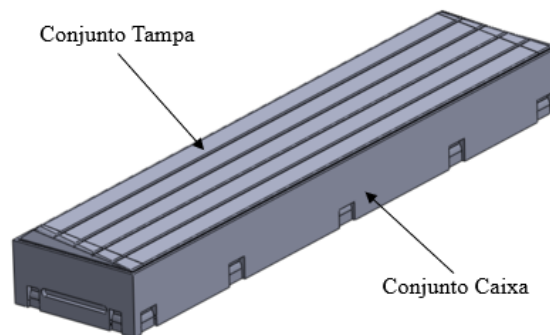


Figura 4 - Representação do Next-Road 1.0 e respetivos conjuntos (Adaptado de (Neves 2019))

Naturalmente, os elementos dentro de cada conjunto variam ligeiramente consoante o tipo de sistema em questão. Assim, há componentes que estão presentes exclusivamente no S_R e componentes que pertencem apenas ao S_G . Além destes, há elementos que estão presentes tanto nas unidades S_R e S_G , os quais se designam por elementos de tronco comum. Deste modo, será feita uma subdivisão da divisão acima, a qual se irá apresentar em seguida:

- Elementos de tronco comum (E_{TC}) – são todos os componentes que são comuns às duas unidades, S_R e S_G ;
- Elementos Redução (E_R) – são todos os componentes exclusivos ao sistema de redução;
- Elementos Geração (E_G) – são todos os componentes exclusivos ao sistema de geração de energia.

Assim, tendo em consideração estes elementos, é possível estruturar os dois sistemas, como é apresentado na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 - Constituição da variante S_R do Next-Road 1.0

Sistema de Redução (S_R)	Conjunto Módulo Interior (C_{MI})	E_{TC}
		E_R
	Conjunto Tampa (C_T)	E_{TC}
	Conjunto Caixa (C_C)	E_{TC}

Tabela 2 - Constituição da variante S_G do Next-Road 1.0

Sistema de Geração (S_G)	Conjunto Módulo Interior (C_{MI})	E_{TC}
		E_G
	Conjunto Tampa (C_T)	E_{TC}
		E_G
	Conjunto Caixa (C_C)	E_{TC}

Deste modo, é fácil compreender como estão constituídas as duas variantes do produto Next-Road 1.0. O C_C é comum às duas unidades. No C_T , as variações são muito ligeiras (apenas quatro componentes exclusivos ao S_G). As principais diferenças entre as duas unidades encontram-se nos seus C_{MI} , devido à presença de todos os elementos responsáveis pela geração de energia presentes no módulo interior de S_G .

Como já foi mencionado, o produto é um equipamento para aplicação na superfície dos pavimentos urbanos, que substitui um segmento de via. Com base num sistema eletromecânico, é possível retirar energia cinética aos automóveis, convertendo-a em elétrica.

Quando aplicado na via pública, só a tampa – que apresenta uma ligeira inclinação – é visível ao condutor do veículo. Resumidamente, a ação de um automóvel sobre o produto aciona o movimento descendente dessa mesma tampa. Esse movimento é transmitido, através de um conjunto de bielas, a um conjunto de patins, elementos do C_{MI} . Por sua vez, os patins, acionados, iniciam um movimento na direção horizontal. A este movimento opõe-se um conjunto de molas. O vencer a força dessas molas, pelo movimento horizontal referido, é responsável pela redução de velocidade do veículo. O princípio de funcionamento do S_R , dado o único objetivo de redução de velocidade, fica por aqui.

O S_G , além da redução da velocidade, tem a capacidade de gerar energia elétrica. O mesmo movimento horizontal dos patins atua um conjunto de rodas dentadas através de um sistema pinhão-cremalheira. O movimento horizontal é, através desse sistema, transformado em angular, atuando um gerador elétrico. Assim, a energia cinética é aproveitada para a geração de energia elétrica.

Além dos componentes descritos, existe, em ambas as variantes do Next-Road 1.0, um conjunto de elementos em aço que permite o correto guiamento vertical dos produtos. Uma vez já não estando atuada pelo veículo, a reposição da posição inicial da tampa é garantida com recurso a um sistema de molas verticais.

1.3.3 Escala de desenvolvimento do produto -TRL

A escala *Technology Readiness Level* (TRL) é uma das ferramentas disponíveis para a avaliação de tecnologias, permitindo avaliar o seu nível de maturidade (Gil, Andrade et al. 2014).

Originalmente desenvolvido pela NASA na década de 1970 para tecnologias de exploração espacial, os TRLs medem o nível de maturidade de uma tecnologia ao longo da sua fase inicial (pesquisa), passando pela sua progressão, até à implementação (TWI 2020). A escala original incluía apenas 7 níveis. No entanto, nos anos 90, a NASA adotou uma escala, que se manteve até hoje, de 9 níveis. Quando uma tecnologia se encontra na fase TRL 1, sabe-se que essa mesma tecnologia está ainda a passar pelos primórdios da sua pesquisa científica, ao passo que no nível 9 já foi comprovada e utilizada com sucesso em ambiente real (ESA 2020). Uma descrição mais detalhada de cada nível é exibida na Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição da escala TRL (Adaptado de (Neves 2019))

Fase	Nível TRL	Descrição
Pesquisa	1	Observação e registo dos princípios básicos
	2	Conceito tecnológico formulado
	3	Prova experimental dos conceitos
Desenvolvimento	4	Validação de componentes em ambiente laboratorial
	5	Validação de componentes em ambiente relevante
	6	Validação do sistema/subsistema em ambiente relevante
Implementação	7	Demonstração do protótipo do sistema em ambiente operacional
	8	Sistema completo e qualificado
	9	Sistema aprovado após várias utilizações com sucesso

O produto Next-Road 1.0 situava-se, no princípio desta dissertação, no nível 6 desta escala. O objetivo desta não passa por fazer avanços no sentido da transição de nível, mas sim por otimizar o protótipo atual, por forma a que o trabalho desenvolvido seja continuado, e posteriormente, se atinjam níveis superiores da escala. Desta forma, não foi alcançado o nível seguinte da escala TRL.

1.4 Objetivos da dissertação

O objetivo final da empresa, já numa fase industrial, seria o da criação de percursos de vinte metros deste produto, em zonas estratégicas das vias públicas – imediatamente antes de passadeiras para peões, por exemplo. Para isso, são consideradas as dimensões de 1200 mm x 350 mm x 150 mm do Next-Road 1.0 e o espaço de 50 mm entre cada produto. Tendo apenas este fator em conta, o número de unidades aplicadas em vinte metros de via pública seria dado por:

$$n^{\circ} \text{ unidades}_{\text{aplicação}} = \frac{20 \text{ [m]}}{0.35 + 0.05 \text{ [m]}} = 50 \quad (1)$$

Por questões de equilíbrio de carga, cada produto é apenas atuado por uma das rodas do veículo. Dado o número de rodas presentes num eixo de qualquer veículo (2), a quantidade de unidades Next-Road por aplicação deverá ser multiplicada por dois. Desta forma, é possível compreender que serão necessárias cem unidades em cada percurso de vinte metros.

Por forma a que o até agora explicitado seja facilmente compreendido apresenta-se a Figura 5, que procura evidenciar não só as dimensões do produto, bem como a montagem deste nos pavimentos.

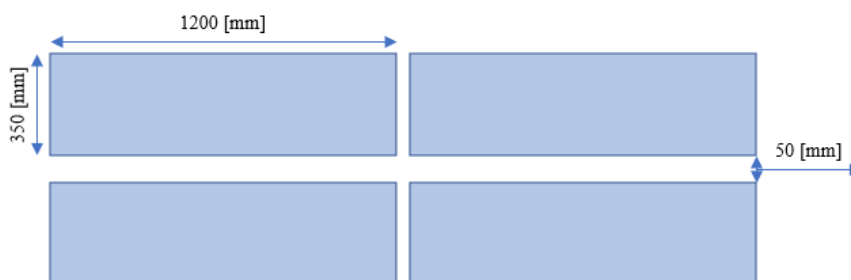


Figura 5 - Vista de cima de 4 unidades Next-Road, e respetivas dimensões

A principal motivação desta dissertação relaciona-se, precisamente, com o início à industrialização do produto da Pavnext. Tomando como ponto de partida o projeto desenvolvido por (Neves 2019), o principal objetivo passa por otimizar a performance técnica e económica da unidade Next-Road 1.0. Esta otimização económica só será possível pela adoção de novos materiais e processos de fabrico, que permitam a produção em grande escala de componentes.

1.5 Planeamento do projeto

Por forma a cumprir os objetivos propostos pela FEUP e pela empresa, a aprendizagem e o trabalho realizados evoluíram de forma sequencial. As etapas percorridas durante a presente dissertação, com vista à otimização do produto da Pavnext, bem como as suas durações, são expostas na Figura 6.

	SET		OUT				NOV				DEZ				JAN				FEV	
SEMANAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ETAPA 1																				
ETAPA 2																				
ETAPA 3																				

- Familiarização com o Next-Road 1.0 (mecanismos, processos e materiais);
- Análise económica e concetual do produto.

- Análise de novas ideologias para a conceção de um novo produto;
- Conceção do novo produto;
- Seleção de materiais.

- Contacto com empresas;
- Validação do produto concebido;
- Análise comparativa.

Figura 6 - Sequência de trabalho

1.6 Método seguido no projeto

Os métodos aplicados para a resolução de problemas e obtenção dos resultados foram baseados nos conhecimentos adquiridos ao longo do curso, na leitura e compreensão de livros e documentos académicos e no contacto com professores e com o mundo empresarial. Por sua vez, todos os estudos e trabalhos desenvolvidos nos diferentes *softwares* na empresa tiveram por base, na sua generalidade, métodos iterativos e cíclicos. Assim, é possível ao leitor compreender que nem todos os resultados foram obtidos apenas com base no conhecimento científico. Quando o resultado esperado não surgiu, procedeu-se à alteração das variáveis em causa nos respetivos *softwares* em busca do resultado desejado.

As funcionalidades do *software* GRANTA EduPack 2020 permitiram uma análise e comparação entre diferentes materiais que pudessem garantir otimizações no produto Next-Road. Com recurso ao *software* SolidWorks® foi possível conceber uma nova solução para o produto da Pavnext, sendo realizados, nesse mesmo *software*, simulações de resistência dos materiais implementados nessa nova solução.

1.7 Estrutura da dissertação

Nesta secção, é especificada a estrutura da dissertação, por forma a que sejam mais claros os assuntos que cada capítulo aborda. Naturalmente, a estrutura deste trabalho segue a sequência lógica de eventos e métodos aplicados, até ao cumprimento dos objetivos finais.

O Capítulo 1 procura formar uma base ao leitor, de maneira a que toda a dissertação seja mais clara e de fácil compreensão. Assim, é realizada uma breve introdução à empresa e ao seu principal produto. Em seguida, explica-se a evolução deste produto até à versão disponível aquando da chegada à empresa. O seu funcionamento é detalhado neste capítulo, bem como os objetivos propostos para a presente dissertação.

No Capítulo 2 é demonstrado o estado da arte de variados temas intimamente relacionados com a dissertação. Desta forma, são abordados os processos de fabrico analisados, as metodologias para a seleção de materiais, os materiais estudados – já implementados no produto e de possível implementação – e o princípio de funcionamento do *software* utilizado para a realização das simulações de resistência dos componentes.

O capítulo seguinte, intitulado “Estudo económico e concetual dos sistemas Next-Road 1.0” inicia a discussão de resultados desta dissertação. Nesta secção são expostas as análises económica e concetual realizadas ao Next-Road 1.0, com o objetivo de identificar os componentes críticos desse mesmo produto.

No Capítulo 4, “Next-Road 2.0: Alternativas idealizadas e implementadas”, são expostas as principais alternativas idealizadas aos componentes do produto Next-Road 1.0, bem como a sua materialização num novo produto, concebido no *software* SolidWorks®.

Os Capítulos 5 e 6, “Next-Road 2.0: Seleção de materiais” e “Next-Road 2.0: Validação dos componentes”, expõem a concretização de alguns dos objetivos principais desta dissertação. Assim, é apresentada a seleção de materiais com o recurso ao *software* GRANTA EduPack 2020 e a validação dos componentes do produto Next-Road 2.0 compostos pelos materiais selecionados. Os resultados são exibidos neste capítulo.

O Capítulo 7, “Comparação entre as versões pré-industrial e industrial”, indica o valor do custo de produção do produto concebido no decorrer da dissertação, comparando-o com o Next-Road 1.0.

No capítulo final, 8, são realçadas as conclusões acerca de todo o trabalho desenvolvido e apresentadas propostas de trabalhos futuros e melhoria das soluções apresentadas.

2 Introdução teórica

2.1 Processos de fabrico utilizados nos produtos

Nesta secção são apresentados os processos de fabrico estudados. Foram analisados processos já implementados e processos de possível implementação. Uma vez que o foco principal deste trabalho é o estudo e adoção de novos materiais, e visto que estes estão intimamente ligados a processos de fabrico, é inevitável a abordagem de algumas noções sobre cada um deles. No entanto, não será explicitado o seu funcionamento ao pormenor.

2.1.1 Maquinagem

Aquando da entrada na empresa, o protótipo do produto Next-Road disponível era praticamente todo concebido pelo processo de maquinagem de ligas de alumínio, aço e alguns materiais poliméricos. O processo de maquinagem pode ser entendido pelo corte ou desbaste de material, implicando a formação de apara do elemento maquinado. Geralmente, os materiais mais comuns neste processo são metálicos: ferrosos (aço por exemplo) ou não ferrosos (caso das ligas de alumínio). No entanto, materiais não metálicos podem ser utilizados neste processo: caso de polímeros, materiais compósitos, entre outros (Batista 2010).

Os processos de maquinagem podem ser divididos em duas grandes variantes: os processos convencionais e os não convencionais. Dentro dos primeiros destacam-se os processos de furação, torneamento e fresagem. Segundo Davim (1995), os não convencionais utilizam as energias química, elétrica ou térmica ao invés da energia mecânica empregue nos processos convencionais e estão subdivididos em: maquinagem por eletroerosão, eletroquímica, por ultrassons, por feixe de eletrões e por laser. Segundo Kumar, Zindani et al. (2018), os materiais usados para satisfazer as necessidades dos clientes são cada vez mais duros, resistentes e de difícil desbaste e corte. Além disso, devido à evolução tecnológica global e à crescente competitividade, são requeridas formas mais complexas, melhores acabamentos superficiais, tolerâncias mais apertadas e maiores taxas de produção (Jain 2002). Assim, foram desenvolvidos os *Advanced Machining Processes* (ADM) que, em conjunto com a introdução da tecnologia de Controlo Numérico por Computador (CNC), são capazes de acompanhar as crescentes exigências.

No entanto, os processos mais utilizados na produção do Next-Road 1.0 são os três processos convencionais acima referidos. A maioria dos componentes em alumínio foram concebidos recorrendo a uma fresadora, enquanto que para os elementos em aço se utilizou um torno CNC. O processo não convencional de corte a laser foi também muito utilizado.

Este processo permite a produção de peças com elevada complexidade e bom acabamento superficial e é um processo económico para a produção de peças únicas. Por estas mesmas razões, o produto mais recente da Pavnext, apesar de ter sido idealizado para a produção da maioria dos seus componentes por extrusão de alumínio, foi concebido utilizando os recursos dos processos de maquinagem.

No entanto, sendo a produção em grande escala um passo importante para a otimização económica de qualquer produto, a produção exclusiva das unidades Next-Road por estes processos não se revela vantajosa.

2.1.2 Extrusão

O processo de extrusão de ligas de alumínio, exibido na Figura 7, inicia-se com o pré-aquecimento dos billetes de alumínio até 450°C, que são depois inseridos na prensa de extrusão. O processo em si fica completo com a passagem destes billetes a pressão elevada através de uma matriz, que lhe conferirá a forma desejada. Assim, é formado um perfil de alumínio que, após sair da matriz, é rapidamente arrefecido, sendo em seguida cortado nas dimensões pretendidas, determinando assim o número de peças extrudidas. Os processos de têmpera e envelhecimento podem ainda ser utilizados no final, com o objetivo de conferir aos componentes as propriedades mecânicas necessárias (Navarra 2020, Sosoares 2020).

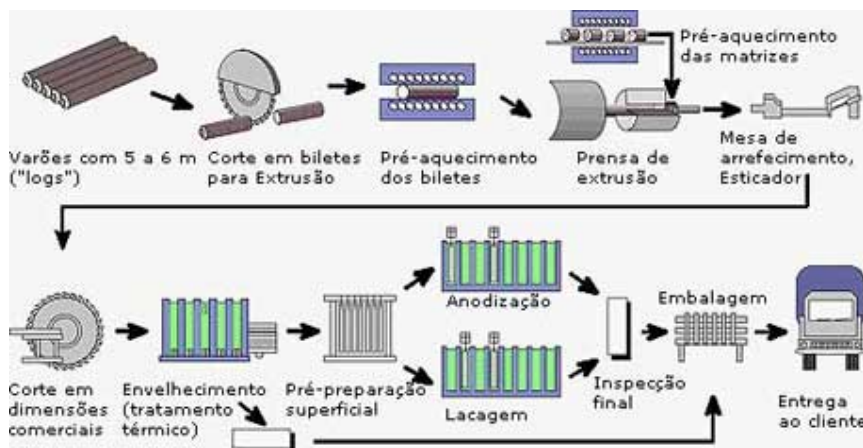


Figura 7 - Processo de extrusão de ligas de alumínio (In <https://www.infoescola.com/engenharia/extrusao/>. Acedido em 4 dez., 2020)

As grandes vantagens deste processo prendem-se com a possibilidade de produção de componentes em série. “A ferramenta de aço tem um ou mais orifícios com a forma do produto final, que origina as barras extrudidas de até 17 metros, ...”, segundo Marcelo Rodrigues, diretor comercial da área de extrusão da empresa Hydro (Alumínio 2020). Com a produção de perfis desta dimensão e posterior corte nas dimensões desejadas, um elevado número de componentes pode ser produzido com uma só extrusão.

Por outro lado, o custo das matrizes de extrusão pode revelar-se relativamente elevado se o perfil da peça a produzir for complexo. Para séries de produção de grande volume, o custo da matriz acaba por se diluir no custo das peças. Assim, para este tipo de séries, o valor de cada componente equivale praticamente ao custo de cada quilograma de liga de alumínio. No entanto, para séries de produção baixas, este processo não se revela uma opção viável, visto que o valor investido nas matrizes de extrusão não irá compensar em relação a outros processos de fabrico. É possível comprovar este fenómeno com o auxílio da Figura 8.

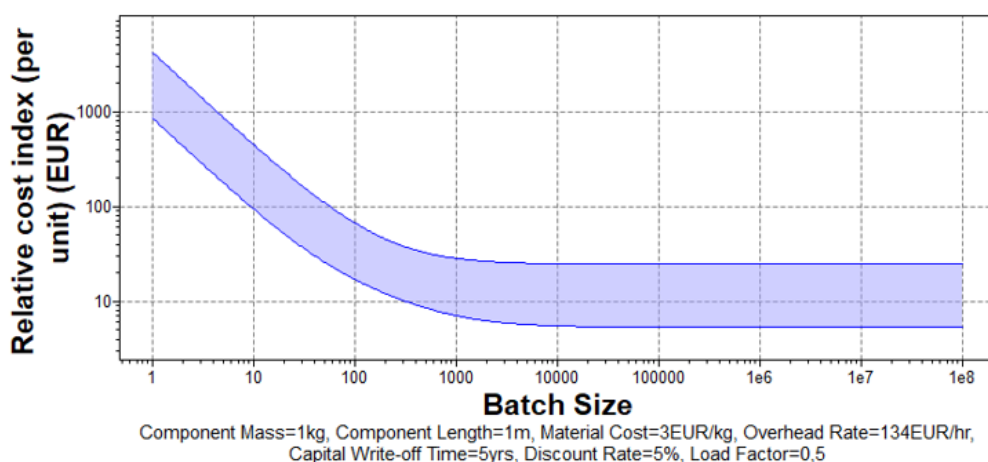


Figura 8 - Evolução do custo unitário do componente extrudido consoante o volume da série de produção (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 4 dez., 2020)

Assim, compreende-se a razão da conceção do produto Next-Road 1.0 quase exclusivamente por processos de maquinagem. O processo de extrusão seria ideal para a produção de um elevado número de unidades do protótipo, mas nunca para uma única unidade, sendo este um dos objetivos futuros da empresa.

Em contrapartida, os componentes extrudidos poderão apresentar limitações geométricas: formas demasiado complexas podem não ser possíveis de produzir e a adição de furos e ocos na direção perpendicular à direção de extrusão do perfil não é possível. Assim, a maquinagem assumirá um papel importante no pós-processamento das peças extrudidas, tornando-as mais complexas e conferindo-lhes as características pretendidas pelos clientes. Desta forma, o custo associado a cada componente apresentará um elevado valor acrescentado.

O processo de extrusão, como já se referiu, foi idealizado como o pilar do Next-Road 1.0. A extrusão de ligas de alumínio seria o processo mais utilizado – presente em variados elementos dos três conjuntos –, sendo a extrusão de borracha igualmente implementada – em elementos do C_T.

2.1.3 Moldação por injeção de plásticos

O processo de injeção de plásticos consiste na fusão do termoplástico e posterior injeção a elevadas pressões num molde. O contacto do polímero a elevadas temperaturas com as paredes frias do molde faz com que solidifique, dando-se em seguida a abertura do molde.

Este é um processo que pode oferecer vários benefícios, tendo em vista o pensamento industrial e a otimização económica do produto. A moldação por injeção de material polimérico é ideal para a produção em série de componentes, dada a capacidade de cada molde produzir várias peças e com ciclos de injeção entre dois segundos e dois minutos (Plastics 2020).

Além disto, este é um processo capaz de garantir formas complexas, com tolerâncias muito baixas. Os moldes podem apresentar saliências, ranhuras, insertos metálicos e furos. Além disso, a possível inclusão de movimentos laterais no período de desmoldação permite a criação de ocos e formas desejadas em qualquer plano. Naturalmente, nestas condições, o custo do molde será superior. No entanto, é, desta forma, eliminada a necessidade de processos posteriores que confiram complexidade às peças, condicionante verificada no processo de extrusão.

Por outro lado, o custo dos moldes para a produção de peças por injeção polimérica é muito elevado. O molde é um produto complexo, sobre o qual estarão aplicados os custos de mão de obra, do material e das horas de maquinagem necessárias à sua produção. Por esta mesma razão, o fabrico de componentes de grandes dimensões pode ser limitado, dado que estes requerem moldes de grande porte, que requereriam máquinas de tamanho elevado. No entanto, uma vez feito o investimento, o preço a pagar por cada componente produzido é muito baixo, visto que será dado pelo custo por quilograma de material polimérico utilizado. Além disso, a vida útil dos moldes para injeção de polímeros é tipicamente elevada (Plastics 2020). Na produção dos componentes, é possível utilizar moldes de alumínio ou de aço – aço pré-tratado ou aço temperado. Enquanto que os primeiros são indicados para a produção de amostras reduzidas, os moldes de aço são capazes de produzir componentes na ordem das centenas de milhares, podendo atingir valores na casa do milhão de componentes.

Analisando a Figura 9, é possível comprovar algumas das afirmações presentes nos parágrafos anteriores. Os elevados custos dos moldes influenciam o custo de cada componente produzido, no caso de séries de produção de baixa importância. À medida que o volume da série aumenta, pode-se verificar uma queda abrupta no valor unitário de cada componente, aproximando-se do valor monetário por quilograma do polímero utilizado. Isto deve-se à diluição do custo do molde no custo de cada peça.

Repare-se ainda que, por comparação das figuras 8 e 9, o investimento inicial em moldes de injeção é muito superior ao necessário em matrizes de extrusão.

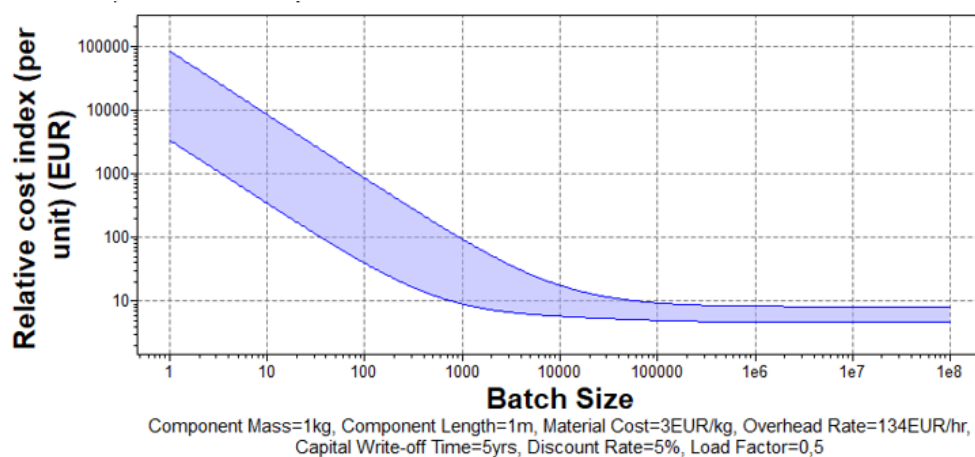


Figura 9 - Evolução do custo unitário do componente injetado consoante o volume da série de produção (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 6 dez., 2020)

Outra limitação que é possível identificar neste processo de fabrico em relação a outros processos em série que utilizam os metais como matéria prima poderá ser as baixas propriedades mecânicas que os polímeros oferecem, comparados com as ligas de alumínio. Este será um estudo que será realizado no decorrer desta dissertação.

2.2 Seleção de materiais

Neste subcapítulo serão abordados aspetos importantes relacionados com o cumprimento dos objetivos principais desta dissertação. Assim, serão expostas as diferentes famílias de materiais e as suas principais propriedades, os objetivos e razões para o início de um estudo de seleção de materiais e os critérios e fatores a ter em conta para a sua correta realização.

Com o passar dos anos, a engenharia e a ciência foram sofrendo avanços e, deste modo, diversos materiais com diferentes propriedades foram surgindo. Atualmente, há uma infinidade de materiais disponíveis e é possível a combinação entre eles de forma a obter diferentes propriedades, que se ajustam a diferentes aplicações e necessidades.

Segundo Ashby (2012), é possível classificar os materiais de engenharia em seis famílias: metais, polímeros, elastómeros, cerâmicos, vidros e híbridos. O autor sugere a divisão das famílias em classes, subdividindo-se estas em membros, que são os materiais disponíveis no planeta. Cada material possui uma série de propriedades, que determinam os comportamentos mecânico, físico, térmico ou elétrico dos materiais em situações específicas.

Na Figura 10, está exemplificada a desconstrução da família “Metais” até ao material “Al 6061” (uma das ligas utilizadas no Next-Road 1.0).

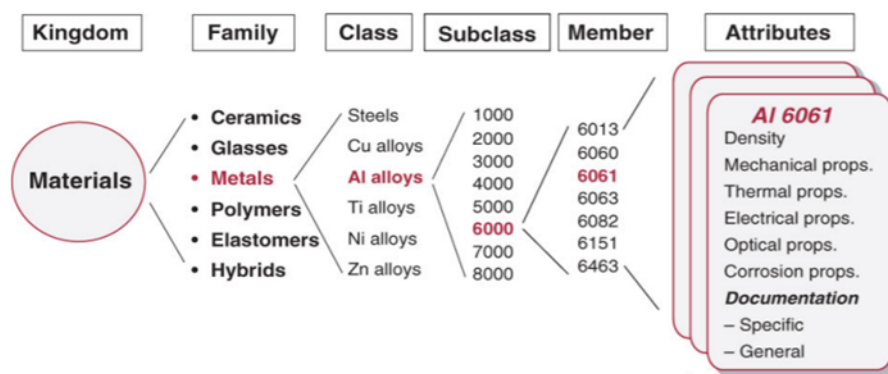


Figura 10 - Organização dos materiais (In https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Materiaalkunde_1_slides_chapter2.pdf. Acedido em 8 dez., 2020)

Consoante os requisitos que o componente deve cumprir, o material selecionado deve ter certas propriedades. Com recurso ao *software* GRANTA EduPack 2020, é possível identificar as propriedades que podem ser de útil análise para uma correta seleção de materiais. São elas:

- Propriedades físicas;
- Propriedades mecânicas;
- Propriedades de impacto e fratura;
- Propriedades térmicas;
- Propriedades elétricas;
- Propriedades magnéticas;
- Propriedades óticas;
- Propriedades ecológicas.

Além das propriedades referidas, fatores como o preço por quilograma de material, a sua durabilidade quando em contacto com diversos fluidos ou os processos de fabrico para os quais estão aptos a ser utilizados, também são condicionantes importantes na hora de seleccionar materiais para determinadas aplicações.

Para além destes pontos, os aspetos intangíveis dos materiais também podem ter um papel importante na seleção. Estes fatores relacionam-se com a época, a cultura e o público alvo do produto para o qual se seleccionam os materiais. Podem também estar interligados com os sentidos e com as sensações que um material provoca numa pessoa (Barauna, Razera et al. 2015). No entanto, a seleção de materiais neste projeto estará diretamente relacionada com os aspetos tangíveis, dado que a grande maioria dos materiais seleccionados estarão incorporados em componentes não visíveis ao público.

2.2.1 Motivos para a seleção de materiais

A seleção de materiais pode acontecer por diversos motivos num projeto. Assim, pode surgir:

- Na conceção de um produto novo, não havendo qualquer restrição sobre o material;
- Na criação de um novo produto para uma empresa que já apresente um processo de fabrico que pré-determina certos materiais;
- No redesign de um produto, com vista a melhoria do seu desempenho;
- Com vista a redução de custos;
- Com vista a redução do peso de componentes, a redução do impacto ambiental ou o aumento da sua vida útil.

2.2.2 Método para a seleção de materiais

Nesta secção é abordado o método para a seleção de materiais de Michael Ashby. Segundo o autor, a seleção deve combinar a experiência com um procedimento sistemático. Só a experiência do “seleccionador” pode ser um fator limitante, dado o incontável número de materiais que foram surgindo (Nunes 2015).

O método deve iniciar-se com o definir dos requisitos que o componente/projeto em questão deve cumprir. Estes, podem ser identificados de acordo com as propriedades gerais dos materiais. Por exemplo, deseja-se produzir um componente para uma certa aplicação que apresente baixa densidade, alta resistência à tração e alta durabilidade em contacto com ácidos. Só o conhecimento humano não seria capaz de filtrar todos os materiais que conferissem ao produto desejado essas características. Assim, Ashby construiu diagramas de propriedades de materiais, para facilitar a filtragem destes aquando da sua seleção. Nesses diagramas contemplou dados para trinta das mais importantes propriedades de caracterização dos materiais e para projetos de engenharia, para as famílias e classes de materiais já mencionadas (Ashby 2012). Na Figura 11 é possível visualizar um dos diagramas de Ashby.

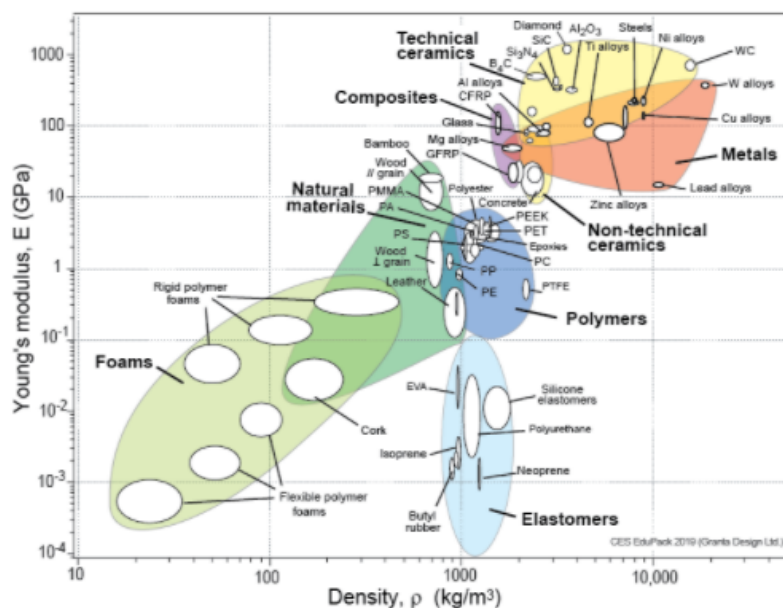


Figura 11 - Diagrama Módulo de Young-Densidade de Ashby (In <https://www.grantadesign.com/education/students/charts/>. Acedido em 13 fev., 2021)

Estes diagramas permitem reduzir o número de materiais selecionáveis. No entanto, a quantidade de materiais que pode ser mostrada em qualquer um deles é limitada. Quando há uma quantidade mínima de restrições, podem ser diagramas úteis. Caso contrário, o seu uso não auxilia de forma totalmente eficaz a seleção de materiais. Desta forma, surge a implementação de *softwares* como o GRANTA EduPack 2020.

Assim, identificam-se as propriedades dos materiais críticas ao estudo, decide-se quais serão usadas como critério de excelência e procede-se à geração de diagramas que irão restringir a quantidade de materiais aptos para satisfazer as necessidades impostas.

Este *software* permite limitar os diagramas que confrontam duas propriedades de forma mais eficaz. É possível impor-lhes limites de ordem de grandeza. Além disso, aspetos que não sejam quantificáveis – materiais resistentes ao desgaste, à corrosão, processos de fabrico para os quais cada material está apto a ser utilizado, ... - podem limitar ainda a escolha dos materiais, para além das duas propriedades quantificáveis escolhidas.

Seleção de materiais no GRANTA EduPack 2020 (caso hipotético)

Com o objetivo de comprovar as funcionalidades descritas acerca deste *software*, imagine-se um caso hipotético em que uma empresa pretenda selecionar um material para a produção de um componente que seja leve e que apresente um elevado módulo de rotura/resistência à flexão. Para além disso, terá de apresentar elevada durabilidade em contacto com a água salgada e o seu valor não deverá ultrapassar os 4€/kg. No entanto, na empresa em questão, o processo de sinterização seletiva a laser de materiais poliméricos já está implementado, pelo que só materiais que possam ser utilizados nesse processo podem ser selecionados.

De forma a iniciar um estudo de seleção de materiais no GRANTA EduPack 2020 é necessário aceder ao menu “Chart/Select”, como é possível visualizar na Figura 12.

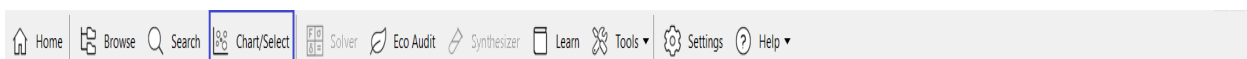


Figura 12 - Barra de ferramentas do GRANTA EduPack 2020 (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020)

Em seguida, é importante selecionar a base de dados “MaterialUniverse: All materials” (Figura 13), de maneira a que o estudo seja o mais abrangente possível.



Figura 13 - Seleção da base de dados para o estudo (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020)

O GRANTA EduPack 2020 permite, desde o princípio do estudo, limitar a seleção a materiais que possam ser usados num processo de fabrico em específico. Para isso, é necessário aceder ao menu “Tree Stage” e selecionar o processo em questão. Esta ferramenta permite ainda incluir materiais específicos no estudo, de forma a compará-los com os materiais selecionáveis para a aplicação em questão. Esta funcionalidade pode ser útil quando se procura substituir um material de um componente por outro, por forma a comparar as suas principais propriedades. Na Figura 14 é possível a visualização desse menu. O processo de fabrico que limita a escolha do material para o caso hipotético em questão está já selecionado, podendo ser confirmado na janela “Selected Records”.

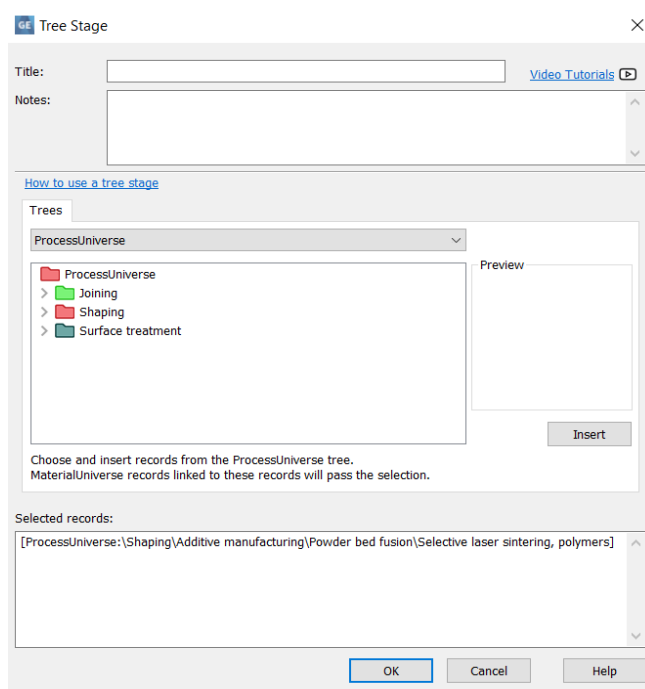


Figura 14 - Menu "Tree Stage" do software GRANTA EduPack 2020 (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020)

O passo seguinte é impor condições de fronteira às propriedades críticas dos componentes em questão. Assim, acedendo ao menu “*Limit*” é possível fazê-lo. Analisando a Figura 15, é fácil compreender a utilidade deste menu na seleção de materiais utilizando o GRANTA EduPack 2020. É possível impor limites em todo o tipo de propriedades quantitativas. Além disso, as propriedades que não são quantificáveis podem funcionar como condições limite.

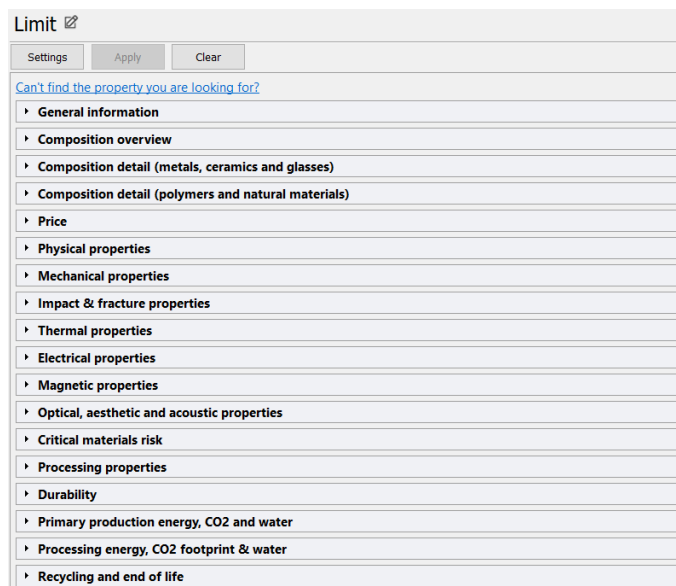


Figura 15 - Menu "Limit" do software GRANTA EduPack 2020 (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020)

O caso de estudo descrito prendia-se com a seleção de um material leve e que apresentasse um elevado módulo de rutura. Para além disso, deveria ter um valor máximo de 4€/kg e ser durável em contacto com a água salgada. Assim, usando o menu “*Limit*” do *software* é possível restringir de forma eficaz os materiais que cumprem os requisitos impostos pela empresa (Figura 16).

▼ Price			
	Minimum	Maximum	
Price		4	EUR/kg
Price per unit volume			EUR/m ³

▼ Physical properties			
	Minimum	Maximum	
Density		1600	kg/m ³
Dynamic viscosity (absolute viscosity)			Pa.s

▼ Mechanical properties			
	Minimum	Maximum	
Young's modulus			GPa
Specific stiffness			MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)			MPa
Tensile strength			MPa
Specific strength			kN.m/kg
Elongation			% strain
Compressive strength			MPa
Flexural modulus			GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	150		MPa
Shear modulus			GPa
Bulk modulus			GPa
Poisson's ratio			
Shape factor			
Hardness - Vickers			HV
Elastic stored energy (springs)			kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles			MPa

▼ Durability	
Water (fresh)	
Water (salt)	Excellent
Weak acids	
Strong acids	
Weak alkalis	
Strong alkalis	
Organic solvents	
Oxidation at 500C	
UV radiation (sunlight)	
Galling resistance (adhesive wear)	
Flammability	

Figura 16 - Condições de fronteira impostas para a seleção de materiais (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020)

O passo final é gerar um diagrama que confronte as duas propriedades definidas como os critérios de excelência. Como é possível aferir, pela Figura 17, foi gerado um diagrama *Densidade x Módulo de rutura*. Nele apenas estão contemplados materiais que podem ser usados no processo de sinterização seletiva a laser de materiais poliméricos, com preço “< 4€/kg”, densidade até 1600 kg/m³, módulo de rutura superior a 150 MPa e com excelente durabilidade em contacto com água salgada. Assim, a seleção ficou reduzida a treze materiais, cabendo, desta forma, à empresa, decidir qual o material que apresenta o melhor compromisso entre o peso e a resistência à flexão para o componente em questão.

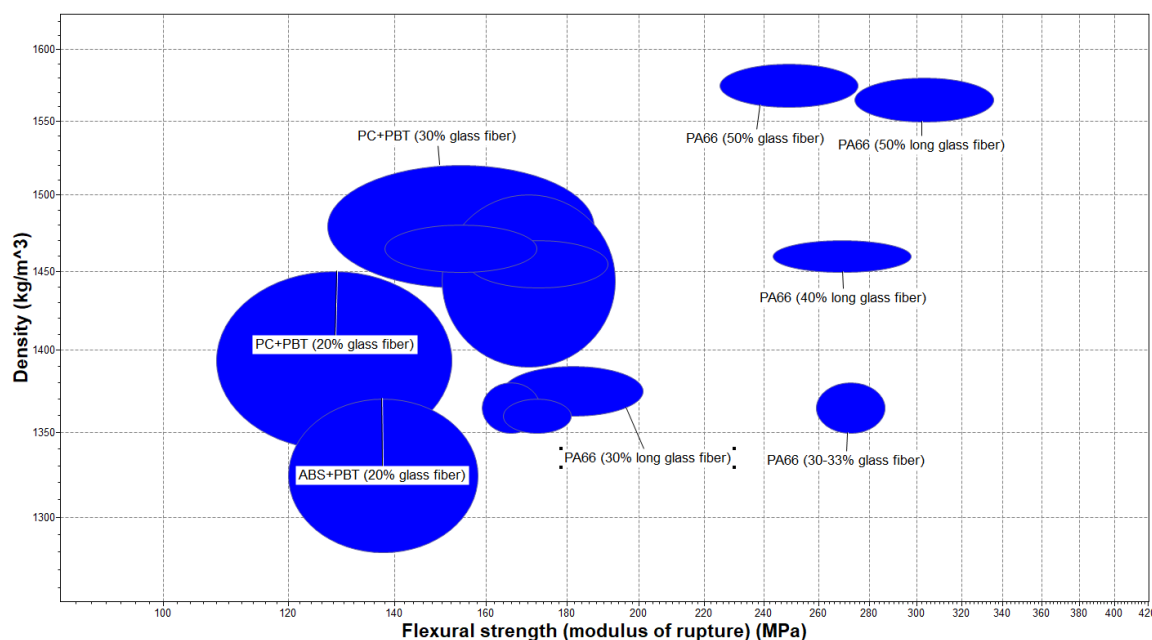


Figura 17 - Diagrama Densidade-Módulo de Ruptura para auxílio da seleção de um material para o caso hipotético (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 9 dez., 2020)

2.3 Materiais estudados

A seleção de materiais será um dos passos decisivos para a otimização do produto Next-Road. No entanto, para a sua correta realização é necessário realizar o estudo dos materiais já implementados no produto, de forma a compreender o que as suas principais características lhe oferecem. Assim, nesta secção, serão analisados não só os materiais já implementados, mas também alguns que os possam substituir.

2.3.1 Ligas de alumínio

As propriedades oferecidas pelo alumínio e as suas ligas tornam-no um dos mais versáteis e usados materiais metálicos em todo o mundo. Dadas as não tão boas propriedades mecânicas do alumínio não ligado, é comum a adição de elementos de liga a este metal, formando assim as ligas de alumínio. Desta forma, é conseguido um conjunto de propriedades que são muito solicitadas (Silva, Alves et al. 2013).

Há dois tipos de ligas: as de fundição e as trabalhadas (*wrought aluminum alloys*). A composição para cada variante é designada por um número de quatro dígitos que assinalam os principais elementos de liga (Silva, Alves et al. 2013). Dados os processos de extrusão/maquinagem implementados para a produção do produto da Pavnext, a liga de alumínio utilizada foi uma liga trabalhada. Na Tabela 4 são apresentadas as diferentes ligas de alumínio.

Tabela 4 - Ligas de alumínio trabalhadas e de fundição (Adaptado de (Silva, Alves et al. 2013))

Série das ligas		Principais elementos de liga	Tratamento de endurecimento
Trabalhadas	Fundidas		
1xxx	1xx.x	Alumínio puro	-
2xxx	2xx.x	Cobre	+
3xxx	6xx.x	Manganês	-
4xxx	4xx.x	Silício	-
5xxx	5xx.x	Magnésio	-
6xxx	3xx.x	Magnésio e Silício	+
7xxx	7xx.x	Zinco	+
8xxx	8xx.x	Lítio	+

As características das ligas de alumínio trabalhadas fazem delas materiais usados para um variado número de aplicações. São elas:

- **Baixa densidade em comparação com outros metais:** o alumínio e as suas ligas apresentam uma densidade na ordem dos 2700 kg/cm³. O facto de combinarem este baixo peso com resistências relativamente elevadas faz com que possam substituir metais mais densos, sem que se verifiquem perdas ao nível de suporte de cargas (Kaufman 2000);
- **Resistência à corrosão:** devido à formação natural da camada de óxido de alumínio (Al₂O₃), a resistência à corrosão de algumas ligas é excelente (Kaufman 2000);
- Elevadas condutividades térmica e elétrica (Kaufman 2000);
- **Resistência a baixas temperaturas:** devido à sua estrutura CFC, as ligas de alumínio não são frágeis. A sua ductilidade, tenacidade e resistência tomam valores maiores em temperaturas abaixo de zero graus celsius (Kaufman 2000, Silva, Alves et al. 2013);
- **Boa conformabilidade:** as ligas de alumínio são ideais para o processo de extrusão a quente, podendo adquirir várias formas, devido à sua maleabilidade e ductilidade. Além disso, estes materiais apresentam relativa facilidade de maquinagem, o que pode ser muito útil após o processo de extrusão;
- **Reciclável:** o alumínio e as suas ligas são dos materiais de construção de mais fácil reciclagem, não alterando as suas propriedades. Assim, o alumínio reciclado permite a produção de componentes de elevada qualidade (Kaufman 2000).

Como é possível aferir pela Tabela 4, há ligas que necessitam de tratamentos térmicos de endurecimento, de forma a melhorar as suas propriedades e a atingir resistências máximas. Essas ligas estão assinaladas na tabela com o símbolo “+”. Por outro lado, as que apresentam o sinal “-” não são tratáveis termicamente, e, por isso, utilizam fenómenos de encruamento (trabalho a frio) para a melhoria das suas características (Kaufman 2000).

Estes tratamentos podem ser rapidamente identificados na designação da liga de alumínio em questão. Depois dos quatro dígitos que indicam a série da liga, é indicado o tipo de tratamento aplicado, com uma letra. A letra F representa o estado bruto, ao passo que as letras H e O representam os estados encruado e recozido, respetivamente (Silva, Alves et al. 2013). Os tratamentos térmicos são assinalados com a letra T. Devido à grande variedade de possibilidades, é feita uma breve explicação sobre alguns dos tratamentos:

- **T3:** A liga é submetida a um recozido de solução ou têmpera, depois é encruada a frio e, posteriormente, envelhecida naturalmente;
- **T4:** A liga é submetida a um recozido de solução ou têmpera, procedendo-se, em seguida, a um envelhecimento natural;
- **T6:** É realizado um recozido de solução e, posteriormente, um envelhecimento artificial.

Esta introdução teórica ajuda a compreender a seleção das ligas de alumínio para conceber o produto Next-Road 1.0. A escolha recaiu sobre as ligas alumínio-silício-magnésio (série 6xxx), por ser a série mais utilizada em processos de extrusão na indústria. Foram selecionadas, para os diferentes componentes extrudidos, as ligas EN-AW-6061 T6 e EN-AW-6063 T6.

Como já foi abordado, estes materiais apresentam inúmeras vantagens. No entanto, apresentam algumas limitações. Uma delas, estando até diretamente relacionada com o processo de extrusão destas ligas, foi já mencionada na secção 2.1.2: poderão ser necessários processos de maquinagem para tornar as peças extrudidas mais complexas, o que significa um aumento considerável no custo dos componentes produzidos nestas ligas.

Além disso, apesar de as ligas de alumínio apresentarem densidades baixas em comparação com a maioria dos metais de construção, conferem ainda um peso relativamente elevado aos componentes, considerando uma linha de montagem manual.

A elevada condutividade térmica, apresentando-se como uma vantagem num variado número de aplicações, é uma desvantagem apresentada pelas ligas de alumínio no produto Next-Road. Sendo este um produto de aplicação nas vias, e estando em contacto com materiais como o alcatrão, a elevada condutividade térmica do alumínio pode ser um inimigo à durabilidade de alguns componentes do Next-Road.

As limitações referidas poderão ser contrariadas com a implementação de materiais poliméricos e compósitos, daí a necessidade do estudo destes materiais.

2.3.2 Materiais poliméricos

O estudo destes materiais é motivado pelas limitações apresentadas pelo processo de extrusão de ligas de alumínio, tendo sido identificados os materiais poliméricos e a moldação por injeção destes como uma possível solução.

Segundo Biron (2018), entre a década de 70 do século passado e o ano de 2015, o crescimento médio anual do consumo de plásticos foi de 5,4%, sendo de 4% para o alumínio e apenas 2,2% para o aço. O avanço tecnológico está diretamente relacionado com o surgimento de novos polímeros, que, em muitas situações, podem ser capazes de substituir os metais e os cerâmicos.

A família dos polímeros pode ser organizada em termoplásticos, elastómeros e plásticos termoendurecíveis. Estes últimos, uma vez processados, não poderão ser fundidos. São rígidos e frágeis e a exposição a altas temperaturas provocará, assim, uma decomposição do material. Por sua vez, os elastómeros são polímeros que apresentam uma grande capacidade de deformação quando solicitados, recuperando em seguida a sua forma (Silva, Alves et al. 2013).

No entanto, o foco do estudo dos materiais poliméricos foram os termoplásticos. Os polímeros deste tipo podem ser fundidos, quando submetidos a temperaturas entre os 150°C e os 400°C (Ansys 2020). Os termoplásticos apresentam a vantagem de poderem ser submetidos a esse processo de aquecimento e fusão várias vezes. Assim, são passíveis de moldar e remoldar,

revelando-se materiais recicláveis, ao invés do que sucede com os elastómeros e os termoendurecíveis.

Tal como demonstra a Figura 18, os termoplásticos, de acordo com a sua estabilidade térmica, podem ser agrupados em: plásticos *standard*, plásticos de engenharia e plásticos de alta performance.

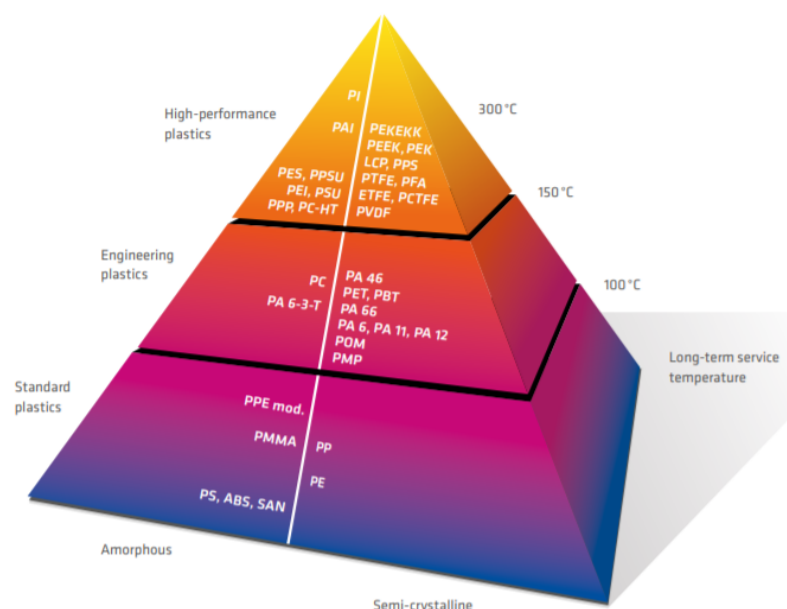


Figura 18 - Classificação dos termoplásticos segundo a sua estabilidade térmica (Adaptado de <https://www.piedmontcmg.com/contract-manufacturing-capabilities/plastics-machining/>. Acedido em 19 dez., 2020)

Com vista a seleção de materiais capazes de substituir o alumínio já presente no produto da Pavnext, é de particular interesse o estudo dos denominados plásticos de engenharia, dado o elevado custo dos de alta performance. A Figura 18 mostra os polímeros que constituem cada um desses grupos, fazendo ainda a distinção em termoplásticos semicristalinos (os que cristalizam parcialmente ao arrefecer) ou amorfos/vítreos (Silva, Alves et al. 2013). Além disso, é evidenciada uma das desvantagens do uso dos termoplásticos de engenharia: as temperaturas máximas de serviço rondam os 150°C apenas.

Por outro lado, o uso destes materiais contraria as grandes desvantagens apresentadas pela extrusão de ligas de alumínio. Um dos processos mais comuns para o processamento de termoplásticos é a moldação por injeção. Como já foi abordado nesta dissertação, na secção 2.1.3., este processo de fabrico permite a produção em série de componentes com formas complexas e bons acabamentos superficiais, evitando a necessidade de maquinaria posterior.

Outra das vantagens dos termoplásticos em relação às ligas de alumínio está relacionada com o peso dos dois materiais. Analisando a Figura 19, é possível estabelecer uma comparação entre os valores típicos para as massas volúmicas dos dois tipos de materiais. Os termoplásticos – representados a azul – apresentam valores entre os 900 e os 1500 kg/cm³, ao passo que o peso específico do alumínio e das suas ligas ronda os 2700 kg/cm³. Esta é uma vantagem valiosa em termos da montagem do produto e montagem no solo manual necessária no produto da Pavnext.

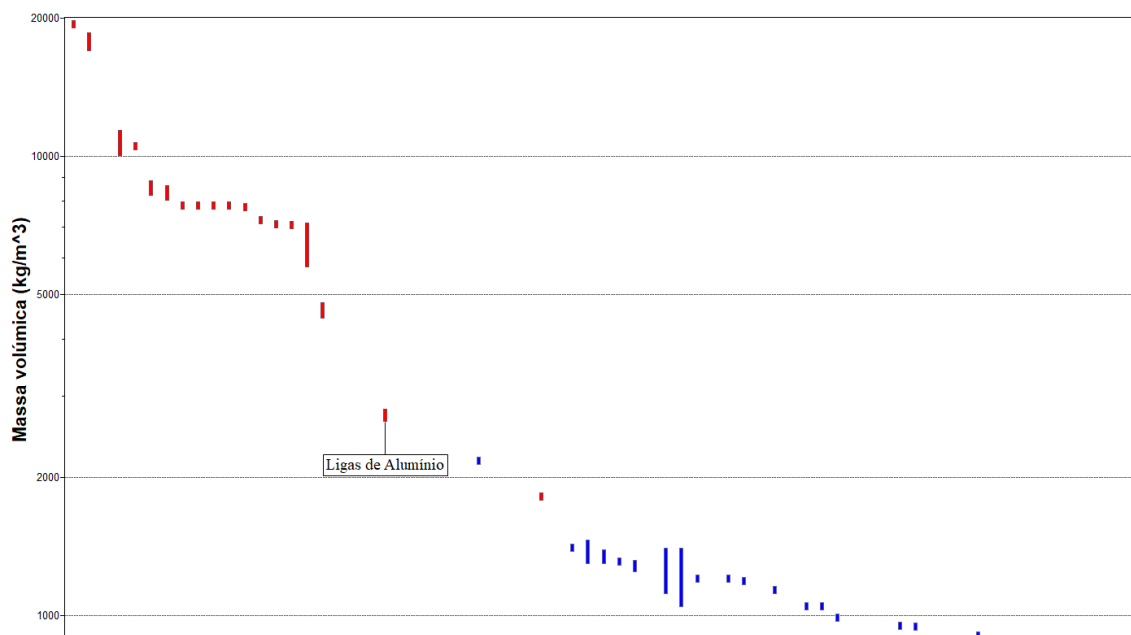


Figura 19 - Valores típicos da massa volúmica dos metais e suas ligas e dos termoplásticos (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 20 dez., 2020)

Além disso, os termoplásticos são bons isoladores térmicos, dada a baixa condutividade térmica que apresentam. Isto será benéfico para o produto Next-Road, visto que estes materiais não irão conduzir calor. No entanto, há que ter em consideração as temperaturas máximas de serviço dos termoplásticos de engenharia, que rondam os 150°C. Assim, estes materiais poderão ser boas opções para componentes internos do produto, tendo de ser evitados para componentes que estejam em contacto directo com o alcatrão nas vias.

Contudo, os termoplásticos, por si só, apresentam uma grande limitação em relação aos metais e, mais concretamente, em relação às ligas de alumínio: piores propriedades mecânicas.

Desta forma, serão feitas comparações entre alguns metais e termoplásticos, acerca de algumas das suas propriedades mecânicas. Para isso, foram elaborados gráficos que comparam essas mesmas propriedades, recorrendo ao *software* GRANTA EduPack. Os metais e suas ligas encontram-se representados a cor vermelha, ao passo que os termoplásticos estão representados a azul.

A Figura 20 permite comparar o módulo de Young/elasticidade – propriedade que mede a rigidez de um material sólido. Os valores variam entre os 0,2 e os 4 GPa para os termoplásticos, enquanto que para os metais esses números já são bem mais elevados. No caso concreto das ligas de alumínio, este valor ronda os 70 GPa.

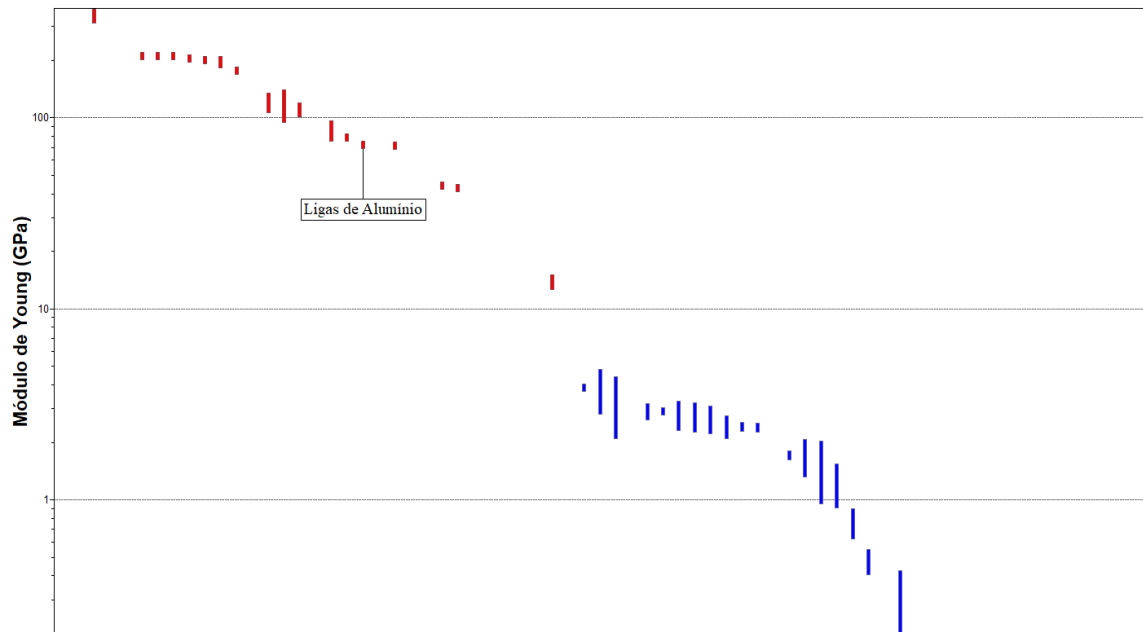


Figura 20 - Valores típicos do módulo de elasticidade dos metais e suas ligas e dos termoplásticos (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 20 dez., 2020)

Outra propriedade mecânica de particular interesse é a tenacidade à fratura. A tenacidade, por si só, mede a capacidade de um material armazenar energia sem que ocorra fratura do mesmo (Ansys 2020).

Analisando a Figura 21, rapidamente se percebe que as ligas metálicas apresentam valores muito superiores aos dos termoplásticos, no que à tenacidade à fratura diz respeito. As ligas de alumínio podem suportar valores na ordem dos 30 MPa/m², até que ocorra a fratura. O intervalo de valores, para os polímeros em questão, varia entre os 0,5 e os 5 MPa/m².

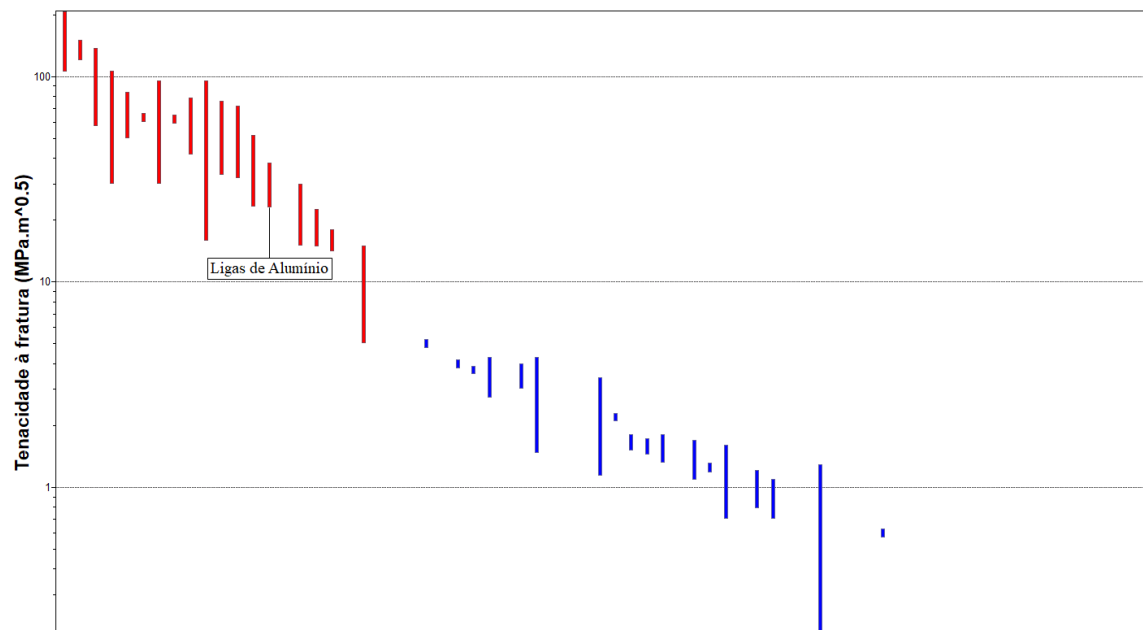


Figura 21 - Valores típicos da tenacidade à fratura dos metais e suas ligas e dos termoplásticos (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 20 dez., 2020)

Assim, é possível compreender que, para aplicações que requerem elevadas performances sob condições de carga elevada, os termoplásticos podem apresentar limitações. No entanto, existem mecanismos de melhoria das propriedades mecânicas destes materiais.

2.3.3 Materiais compósitos

Como já foi constatado, os polímeros apresentam vantagens a vários níveis em comparação com os metais e as suas ligas. Contudo, partem em desvantagem em relação aos últimos dentro do contexto de aplicações de engenharia.

Assim, surgem alguns mecanismos de endurecimento de termoplásticos. Reforços de fibras de vidro ou carbono, sob a forma de fibras curtas – alinhadas ou orientadas aleatoriamente – ou longas podem ser adicionados aos polímeros, formando assim materiais compósitos de matriz polimérica. Desta forma, o módulo de Young é incrementado, aumentando assim a capacidade destes materiais em resistir a tensões elevadas. Se, a esta adição de fibras, aliarmos uma geometria que contemple ranhuras e reforços, o componente injetado desejado poderá apresentar um aumento significativo na rigidez e ser aplicado em situações em que a resistência a cargas elevadas seja um requisito (PlastiComp 2020).

A classificação dos diferentes materiais compósitos pode ser consultada no organograma da Figura 22.

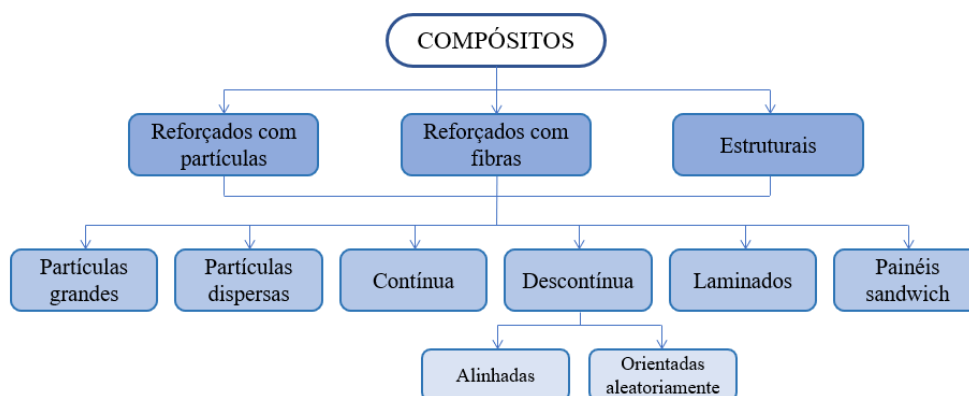


Figura 22 - Classificação dos materiais compósitos (Adaptado de (Silva, Alves et al. 2013))

As diferentes orientações das fibras, já referidas, estão contempladas na Figura 23, e legendadas em seguida:

- Reforço com fibra contínua;
- Reforço com fibra descontínua alinhada;
- Reforço com fibra descontínua orientada aleatoriamente.

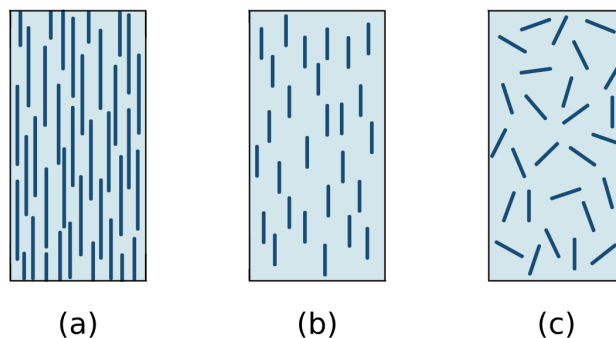


Figura 23 - Orientação das fibras nas matrizes dos compósitos (In https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fiber-reinforced_composites_tipology.svg. Acedido em 28 dez., 2020)

Os compósitos reforçados com fibras são anisotrópicos, ou seja, o valor das suas propriedades será diferente quando medidas em direções diferentes.

Assim, é necessária uma correta orientação das fibras na matriz polimérica, em função da direção da carga que irá ser aplicada no componente em questão. Para que a performance de um componente injetado reforçado com fibras seja ótima, estas devem estar na direção perpendicular à direção das tensões aplicadas nas áreas críticas (Silva, Alves et al. 2013, PlastiComp 2020). A Figura 24 procura mostrar a diferença entre materiais isotrópicos e anisotrópicos.

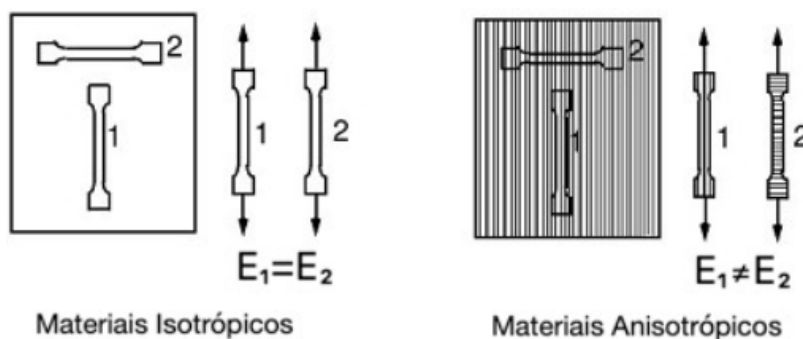


Figura 24 - Materiais isotrópicos vs. materiais anisotrópicos (In <https://www.knowswwhy.com/difference-between-isotropic-and-anisotropic/>. Acedido em 3 fev., 2021)

As propriedades destes materiais reforçados não são, no entanto, apenas função da orientação das fibras, dependendo igualmente do tamanho destas, do seu teor em volume e do tipo de fibra e matriz (Silva, Alves et al. 2013).

Comprimento das fibras

Há uma grande diversidade de fibras, de variados comprimentos, disponíveis no mercado. Desde pós até fibras com comprimentos na ordem dos mm. É possível dividir as fibras em fibras curtas (descontínuas) ou longas (contínuas). Os termoplásticos reforçados com fibras curtas contêm fibras de comprimento geralmente inferior a 5 mm, ao passo que as fibras longas variam entre os 5 e os 25 mm. As fibras que proporcionam melhores propriedades mecânicas são as longas ou contínuas. A elevada proporção de fibras com comprimentos superiores a 10 mm aumenta de forma significativa a rigidez, a resistência e a resistência ao impacto dos componentes (Silva, Alves et al. 2013). É possível comprovar esta afirmação com o auxílio do gráfico da Figura 25.

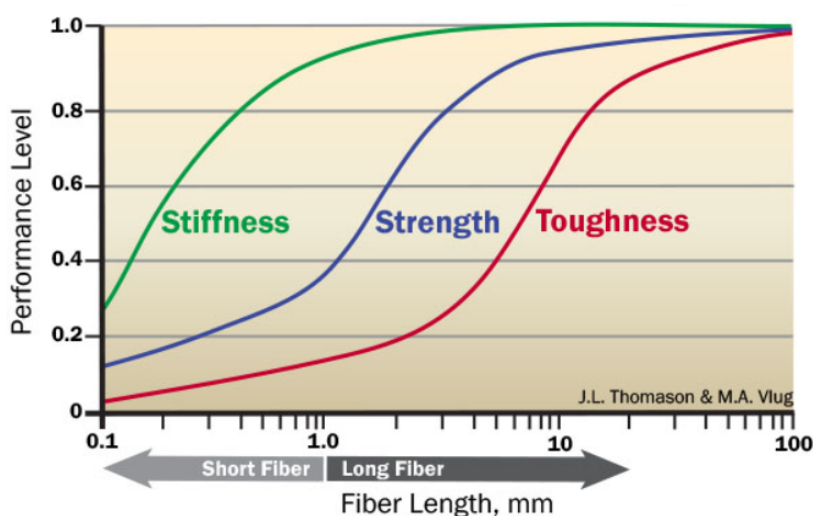


Figura 25 - Influência do comprimento da fibra nas propriedades mecânicas dos compósitos (In <https://www.plasticomp.com/long-fiber-benefits/>. Acedido em 29 dez., 2020)

No entanto, os componentes constituídos por materiais compósitos reforçados com fibra longa apresentam uma grande desvantagem: o seu processamento pode ser difícil. Assim, muitos autores apontam os materiais reforçados com fibras curtas bem alinhadas como um bom equilíbrio entre *performance* e processamento.

De forma a demonstrar esta melhoria das propriedades mecânicas dos termoplásticos reforçados face aos convencionais, foi elaborado um gráfico que compara uma das principais propriedades mecânicas. Além disso, será apresentado nesse gráfico um valor médio relativo às ligas de alumínio, visto ser o material com maior peso na unidade Next-Road 1.0. Para isto, recorreu-se ao *software* GRANTA EduPack.

A Figura 26 possibilita a comparação do módulo de elasticidade destes três tipos de materiais. Para este efeito, foram selecionados dois termoplásticos (PEEK e poliimida). Assim, compararam-se os valores destes materiais reforçados com o mesmo teor (30%) de diferentes tipos de fibra – carbono e vidro – com os valores referentes a esses mesmos termoplásticos sem reforço.

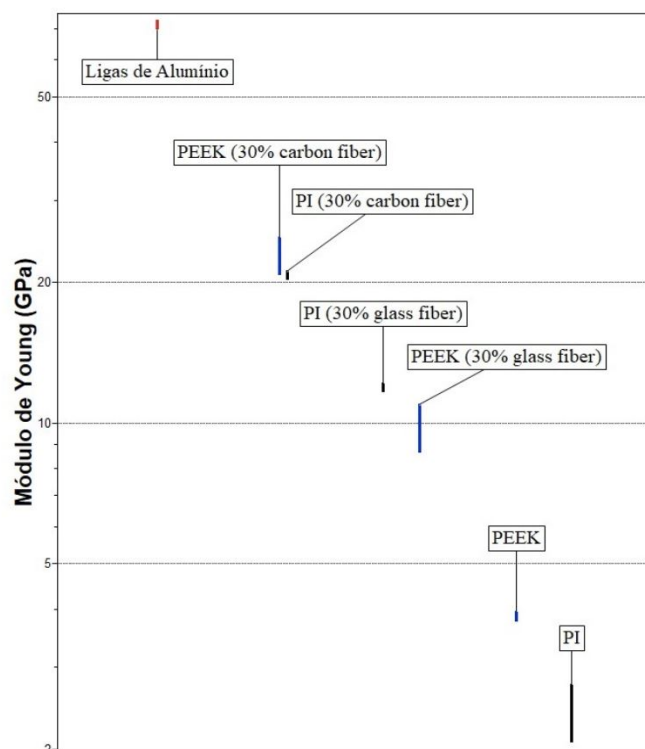


Figura 26 - Valores típicos do módulo de elasticidade de alguns termoplásticos, termoplásticos reforçados e ligas de alumínio (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 29 dez., 2020)

Os valores médios são apresentados na Tabela 5. A coluna “Incremento no módulo” não é mais que o aumento percentual do valor do módulo de Young verificado para um termoplástico reforçado em relação ao não reforçado.

Tabela 5 - Valores típicos do módulo de elasticidade de alguns termoplásticos, termoplásticos reforçados e ligas de alumínio (Adaptado de (Ansys 2020))

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Incremento no módulo (%)
PEEK	3,9	-
PEEK + 30%GF	9,8	254%
PEEK + 30%CF	22,9	593%
PI	2,4	-
PI + 30%GF	11,9	496%
PI + 30%CF	20,7	863%
Ligas de Alumínio	70,0	-

Analisando essa mesma tabela, é possível comprovar um aumento significativo nos valores dos módulos de elasticidade dos termoplásticos, quando reforçados.

Além disso, pode concluir-se que as fibras de vidro são menos rígidas que as fibras de carbono. No entanto, são as mais utilizadas no processo de injeção de termoplásticos reforçados, devido ao custo reduzido.

Outra conclusão que pode ser retirada é que os valores dos módulos dos termoplásticos reforçados estão ainda longe dos das ligas de alumínio. Contudo, a baixa densidade destes materiais, conjugada com os já relativamente elevados valores dos seus módulos de elasticidade, fazem deles materiais bastante utilizados em aplicações de engenharia.

2.4 Materiais utilizados no Next-Road 1.0

Como já foi sendo referido no decorrer da dissertação, a grande maioria dos componentes que constituem o Next-Road 1.0 são concebidos em ligas de alumínio, dadas as características que podem oferecer, já abordadas em 2.3.1. Há ainda alguns componentes concebidos em aço inoxidável. A presença dos plásticos neste produto faz-se igualmente notar, sendo o Ertacetal – um poliacetal (POM) – o mais utilizado. A sua característica autolubrificante e o baixo coeficiente de atrito que apresenta, torna-o um material interessante para certas aplicações de deslizamento.

Este conjunto de materiais constitui um interessante alvo de otimização, como já foi sendo levemente referido:

- As ligas de alumínio, extrudidas, podem requerer processos de maquinagem, que representam custos fixos encarecedores dos componentes;
- Os elementos em aço são concebidos, integralmente, com recurso a processos de maquinagem, não havendo, assim, perspetivas de produções em grande escala destes elementos;
- Os componentes em Ertacetal são igualmente concebidos por processos de maquinagem. Além disso, este é um plástico caro, quando em comparação com plásticos de possível injeção.

A possível substituição destes materiais será abordada posteriormente nesta dissertação.

2.5 Software de simulação: SolidWorks® Simulation

O principal objetivo desta dissertação passa pela otimização económica do Next-Road 1.0, adotando novos materiais para os componentes do produto.

Como tal, foi concebido um novo sistema no *software* SolidWorks®, o Next-Road 2.0 (apresentado no Capítulo 4), tendo sido realizada uma seleção de materiais para constituir os seus componentes. Naturalmente, os materiais selecionados devem resistir às cargas impostas, por forma a que o bom desempenho do produto seja garantido.

Assim, posteriormente à seleção de materiais, procedeu-se à realização de simulações de resistência aos componentes, concebidos nos materiais selecionados, simulando as solicitações a que estão sujeitos em ambiente real. As simulações foram realizadas no SolidWorks® Simulation, um *add-in* do *software*.

Desta forma, serão expostos, de forma breve, as funcionalidades que o *software* de simulação apresenta, bem como o critério de falha por si utilizado.

2.5.1 SolidWorks® Simulation

O SolidWorks® Simulation é um *add-in* de análise estrutural, que usa o método dos elementos finitos (MEF) para prever, virtualmente, o comportamento real de um componente, quando solicitado.

O primeiro passo para a realização das simulações é definir o tipo de estudo pretendido. Este *software* permite uma grande variedade de estudos, como é apresentado na Figura 27.

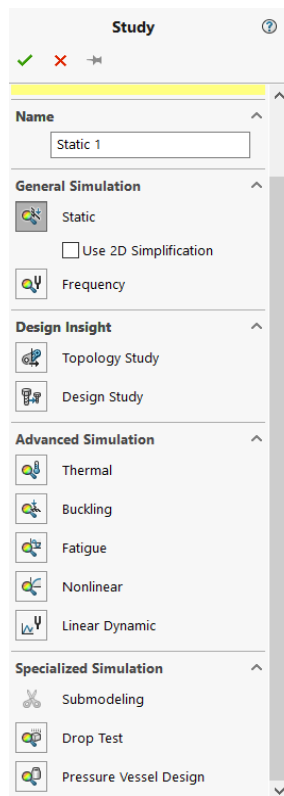


Figura 27 - Estudos possíveis de realizar no SolidWorks® Simulation

Uma vez escolhido o tipo de estudo a realizar, é aberta a árvore de simulação, que permite definir todas as condições da simulação em questão, exposta na Figura 28.

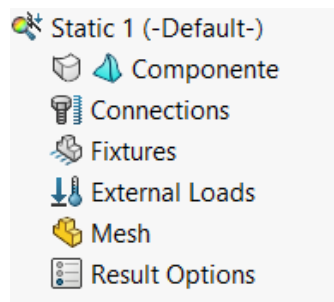


Figura 28 - Árvore de simulação

O passo seguinte é definir qual o material que constitui o componente que irá ser testado. Selecionando a opção correspondente ao produto (“Componente” neste caso), será possível realizar uma série de operações, entre as quais selecionar o material pretendido, em “*Apply/Edit Material*” (Figura 29). Esta operação permite, ainda, inserir qualquer material que não esteja na base de dados, atribuindo-o ao componente em questão.

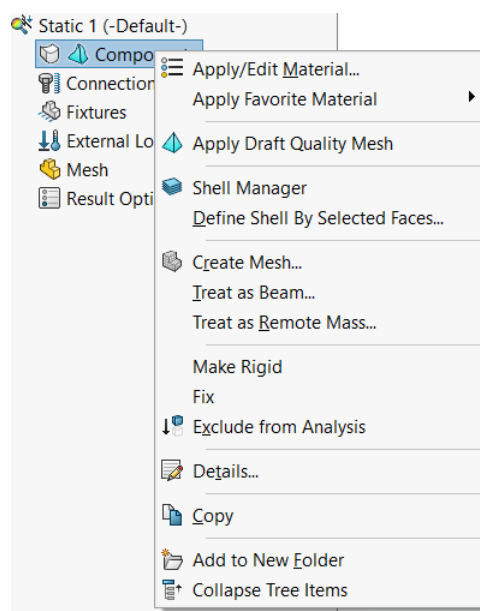


Figura 29 - Opção para a seleção do material

Estando o material definido, segue-se a implementação das condições de fronteira, que transmitem à simulação o comportamento do componente em ambiente real. Assim, selecionando a opção “*Fixtures*” é possível definir o tipo de apoio do componente. Como a Figura 30 exhibe, as opções de encastramento, apoio simples, rótula, etc., estão disponíveis no programa.

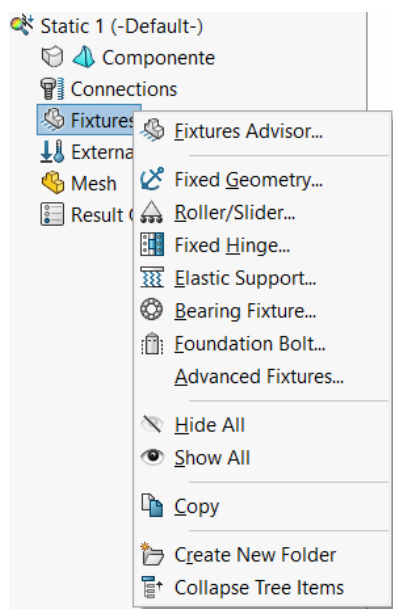


Figura 30 - Opção para a seleção do tipo de apoio

Segue-se a representação das solicitações a que o componente é sujeito em ambiente real. A opção “*External Loads*” permite representar forças, cargas distribuídas, momentos, pressões, etc., como é possível visualizar na Figura 31.

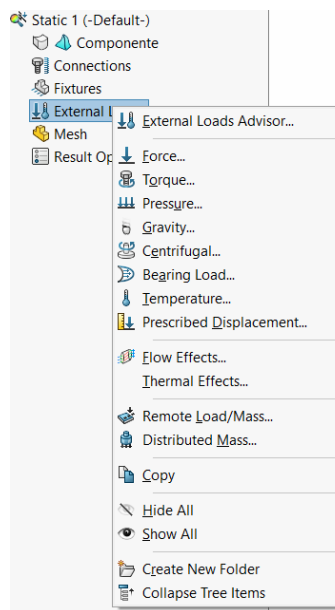


Figura 31 - Representação das solicitações

Uma vez definidas todas as condições de fronteira, o método de elementos finitos será implementado para determinar os resultados. Assim, é necessário definir a discretização do modelo, selecionando a opção “*Mesh*”, na árvore de simulação.

Naturalmente, quanto mais fina for a malha selecionada, mais precisos serão os resultados obtidos. No entanto, o tempo computacional para a realização da simulação será superior. No SolidWorks® Simulation, o elemento utilizado no MEF é triangular e o tamanho da malha é dado pelo comprimento da base de um elemento/triângulo. A Figura 32 apresenta o mesmo componente segundo discretizações diferentes. O tamanho da malha em a) é de 2 mm, ao passo em que b) é de 0,75 mm. Dada o maior número de elementos triangulares em b), são de esperar resultados mais próximos da realidade.

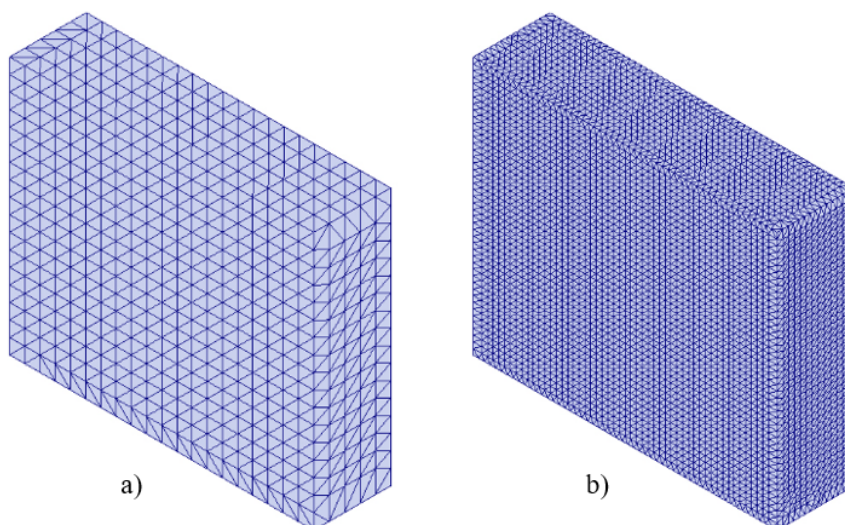


Figura 32 - Representação de um componente, segundo discretizações distintas

O último passo será executar a simulação, sendo os resultados expostos na árvore, como se expõe na Figura 33.

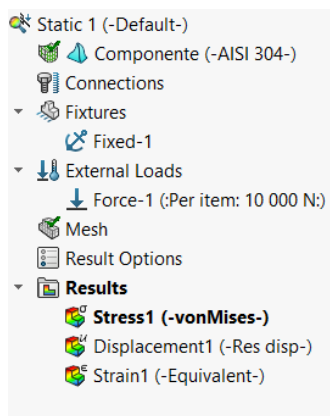


Figura 33 - Resultados obtidos através das simulações

2.5.2 Critério de falha utilizado

O critério de falha predefinido pelo SolidWorks® Simulation é o de Von Mises. Assim, dadas as condições implementadas (componente encastrado, cargas aplicadas, etc.), o programa calcula a tensão equivalente de Von Mises (σ_{eq}), comparando-a com a tensão limite elástico (σ_e) do material que constitui o componente.

Desta forma, se $\sigma_{eq} > \sigma_e$, a deformação gerada no componente testado é permanente e ocorre no regime plástico, tornando-o inapto para a aplicação idealizada. Se $\sigma_{eq} < \sigma_e$, a deformação gerada no componente ocorre no regime elástico. Neste caso, quando cessa a solitação da peça, esta retorna à sua posição inicial.

As deformações e deslocamentos do componente são calculados a partir da tensão equivalente de Von Mises e do módulo de elasticidade do material.

De forma a que o explicado seja claro, apresenta-se a Figura 34, um gráfico geral *Tensão x Deformação* para materiais dúcteis, onde σ_e = “Yield strength”.

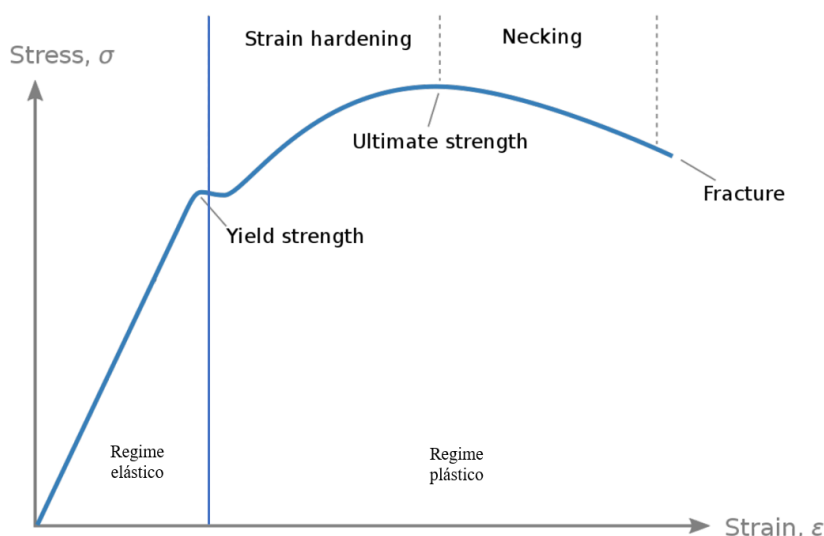


Figura 34 - Gráfico Tensão x Deformação (Adaptado de https://en.wikipedia.org/wiki/Stress%E2%80%93strain_curve. Acedido em 4 fev., 2020)

Posto isto, dá-se por terminada a introdução teórica da presente dissertação, que será a base para que o leitor compreenda claramente os capítulos seguintes. Por sua vez, esses englobam todo o trabalho realizado na Pavnext e a discussão dos resultados obtidos.

3 Estudo económico e concetual dos sistemas Next-Road 1.0

Neste capítulo irão ser realizadas análises económicas e concetuais acerca das duas variantes já existentes do produto da Pavnext. Para isso, considerou-se o Next-Road 1.0 tal como foi idealizado pela empresa, assumindo o processo de extrusão um papel principal. Além deste, os processos de maquinagem (produção de elementos em aço e pós-processamento de componentes) e de moldação, num componente apenas, foram implementados. Assim, a análise de custos referida foi efetuada com recurso à *Bill of Materials* (BOM) que se encontra no Anexo A.

O objetivo destes estudos foi aferir os pontos críticos e principais dificuldades nas duas variantes do produto. Este foi um importante ponto de partida para aquilo que seriam os objetivos principais desta dissertação: a otimização técnica e económica do produto de *energy harvesting* da Pavnext.

A primeira análise, designada por análise de custos, foi realizada tendo em conta uma produção de quarenta unidades do produto Next-Road 1.0, repartidas igualmente pelos dois sistemas existentes (20 S_R+20 S_G).

A análise concetual teve em conta os variados componentes dos dois sistemas, a distinção entre eles como estruturais ou funcionais e os requisitos que cada um deles deveria cumprir para o correto funcionamento desses mesmos sistemas.

Como o objetivo desta análise seria o de identificar possíveis pontos críticos e consequentes otimizações dos produtos, foram igualmente consideradas as adversidades encontradas aquando da montagem e teste do protótipo em via urbana.

Para que as análises referidas sejam dispostas com clareza, será utilizada a terminologia adotada na secção 1.3.2.

Identificados os alvos do estudo, foi realizada a análise de custos com recurso à BOM referida. Algumas considerações importantes são agora apresentadas:

- Todos os componentes que compõem o protótipo estão presentes na BOM e detalhadamente descritos – material constituinte, fornecedor e quantidade necessária de cada componente para a produção de quarenta unidades Next-Road;
- Os componentes estão dispostos pelo conjunto ao qual pertencem, sendo especificado se são E_R, E_G ou E_{TC};
- Os custos encontram-se igualmente detalhados, sendo discriminados:
 - o custo das matrizes (se necessárias) para a produção de cada componente;
 - o custo dos processos de maquinagem (pós-processamento);
 - o custo unitário de cada componente, referenciado na dissertação como “custo s/ matriz”;
 - o custo unitário de cada componente tendo em conta o investimento inicial na matriz necessária para a sua produção, referenciado na dissertação como “custo

c/ matriz”. Estes valores estão concebidos para uma série de quarenta unidades Next-Road 1.0.;

O referido “custo c/ matriz” de um componente pode ser calculado da seguinte forma:

$$\text{custo c/ matriz (unitário)} = \text{custo s/ matriz} + \frac{\text{custo da matriz}}{n^{\circ} \text{ de componentes extrudidos}} \quad (2)$$

Por forma a que a interpretação dos resultados presentes neste capítulo seja facilitada, é importante realçar o número de componentes que constituem cada sistema do Next-Road 1.0, explicitando algumas considerações sobre esses dados. Assim, é exposta a Tabela 6:

- Os elementos “New” são componentes produzidos pelos processos de fabrico já mencionados no princípio do presente capítulo.
- Os componentes standardizados são abundantes nos dois sistemas. Representam, sobretudo, elementos de ligação entre componentes e conjuntos ou de isolamento (parafusos, anilhas, porcas, vedantes, o-rings, etc.)

Tabela 6 - Número de componentes "new", "standard" e totais nos sistemas S_G e S_R

	Nº Componentes	
	S _G	S _R
Caixa	7	7
Modulo Interior	70	69
Tampa	36	36
New	113	112
Standard	371	339
Total	484	451

3.1 Análise de custos

Com o intuito de servir de ponto de partida para o cumprimento dos objetivos principais desta dissertação, foram traçados os objetivos principais para esta análise de custos:

- Cálculo do investimento em matrizes de extrusão e moldes;
- Cálculo do custo de produção das unidades S_R e S_G, considerando, ou não, os custos das matrizes;
- Cálculo da influência de cada um dos 3 conjuntos no custo de produção de cada um dos sistemas, considerando, ou não, os custos das matrizes;
- Identificação dos dez componentes ou ações mais dispendiosas na produção de cada um dos sistemas.

Anteriormente ao início da análise propriamente dita, é importante referir que, por motivos de confidencialidade, os valores monetários estão afetados de uma multiplicação por uma constante.

3.1.1 Investimento em matrizes de extrusão

O Next-Road 1.0 é uma versão concebida tendo em vista produções pré-industriais. Assim, foi idealizada a solução da extrusão em alumínio da maioria dos componentes que o constituem. Desta maneira, são necessárias matrizes para que se possam extrudir as peças, matrizes estas que podem apresentar um custo elevado.

Utilizando a BOM fornecida e definindo os fornecedores de matrizes como FM1, FM2 e FM3, foram então calculados os valores investidos em matrizes, apresentados na Tabela 7. É importante notar que os componentes extrudidos são comuns às unidades S_R e S_G .

Tabela 7 - Custo das matrizes de extrusão

	Fornecedor			Total
	FM1	FM2	FM3	
Custo das matrizes [u.m.]	100	260	5 950	6 310
% do valor total investido	2%	4%	94%	100%
Nº matrizes	1	2	7	10
Componentes extrudidos em 1 unidade	6	2	25	33
Componentes extrudidos em 40 unidades	240	80	1000	1320

Para a produção em série das unidades Next-Road decidiu-se que seria necessário investir em matrizes para dez tipos de componentes, num total de 6310 u.m..

Da interpretação da Tabela 7 surge:

- Foram investidas 5950 u.m. em sete matrizes concebidas pelo FM3, para a produção de sete tipos de componentes distintos. Uma produção de quarenta unidades Next-Road 1.0 requer 1000 componentes extrudidos pelas matrizes do FM3.
- Foram investidas 260 u.m. em duas matrizes produzidas pelo FM2, para a produção de dois tipos de componentes distintos. Uma produção de quarenta unidades Next-Road 1.0 requer 80 componentes extrudidos pelas matrizes do FM2.
- Foram investidas 100 u.m. numa matriz do FM1, para a produção de um tipo de componente. Uma produção de quarenta unidades Next-Road 1.0 requer que se extrudam 240 componentes desse tipo pelas matrizes do FM1.

Como já foi referido, os principais componentes funcionais do Next-Road 1.0 foram idealizados de forma a serem concebidos por extrusão. Com o intuito que o leitor entenda a influência dos componentes extrudidos no custo final de cada um dos sistemas, apresentam-se a Tabela 8 e a Tabela 9. O custo total de cada sistema, apresentado na Tabela 9, será exposto com maior detalhe numa secção posterior.

Tabela 8 - Presença dos componentes extrudidos em cada sistema

	S_G	S_R
Componentes extrudidos em 1 unidade	33	33
Total de componentes	484	451
[%] no sistema	6,8%	7,3%

Tabela 9 - Influência dos componentes extrudidos no custo total de cada sistema

	S_G	S_R
Custo dos componentes extrudidos [u.m]	223	223
Custo total de 1 unidade	543	441
[%] no custo total do sistema	41%	50%

Analisando as tabelas expostas, realça-se que a produção de apenas 6,8% e 7,3% dos componentes se reflete em 41% e 50% do custo total de S_G e S_R, respetivamente. No entanto, como será explicitado na secção 3.1.4., estes valores prendem-se com os processos de maquinaria posteriores que os componentes concebidos por extrusão requerem.

3.1.2 Custos de produção das unidades S_R e S_G - unitário e em série

Nesta secção são calculados e discutidos:

- Custos de produção unitários das unidades S_R e S_G, considerando-se, ou não, a influência das matrizes de extrusão;
- Custos totais de produção em série das unidades S_R e S_G: séries de quarenta unidades (20 S_R + 20 S_G), quatrocentas unidades (200 + 200) e quatro mil unidades (2000 + 2000), considerando-se, ou não, a influência das matrizes de extrusão.

Este último ponto tem como principal objetivo avaliar a diluição do investimento nas matrizes no custo de produção dos componentes e, consequentemente, no produto Next-Road 1.0. Naturalmente, à medida que a série de produção de componentes aumenta de volume, o valor investido nas matrizes para extrudir tais componentes vai-se diluindo no seu custo de produção.

O primeiro estudo a ser realizado foi o do cálculo do custo unitário das unidades S_R e S_G. É preciso ter-se em consideração alguns pontos:

- Foram calculados os custos unitários dos produtos S_R e S_G, para séries de produção com volumes diferentes;
- O custo da unidade S_R é o resultado da soma do custo dos elementos de tronco comum com os elementos exclusivos ao sistema de redução;
- O custo da unidade S_G é o resultado da soma do custo dos elementos de tronco comum com os elementos exclusivos ao sistema de geração de energia elétrica.

Os valores obtidos encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Custo unitário das unidades S_G e S_R em função das variáveis "s/ matriz" e "c/ matriz", para diferentes séries de produção

	Custo Unitário [u.m.]			
	s/ matriz	c/ matriz		
		40 unidades	400 unidades	4000 unidades
E_{TC}	262	420	278	264
E_G	123	123	123	123
E_R	22	22	22	22
$S_G (E_{TC}+E_G)$	385	543	401	387
$S_R (E_{TC}+E_R)$	284	441	299	285

Da interpretação e análise dos dados da Tabela 10 surgem algumas conclusões:

1. A variação entre os valores na linha " E_{TC} " e a estabilidade dos valores nas linhas " E_G " e " E_R " sugere o que já tinha sido constatado na secção 3.1.1: os componentes produzidos por extrusão são comuns aos dois sistemas;
2. É possível constatar que à medida que a série de unidades a produzir aumenta, naturalmente o custo das matrizes vai-se diluindo no custo de cada peça extrudida, tendendo o custo a aproximar-se dos valores em que não se consideram os investimentos realizados em matrizes.

Assim, decidiu estudar-se a diluição das matrizes no custo de produção das unidades Next-Road 1.0. Para isso, consideraram-se séries de 40, 400 e 4000 unidades. Os resultados são dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Diluição do valor das matrizes em função de diferentes séries de produção

	Custo Total [u.m.]					
	Série 40		Série 400		Série 4000	
	s/ matriz	c/ matriz	s/ matriz	c/ matriz	s/ matriz	c/ matriz
E_{TC}	10 483	16 793	104 830	111 141	1 048 303	1 054 613
E_G	2 465	2 465	24 646	24 646	246 463	246 463
E_M	430	430	4 305	4 305	43 048	43 048
S_G	7 706	10 861	77 061	80 217	770 615	773 770
S_R	5 672	8 827	56 720	59 875	567 199	570 355
Total	13 378	19 689	133 781	140 092	1 337 814	1 344 124
Diluição [%]	67,9%		95,5%		99,5%	

Desta forma, pode concluir-se que:

1. À medida que o volume das séries de produção aumenta, a diluição do custo das matrizes no valor das peças não varia de forma proporcional. Tal facto irá ao encontro do apresentado na Figura 8;
2. O valor da diluição sofre um aumento acentuado quando se transita de uma produção de quarenta unidades (67,9%) para uma de quatrocentas (95,5%), sendo que a partir desta os valores já são praticamente constantes e muito positivos;
3. A linha correspondente aos E_R apresenta valores muito baixos, quando em comparação com as linhas E_{TC} e E_G . Assim, é de especial interesse o estudo da viabilidade da eliminação destes componentes ou da sua inclusão nos E_{TC} , tornando assim o S_R numa base comum a esse mesmo sistema e ao S_G . Assim, poder-se-á proceder à montagem, ou não, dos componentes responsáveis pela geração de energia no S_R , consoante as necessidades do cliente. De acordo com esta hipótese, passar-se-ia a ter: $S_R = E_{TC}$; $S_G = S_R + E_G$.

3.1.3 Custo e influência de cada conjunto

Como já tinha sido referido, foram definidos três módulos de montagem individual que depois se acoplam entre si. Assim, outro dos desafios passou por calcular o custo unitário de cada conjunto nas unidades S_R e S_G , de forma a perceber qual era o local da linha de montagem que se apresentava crítico. Mais uma vez consideraram-se as variáveis “s/ matriz” e “c/ matriz”, apenas para uma série de quarenta unidades Next-Road 1.0. Os resultados são expostos na Tabela 12.

Tabela 12 - Custo unitário de cada conjunto em função dos sistemas S_G e S_R

	Custo unitário [u.m.]					
	Caixa		Tampa		Módulo Interior	
	s/ matriz	c/ matriz	s/ matriz	c/ matriz	s/ matriz	c/ matriz
E_{TC}	73	99	110	196	79	125
E_G	-	-	9	9	114	114
E_R	-	-	-	-	22	22
S_G	73	99	119	205	193	239
S_R	73	99	110	196	100	146

Atentando a Tabela 12, é possível constatar que:

1. Só na linha E_{TC} existe diferença entre os valores das colunas “s/ matriz” e “c/ matriz”, o que corrobora algumas das conclusões aferidas anteriormente: todos os componentes extrudidos são comuns às unidades S_R e S_G ;
2. Para o conjunto “Caixa” só a linha E_{TC} apresenta valores. Assim, conclui-se que este módulo é comum às 2 variantes do produto Next-Road. É o conjunto com menor custo, para qualquer um dos casos;
3. Para o conjunto “Tampa”, os valores presentes na linha E_G são muito baixos em comparação com os restantes valores associados a este conjunto. Seria, assim, de especial interesse tornar o C_T comum aos dois sistemas;

4. Para o módulo interior, a diferença de valores entre as linhas E_G (114 u.m.) e E_R (22 u.m.) é acentuada e notória. Assim, compreende-se que os elementos associados à transformação de energia apresentam custos elevados e estão alojados no módulo interior do S_G .

Analisando os pontos 3. e 4. é possível ir ao encontro de uma possível otimização da linha de montagem já abordada na conclusão 3. da secção 3.1.2.: o S_R constituído apenas por E_{TC} , servindo de base aos dois sistemas, sendo os componentes responsáveis pela geração de energia instalados, a posteriori, no módulo interior do produto. Assim, seria alcançada uma excelente otimização no que à linha de montagem diz respeito.

Por forma a analisar de forma mais clara os dados obtidos, optou-se por elaborar a Tabela 13, que exhibe o peso económico (%) que cada um dos três conjuntos ocupa em cada uma das unidades S_G e S_R (para uma série de 40 produtos).

Tabela 13 – Peso económico de cada um dos conjuntos em cada um dos sistemas

Conjunto	Peso [%]			
	S_G		S_R	
	s/ matriz	c/ matriz	s/ matriz	c/ matriz
Caixa	19	18	26	22
Tampa	31	38	39	44
Módulo Interior	50	44	35	33

Analisando os valores da Tabela 13, é possível observar que:

1. O C_{MI} é o conjunto com maior peso percentual no S_G ;
2. O C_T é o conjunto que ocupa a maior tranche no S_R ;
3. Para os dois sistemas, o C_T é o único em que se verifica um aumento do peso percentual da coluna “s/ matriz” para a coluna “c/ matriz”. Isto deve-se ao facto deste conjunto ser o que apresenta o maior número de peças extrudidas.

As conclusões 1. e 2. poderão ser sustentadas pelo elevado custo que os componentes diretamente associados à geração de energia elétrica (alojados no C_{MI} da unidade S_G) apresentam. Esta inferência vai de encontro à conclusão a que se chegou no ponto 4. deste mesmo subcapítulo.

3.1.4 Top-10 componentes/processos com maior custo

Este foi um dos estudos mais importantes, com vista a otimização do produto e o pensamento na industrialização do mesmo. Assim, considerando-se os custos “s/ matriz” de cada componente e de cada ação (processos de fabrico/pós-processamento), procedeu-se ao cálculo dos dez componentes/processos com maior influência no custo final de cada um dos sistemas.

Para a melhor interpretação dos dados obtidos nas tabelas que serão abaixo expostas (Tabela 14 e Tabela 15), são precisas ter presentes algumas considerações:

- A letra “C” refere-se à palavra “componente”, enquanto que a “P” a processos de pós-processamento dos componentes (maquinagem);
- As quantidades associadas a processos de fabrico referem-se ao número de componentes maquinados;
- Os componentes ou processos assinalados com um “x” nas colunas E_G e E_R são exclusivos aos respetivos sistemas.

Tabela 14 - Lista dos dez componentes/processos com maior custo no sistema de geração

S _G	E _G	Quantidade	Custo [u.m.]	Peso no custo do sistema [%]
C ₁	x	2	32	8,3
C ₂	x	2	29	7,6
P ₁	-	2	26	6,8
P ₂	-	2	24	6,2
C ₃	-	8	16	4,2
P ₃	-	1	15	3,9
C ₄	-	3	15	3,9
P ₄	-	1	15	3,9
C ₅	-	1	15	3,8
C ₆	-	4	14	3,5
Total:		26	201	52,1 (31,3%C + 20,8%P)

Tabela 15 - Lista dos dez componentes/processos com maior custo no sistema de redução

S _R	E _R	Quantidade	Custo [u.m.]	Peso no custo do sistema [%]
P ₁	-	2	26	9,2
P ₂	-	2	24	8,5
C ₃	-	8	16	5,6
P ₃	-	1	15	5,3
C ₄	-	3	15	5,3
P ₄	-	1	15	5,3
C ₅	-	1	15	5,2
C ₆	-	4	14	4,8
P ₅	-	2	12	4,2
C ₇	x	2	10	3,5
Total:		26	151	56,9% (24,4%C + 32,5%P)

Tendo em conta os dados exibidos nas tabelas Tabela 14 e Tabela 15, é possível constatar que:

1. As ações de maquinagem de apenas seis e oito componentes têm um peso muito elevado nos sistemas de geração e redução, respetivamente. Para o S_R , ocupam 32,5% dos custos de uma unidade enquanto que para o S_G ocupam 20,8% dos custos;
2. C_1 e C_2 , componentes standardizados e diretamente associados à geração de energia elétrica, ocupam 15,91% do custo de produção de uma unidade S_G ;
3. Dez tipos de componentes/processos de pós-processamento representam mais de metade do custo de produção do S_G (52,09%);
4. Dez tipos de componentes/processos de pós-processamento correspondem a 56,9% do custo de produção do S_R .

Desta forma, é fácil compreender a influência que um número reduzido de componentes/processos tem no custo de produção de um produto com mais de 450 componentes. Assim, de maneira a enquadrar esta análise na globalidade de cada variante do produto da Pavnext, foi elaborada a Tabela 16, onde:

- O “nº de componentes com peso crítico” de cada sistema é dado pela soma das quantidades de C_i de cada sistema (Tabela 14 e Tabela 15);
- $[\%] \text{ no sistema} = \frac{n^\circ \text{ componentes}_{\text{peso crítico}}}{n^\circ \text{ componentes}_{\text{totais}}}$.

Tabela 16 - Peso dos componentes críticos no custo final de cada um dos sistemas

	Nº Componentes		[%] no sistema	[%] no custo total do sistema
	com peso crítico	totais		
S_G	20	484	4,13%	31,3%
S_R	18	451	4,00%	24,4%

Portanto, uma análise à Tabela 16 leva a aferir que:

1. Para o S_G , apenas 4,13% dos componentes representam 31,3% do custo de produção de um produto Next-Road;
2. Para o S_R , 4% dos componentes constituem 24,4% do custo de produção.

De igual modo, apresenta-se a Tabela 17.

Tabela 17 - Peso do pós-processamento de alguns componentes no custo final de cada um dos sistemas

	Nº de componentes		[%] no sistema	[%] no custo total do sistema
	maquinados, com peso crítico	totais		
S_G	6	484	1,20%	20,8%
S_R	8	451	1,80%	32,5%

Desta forma, conclui-se que o pós-processamento de 1,2% e 1,8% dos componentes se reflete em 20,8 e 32,5% do custo total do S_G e do S_R , respectivamente.

Os componentes críticos analisados, bem como os processos de pós-processamento de certos elementos representam mais de metade do custo final do produto Next-Road 1.0. Assim, a sua substituição, agregação num componente comum ou a seleção de diferentes materiais poderão ser metas a alcançar, por forma a otimizar economicamente o produto da Pavnext. Essas temáticas serão abordadas nos Capítulos 4 e 5.

3.2 Componentes estruturais vs. funcionais

Um dos passos importantes a realizar de forma posterior ao início da industrialização é o de caracterizar cada componente de um produto como estrutural ou funcional, de maneira a que seja possível identificar os requisitos de cada peça, e que características são necessárias para o seu bom funcionamento. Só desta maneira foi possível ponderar otimizações mais concretas: aliando o conhecimento profundo acerca de cada componente e os requisitos que deve cumprir para o bom desempenho do produto com o conhecimento dos seus custos críticos.

Para a definição do que era estrutural e funcional, adotaram-se os seguintes conceitos:

- **Componente estrutural:** aqueles que contribuem apenas e só para a estrutura, robustez e estabilidade do produto.
- **Componente funcional:** componentes responsáveis pelos mecanismos do sistema. A remoção de um destes componentes comprometeria todo o funcionamento do produto.

Assim, partindo destas definições e com o auxílio da BOM disponibilizada, foi elaborada uma tabela, identificando cada componente dos S_R e S_G como estrutural ou funcional. Esta tabela pode ser encontrada no Anexo B.

Em seguida, foram estabelecidos os requisitos para os conjuntos “Tampa”, “Módulo interior” e “Caixa”.

Conjunto Tampa:

- Atrito similar ao betuminoso;
- Antirroubo;
- Resistência à radiação UV
- Cor que replique a do alcatrão;
- Isolamento para com o exterior (ar e água), isolamento térmico e sonoro;
- Suporte de cargas;
- Transmissão de carga e movimento;
- Menor massa (kg) possível.

Conjunto Módulo Interior:

- Componentes que necessitam autolubrificação;
- Atrito mínimo;
- Transmissão de movimento;
- Suporte de cargas.

Conjunto Caixa:

- Permitir o acesso ao interior do sistema;
- Isolamento para com o exterior (ar e água) e isolamento sonoro;
- Saída de cabos elétricos.

Esta análise foi direcionada já com o pensamento na concretização de um novo modelo. Poder-se-á aferir, no Capítulo 4, que cada conjunto procurou seguir o design já implementado no Next-Road 1.0, por forma a que os referidos requisitos fossem cumpridos.

3.3 Next-Road 1.0 em contexto real

De forma a validar alguns conceitos, procedeu-se à realização de testes de montagem do Next-Road 1.0 numa via publica. Assim, pôde testar-se:

- A inserção do produto no pavimento;
- A reação do mecanismo perante diferentes velocidades do veículo.

Quanto ao primeiro ponto, registou-se a facilidade com que o protótipo foi inserido na placa de betão já previamente concebida na via urbana. Notou-se, igualmente, que o único ponto desfavorável se prendia com a necessidade desta operação ser realizada por pelo menos duas pessoas capacitadas fisicamente, dada a elevada massa do protótipo.

A reação do mecanismo foi positiva, visto que, para as três velocidades testadas, a tampa desceu ao nível do solo na sua totalidade. Assim, não se notou qualquer desconforto para o condutor, uma vantagem em relação às lombas convencionais.

A limitação acima referida, reforçou o que já havia sido afirmado na secção 2.3.1.: as ligas de alumínio, apesar da sua baixa densidade comparada com a de outros metais, apresentam um peso elevado, considerando uma montagem manual. A seleção de materiais mais leves, abordada no Capítulo 5, irá facilitar o transporte e montagem do produto.

3.4 Análise final ao produto: possíveis otimizações

A análise de custos aos dois sistemas do produto Next-Road 1.0 expôs alguns problemas, nomeadamente, processos e componentes críticos. As conclusões retiradas acerca dessa análise e das seguintes sugerem algumas otimizações que poderão ser implementadas, quer a nível de linha de montagem, quer de processos e, consequentemente, materiais utilizados. Todas estas otimizações têm em vista a redução de custos:

- Fazer com que o S_R seja somente constituído por elementos de tronco comum. Esta seria uma ação capaz de automatizar o processo de produção das duas variantes do produto. Assim, produzir-se-iam em série várias unidades S_R e, dependendo dos requisitos impostos pelo cliente, proceder-se-ia, ou não, à montagem dos componentes responsáveis pela geração de energia no sistema de redução. Assim, $S_G = S_R + E_G$;
- Pensar no processo de injeção de materiais poliméricos como uma solução. Pôde-se aferir que a extrusão de alumínio em si não é um processo de fabrico que acarreta custos elevados. No entanto, este processo necessita, em muitos casos, de processos de pós-processamento. Nos subcapítulos anteriores, foi possível aferir que estes processos de maquinaria correspondiam a elevadas parcelas dos custos de produção totais de uma unidade. Assim, a injeção surge como alternativa, visto que possibilita a produção de componentes em grandes séries e com bons acabamentos. Desta forma, é minimizado o recurso a processos posteriores;
- Consequentemente, procurar a substituição dos materiais utilizados até então por materiais poliméricos injetáveis, que garantam o igual funcionamento do protótipo e dos seus mecanismos. Com estes materiais, pode ser possível a redução do peso total do Next-Road 1.0, situação que se revelou crítica aquando da montagem do produto e realização de testes em via urbana.

Este último ponto será o de maior enfoque nesta dissertação, encontrando-se sempre intimamente ligado ao processo de injeção de plásticos.

Nota para o facto de estas propostas terem sido apenas um ponto de partida para a concretização de um novo modelo, o Next-Road 2.0. O desenvolvimento deste produto surge no capítulo seguinte.

4 Next-Road 2.0: Alternativas idealizadas e implementadas

Este capítulo aborda os aspetos anteriores à seleção de materiais, realizada com vista a otimizar o produto da Pavnext. Assim, é documentado, neste capítulo, o caminho percorrido até à execução de um desenho final de um novo produto, o Next-Road 2.0. Tal como foi sugerido no capítulo anterior, procurou-se, desde o início da sua conceitualização, conceber apenas uma variante do produto. Assim, esta teria a função de redução da velocidade dos veículos e, se o cliente assim desejasse, proceder-se-ia à montagem dos componentes responsáveis pela geração de energia nessa mesma variante, posteriormente.

O desenho concebido, realizado no *software* SolidWorks®, teve como base uma série de alternativas idealizadas a alguns dos componentes do produto Next-Road 1.0. Desta forma, procura-se, não só, expor todas essas alternativas – sendo que nem todas elas foram implementadas no desenho final –, mas também apresentar o novo produto proposto para a Pavnext. O desenho final do produto pode ser consultado no Anexo C.

4.1 Considerações iniciais

A motivação para a realização da presente dissertação, bem como a materialização de um novo produto prende-se, principalmente, com a redução dos custos de produção do Next-Road 1.0, produto desenvolvido por José Ricardo Neves, por forma a que a industrialização do produto da Pavnext seja viável.

Com base nas análises realizadas até então, percebe-se que essa redução de custos será atingida com a implementação de processos de fabrico diferentes e materiais diferentes.

Assim, a linha de pensamento que teve por base o surgimento, não só das alternativas propostas, bem como do produto Next-Road 2.0, teve em conta os seguintes objetivos:

- Redução de custos substituindo processos e materiais;
- Redução de peso do produto e do nº de componentes;
- Linha de montagem mais eficiente e segura, e menos morosa.

Neste capítulo serão detalhadas as alternativas sugeridas para a otimização de cada conjunto, até ao culminar de componentes finais, materializados no SolidWorks®.

Naturalmente, a materialização do Next-Road 2.0, de forma a cumprir os objetivos traçados, teve de seguir certos aspetos, que serão explicitados nas próximas secções.

4.1.1 Processos de fabrico

No seguimento da análise de custos realizada, foi possível inferir que o peso de processos de pós-processamento, como a maquinaria, encareceram o produto Next-Road 1.0. Assim, para a idealização e materialização das alternativas aos componentes, foram tidos em

conta, preferencialmente, processos de fabrico que permitissem a produção de componentes em série, e, sempre que possível, sem necessidade de processos de pós-processamento.

Desta forma, são apresentados os processos de fabrico que foram considerados neste exercício, por ordem de preferência:

1. **Moldação por injeção de plásticos:** processo principal a ser implementado, responsável pela produção da grande maioria dos componentes funcionais. Apresenta inúmeras vantagens, já expostas na secção 2.1.3;
2. **Extrusão de ligas de alumínio:** processo a evitar dada a impossibilidade de reproduzir ocos e furos na direção perpendicular ao sentido da extrusão, levando, em alguns casos, à necessidade de processos de maquinagem posteriores. No entanto, dado permitir uma produção em grande escala, pode ser implementado em componentes que necessitem de maior robustez, resistência e rigidez;
3. **Maquinagem:** para componentes com requisitos específicos e pós-processamento.

4.1.2 Materiais

Anteriormente à idealização das alternativas, foi realizada uma primeira triagem aos materiais de possível implementação. Assim, os materiais que constituíssem o Next-Road 2.0 deveriam cumprir uma série de requisitos, por forma a constituírem vantagem em relação ao produto anterior:

- Materiais que pudessem ser moldados por injeção;
- Materiais com densidades baixas, de maneira a promoverem uma redução de peso no produto;
- Materiais que constituíssem preços menores ou iguais que os das ligas de alumínio;
- Materiais com propriedades mecânicas próximas às dos materiais implementados no Next-Road 1.0.

A seleção de materiais irá ser abordada no Capítulo 5. À medida que os componentes do Next-Road 2.0 forem apresentados, neste mesmo capítulo, serão acompanhados do material em que irão ser concebidos, sendo exposta uma breve explicação do fator que levou à seleção dos materiais em questão. No entanto, a sequência que a mesma seleção seguiu e as propriedades mecânicas analisadas serão explicadas, pormenorizadamente, no capítulo seguinte.

4.1.3 Design dos componentes e éticas a cumprir

O design dos componentes do produto Next-Road 1.0 encontra-se definido e os seus mecanismos e estrutura funcionalmente validados. Desta forma, o design de cada componente do novo produto procurou seguir o já implementado na versão 1.0, por forma a que os requisitos já impostos aos componentes fossem cumpridos.

No entanto, as éticas características do processo eleito para a maioria da produção das novas peças - injeção de plástico – impõem restrições ao nível da espessura das paredes dos componentes. Assim, de acordo com o *software* GRANTA EduPack 2020, estas não poderão ultrapassar valores na ordem dos 6,3 mm. Por razões de segurança, definiu-se o valor para a espessura máxima em 5 mm. Além disso, devem ser cumpridas éticas, de forma a facilitar o enchimento das cavidades do molde e o processo de desmoldação dos componentes. Devem

adotados raios de curvatura e ângulos de saída para os componentes, estando os valores a adotar tabelados, de acordo com as dimensões dos componentes em questão.

Refere-se, igualmente, que o elevado número de elementos de ligação presentes no Next-Road 1.0, bem como o processo complicado e moroso que se revelou a sua montagem, levou à procura de uma nova solução: procurou-se a reformulação de alguns componentes, de maneira a que fossem agregados num só, conduzindo a uma otimização da linha de montagem.

Assim, de maneira a perceber em que componentes se podem atingir os objetivos propostos, faz sentido analisar os requisitos que cada componente tem de cumprir. Só desta maneira será possível a otimização do produto. Desta forma, apresentam-se breves descrições de cada um dos três conjuntos do produto, que requisitos têm de cumprir, e algumas sugestões de otimização de cada módulo.

4.2 Materialização do novo produto

A materialização do Next-Road 2.0 seguiu um processo lógico. Primeiramente foram idealizadas alternativas para o C_{MI} , visto ser o conjunto com um maior número de componentes funcionais e responsável pelos mecanismos do produto. Em seguida, procedeu-se à conceção dos elementos do C_T , dada a sua constante interação com o C_{MI} e a presença de alguns elementos fulcrais para o funcionamento do produto. O último conjunto a ser reconstruído seria o C_C , constituído por elementos estruturais, apenas com funções de suporte e isolamento.

Nas secções que se seguem serão expostas as novas soluções propostas para o produto da Pavnext. Será, para cada conjunto/componente, seguida uma sequência lógica, partindo das alternativas idealizadas até ao desenho final. É importante realçar que, à exceção do gerador elétrico e elementos standardizados, todos os componentes foram idealizados e concebidos pela equipa responsável pela construção do Next-Road 2.0.

4.2.1 Módulo interior

O C_{MI} aloja os elementos do produto responsáveis pela redução de velocidade do veículo, bem como aqueles que permitem a geração de energia. Como já foi abordado na secção 1.3.2, os mecanismos deste conjunto respondem a uma solicitação aplicada no C_T , por ação de um veículo. Esta interação pode ser observada através da Figura 35, vista lateral, ilustrativa, do produto Next-Road 1.0 (omitindo o C_C).

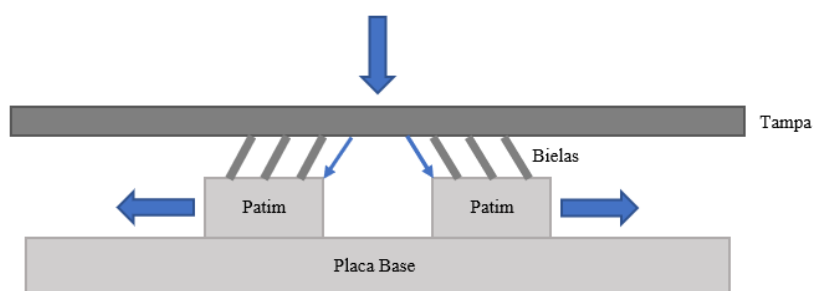


Figura 35 - Interação entre o C_T e o C_{MI}

No Next-Road 1.0, o principal componente deste conjunto denomina-se “Placa Base”. Este componente é o suporte para todos os elementos do C_{MI} . Aparafusado a esse componente, encontram-se as saliências (denominadas “Carris”) por onde os já referidos dois “Patins” deslizam.

Os mecanismos de interação entre estes três elementos do C_{MI} são apresentados na Figura 36. O desenho apresentado apenas visa retratar essa mesma interação, não sendo representativo do design original dos elementos do Next-Road 1.0.

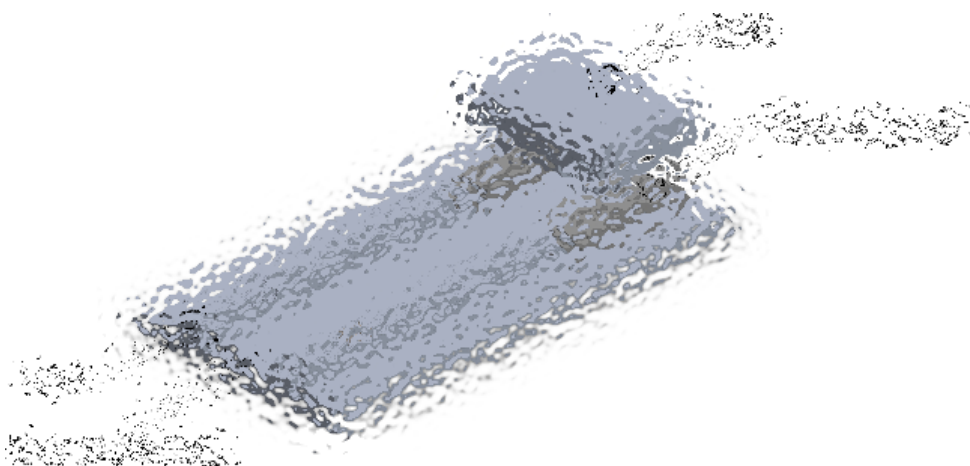


Figura 36 - Deslizamento do Patim sobre os Carris

É possível reparar, nesta mesma representação, na presença do componente denominado “Película de Ertacetal”. Este elemento permite o deslizamento do patim sobre o carril, sem que haja fricção e consequente desgaste dos componentes. Como referido em 2.4, este é um material autolubrificante, que apresenta um baixo coeficiente de atrito. Este elemento em Ertacetal figura entre os dez mais dispendiosos de qualquer um dos sistemas do produto Next-Road 1.0, referido como C_3 em 3.1.4. Assim, a sua remoção foi um dos desafios a enfrentar.

Por sua vez, a placa base, os carris e os patins são componentes extrudidos em alumínio, e posteriormente maquinados. A sua maquinagem figura, igualmente, entre as dez ações mais dispendiosas do Next-Road 1.0. Estes processos podem ser identificados como P_4 (maquinagem da placa base e carris) e P_5 (maquinagem dos patins) em 3.1.4.

Sendo estes os elementos, pertencentes ao C_{MI} , com maior custo na versão 1.0, serão naturalmente os que maior atenção requerem na busca da otimização do produto. Não obstante, este conjunto alberga ainda:

- Elementos em aço responsáveis pelo guiamento vertical do produto;
- Batentes de fim de curso do patim: blocos em alumínio responsáveis por definir a posição inicial do patim;
- Molas “ASTM A228”:
 - Horizontais, que se opõem ao movimento horizontal dos patins;
 - Verticais, responsáveis pelo movimento de restituição do C_T (será explicado com maior detalhe).
- Gerador elétrico;
- Sistema pinhão-cremalheira: cremalheira, rodas dentadas, veios.

Posto isto, inicia-se a concetualização dos novos componentes, constituintes do produto Next-Road 2.0. Serão, primeiramente, apresentados o novo patim e a nova placa base, por se tratarem dos elementos com maior preponderância no produto. Em seguida, serão expostos os restantes elementos. Ressalva-se, novamente, que os materiais adotados para cada componente serão já referidos, acompanhados da principal razão para a sua seleção. Esta será exposta com maior detalhe no Capítulo 5.

1. Patim

Este componente foi identificado como crítico aquando da realização da análise de custos. Seguindo o design implementado neste componente na versão 1.0, o novo patim requer:

- Uma parte inferior: zona negativa do carril, de forma a que seja possível o seu deslizamento;
- Uma parte superior: zona onde se possam acoplar as bielas, que resista às cargas por elas transmitidas.

Desta forma, foram idealizadas alternativas para a conceção de um novo patim. A extrusão de ligas de alumínio foi prontamente excluída. A necessidade de um perfil em Ertacetal – para que o deslizamento do componente fosse eficaz – bem como os processos de pós-processamento para criar zonas que alojem as bielas tornam esta solução dispendiosa.

Assim, foram idealizadas soluções que eliminassem C_3 e P_5 :

a) Patim, todo ele, concebido com recurso à injeção de plásticos

Esta alternativa figurar-se-ia como a mais económica, idealizando a produção industrial, por todas as vantagens já referidas, características deste processo.

No entanto, este componente tem de cumprir um requisito principal: boas propriedades de deslizamento. Assim, por contacto com a indústria especializada na área da injeção de plásticos, decidiu-se que o material que ofereceria o menor coeficiente de atrito e, portanto, melhores propriedades de deslizamento seria o POM. Desta forma, todo o patim deveria ser concebido neste material.

No entanto, com recurso ao GRANTA EduPack 2020, rejeitou-se esta opção. O patim é um elemento que deve suportar cargas elevadas, transmitidas pelas bielas. As propriedades mecânicas oferecidas pelo POM, não satisfazem as procuradas para este tipo de componente.

Desta forma, idealizou-se uma segunda alternativa, que será agora exibida.

b) Solução híbrida

Esta alternativa surgiu, por forma a combater as limitações da primeira. Qualquer solução híbrida que envolvesse a extrusão em alumínio foi descartada. A parte inferior, concebida em alumínio, não garantiria o eficaz deslizamento do patim, enquanto que a parte superior, apesar de garantir os requisitos mecânicos, iria requerer maquinaria posterior ao processo de extrusão.

Assim, idealizou-se uma nova proposta, que combina processos de injeção de materiais diferentes, apresentada na Figura 37. Surge assim o Patim 2.0.

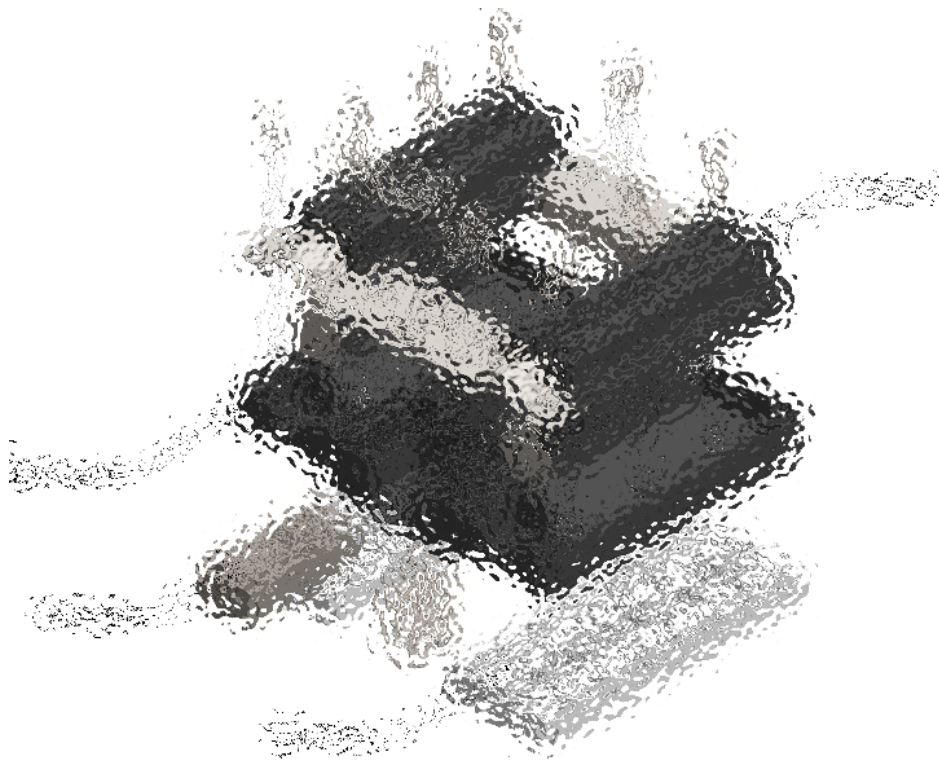


Figura 37 - Vista explodida do Patim 2.0. Dimensões aproximadas: 230x270x75 [mm]

Este componente é composto por três subcomponentes. Será relatada uma breve descrição de cada um, bem como exibida a imagem correspondente:

- **Parte inferior** (Figura 38): Parte responsável pelo deslizamento horizontal do patim. O seu perfil é tal, que encaixa no perfil dos carris, trancando o movimento lateral do patim. Este subcomponente será concebido com recurso à injeção de POM, dadas as suas propriedades autolubrificantes.

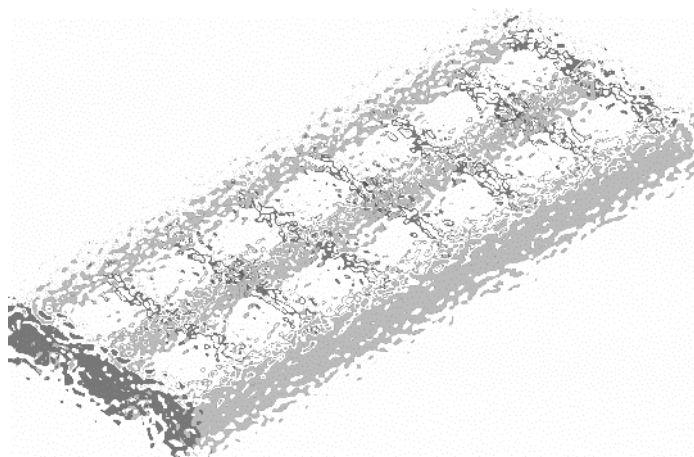


Figura 38 - Parte inferior do Patim 2.0

- **Parte superior** (Figura 39): Aquando do início do movimento horizontal do Patim, uma força no sentido contrário a esse movimento é exercida, pelas cremalheiras. Desta

forma, a parte superior deve apresentar rigidez e resistência elevadas. Assim, foi selecionado um material compósito para a sua constituição: poliamida com reforço de fibra de vidro (PA GF). De forma a aumentar a robustez deste elemento, foram realizadas ranhuras de reforço nas paredes que contactam com as cremalheiras.

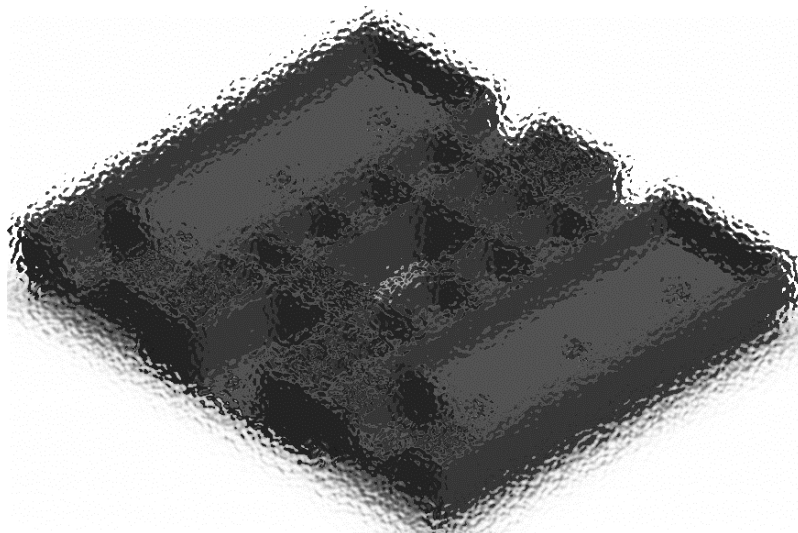


Figura 39 - Parte superior do Patim 2.0

- **Cantoneira** (Figura 40): Este é o principal elemento de contacto entre o C_{MI} e o C_T , apresentando como função o alojamento das bielas, em furos concebidos para tal. Dadas as elevadas cargas que estas transmitem à cantoneira, este será um elemento igualmente concebido com recurso à injeção de PA GF. Esta peça encontra-se nervurada, interiormente, por forma a garantir maior robustez e capacidade de resistência a cargas ao patim.

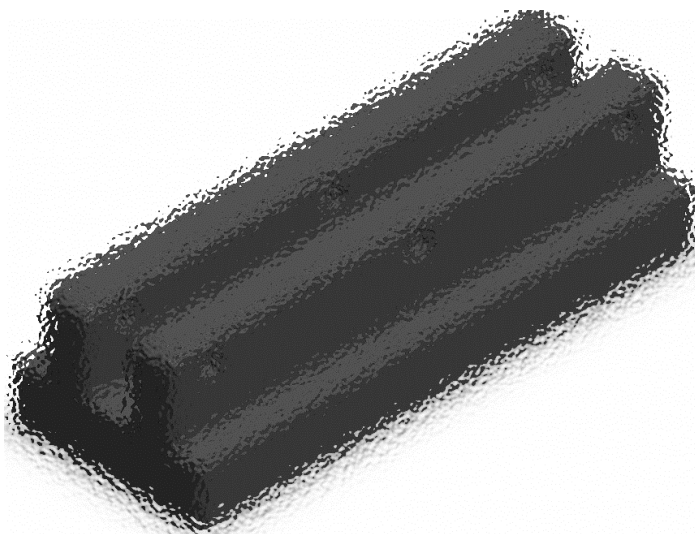


Figura 40 - Cantoneira, elemento pertencente ao Patim 2.0

Uma explicação acerca do teor de fibra de vidro presente no material compósito a injetar será abordada no Capítulo 5, reservado à seleção de materiais.

Por sua vez, como é possível aferir por observação da Figura 37, o acoplamento entre os três elementos que formam o Patim 2.0 será garantido por aparafusamento. A montagem deste componente é facilitada pelas “reentrâncias” na parte superior, destinadas ao encaixe dos outros dois elementos.

Apresentada a nova solução proposta para o patim, é interessante realçar a principal **vantagem** que esta alternativa traz, em relação ao componente anterior: a produção do Patim 2.0 apenas requer a injeção do material selecionado em moldes para os três elementos que o compõem. Com esses moldes, centenas de milhares de peças poderão ser produzidas, sem que haja qualquer necessidade de pós-processamento dos elementos. Além disso, dadas as propriedades do material selecionado para a parte inferior, o C₃ seria eliminado.

Por outro lado, a grande **desvantagem** da concepção do Patim 2.0 prende-se com o elevado número de elementos de ligação necessários. A solução anterior, sendo totalmente extrudida, representava um componente maciço sem qualquer necessidade de componentes standardizados. Ainda assim, não se prevê um acréscimo de preço significativo com a adição destes elementos, dada a possibilidade de encomenda em escala industrial. Além disso, embora o processo de montagem do Patim 1.0 fosse nulo, o do Patim 2.0 revela-se de baixa dificuldade.

Conclui-se assim a apresentação do Patim 2.0, concebido para a materialização com recurso ao processo de injeção de POM e PA GF.

2. Placa Base

A placa base no Next-Road 1.0 não é mais que uma placa em alumínio extrudida, onde assentam todos os componentes do C_{MI}. Sendo um componente extrudido, que serve de base a todos os outros, terá de ser maquinado, por forma a que sejam realizados todos os furos necessários. O seu pós-processamento, assinalado como P₄, é um parâmetro crítico na versão 1.0. Assim, a primeira abordagem passou, automaticamente, por conceber uma nova Placa Base injetada em material polimérico. Assim, eliminar-se-ia P₄.

Seguindo o design implementado neste componente na versão 1.0, a nova Placa Base requer:

- Carris de deslizamento;
- Elementos de guiamento vertical, responsáveis pelo retorno do C_T à posição inicial;
- Batentes de fim do curso dos patins;
- Sistema pinhão-cremalheira e gerador elétrico;
- Molas horizontais responsáveis pela redução de velocidade do veículo;
- Sistema de sincronização, responsável pelo correto equilíbrio da carga proveniente do C_T.

Assim, concebeu-se a Placa Base 2.0, idealizada para ser produzida com recurso à injeção de plásticos. O componente anterior era apenas uma placa, onde praticamente todos os elementos constituintes do C_{MI} eram acoplados por aparafusamento.

Por sua vez, sendo o processo de fabrico escolhido a moldação por injeção, a Placa Base 2.0 poderá ser concebida com todos os elementos necessários em si embutidos. As novas dimensões serão de 1100 mm x 320 mm x 90 mm. A nova solução é apresentada na Figura 41.

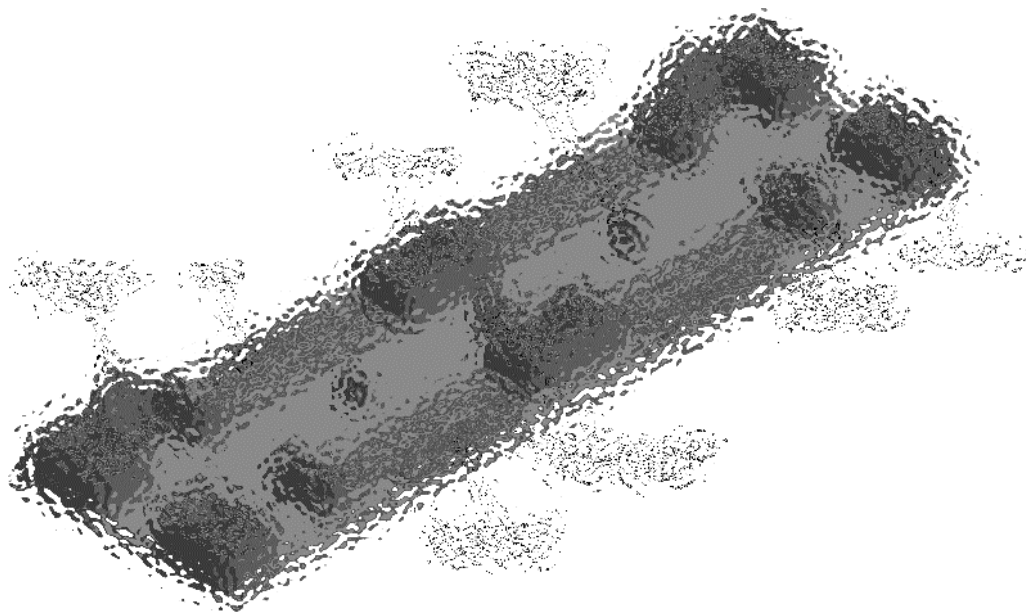


Figura 41 - Placa Base 2.0. Dimensões aproximadas: 1100x320x90 [mm]

Assim, a nova placa é moldada já com os carris, os elementos de guiamento vertical, os alojamentos para as molas horizontais e a estrutura onde irá assentar o sistema de sincronização. Os guias verticais adjacentes aos carris funcionam, igualmente, como batentes que definem a posição inicial dos patins. Além destes, foram idealizados outros elementos que não pertenciam ao C_{MI} do Next-Road 1.0: encaixes para guias laterais, encaixe para guias centrais e alojamento para gerador.

À exceção dos carris, todos os elementos mencionados serão analisados no ponto c) desta secção. Será explicado o propósito da sua conceção, bem como as vantagens e desvantagens da sua produção.

No Next-Road 1.0, o C_C envolve todo o C_{MI} como recurso a um perfil em U. Assim, a Placa Base do produto em questão não se encontra em contacto direto com o solo, aquando da montagem do produto na via pública. Por sua vez, a Placa Base 2.0 foi concebida visando ser a base de todo o produto. Deste modo, a sua face inferior foi reforçada com nervuras, por forma a garantir uma maior robustez ao produto. A Figura 42 exhibe o pormenor agora relatado.

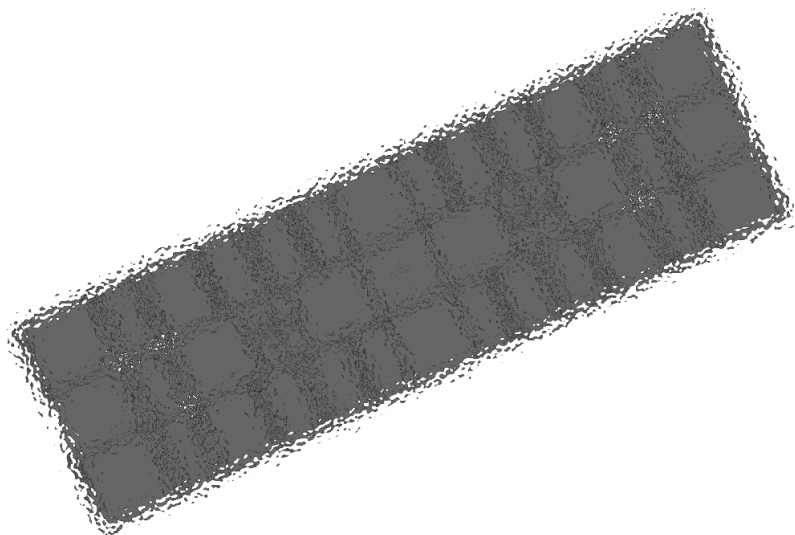


Figura 42 - Face inferior da Placa Base 2.0

Este componente estará sujeito a cargas elevadas nas zonas dos alojamentos para as molas e nos guias verticais adjacentes aos carris. Assim, este componente deverá apresentar elevada resistência e rigidez nos pontos mencionados. Uma vez que toda peça deverá ser concebida no mesmo material, e, por razões de uniformidade de materiais na versão 2.0, foi selecionado o PA GF.

Apresentada a Placa Base 2.0, é interessante realçar as **vantagens** que esta alternativa traz, em relação ao componente anterior:

Do ponto de vista económico, esta pode ser uma solução interessante. O investimento que será necessário realizar, numa matriz para produzir um componente com a complexidade e as dimensões mencionadas, será muito elevado. Além disso, será necessário um movimento lateral do molde para realizar os furos no elemento que aloja o gerador. No entanto, apenas um molde conseguirá produzir centenas de milhares de peças, começando a verificar-se a diluição do seu custo no baixo custo de cada componente. Uma vez comprado o molde, o custo de cada componente será diretamente proporcional à sua massa. A comparação económica entre os componentes das versões 1.0 e 2.0 será realizada no Capítulo 7.

Outra clara vantagem em relação à Placa Base 1.0 prende-se com a já referida massa. A Placa Base 2.0, devido à densidade do material que a constitui, é menos pesada que o conjunto “Placa Base + Carris + Elementos de guiamento + Batentes de fim de curso” na versão 1.0.

Além disso, a quantidade de elementos de ligação será reduzida, pelas razões já referidas nesta secção.

Contudo, a grande **desvantagem** deste novo componente pode estar relacionada com a sua manutenção. Se algum dos componentes albergado pela Placa Base 2.0 sofrer danos, terá de ser substituída toda a placa.

Conclui-se assim a apresentação deste componente, concebido para a materialização com recurso ao processo de injeção de PA GF.

3. Elementos Restantes

Nesta secção serão abordados com maior clareza os elementos constituintes da Placa Base 2.0, bem como os restantes componentes do C_{MI} . Para isso, considera-se importante apresentar a Figura 43, que representa todo o C_{MI} , pertencente ao Next-Road 2.0.

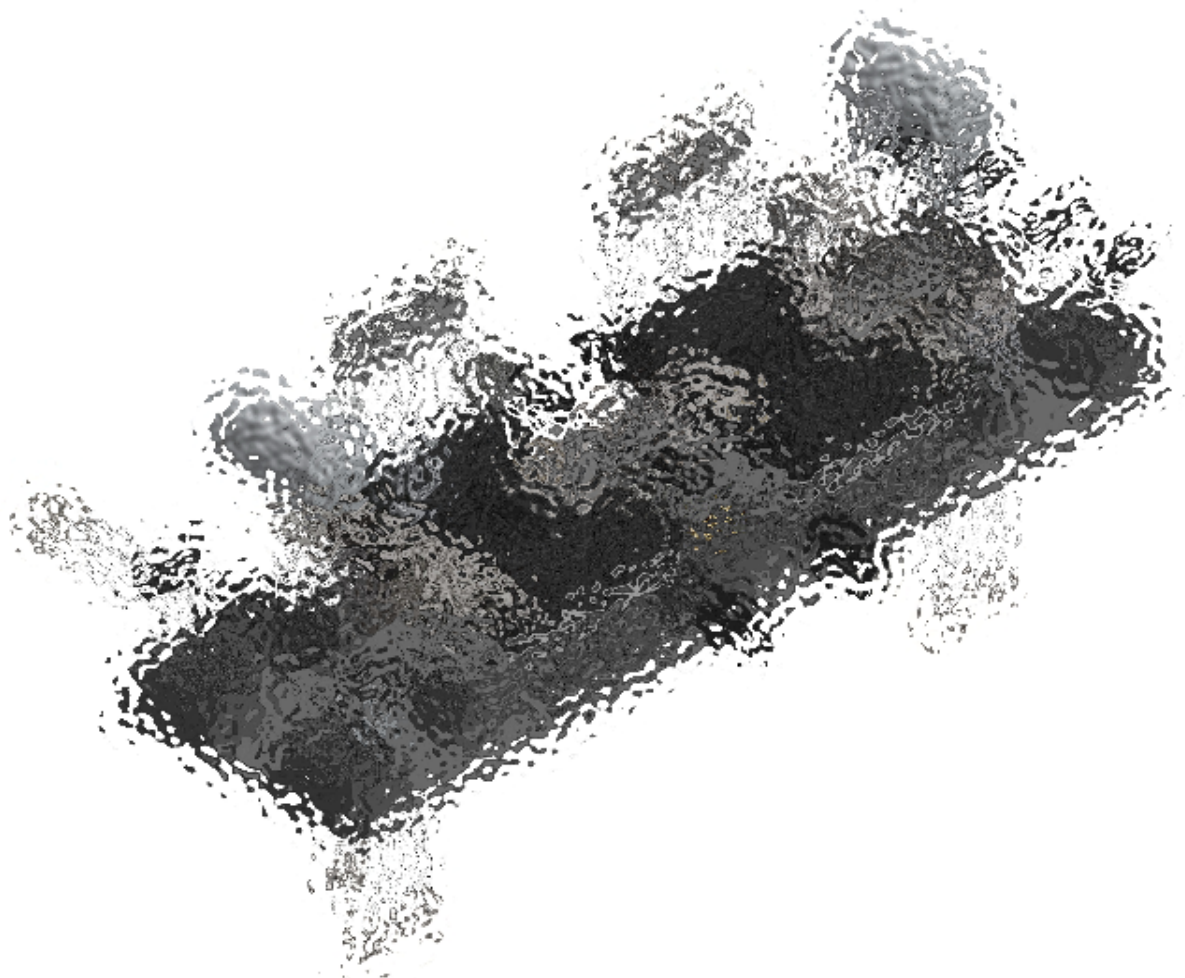


Figura 43 – Vista explodida do C_{MI} , pertencente ao Next-Road 2.0

a) Guias centrais e laterais

O Patim tem a função de transmitir a força exercida na tampa para as molas horizontais, através do seu próprio deslizamento. Assim, este componente não se pode mover em qualquer direção que não seja a horizontal. A sua rotação é impossibilitada pelos carris, ao passo que o seu deslocamento vertical é impedido pelos guias centrais e laterais.

A Figura 44 apresenta o guia central. Este componente limita o patim superiormente na sua zona central e é aparafusado ao referido “encaixe para os guias centrais” na Figura 41.

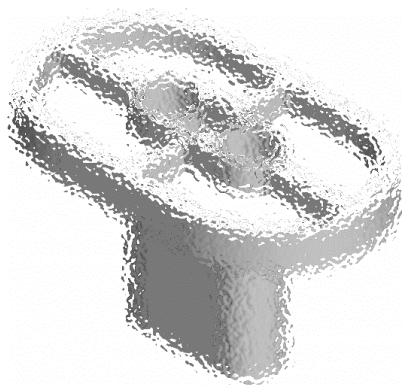


Figura 44 - Guia central. Dimensões aproximadas: 70x40x53 [mm]

Na Figura 45, é possível visualizar o guia lateral. Estes componentes limitam o patim superiormente nas suas zonas laterais, sendo aparafusados aos “encaixes para os guias laterais” (Figura 41).

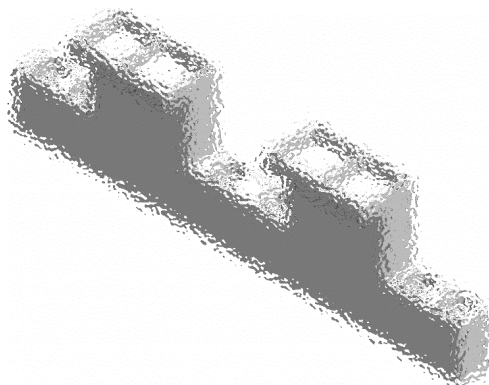


Figura 45 - Guia lateral. Dimensões aproximadas: 180x20x50 [mm]

Estes elementos, estando em contacto com as faces superiores do Patim 2.0 aquando do seu deslizamento, necessitam, igualmente, de apresentar baixo coeficiente de atrito. Além disso, não se tratam de componentes que sofrem solicitações elevadas. Assim, o material escolhido para a sua constituição foi o POM.

Desta forma, os componentes em questão serão moldados por injeção, o que permitirá a sua produção em grande escala. Dadas as baixas dimensões destas peças e a ausência de necessidade de movimento lateral dos moldes, estes serão simples.

b) Alojamento para as molas

As molas horizontais opõem-se ao movimento do patim, tendo este que vencer a força exercida por elas, para que haja uma redução do valor da velocidade do veículo.

As referidas molas, comprimidas pelo movimento horizontal do patim, são apoiadas em alojamentos idealizados para tal. É possível visualizar esse componente na Figura 46.

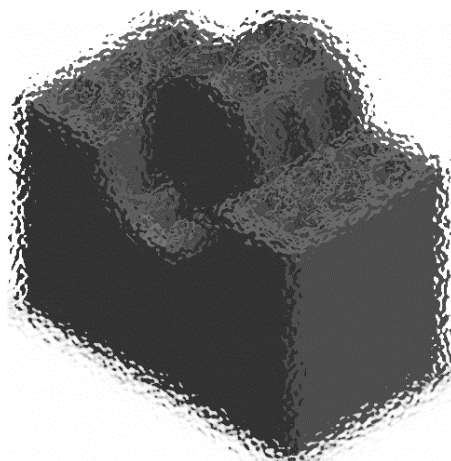


Figura 46 - Alojamento para uma mola horizontal

Este componente foi dimensionado tendo em conta a pré-carga a que as molas estarão sujeitas, no estado de repouso. Além disso, a face circular visível na Figura 46 foi reforçada com nervuras, dada a carga a que este elemento estará sujeito aquando do início do movimento do Patim.

As molas, durante a sua compressão e descompressão, não poderão sofrer deslocamentos na direção vertical, tendo sido idealizados componentes que visam limitar esse mesmo deslocamento.

c) Chapas em aço

Estes componentes visam impedir o deslocamento vertical das molas, fixando-as nos alojamentos destinados. As referidas chapas estão acopladas ao alojamento das molas e ao Patim 2.0, com recurso a elementos de ligação. A primeira é representada na Figura 47, podendo igualmente ser visualizada na Figura 43.

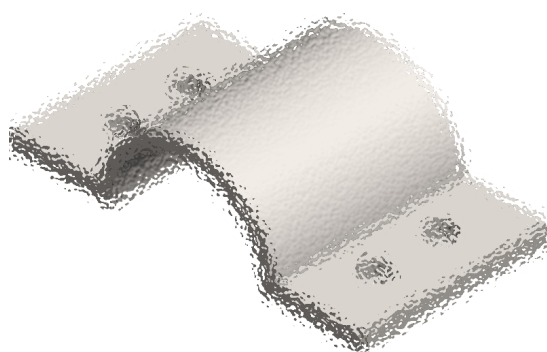


Figura 47 - Chapa pertencente ao alojamento para as molas. Dimensões aproximadas: 75x40x20 [mm]

A chapa acoplada ao patim é exposta na Figura 48, podendo ser visualizado o seu acoplamento na Figura 37.

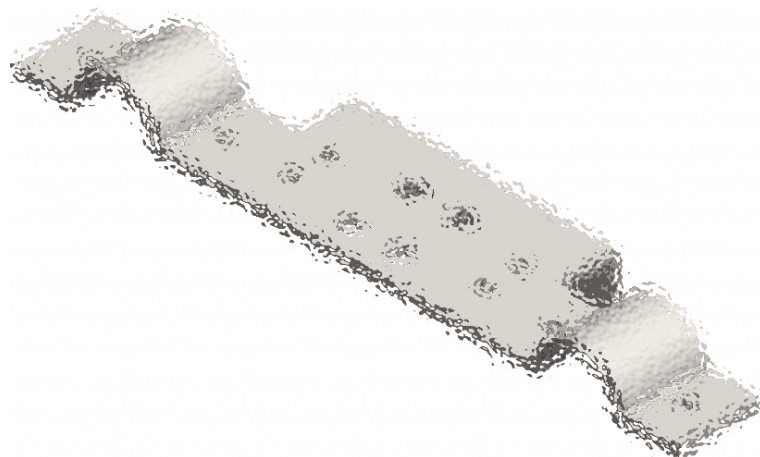


Figura 48 - Chapa de fixação das molas ao Patim 2.0. Dimensões aproximadas: 270x60x40 [mm]

Estes componentes serão concebidos em aço inoxidável, mais propriamente o AISI 304. Os processos de corte a laser e quinagem serão os processos implementados para a produção das peças em questão.

Assim, estes serão componentes de fácil conceção. No entanto, a sua cadência de produção poderá não ser elevada.

d) Sistema de sincronização

Como já foi referido, o C_T é solicitado pela ação de um automóvel, acionando o movimento descendente desse mesmo conjunto. Esse movimento é transmitido, através de um conjunto de bielas, aos patins. De forma a garantir que os dois patins sofrem exatamente o mesmo deslocamento, adaptou-se o “Sistema de sincronização”, já existente na versão 1.0. Este sistema, representado na Figura 49, é constituído por dois “Tirantes” e uma “Barra de sincronização”.

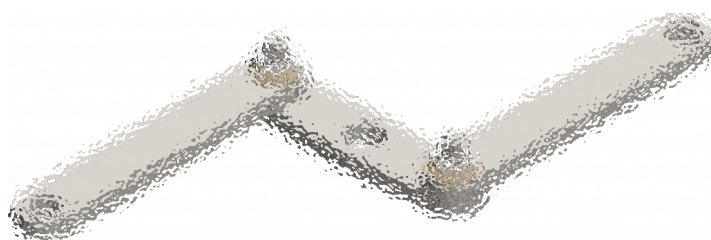


Figura 49 - Sistema de sincronização

Por sua vez, os elementos mencionados serão concebidos em aço AISI 304, com recurso à maquinaria de corte a laser.

Cada produto Next-Road 2.0 é constituído por dois sistemas de sincronização, que se interligam com recurso a parafusos, porcas e anilhas. Responsável pelo correto equilíbrio da carga transmitida aos dois patins, naturalmente, este sistema estar-lhes-á acoplado, assentado sobre o elemento “encaixe para o sistema de sincronização” (assinalado na Figura 41). Esta constituição está representada na Figura 50.

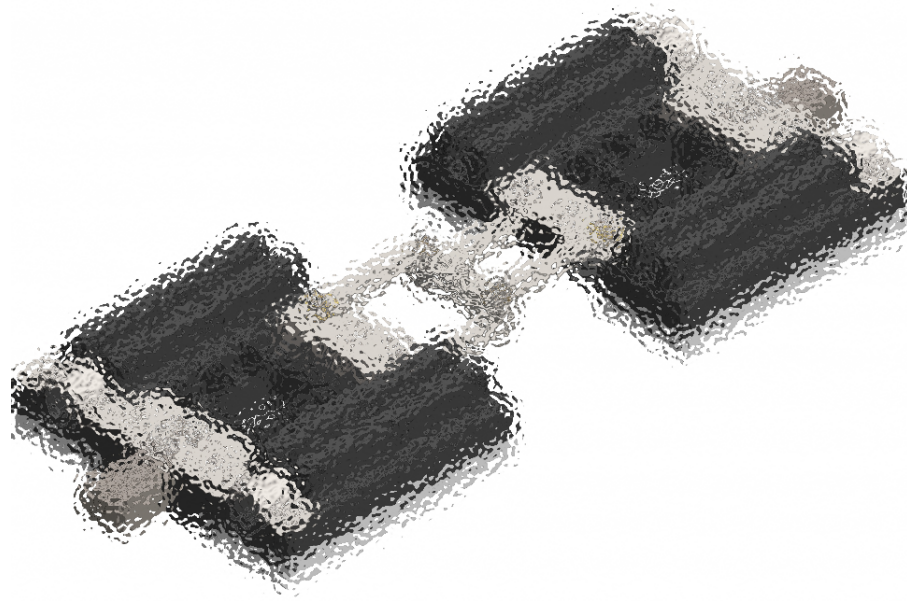


Figura 50 – Montagem do sistema de sincronização

Este sistema, sendo essencial ao correto funcionamento do produto, não traz nenhuma otimização em relação ao Next-Road 1.0, visto que já existia nessa mesma versão.

Atentando a Figura 50, repara-se na existência de uma outra chapa, além das já mencionadas. A chapa referida, que tem a função de fixar o sistema de sincronização aos patins, é exibida na Figura 51.

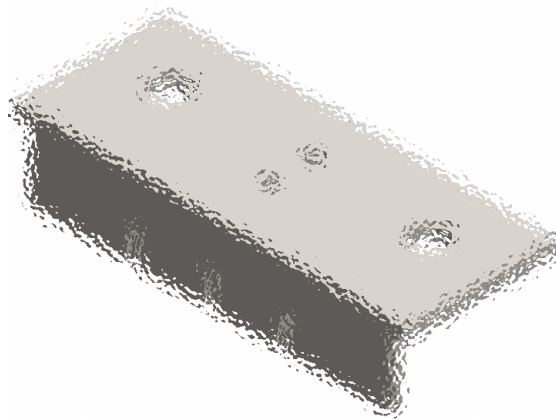


Figura 51 - Chapa de fixação do sistema de sincronização. Dimensões aproximadas: 120x45x25 [mm]

Os processos de fabrico a adotar para a produção deste componente serão o corte a laser e a quinagem, recorrendo-se ao aço AISI 304 para a sua composição.

Assim, conclui-se que todas as chapas presentes no C_{MI} não são mais que elementos de fixação, apresentando a desvantagem de requererem variados elementos de ligação.

e) Guias verticais

A função destes elementos passa por garantir o correto guiamento do C_T , sem que se verifique qualquer tipo de rotação, bem como garantir o retorno desse conjunto à posição inicial, com o auxílio de um conjunto de molas. Dada a interação entre estes guias com os elementos de guiamento pertencentes ao C_T , o funcionamento deste mecanismo será apresentado na próxima secção.

f) Batentes de borracha

Acoplados aos guias verticais, tanto nos seus topos, como nas paredes adjacentes aos carris, estes componentes têm a função de minimizar o impacto causado nos guias verticais, tanto pela descida do C_T , como pelo retorno do patim à posição inicial. A Figura 52 exhibe esses elementos.

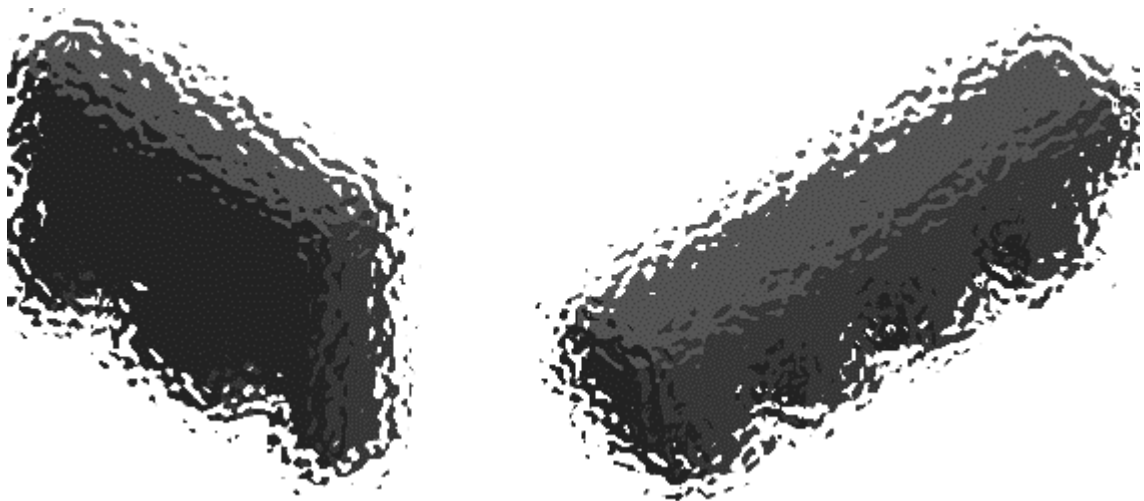


Figura 52 - Batentes de borracha. Dimensões aproximadas (esquerda para a direita): 75x15x50, 75x15x20 [mm]

O processo de fabrico implementado para a produção destes componentes é a extrusão de borracha Neoprene. Sendo um processo que permite produções em grande escala, e visto que neste caso não serão necessários processos de pós-processamento, a produção dos batentes de borracha será muito vantajosa economicamente.

Uma vez terminada a apresentação do C_{MI} do novo produto, a secção seguinte exhibe a conceção do conjunto que contacta com o exterior, o C_T . O desenho completo do C_{MI} 2.0 pode ser consultado no Anexo C.

4.2.2 Conjunto Tampa

Este é o conjunto responsável pelo contacto com o veículo, desencadeando todos os mecanismos no produto. Assim, o corpo principal do C_T , no Next-Road 1.0, era a Tampa em si, perfil extrudido em alumínio (e posteriormente maquinado), com funções de suporte de cargas. Este componente apresentou-se como um parâmetro crítico quando realizada a análise económica da versão 1.0. Desta forma, tanto a peça em si como o seu pós-processamento figuram nas dez ações mais dispendiosas, aferidas em 3.1.4, estando referidos como C_5 e P_3 , respetivamente.

Além do componente principal, este conjunto albergava ainda:

- Elementos em aço integralmente maquinados: aparafusados à tampa, garantiam o correto guiamento e limitavam o deslocamento máximo do C_T . Dado o processo de fabrico utilizado para a sua conceção, percebe-se que figure entre os elementos mais caros do produto Next-Road 1.0 (C_4 e C_6);
- Sistema de bielas extrudidas em alumínio: função de transmitir a carga aplicada no C_T , para o C_{MI} ;
- Borrachas extrudidas em Neoprene: função de contacto com o veículo;
- Componentes com funções de isolamento.

A idealização de um novo C_T prendeu-se, sobretudo, com duas razões:

- A elevada massa apresentada por este módulo, principal responsável pela inércia do sistema/causadora de possível inércia à descida do conjunto e causadora de dificuldades no processo de montagem;
- A maquinagem necessária para conceber os elevados detalhes apresentados na direção perpendicular ao sentido de extrusão.

Posto isto, foram idealizadas algumas alternativas a este módulo, por forma a contrariar as limitações referidas.

Primeiramente, idealizou-se a conceção da tampa, integralmente em material polimérico, recorrendo-se ao processo de moldação por injeção. Esta alternativa teria como principal vantagem a redução abrupta do peso total deste módulo. Além disso, reduzir-se-ia a quantidade de elementos de ligação. No entanto, sendo este um conjunto com requisitos de suporte e transmissão de cargas elevadas, o processo de injeção de plásticos poderia trazer debilidades ao nível da rigidez e resistência da tampa.

Desta forma, idealizou-se uma solução híbrida, que conjuga os processos de fabrico em série da extrusão de ligas de alumínio e da injeção de materiais poliméricos.

Assim, o conjunto foi separado em duas “metades”:

- **Metade superior:** encarregue pela interação com o veículo, constituída pelas borrachas de contacto e pelo bloco extrudido em alumínio;
- **Metade inferior:** encarregue pela interação com o C_{MI} , constituída pela tampa em material polimérico.

O novo C_T pode ser visualizado na Figura 53, sendo, em seguida, descrito cada componente do conjunto concebido.

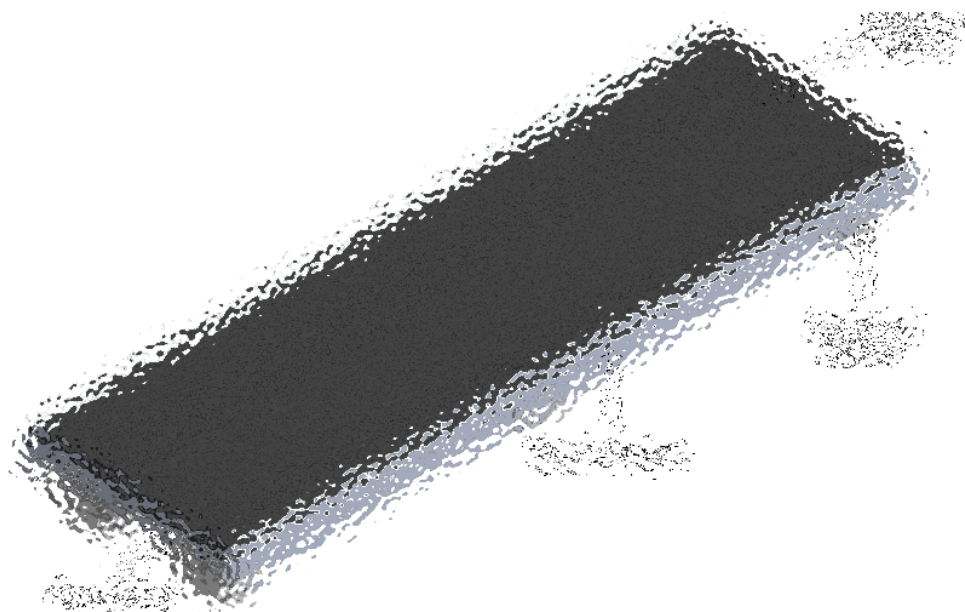


Figura 53 - Conjunto Tampa 2.0. Dimensões aproximadas: 1130x340x120 [mm]

A metade inferior será acoplada à superior por deslizamento. Por forma a aumentar a robustez desse mesmo acoplamento, serão utilizados parafusos em pontos estratégicos.

1. Metade superior

Com a função de contactar com o veículo, esta secção do C_T apresenta alguns requisitos. Assim, deve replicar condições de atrito similares ao betuminoso, cor similar à do alcatrão e suportar as cargas elevadas impostas pelos automóveis. Por forma a cumprir os requisitos mencionados idealizou-se a referida “Metade superior”, apresentada na Figura 54.

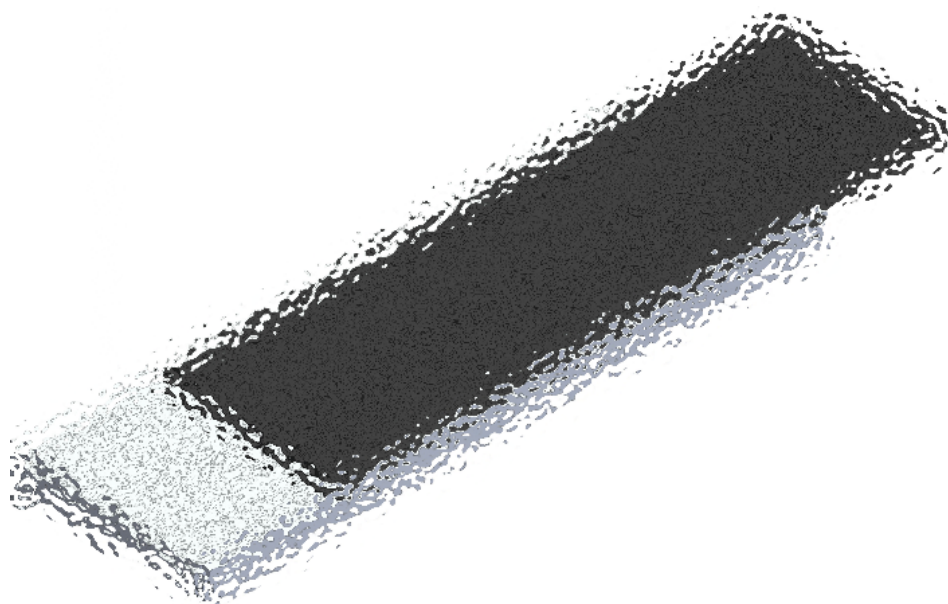


Figura 54 - Metade superior do C_T

Os dois componentes constituintes desta secção do C_T serão produzidos com recurso a matrizes de extrusão, tornando possível a sua produção em grande escala. No entanto, o bloco extrudido em alumínio será sujeito a processos de maquinagem posteriores, por forma a realizar os furos necessários para o acoplamento à metade inferior do C_T .

Como se pode aferir na Figura 54, as borrachas serão acopladas ao perfil em alumínio por deslizamento.

A liga de alumínio utilizada na extrusão do bloco em questão, à semelhança do que acontecia no Next-Road 1.0, será a EN-AW-6063 T6, ao passo que as borrachas serão extrudidas em Neoprene. Os materiais escolhidos seguiram os requisitos que este conjunto deve cumprir.

2. Metade inferior

A metade inferior do C_T tem a função de transmitir a carga imposta pelo veículo até ao C_{MI} , bem como, em conjunto com os guias verticais expostos na Figura 41, garantir o correto guiamento da tampa. Os componentes que constituem a metade inferior são exibidos na Figura 55.

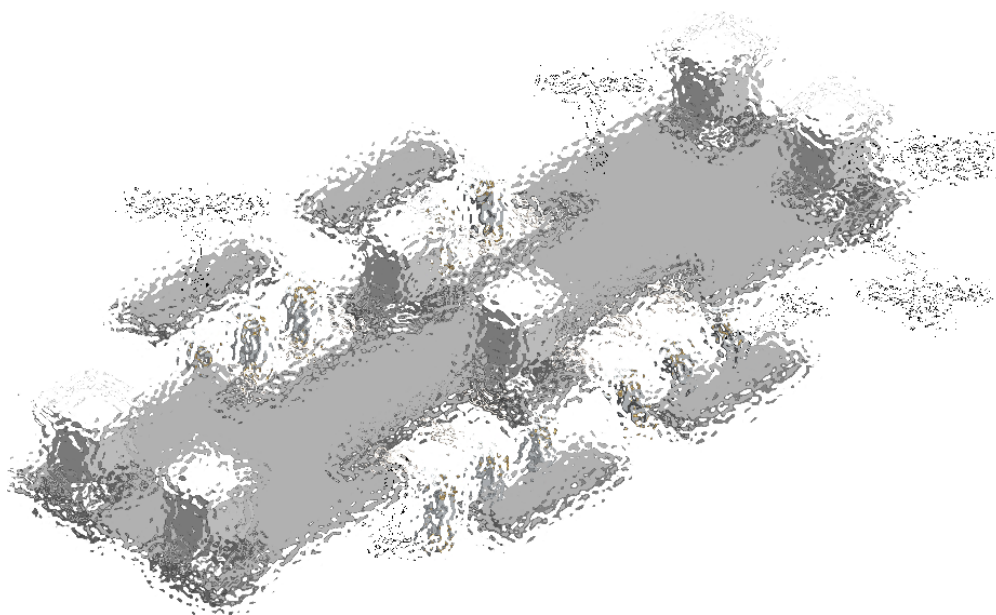


Figura 55 - Metade inferior do C_T

Tal como nas secções anteriores será feita uma breve explicação sobre cada componente. A imagem de cada componente é exibida no Anexo C.

- **Tampa injetada:** Sendo este um sistema que necessita o acoplamento de bielas e de elementos de guiamento, terá de ser complexo. No Next-Road 1.0, essa complexidade, necessária para garantir os encaixes e saliências para o acoplamento das bielas e dos guias, era garantida com recurso à maquinagem. Assim, por forma a reduzir os custos fixos associados a este conjunto, bem como reduzir a sua massa, idealizou-se a solução exposta. O material escolhido para a sua produção é o PA GF, pela capacidade de resistência a cargas elevadas que apresenta. Este componente é ainda responsável por limitar o deslocamento vertical do C_T . Este fenómeno é conseguido graças ao elemento “Batente de fim de curso”, que ao contactar com os guias verticais, presentes no C_{MI} , cessa o movimento da tampa.

- **Biela:** Componente extrudido em alumínio, sendo o seu principal objetivo a transmissão do movimento vertical do C_T aos patins;
- **Auxiliar de fixação:** A função deste componente é fixar as bielas, garantido o seu correto posicionamento. A impossibilidade de criar uma tampa injetada que permitisse a inserção dos pernos, levou à idealização dos auxiliares de fixação. Assim, será possível inserir os pernos, seguidos das bielas, acoplando-se posteriormente os auxiliares. Estes componentes, uma vez montados, encontram-se fixos, dados os limites impostos pelas bielas, de um lado, e pelo bloco de alumínio, do outro. Os auxiliares de fixação, tal como a tampa injetada, serão processados em PA GF.
- **Elementos de guiamento:** A sua função passa por garantir o correto guiamento do C_T , impedindo a sua rotação. Quando este conjunto é solicitado, os elementos de guiamento, em solidariedade com a tampa, iniciam o seu movimento descendente. Como é possível visualizar na Figura 56, estes componentes deslizam no interior dos guias verticais, impossibilitando qualquer rotação do C_T . Dada esta interação, os elementos de guiamento serão concebidos com recurso à injeção de POM. Apresentam-se como uma grande vantagem, em termos económicos, em relação aos anteriores guias (maquinados em aço).

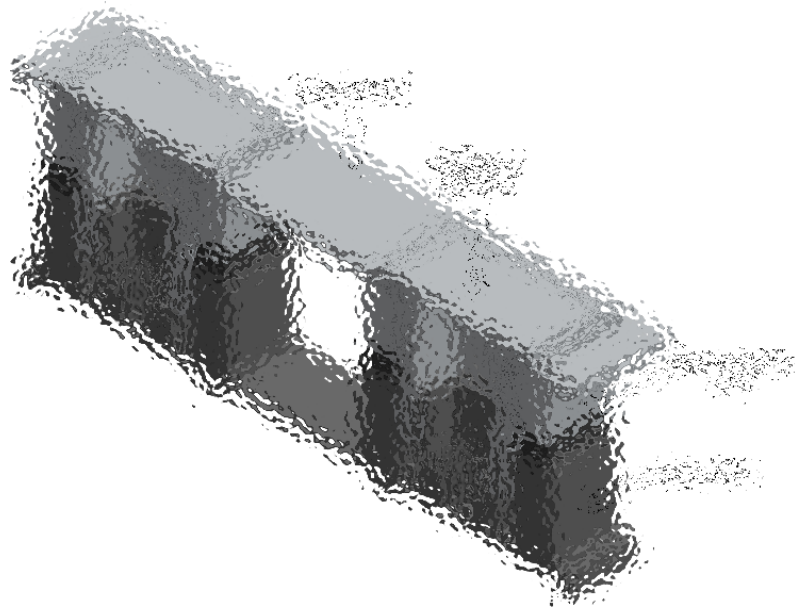


Figura 56 - Mecanismo de descida do C_T (vista em corte)

O retorno do C_T é garantido por um conjunto de molas, alojadas no interior dos guias verticais. Aquando da descida da tampa, é exercida uma força por esta sobre as referidas molas. Quando o sistema deixa de estar atuado, o conjunto de molas restabelece a posição inicial do C_T .

É de referir ainda que é o deslocamento máximo da tampa, de 25 mm, imposto pelo contacto dos batentes de fim de curso com as borrachas dos guias verticais, que determina o curso máximo dos patins.

Concluindo, todos os componentes que constituem o novo Conjunto Tampa são produzidos com recurso a moldes ou matrizes de extrusão. Assim, eliminam-se todos os componentes maquinados, parâmetros críticos no modelo 1.0. O único processo de pós-processamento que será utilizado no C_T 2.0, será a realização de furos no bloco de alumínio.

4.2.3 Conjunto Caixa

O C_C , pertencente ao Next-Road 1.0, é um conjunto concebido apenas em alumínio. Constituído pela base, laterais, topo e barras de ligação, todos os componentes deste módulo foram extrudidos individualmente e, posteriormente maquilados.

A conceção do C_C 2.0 não foi realizada, dado o período limitado para a realização da dissertação.

Desta forma, conclui-se o Capítulo 4, onde foi apresentada a conceção do Next-Road 2.0, uma versão que visa a industrialização do produto da Pavnext. Segue-se o capítulo que aborda a seleção de materiais realizada para os componentes do modelo 2.0.

5 Next-Road 2.0: Seleção de materiais

Como o próprio título da dissertação refere, o seu principal objetivo passa pela otimização económica do produto Next-Road, através da adoção de novos materiais.

O presente capítulo aborda a seleção de materiais para os componentes do produto Next-Road 2.0. Os materiais selecionados foram já referidos na secção anterior, justificando-se, neste capítulo, a sua escolha.

As análises realizadas à versão 1.0 do produto da Pavnext permitiram aferir uma série de conclusões relacionadas com a substituição de materiais, as quais já foram sendo referidas ao longo da dissertação:

- O processo de maquinagem integral de componentes representam custos fixos elevados;
- O design dos componentes extrudidos do Next-Road 1.0 leva à necessidade de processos de pós-processamento;
- A massa dos componentes em alumínio é elevada, tendo em conta a montagem manual do produto Next-Road.

Assim, as desvantagens do material mais utilizado no Next-Road 1.0 – as ligas de alumínio – não se prendiam nem com as suas propriedades mecânicas, nem com o custo da matéria-prima, mas sim com os custos fixos elevados associados ao seu pós-processamento e com a sua massa.

Desta forma, recorreu-se ao processo de injeção para conceber o novo produto. Os primeiros requisitos a cumprir na seleção de materiais – já referidos anteriormente – são agora reforçados:

- Materiais que possam ser moldados por injeção;
- Materiais com densidades baixas, de maneira a promoverem uma redução de peso no produto;
- Preço da matéria-prima similar ao das ligas de alumínio, ou seja, menor ou igual que 3,5€/kg.

Com recurso ao *software* GRANTA EduPack 2020, usando as funcionalidades explicitadas em 2.2.2, gerou-se um gráfico que segue as primeiras restrições impostas ao material a seleccionar. Esse mesmo gráfico é exposto na Figura 57.

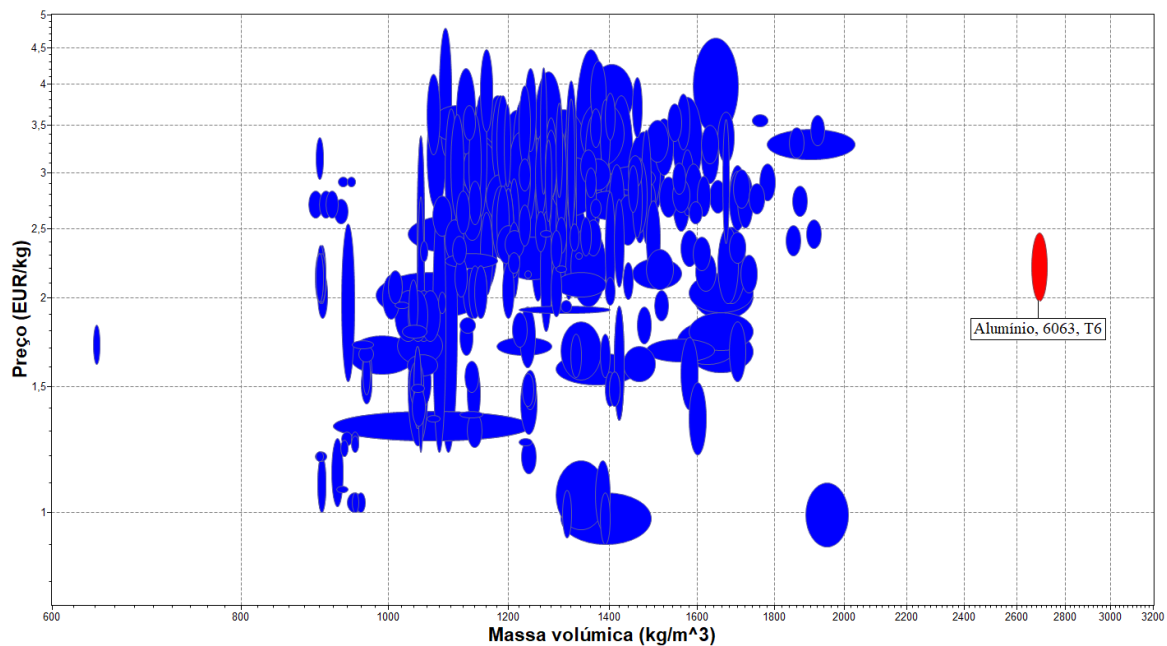


Figura 57 - Seleção de materiais: Preço x Massa volúmica (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020)

Naturalmente, uma primeira triagem dos materiais que apenas limita o seu preço, massa volúmica e processo pelo qual darão origem a peças, não será precisa. As três restrições impostas limitaram a seleção a 265 materiais, dos 4169 disponíveis no *software*. As seleções de materiais realizadas para os diferentes componentes, partiram deste gráfico.

De forma a restringir cada vez mais os materiais a utilizar, faz sentido ter em atenção os requisitos que os componentes do produto Next-Road 2.0 devem cumprir. Assim, identificaram-se, para esta seleção de materiais, dois tipos de componentes:

- Componentes com funções de resistência a cargas elevadas;
- Componentes com funções de guiamento e deslizamento.

Partindo do conjunto de materiais que foi gerado no gráfico da Figura 57, foram selecionados materiais de acordo com as propriedades requeridas para cada componente. Nas próximas secções é, então, detalhada esta seleção.

De referir, ainda, que a escolha de materiais realizada visa apenas validar funcionalmente os componentes concebidos. Este será sempre o primeiro passo, sendo um ponto de partida para que se realize, posteriormente, uma seleção com vista à durabilidade do produto Next-Road.

5.1 Seleção de materiais para componentes com funções de resistência a cargas

O Next-Road 1.0, constituído, como referido antes, maioritariamente por ligas de alumínio extrudadas, é um produto já validado em ambiente relevante. Assim, as suas propriedades mecânicas podem ser tomadas como modelo a seguir na seleção de materiais para os componentes solicitados por cargas elevadas.

Desta forma, para os componentes sujeitos a maior solicitação no produto Next-Road 2.0, foram identificadas as propriedades mecânicas mais importantes dos materiais a implementar. A Tabela 18 explicita-as, adicionando os fatores que levaram à sua análise.

Tabela 18 - Componentes mais solicitados e respetivas propriedades mecânicas a analisar

COMPONENTE	PROPRIEDADES MECÂNICAS	FATORES QUE LEVARAM AO ESTUDO
Metade superior do C_T	Módulo de elasticidade Tensão limite elástico	Elevada carga transmitida pelo peso do veículo.
Cantoneira	Módulo de elasticidade Tensão limite elástico Resistência à compressão	Transmissão de carga das bielas para a cantoneira.
Parte superior do Patim	Módulo de elasticidade Tensão limite elástico Resistência à compressão Tenacidade à fratura	Transmissão de carga das bielas; Força exercida pelas cremalheiras; Impacto causado no retorno do patim à posição inicial.
Guias verticais	Módulo de elasticidade Tensão limite elástico Tenacidade à fratura	Força e impacto causados pelo retorno dos patins à posição inicial.
Alojamento das molas	Módulo de elasticidade Tensão limite elástico	Carga transmitida pelas molas horizontais

Desta forma, com recurso ao EduPack, foi elaborada a Tabela 19, onde constam os valores médios das propriedades mecânicas referidas na Tabela 18, para a liga de alumínio mais utilizada no Next-Road 1.0. Dada a sua validação, estes valores poderiam ser utilizados como referência.

Tabela 19 - Valores de referência das propriedades a analisar (liga AW 6063 T6) (Adaptado de (Ansys 2020))

AW 6063 T6	
Massa volúmica [Kg/m³]	2 690
Módulo de Young (E) [GPa]	71
Tensão limite elástico (σ_e) [MPa]	215
Resistência à compressão [MPa]	215
Tenacidade à fratura [MPa/m²]	33

Posto isto, inicia-se a descrição do procedimento referente à seleção de materiais para cada componente referido na Tabela 18.

5.1.1 Componentes pertencentes ao C_T

Atente-se, primeiramente, na seleção do material constituinte da metade superior do C_T . Este é o componente que contacta diretamente com os veículos. Em alguns casos poderá ter de suportar o peso de um veículo parado sobre si. Assim, a rigidez deste elemento foi definida como o critério principal, e deve ser o mais próxima possível do material que foi definido como a referência.

Desta forma, foi elaborado um gráfico *Preço x Módulo de elasticidade*, por forma a entender a gama de valores dos materiais selecionáveis. Dadas as propriedades definidas como críticas para a tampa, restringiu-se a seleção a materiais que apresentam tensões limite elástico maiores que 115 MPa (sensivelmente metade do valor do material de referência, valor arbitrado dado todo este processo ser interativo). Assim, reduziu-se a seleção a 41 materiais. A Figura 58 mostra o gráfico gerado.

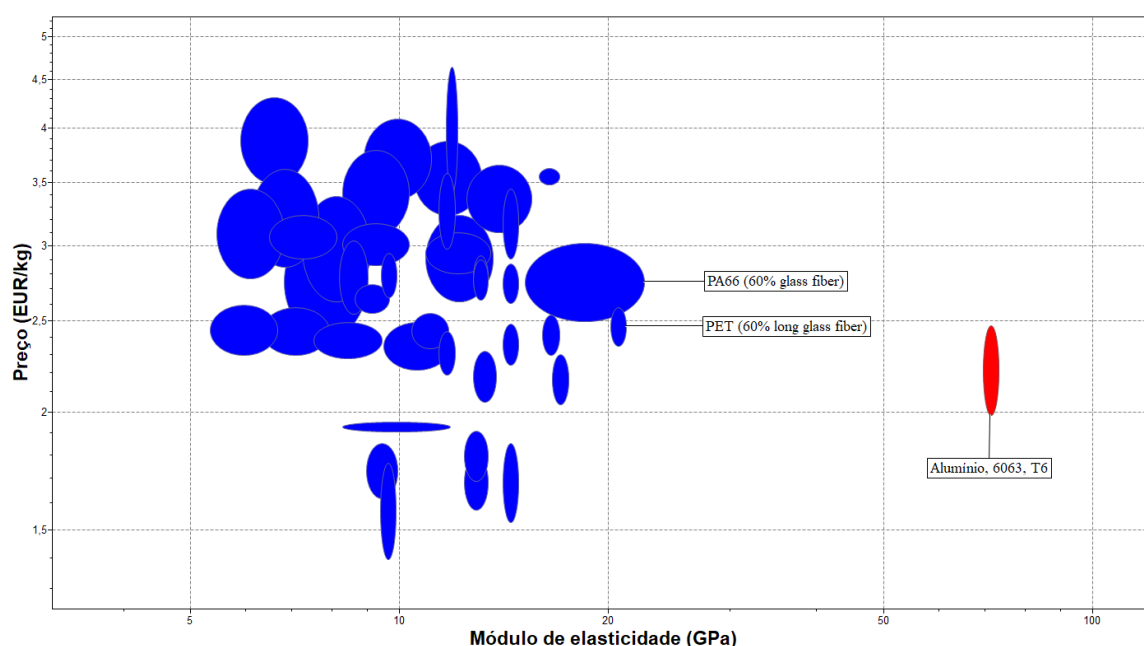


Figura 58 - Seleção de materiais: Preço x Módulo de elasticidade (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020)

Analisando essa mesma figura, é possível entender que nenhum material que respeite as restrições impostas inicialmente se aproxima da liga de alumínio 6063. O PA66 e o PET, reforçados com 60% de fibra de vidro, são os que apresentam maior valor para o módulo de elasticidade dos materiais selecionáveis, sendo os seus valores médios 18,5 GPa e 20,7 GPa, respetivamente.

Naturalmente, existem materiais compósitos que apresentam valores superiores no que à rigidez diz respeito. No entanto, o custo da matéria-prima, imposto como critério primordial pela empresa, limita o leque de materiais selecionáveis.

Desta forma, a decisão tomada, em conjunto com a empresa, foi a de conceber uma estrutura híbrida para o C_T do Next-Road 2.0, como foi referido no Capítulo 4. Assim, a metade superior deste conjunto será extrudida na liga EN-AW-6063 T6, por nenhum material se aproximar dos níveis de rigidez pretendidos.

Esta decisão não significa que qualquer outro material seleccionável não pudesse constituir este elemento. No entanto, sendo este o componente que contacta com o exterior, e que é mais solicitado, optou-se por manter o material em vigor no Next-Road 1.0.

Por outro lado, como foi referido em 4.2.2., o C_T contempla ainda uma metade inferior, concebida de maneira a tornar este conjunto mais leve e sem necessidade de pós-processamento.

Assim, o material seleccionado para este componente será o material compósito que apresente as melhores propriedades mecânicas possíveis, de acordo com as restrições impostas. Este material será o mesmo que nos restantes componentes injetados, que requeiram elevada resistência a cargas. A sua selecção será explicitada na secção que se segue.

5.1.2 Componentes pertencentes ao C_{MI}

A selecção do material destes componentes ocorreu em paralelo. Além de fazerem parte do mesmo conjunto, as propriedades mecânicas definidas como mais importantes na escolha do material para cada um deles, são idênticas.

O módulo de elasticidade e a tensão limite elástico são importantes pois são propriedades usadas no critério de falha de Von Mises, medindo a rigidez e resistência dos materiais.

A força transmitida pelas bielas comprime o material que constitui o patim. Assim, a resistência à compressão torna-se numa propriedade a analisar. Essa mesma força obriga o patim a deslizar, comprimindo as molas horizontais. Esses elementos exercem uma força sobre o seu alojamento. Quando o C_T deixa de ser atuado o patim retorna à sua posição inicial, causando um forte impacto nas paredes dos guias verticais. Assim, torna-se interessante analisar a tenacidade à fratura do material a seleccionar.

Desta forma, além das três restrições iniciais já impostas, limitou-se ainda mais a escolha do material:

- Módulo de elasticidade maior ou igual a 5 GPa;
- Tensão limite elástico maior ou igual a 120 MPa;
- Resistência à compressão maior ou igual a 120 MPa.

Estes valores foram mais uma vez arbitrados, dada a natureza iterativa deste processo, de forma a restringir ao máximo o intervalo de materiais seleccionáveis. Na Figura 59 pode visualizar-se a imposição das restrições no *software*.

▼ Mechanical properties				
		Minimum	Maximum	
Young's modulus		5		GPa
Specific stiffness				MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)		120		MPa
Tensile strength				MPa
Specific strength				kN.m/kg
Elongation				% strain
Compressive strength		120		MPa
Flexural modulus				GPa
Flexural strength (modulus of rupture)				MPa
Shear modulus				GPa
Bulk modulus				GPa
Poisson's ratio				
Shape factor				
Hardness - Vickers				HV
Elastic stored energy (springs)				kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles				MPa

Figura 59 - Restrições impostas na seleção de materiais para os elementos do Patim 2.0 (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020)

Desta forma, o GRANTA EduPack 2020 devolveu 34 materiais capazes de cumprir com os requisitos impostos. Por sua vez, do contacto com empresas especializadas na área da injeção de plásticos, confirma-se o que já havia sido referido em 2.3.3: os materiais reforçados com fibras longas dificultam o processo de injeção, podendo ainda ocorrer a sua quebra. Consequentemente, este tipo de materiais foi removido, ficando a seleção de materiais para os elementos em questão reduzida a 16.

Os 16 materiais seleccionáveis são, maioritariamente, pertencentes a duas classes de termoplásticos:

- Polietileno tereftalato reforçado com fibra de vidro (PET GF);
- Poliamidas reforçadas com fibra de vidro (PA6/PA66 GF).

Além destes, misturas reforçadas como o PA6+PP GF30 e o PET+PC GF30 cumprem os requisitos especificados. A lista dos 16 materiais retornados pelo EduPack é apresentada na Figura 60.

- ABS+PBT (30% glass fiber)
- Aluminum, 6063, T6
- PA6 (30-35% glass fiber)
- PA6 (33% glass fiber, toughened)
- PA6 (50% glass fiber)
- PA6+PP (30-35% glass fiber)
- PA66 (30-33% glass fiber)
- PA66 (50% glass fiber)
- PA66 (60% glass fiber)
- PBT (50% glass fiber)
- PC+PET (30% glass fiber)
- PET (30% glass fiber)
- PET (30% glass fiber, recycled conte...
- PET (35-45% glass fiber and mica)
- PET (40-45% glass fiber)
- PET (45% glass fiber, recycled conte...
- SAN (20% glass fiber)

Figura 60 - Lista de materiais seleccionáveis (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020)

Posto isto, procedeu-se à realização de gráficos que relacionam as propriedades referidas como importantes. Primeiramente, relacionaram-se as propriedades E e σ_e , dada a sua relação no critério de falha que irá ser utilizado.

Desta forma, na Figura 61 apresenta-se o gráfico *Tensão limite elástico x Módulo de elasticidade*, onde estão contemplados os 16 materiais referidos.

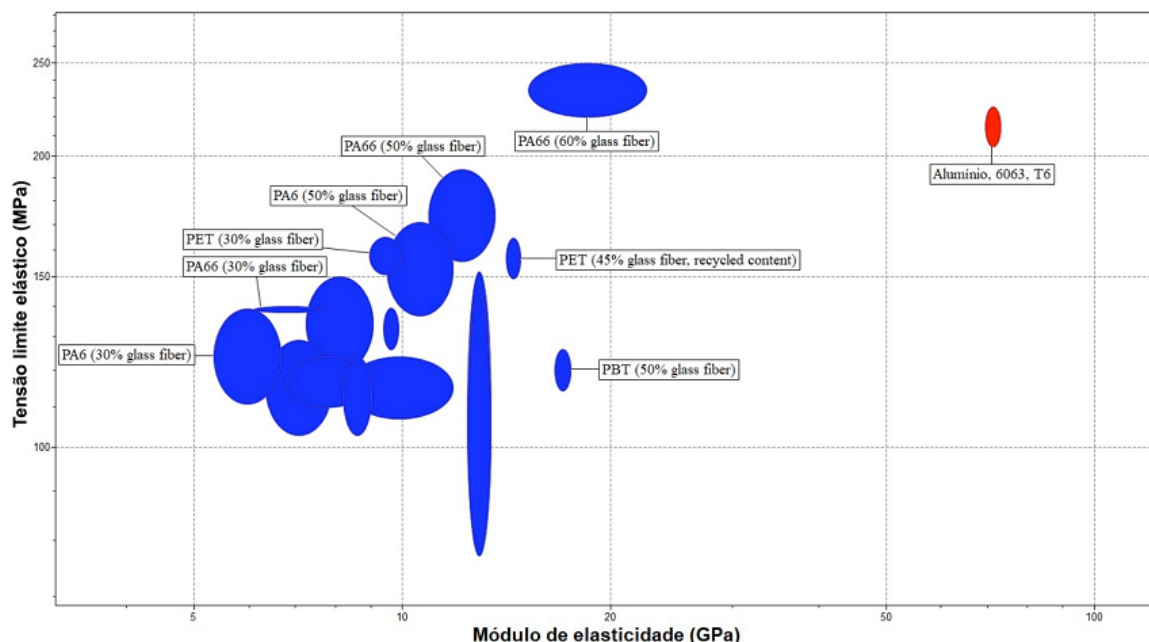


Figura 61 - Seleção de materiais: Tensão limite elástico x Módulo de elasticidade (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020)

Para além deste, foi elaborado um gráfico *Preço x Resistência à compressão*, o qual é exibido na Figura 62.

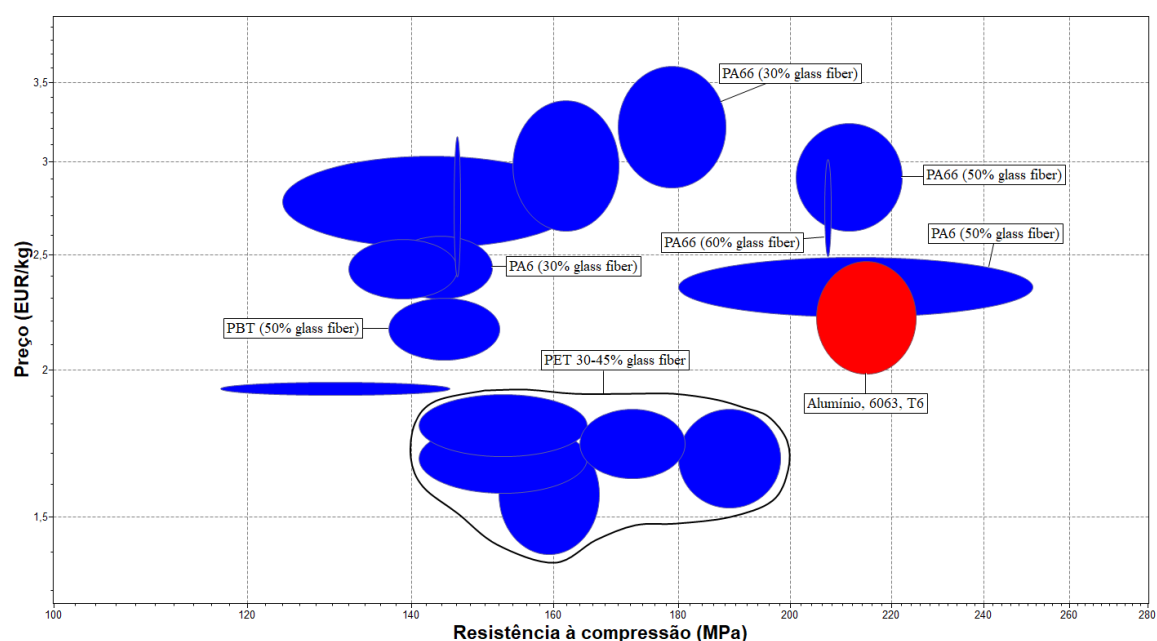


Figura 62 - Seleção de materiais: Preço x Resistência à compressão (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020)

Por último, foi analisada a tenacidade à fratura dos materiais em questão, tal como se apresenta na Figura 63.

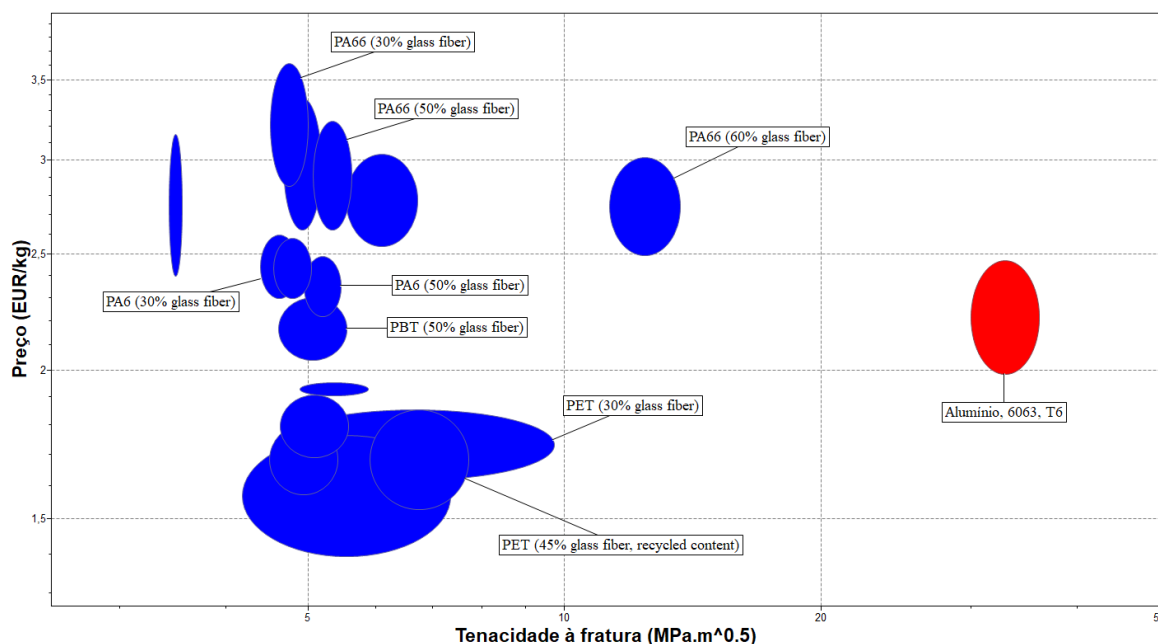


Figura 63 - Preço x Tenacidade à fratura (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 25 jan., 2020)

Por sua vez, a análise aos gráficos expostos permite concluir:

- Os materiais que apresentam melhor relação entre rigidez e tensão limite elástico são o PA6 GF50, o PA66 GF50, o PET GF45 e o PA66 GF60;
- PA6 e PA66, para a mesma percentagem de fibra, apresentam propriedades mecânicas e preços semelhantes, com um ligeiro ascendente no valor de ambos no PA66;
- Os valores de qualquer um dos materiais, no que a tenacidade à fratura diz respeito, estão muito distantes dos da liga EN-AW-6063 T6;

Por forma a que a interpretação dos gráficos gerados seja mais clara, elaborou-se a Tabela 20, que expõe os valores das propriedades dos principais materiais selecionáveis. Para cada propriedade/linha, assinalou-se a verde os três maiores valores. Os números apresentados são valores médios, relativos aos intervalos contemplados no EduPack.

Tabela 20 - Propriedades dos principais materiais selecionáveis (Adaptado de (Ansys 2020))

	PA6		PA66		PET	
	GF30	GF50	GF30	GF50	GF30	GF45
Módulo de elasticidade [GPa]	6	10,6	6,8	12,2	9,4	14,4
Tensão limite elástico [MPa]	124	153	139	174	158	157
Resistência à compressão [MPa]	144	213	179	211	172	189
Tenacidade à fratura [MPa/m²]	4,6	5,2	4,7	5,3	6,7	6,8
Preço [€/kg]	2,44	2,35	3,21	2,91	1,73	1,68

Sendo esta uma secção restrita de materiais (apenas 16), é de esperar que se comportem de forma semelhante perante as mesmas solicitações. No entanto, interpretando os dados da Tabela 20, é possível aferir que:

- O aumento da percentagem de reforço é acompanhado por uma melhoria das propriedades mecânicas, para a mesma matriz polimérica;
- A classe dos PET reforçados apresenta a melhor relação entre o custo e as propriedades mecânicas em questão.

Contudo, o fator decisivo para a escolha do material, nesta última fase, foi o contacto com a indústria. Aquando do envio dos desenhos dos componentes para orçamentação dos moldes para a sua execução, foi reportada a seleção de materiais realizada, tendo sido referidos os três tipos de materiais compósitos com os quais se poderia produzir as peças. De acordo com as conclusões retiradas, foi transmitido que, para qualquer um dos materiais, seria do interesse da Pavnext a maior quantidade de fibra possível, sabendo de antemão que uma maior percentagem pode dificultar o processo de injeção.

Por sua vez, a resposta obtida retirou o PET GF da equação, dada a maior familiarização com as poliamidas, por parte das empresas contactadas.

Quanto à cota de fibra a incorporar, o *feedback* foi positivo, tendo sido referida a possibilidade de injetar PA6/PA66 com qualquer tipo de percentagem até 50%. No entanto, quanto maior o valor selecionado, mais complexo será o processo de otimização final dos moldes. Desta forma, poderão ter de ser feitos mais testes e ajustes nos moldes, levando a possíveis incrementos no seu custo.

Concluindo, com base na seleção de materiais realizada, bem como no *feedback* prestado pela indústria na área da injeção, o material mais indicado para os componentes do C_{MI} será qualquer uma das poliamidas (PA6/PA66) reforçadas com fibra de vidro (30-50%).

No Capítulo 6 serão expostos as simulações de resistência aos componentes do Next-Road 2.0, onde o PA6 GF30 e o PA66 GF50 serão os materiais utilizados, por forma a garantir um fator de comparação.

5.2 Seleção de materiais para componentes com funções de guiamento e deslizamento

No Capítulo 4 foi apresentado o produto Next-Road 2.0, tendo sido expostos cada um dos seus componentes principais. Assim, foram identificados quatro elementos com funções de deslizamento: parte inferior do patim, guia central, guia lateral e elemento de guiamento.

No Next-Road 1.0, como já se apresentou, o patim desliza sobre o carril com o auxílio de um perfil de Ertacetal. Por sua vez, neste mesmo produto, os elementos de guiamento – em aço – guiam o sistema através de um conjunto de rolamentos.

A seleção de materiais, neste caso, teve por base o bom desempenho do material, já testado, existente na versão 1.0, que permitia o deslizamento dos patins. O Ertacetal é um plástico autolubrificante, com baixo coeficiente de atrito, que garante um eficaz deslizamento dos componentes.

Assim, a seleção do material para este tipo de componentes foi limitada desde o início da conceção do Next-Road 2.0. A dúvida residia apenas em qual dos dois tipos de POM seleccionar: o homopolímero ou o copolímero. O primeiro apresenta um ligeiro ascendente no que às propriedades mecânicas diz respeito (Ansys 2020). No entanto, o único requisito que o

material constituinte dos componentes em questão tem de cumprir, é permitir o seu deslizamento ou o deslizamento de outros componentes sobre si, sem que haja fricção e degradação do material. Neste capítulo, os dois são similares, pelo que se reportou à indústria que os componentes seriam injetados em POM, sem qualquer tipo de distinção.

O contacto com a indústria confirmou as boas propriedades de deslizamento e a possibilidade de injetar as peças em POM. Assim, este foi o material seleccionado para os quatro elementos mencionados nesta secção.

Concluindo, será apresentada a Tabela 21, onde são expostos os valores das propriedades referidas, para os materiais seleccionados.

Tabela 21 - Propriedades dos materiais seleccionados (Adaptado de (Ansys 2020))

Propriedades	EN-AW-6063 T6	PA6 GF30	PA66 GF50	POM
Módulo de elasticidade [GPa]	71	6	12,2	3,1
Tensão limite elástico [MPa]	215	124	174	67
Resistência à compressão [MPa]	215	144	211	116
Tenacidade à fratura [MPa/m ²]	33	4,6	5,3	4
Preço [€/kg]	2,23	2,44	2,91	1,65

6 Next-Road 2.0: Validação dos novos componentes

O presente capítulo visa demonstrar as simulações de resistência realizadas aos componentes concebidos para a versão 2.0, constituídos pelo material selecionado no capítulo anterior.

6.1 Considerações iniciais

Uma vez concebido o Next-Road 2.0, é necessário validar o seu funcionamento. Uma vez que a cinemática, à partida, estará validada – dado o design e dimensões similares entre os componentes das versões 2.0 e 1.0 –, resta perceber se os componentes do novo produto, concebidos no material selecionado, suportarão as solicitações impostas.

As simulações foram realizadas, individualmente, aos componentes que são solicitados, no SolidWorks® Simulation.

Previamente à apresentação das simulações e respetivos resultados, faz sentido realçar algumas considerações:

- Foram realizadas simulações a seis zonas solicitadas, aquando da atuação do produto;
- Dado o resultado da seleção de materiais, as simulações, para cada componente, consideraram dois materiais distintos: PA6 GF30 e PA66 GF50;
- Como foi referido em 2.5.2, o critério de falha utilizado no *software* foi o de Von Mises. Assim, para cada simulação, gerou-se a tensão equivalente de Von Mises (σ_{eq}) na face solicitada do componente em questão, comparando-se este valor com a tensão limite elástico do material constituinte desse componente.
- O valor dos deslocamentos, em mm, que cada componente sofre quando solicitado foi, igualmente, um dado retirado.

Posto isto, serão explicitadas algumas observações acerca dos materiais que constituem os componentes testados.

6.2 Materiais testados

Como se referiu, os materiais utilizados nas simulações de resistência foram o PA6 GF30 e o PA66 GF50, por forma a que se obtenha um termo de comparação entre dois dos materiais disponíveis para a injeção dos componentes.

Os materiais referidos não se encontravam na base de dados do *software*. Assim, foi necessária a sua introdução no SolidWorks®, registando as suas propriedades mecânicas necessárias às simulações.

a) PA6 GF30

Dada a ausência de uma ficha técnica, resultante do contacto com a indústria, aquando do princípio da realização das simulações, que contemplasse as principais propriedades deste material, foram utilizados os valores contemplados no EduPack para a inserção do PA6 GF30 no SolidWorks®. A Tabela 22 exhibe essas mesmas propriedades.

Tabela 22 - Propriedades do PA6 GF30, introduzidas no *software* de simulação (Adaptado de (Ansys 2020))

PA6 GF30	
Módulo de elasticidade [GPa]	6
Coefficiente de Poisson	0,35
Massa volúmica [Kg/m ³]	1 350
Resistência à tração [MPa]	170
Tensão limite elástico [MPa]	125

b) PA66 GF50

De forma a dispor de dois resultados possíveis para cada simulação, optou-se por utilizar, de igual modo, o PA66 GF50. Os dados relativos às suas propriedades, para inserção no SolidWorks®, têm por base uma ficha técnica fornecida por uma empresa especializada na área da injeção de plásticos (pode ser consultada no Anexo D). A Tabela 23 mostra os dados relativos a este material.

Tabela 23 - Propriedades do PA66 GF50, introduzidas no *software* de simulação

PA66 GF50	
Módulo de elasticidade [GPa]	15
Coefficiente de Poisson	0,34
Massa volúmica [Kg/m ³]	1 560
Resistência à tração [MPa]	195
Tensão limite elástico [MPa]	175

O módulo de elasticidade assumido está referido como “*Tensile modulus*” na ficha técnica. A resistência à tração é referida como “*Tensile strenght at break*”. A inclusão desta propriedade, bem como a ausência da propriedade “*Yield strenght*” (Tensão limite elástico) nesse documento leva a crer que, dada a elevada percentagem de fibra do material em questão, este não passará por um regime plástico, quando solicitado. Assim, a sua deformação ocorrerá no regime elástico até tensões na ordem dos 195 MPa, ocorrendo a sua rotura para valores superiores a este. No entanto, foi adotado o valor contemplado no EduPack para a tensão limite elástico de 175 MPa, por forma a trabalhar com um fator de segurança. O valor relativo ao coeficiente de Poisson foi, igualmente, retirado do EduPack 2020.

Posto isto, serão apresentados os pressupostos assumidos em relação ao critério de falha utilizado para as simulações realizadas.

6.3 Critério de falha de Von Mises: pressupostos assumidos

O critério de Von Mises é o utilizado no SolidWorks®, para a determinação da falha dos materiais. Este é um critério que só deve ser aplicado a materiais dúcteis isotrópicos, como os metais, por exemplo.

Como foi referido em 2.3.3, a maioria dos polímeros reforçados com fibra são anisotrópicos, ou seja, o valor das suas propriedades será diferente quando medidas em direções diferentes. No entanto, após consulta da opinião de um docente especializado na área dos materiais compósitos, assumiu-se que os materiais utilizados se comportavam como isotrópicos, uma vez que:

- Nas fichas técnicas dos materiais disponibilizadas pela indústria, não foram facultados dados acerca dos valores dos módulos e resistências nos diferentes eixos, tendo sido apenas apresentados valores gerais para essas mesmas propriedades;
- Não foi realizada nenhuma simulação de enchimento da cavidade do molde para os componentes em questão, por forma a perceber como se iriam dispor as fibras na matriz polimérica. No entanto, assumiu-se que, tal como na maioria dos casos, as fibras se dispusessem aleatoriamente, aproximando o material de um com propriedades isotrópicas.

Assim sendo, é necessário expor quais os componentes do produto Next-Road 2.0 que foram testados, e quais as cargas envolventes em cada um deles.

6.4 Solicitação dos componentes

O produto Next-Road, sendo um sistema que contacta diretamente com um veículo, será um produto que deverá resistir a cargas elevadas.

Nesta secção, será exposta a proveniência das forças a que cada componente testado terá de resistir, de forma a que seja garantido o bom desempenho do produto. É importante referir que:

- O dimensionamento dos componentes deverá ser realizado com vista a suportar a carga de um veículo pesado de mercadorias, que apresenta uma carga equivalente de dez toneladas por eixo;
- Todas as cargas aplicadas diretamente nos componentes testados serão multiplicadas por um fator de segurança (FS) de 1,5, por forma a garantir um dimensionamento seguro.

Desta forma, os testes de falha foram realizados em seis zonas do sistema Next-Road 2.0, sendo apresentados, em seguida, o valor da carga que estas devem suportar.

6.4.1 Face superior dos guias verticais

Funcionando como batente de fim do curso da tampa, as faces superiores dos guias verticais (FSGV), expostos no Capítulo 4, são zonas que poderão ser solicitadas a cargas elevadas. O produto Next-Road é atuado, somente, por uma roda de veículo de cada vez. Assim, a carga incidente no C_T , considerando um veículo com dez toneladas (10000 kg) por eixo será dada por:

$$\text{Carga incidente no } C_T [N] = \frac{10\,000 [kg]}{2 \text{ rodas}} * 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \simeq 50\,000 N \quad (3)$$

Durante o movimento descendente deste conjunto, a força das já referidas molas verticais opõe-se a esse movimento, sendo dada por:

$$\text{Força}_{\text{molas verticais}} [N] = K_{\text{molas}} \left[\frac{N}{m} \right] * \text{deslocamento } C_T [m] = 6\,500 N \quad (4)$$

onde:

- K_{molas} = constante elástica equivalente das seis molas verticais;
- deslocamento C_T = deslocamento máximo vertical do C_T .

Uma vez terminado o curso de descida do C_T , os seis batentes de fim de curso transmitem a carga às seis FSGV, como expõe a Figura 64.

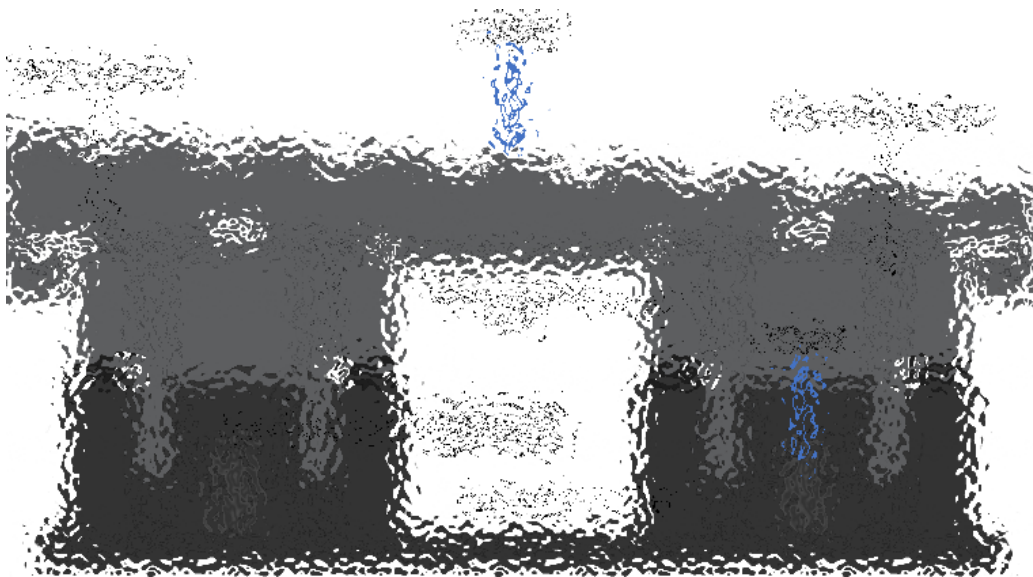


Figura 64 - Transmissão da carga à face superior dos guias verticais

Deste modo, a solicitação máxima que o topo de um guia vertical poderá estar sujeito será dada por:

$$\text{Solicitação máx}_{FSGV} [N] = \frac{\text{Carga } C_T - \text{Força}_{\text{molas verticais}}}{\text{n}^{\circ} \text{ de guias verticais}} * FS \simeq 10\,875\,N \quad (5)$$

6.4.2 Restantes elementos

Nesta secção serão expostos os elementos responsáveis pelos mecanismos do C_{MI} que são solicitados. A proveniência da carga a que os topos dos guias verticais estão sujeitos foi abordada, de forma a contextualizar o leitor com a carga máxima que pode ser aplicada no produto Next-Road.

No entanto, uma vez que o principal objetivo da presente dissertação não é o estudo da cinemática do sistema, serão apenas referidos os valores das cargas a que cada componente do C_{MI} é sujeito, fornecidos pela empresa, afetados de um $FS=1,5$. Estes valores, referentes à versão 1.0, assumem-se como os mesmos para o produto 2.0, uma vez que as dimensões e design dos componentes não foram praticamente alterados, não afetando a referida cinemática.

A apresentação dos componentes solicitados seguirá uma lógica sequencial, de acordo com o funcionamento do produto.

1. Cantoneira

A cantoneira é um dos componentes solicitados no produto Next-Road. As bielas, quando acionadas, transmitem a força por elas conduzida aos parafusos que garantem o seu acoplamento à cantoneira. Por sua vez, estes parafusos distribuem igualmente a carga por cada um dos quatro furos onde assentam. Estes, podem ser visualizados na Figura 65.

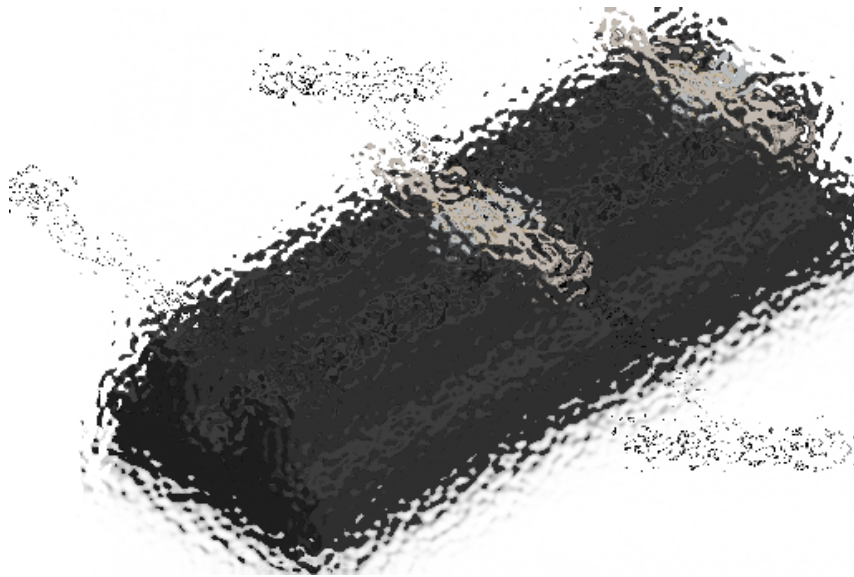


Figura 65 - Acoplamento cantoneira x bielas, visto em corte

Assim, a solicitação a que as cantoneiras estarão sujeitas poderá ser avaliada em função da solicitação em cada furo referido. O valor fornecido pela empresa foi de 325 N. A representação desta carga é exposta na Figura 66.

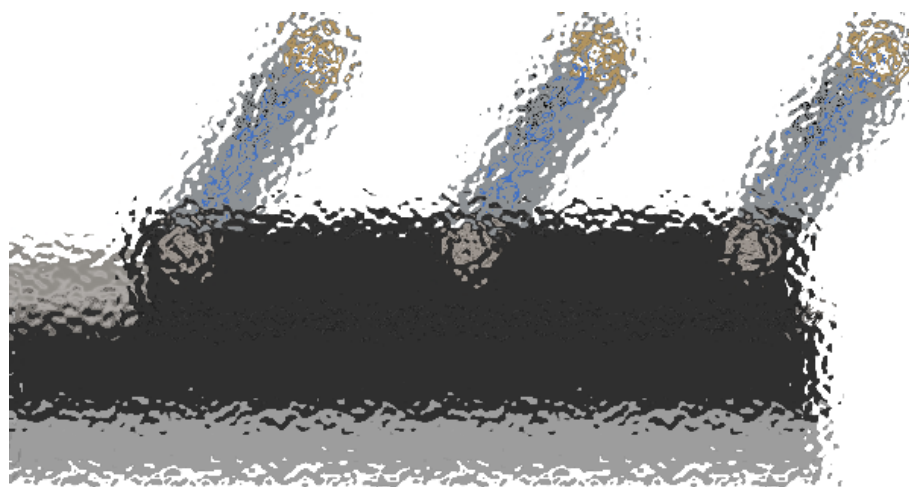


Figura 66 - Solicitação sobre a cantoneira 2.0

2. Alojamento para as molas horizontais

Iniciado o deslocamento horizontal do patim, imposto pelo movimento das bielas, as molas horizontais são comprimidas, originando uma carga incidente na parede dos seus alojamentos. O seu valor, como exposto na Figura 67, é igual a 3750 N.

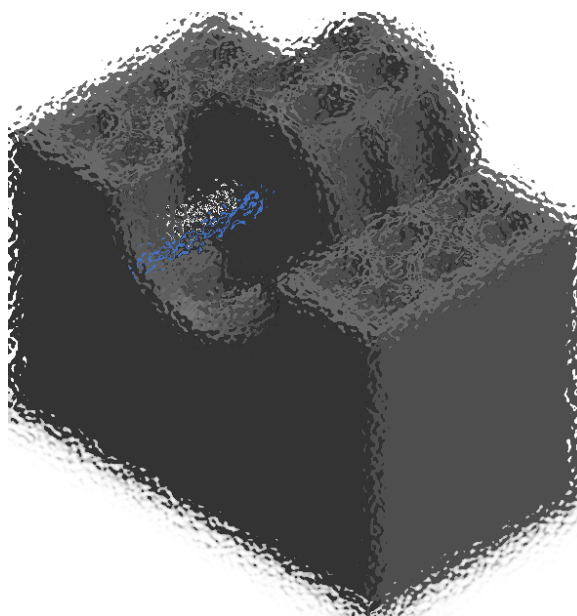


Figura 67 - Solicitação sobre o alojamento para as molas horizontais

3. Parte superior do Patim 2.0

Como já foi referido, aquando do início do movimento horizontal do patim, uma força no sentido contrário a esse movimento é exercida, pelas cremalheiras. Por sua vez, essa força é transmitida aos quatro parafusos M8 existentes, que têm a função de fixá-las ao Patim 2.0.

Desta forma, os quatro parafusos distribuem igualmente a carga pelos oito furos existentes naquela zona: quatro pertencentes à parte superior (de possível visualização na Figura 39), sendo os outros quatro pertencentes à chapa de fixação das molas (Figura 48).

A Figura 68 clarifica o texto descrito.

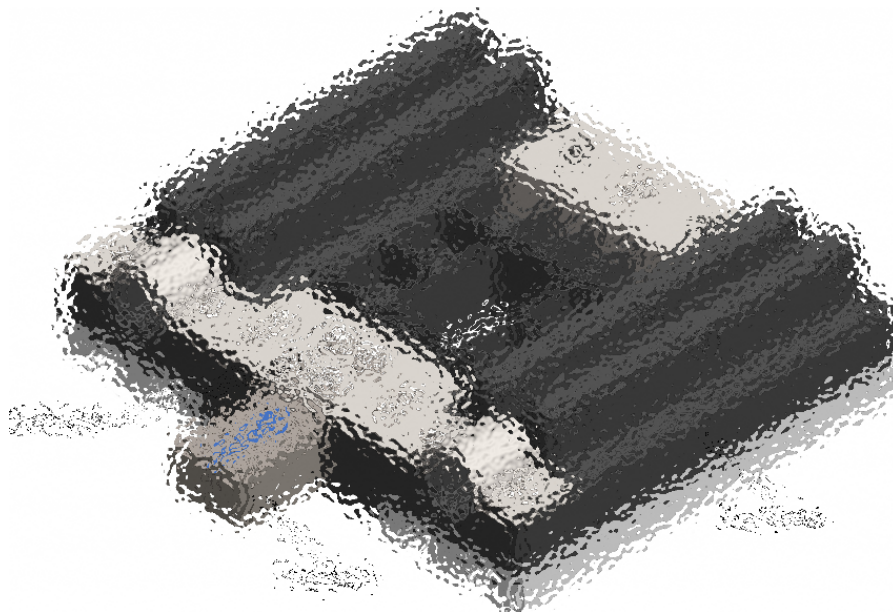


Figura 68 - Patim 2.0

Assim, cada furo referido terá de resistir a uma carga de 950 N, no sentido contrário ao movimento do patim.

4. Guias verticais adjacentes aos carris

Quando o C_T deixa de estar atuado, o patim retorna à sua posição inicial, causando um elevado impacto nos batentes de borracha e faces laterais dos guias verticais adjacentes aos carris. A força exercida em cada guia é igual ao valor da carga incidente nos alojamentos das molas horizontais, 3750 N.

Deste modo, é apresentado, na Tabela 24, um resumo dos componentes solicitados e a respetiva carga a que estarão sujeitos.

Tabela 24 - Carga exercida em cada componente solicitado

Solicitação [N]	
Guias verticais -Topo	10 875
Furos - Cantoneira	325
Alojamento das molas	3 750
Furos - Patim	950
Furos - Chapa	950
Guias verticais - Lateral	3 750

Posto isto, o enfoque da próxima secção será a análise sobre simulações realizadas aos componentes referidos.

6.5 Testes à resistência dos componentes (simulações)

As simulações revelam uma extrema utilidade, no que diz respeito à validação da seleção de materiais realizada. Através deles, é possível aferir a validade/invalidade de certos processos, materiais ou identificar componentes críticos.

Tendo em atenção as considerações iniciais já enunciadas em 6.1 e 6.3, bem como as funcionalidades do SolidWorks® Simulation, explicitadas na secção 2.5, apresentar-se-ão as simulações realizadas para prever o comportamento dos componentes do Next-Road 2.0 em contexto real. Refere-se, ainda, que para cada componente, foram realizadas simulações para três tamanhos de malha distintos, todos eles considerados “malha fina” pelo *software*.

É importante realçar que os processos de desenho de componentes, seleção de materiais e de simulação foram realizados em conjunto, de forma iterativa. Assim, verificaram-se casos em que um elemento em específico não resistiu à carga imposta. Desta forma, esse componente foi redesenhado, encontrando-se estratégias de reforço eficazes, nunca desobedecendo as regras impostas pelo processo de injeção.

Refere-se ainda que o novo C_T, sendo constituído por um bloco de alumínio similar à tampa presente na versão 1.0 (testada com sucesso em ambiente real), não foi testado com recurso ao SolidWorks®.

Todos os componentes injetados foram testados usando o PA6 GF30 e o PA66 GF50, ao passo que a chapa para fixação das molas será concebida em aço inoxidável. Assim, serão, em seguida, apresentados os resultados das simulações do comportamento dos componentes. Para isso, serão exibidos gráficos que os comparam. Além disso, será mostrada uma figura que exhibe o *layout* de simulação do *software*, para cada componente. Essa imagem será referente à tensão equivalente de Von Mises gerada no elemento em questão, para o caso do tamanho de malha mais pequeno. Será apresentado, no Anexo E, um exemplo de um relatório completo das simulações realizadas a um dos componentes.

Por forma a que seja possível comparar as tensões geradas em cada componente com as tensões limite elástico dos materiais que os constituem, são lembrados estes valores na Tabela 25.

Tabela 25 - Valores da tensão limite elástico dos materiais testados

Tensão limite elástico [MPa]	
PA6 GF30	125
PA66 GF50	175
AISI 304	207

Nas secções seguintes serão apenas apresentados os resultados obtidos, ao passo que as conclusões acerca destes serão expostas em 6.6.

6.5.1 Guias verticais - Topo

Responsáveis por absorver toda a carga transmitida pelo veículo, as faces superiores dos guias verticais são a zona mais solicitada do C_{MI} , estando, cada uma delas, sujeita a uma força de 10875 N. Assim, o guia vertical é um componente robusto, de grandes dimensões e reforçado com nervuras.

A Figura 69 exhibe a tensão equivalente na zona mencionada, com recurso às funcionalidades do SolidWorks® Simulation.

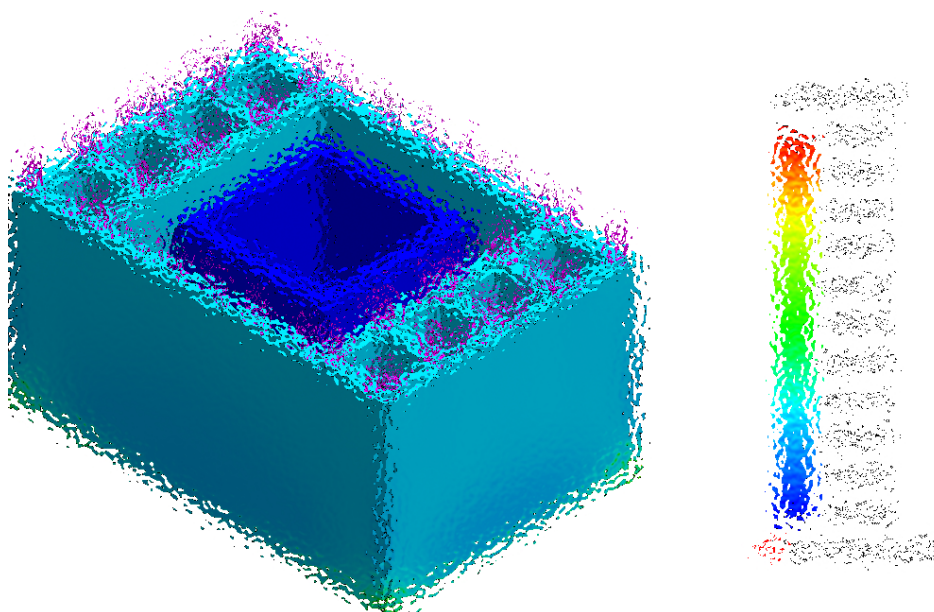


Figura 69 - Tensão máxima de Von Mises gerada no topo de um guia vertical, para um tamanho de malha de 1 mm

Neste caso, a tensão máxima é gerada nos quatro vértices da base do guia vertical.

Em seguida, apresentam-se os gráficos elaborados, que visam mostrar a tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) gerada neste componente, bem como o deslocamento máximo, em mm, que o mesmo sofre quando a carga em questão é aplicada (Figura 70 e Figura 71).

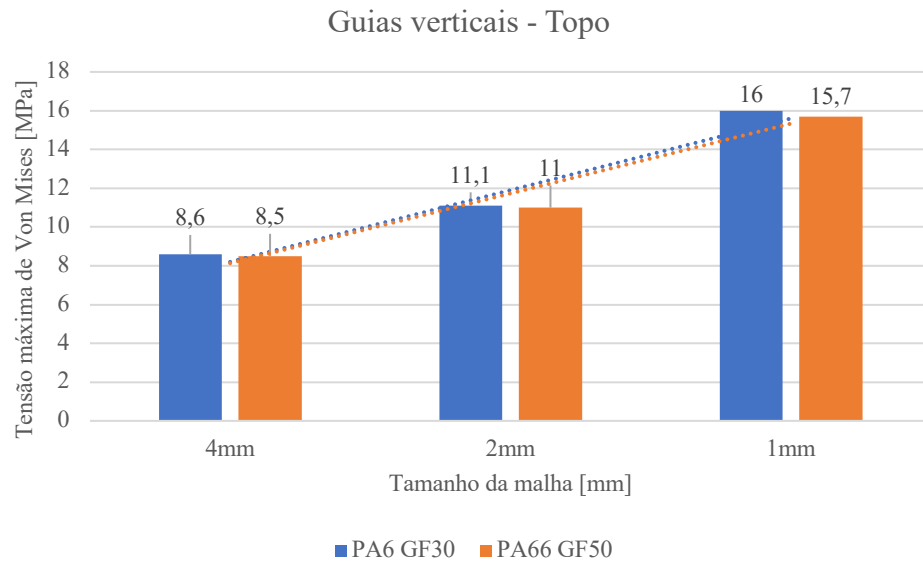


Figura 70 - Topo dos guias verticais: Tensão máxima x Tamanho da malha (PA6/PA66)

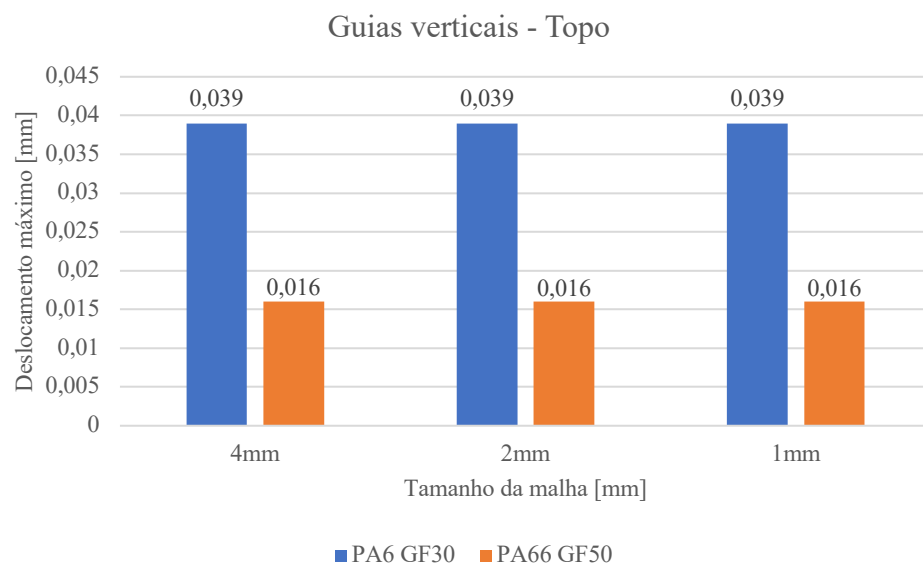


Figura 71 - Topo dos guias verticais: Deslocamento máximo x Tamanho da malha (PA6/PA66)

Pela análise aos gráficos apresentados, é possível retirar algumas conclusões:

- Para a mesma discretização, o valor da $\sigma_{\text{máx}}$ é igual para os dois materiais considerados, uma vez que a área onde a carga incide é igual nos dois casos. Assim, o material com o maior módulo de elasticidade (PA66 GF50), apresenta menor deslocamento e deformação;
- À medida que a malha é refinada, os resultados são mais precisos. Os valores relativos à $\sigma_{\text{máx}}$ vão aumentando, ao passo que os valores do deslocamento máximo são praticamente constantes, dado se apresentarem muito baixos.

O último ponto leva a que, daqui em diante, os gráficos *Deslocamento máximo x Tamanho da malha* contemplem apenas os valores relativos à malha mais fina.

6.5.2 Cantoneira

A Figura 72 mostra a simulação realizado para a cantoneira. Foi aplicada uma carga de 325 N em cada furo, influenciada pelo ângulo inicial formado entre as bielas e o plano horizontal. Na Figura 72, a carga é apenas representada num dos furos, por forma a que a sua compreensão seja mais clara.

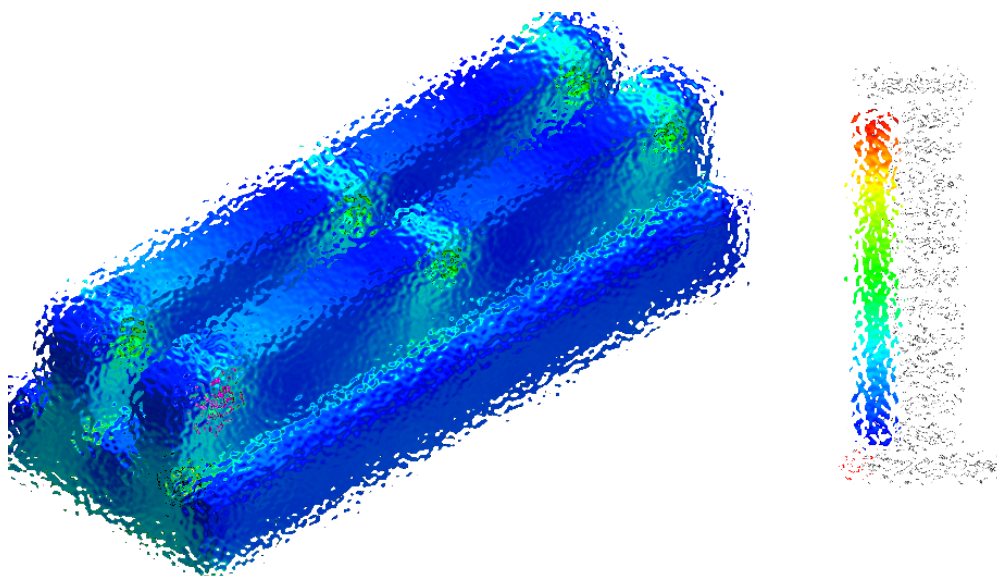


Figura 72 - Tensão máxima de Von Mises gerada na cantoneira, para um tamanho de malha de 0,75 mm

À semelhança do que se havia registado no caso anterior, a $\sigma_{\text{máx}}$ não se verificou nos locais de aplicação das forças. O local crítico encontra-se assinalado por um círculo preto na Figura 72.

Os gráficos *Tensão máxima x Tamanho da malha* e *Deslocamento máximo x Tamanho da malha* podem ser visualizados na Figura 73 e na Figura 74, respetivamente.

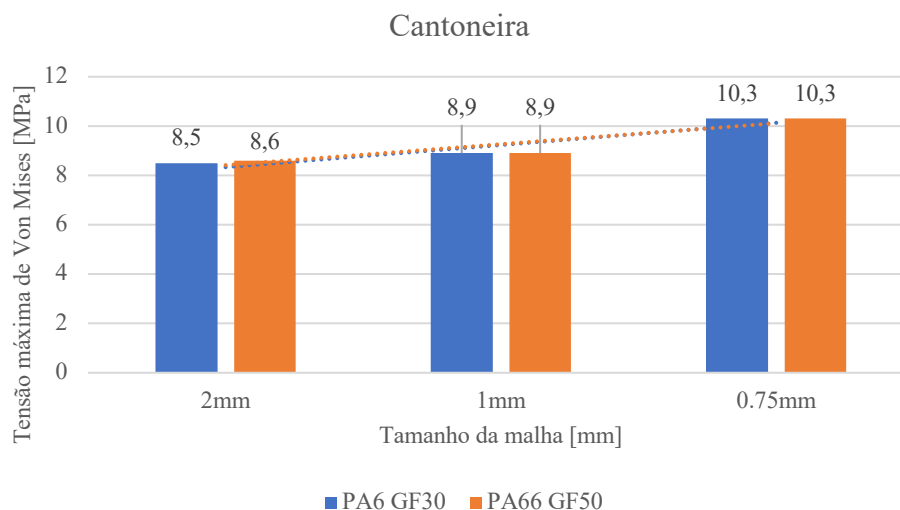


Figura 73 - Cantoneira: Tensão máxima x Tamanho da malha (PA6/PA66)

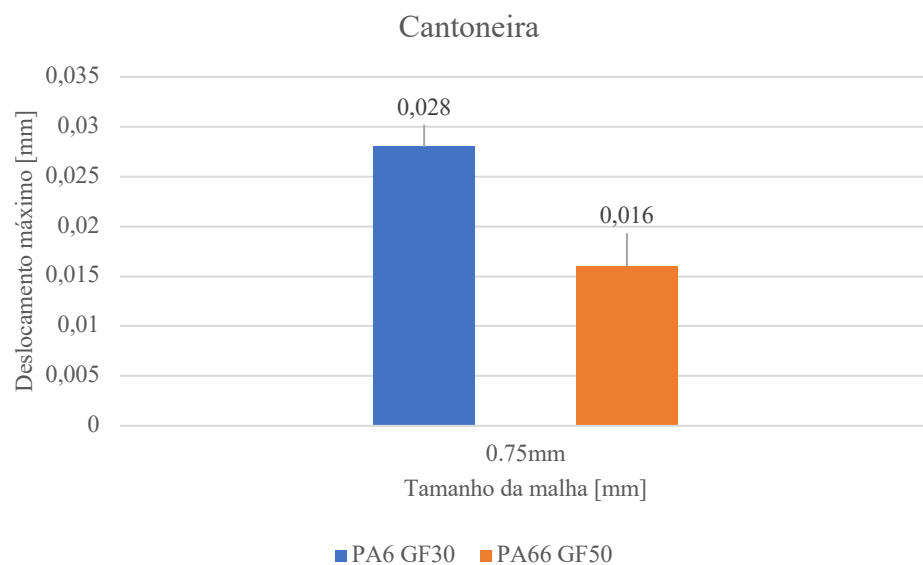


Figura 74 - Cantoneira: Deslocamento máximo x Tamanho da malha (PA6/PA66)

6.5.3 Alojamento para as molas horizontais

A Figura 75 exibe uma das simulações realizadas, por forma a entender o comportamento do alojamento para as molas horizontais, quando sujeito a uma solicitação de 3750 N.

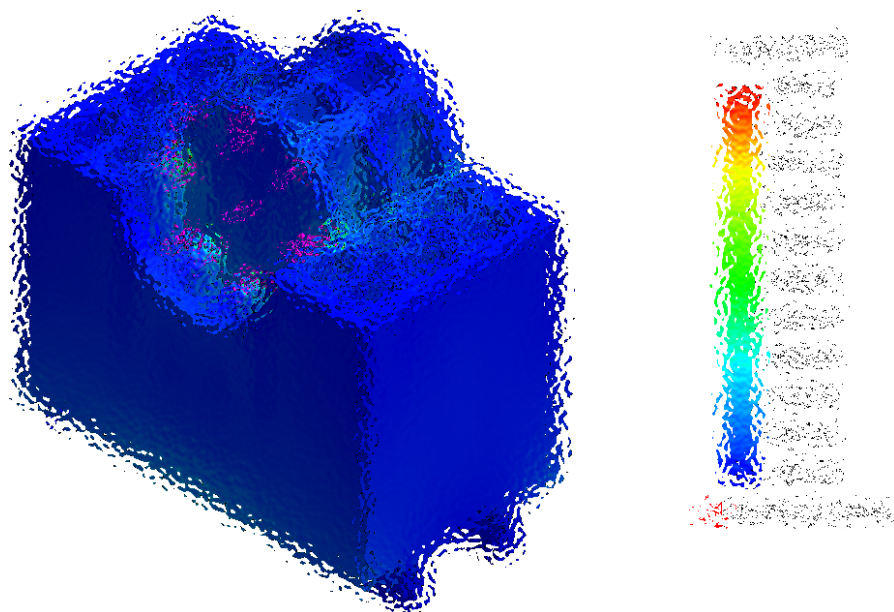


Figura 75 - Tensão máxima de Von Mises gerada no alojamento das molas, para um tamanho de malha de 0,75 mm

Neste componente, a $\sigma_{\text{máx}}$ é gerada nas extremidades das faces circulares.

Os gráficos *Tensão máxima x Tamanho da malha* e *Deslocamento máximo x Tamanho da malha* podem ser visualizados na Figura 76 e na Figura 77, respetivamente.

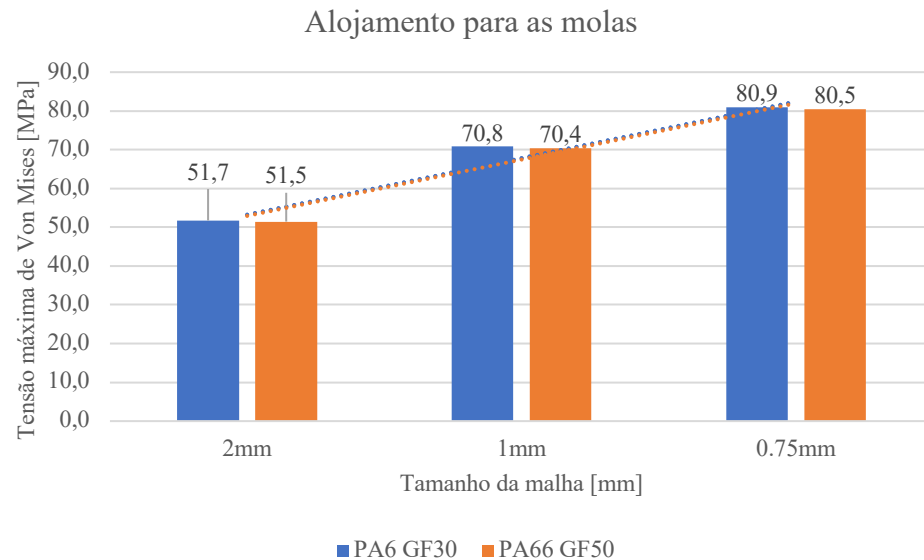


Figura 76 - Alojamento: Tensão máxima x Tamanho da malha (PA6/PA66)

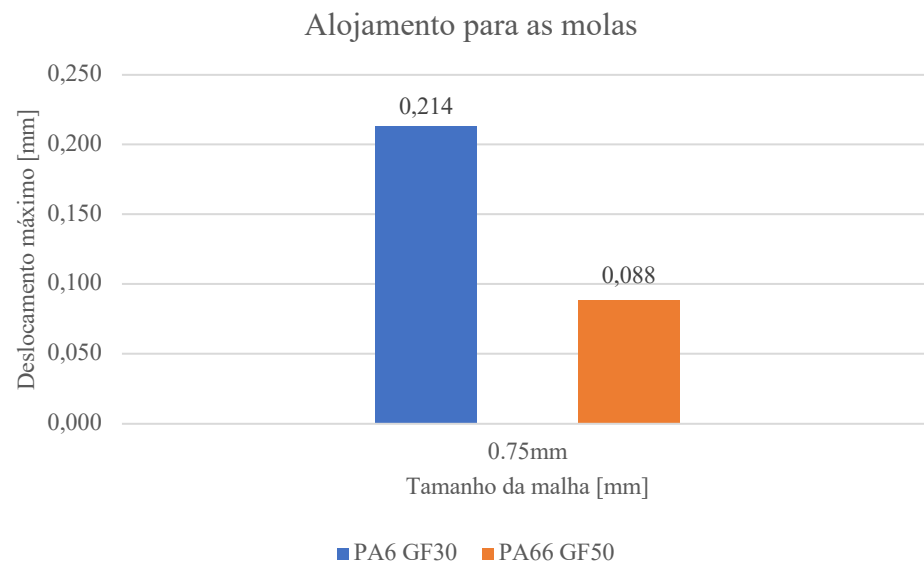


Figura 77 - Alojamento: Deslocamento máximo x Tamanho da malha (PA6/PA66)

6.5.4 Parte superior do Patim

Para a realização das simulações na parte superior do patim, aplicou-se uma carga de 950 N em cada um dos quatro furos presentes no alojamento para as cremalheiras. É ainda importante referir que as zonas laterais deste componente foram retiradas, uma vez que não interferiam com as tensões geradas nos furos, permitindo reduzir o tempo computacional requerido para o realizar das simulações. A Figura 78 e a Figura 79 exibem as tensões equivalentes de Von Mises.

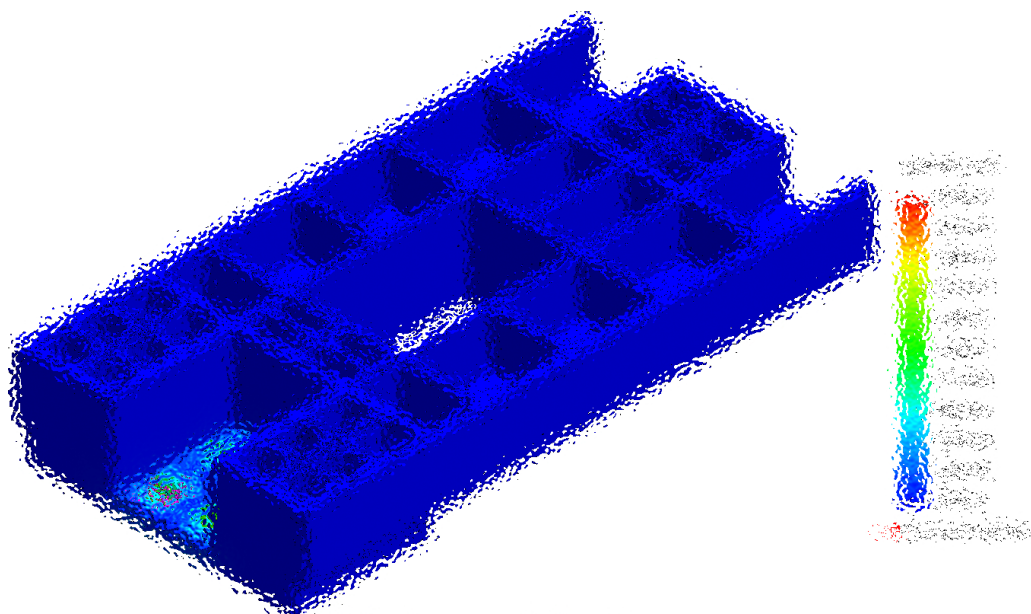


Figura 78 - Tensão máxima de Von Mises gerada na parte superior do Patim, para um tamanho de malha de 1 mm

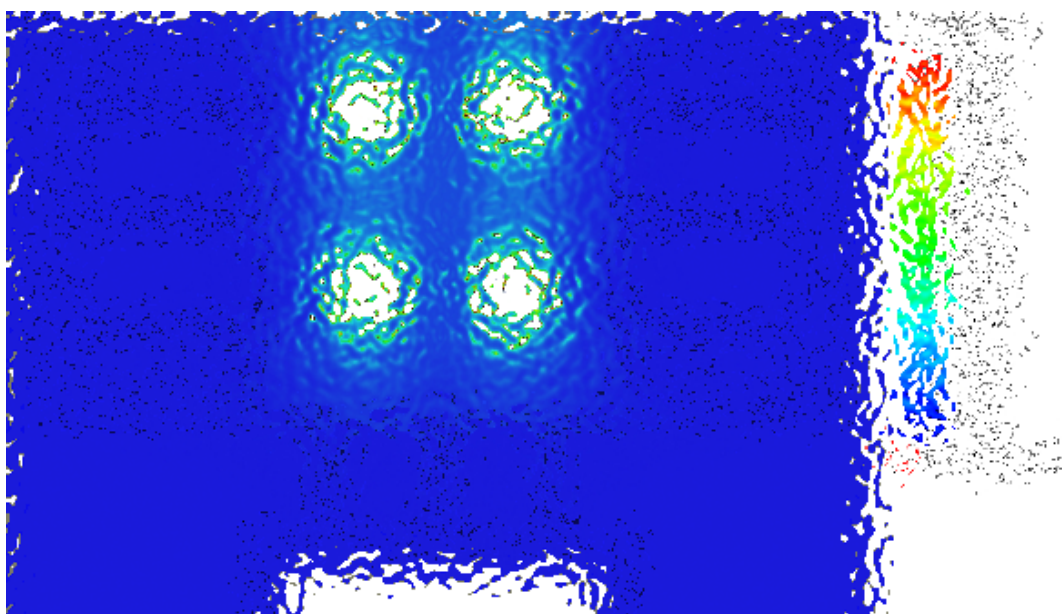


Figura 79 - Tensão máxima de Von Mises gerada na parte superior do Patim, para um tamanho de malha de 1 mm (vista de baixo)

Neste componente, a $\sigma_{\text{máx}}$ é gerada no ponto de aplicação da carga.

Os gráficos *Tensão máxima x Tamanho da malha* e *Deslocamento máximo x Tamanho da malha* podem ser visualizados na Figura 80 e na Figura 81, respetivamente.

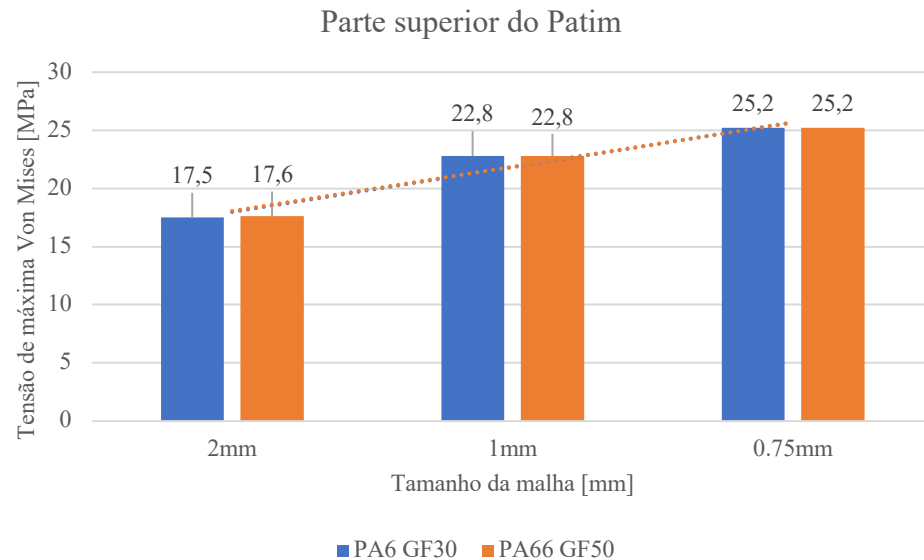


Figura 80 - Parte superior do Patim: Tensão máxima x Tamanho da malha (PA6/PA66)

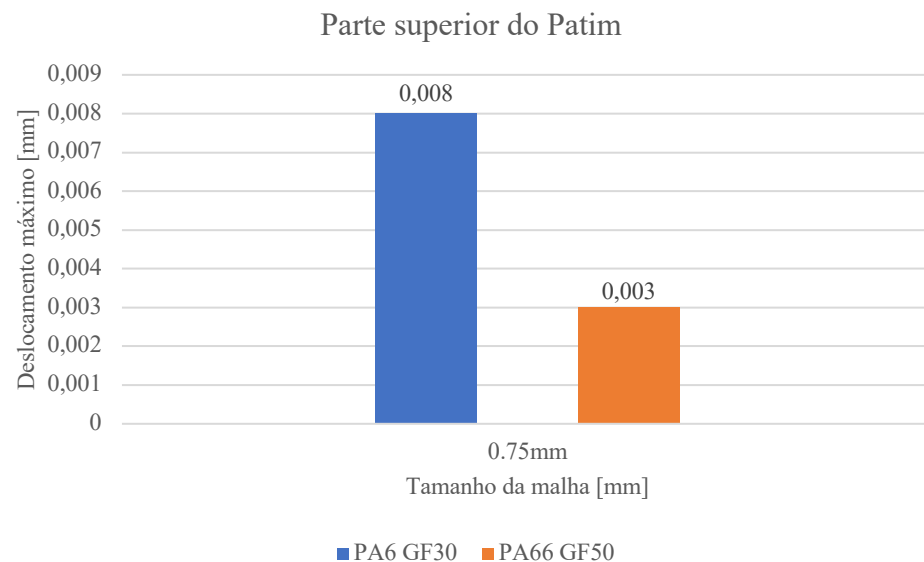


Figura 81 - Parte superior do Patim: Deslocamento máximo x Tamanho da malha (PA6/PA66)

6.5.5 Chapa de fixação das molas

A Figura 82 mostra o resultado da simulação à chapa de fixação, em que a solicitação em cada furo foi de 950 N.

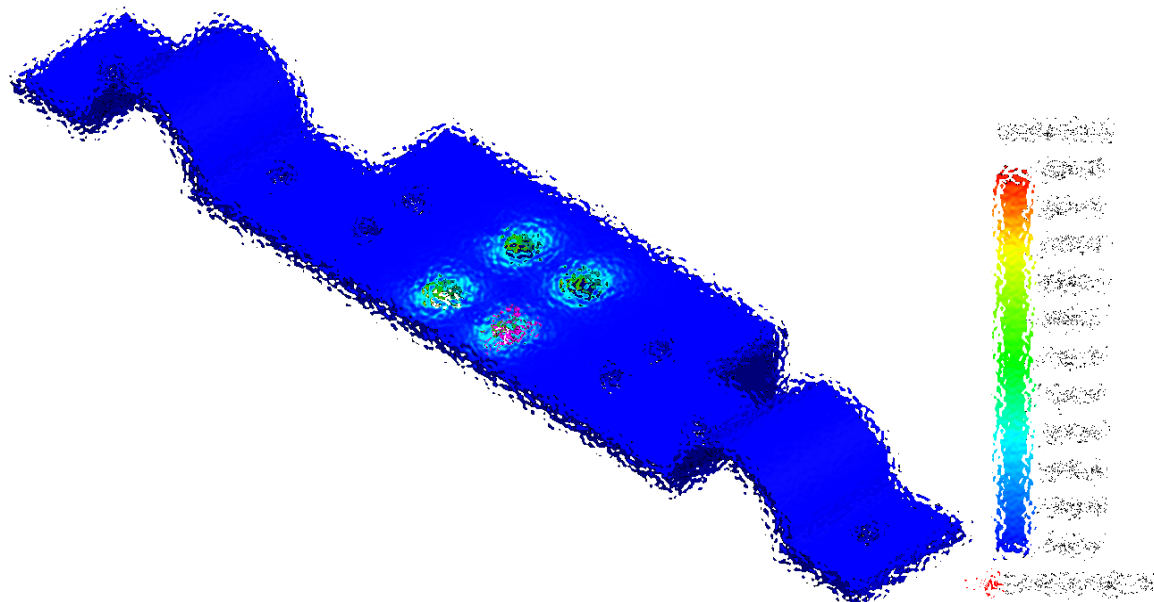


Figura 82 - Tensão máxima de Von Mises gerada na chapa de fixação, para um tamanho de malha de 0,75 mm

O gráfico gerado *Tensão máxima x Tamanho da malha* é exibido na Figura 83. Dado o elevado módulo de elasticidade apresentado pelo aço AISI 304 (190 GPa), o deslocamento máximo imposto pela $\sigma_{\text{máx}}$ é de menos de 1 μm , ordem de grandeza que se considera insignificante, pelo que se optou em não apresentar qualquer gráfico relativo a esse dado.

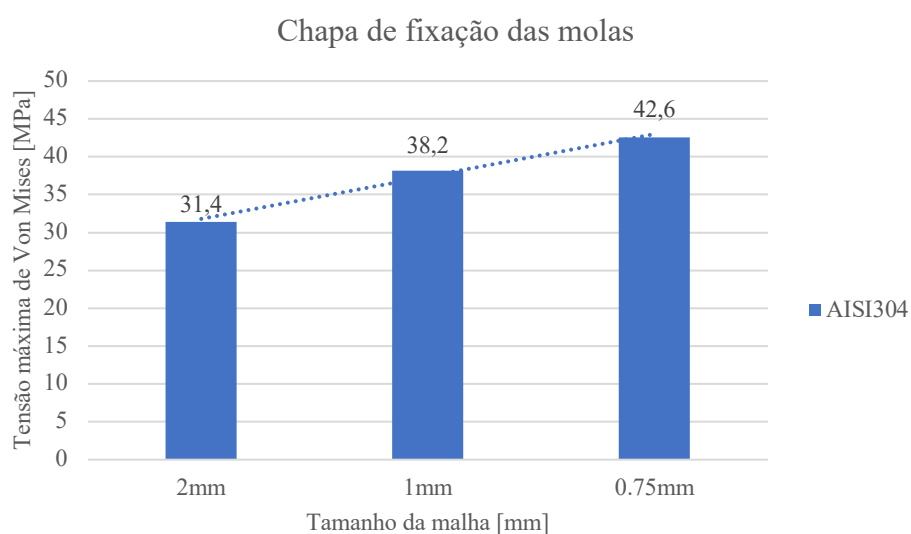


Figura 83 - Chapa de fixação das molas: Tensão máxima x Tamanho da malha

6.5.6 Guias verticais - Lateral

A Figura 84 demonstra uma das simulações realizadas, por forma a entender o comportamento dos guias verticais aquando do retorno do Patim à posição inicial, quando sujeito a uma solicitação de 3750 N. Na figura, a carga é representada apenas numa das faces, de maneira a que a sua compreensão seja mais clara.

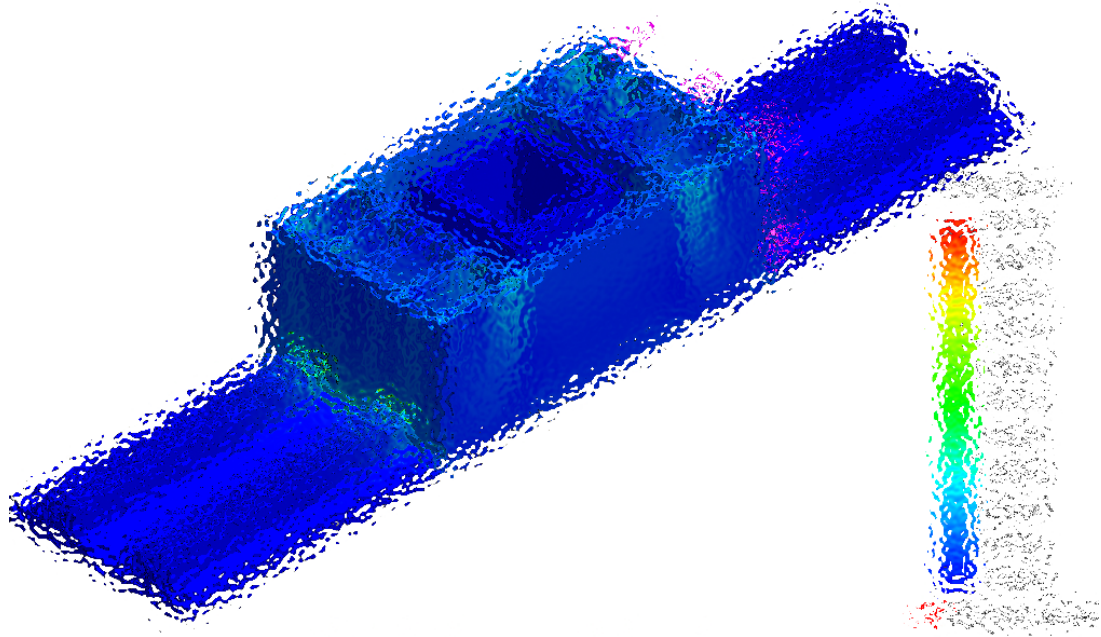


Figura 84 - Tensão máxima de Von Mises gerada na lateral do guia vertical, para um tamanho de malha de 1 mm

A zona onde a tensão é máxima é rodeada na Figura 84. Os gráficos *Tensão máxima x Tamanho da malha* e *Deslocamento máximo x Tamanho da malha* podem ser visualizados na Figura 85 e na Figura 86, respetivamente.

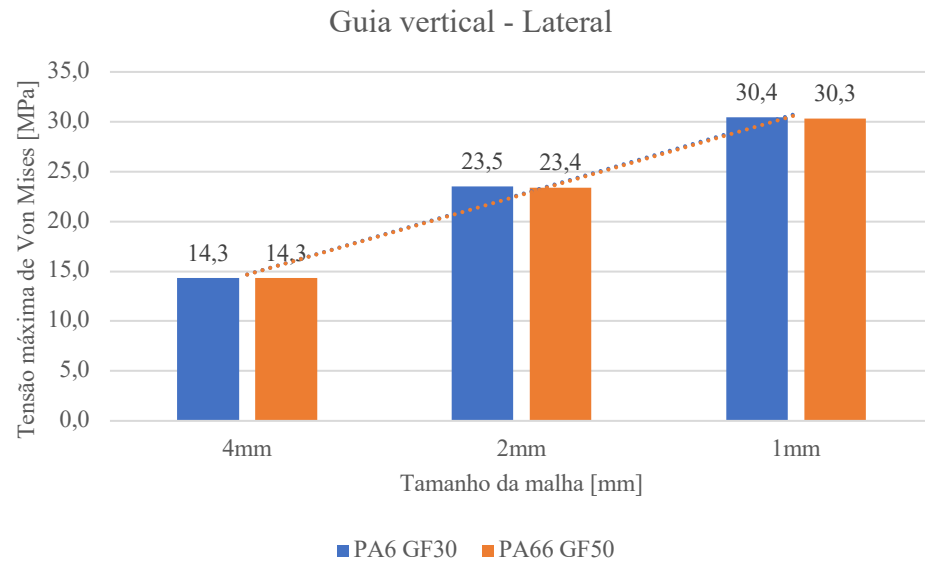


Figura 85 - Lateral dos guias verticais: Tensão máxima x Tamanho da malha (PA6/PA66)

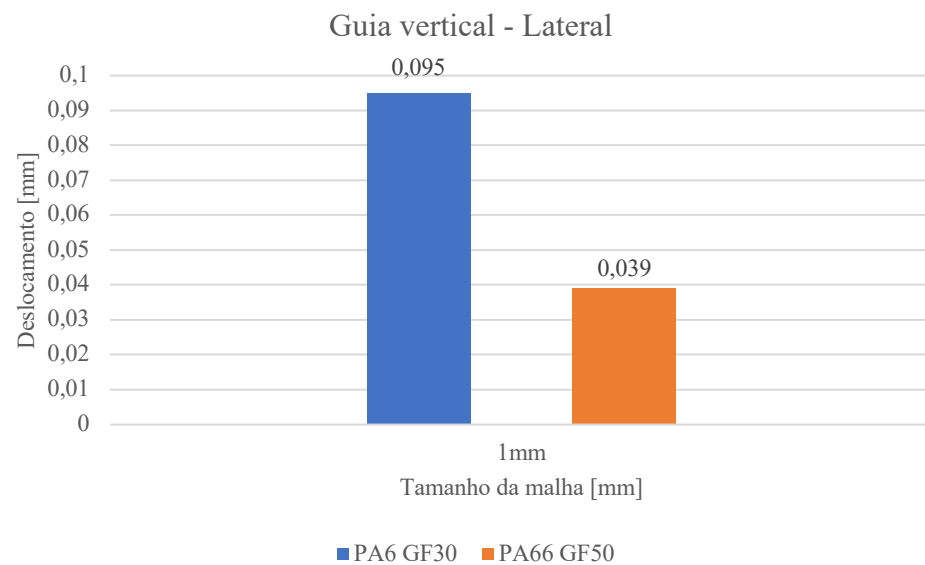


Figura 86 - Lateral dos guias verticais: Deslocamento máximo x Tamanho da malha (PA6/PA66)

Terminada a exposição dos resultados acerca das simulações do comportamento dos componentes constituídos pelos materiais seleccionados, a secção seguinte aborda as principais conclusões aferidas.

6.6 Simulações: conclusões

Para que as conclusões retiradas sejam de mais fácil interpretação, optou-se por elaborar a Tabela 26.

Tabela 26 - Valores de tensão e deslocamento máximos relativos a cada componente (malha mais fina)

Componente	$\sigma_{\text{máx}}$	Deslocamento [mm]	
		PA6 GF30	PA66 GF50
Guias verticais -Topo	16	0,039	0,016
Cantoneira	10	0,028	0,016
Alojamento das molas	81	0,214	0,088
Furos - Patim	25	0,008	0,003
Guias verticais - Lateral	30	0,095	0,039

Analisando os gráficos e figuras expostas em 6.5, e a Tabela 26, é possível retirar algumas conclusões:

- Nenhum componente cede quando solicitado, uma vez que as tensões máximas são, em todos os casos estudados, menores que as tensões limite elástico dos materiais utilizados;
- Naturalmente, os valores dos deslocamentos gerados nos componentes, e, consequentemente, as deformações a que eles estão sujeitos, são menores quando os componentes são concebidos no material PA66 GF50. Assim, este material pode aumentar a vida útil das peças, em relação ao PA6 GF30;
- O componente “Alojamento para as molas” apresenta valores de deslocamento muito superiores aos restantes (assinalados a vermelho na Tabela 26). O objetivo deste estudo foi apenas aferir se os elementos concebidos suportavam as solicitações impostas, não tendo sido realizado um estudo à fadiga dos componentes. No entanto, dada a deformação elástica que o alojamento sofre em comparação com os restantes, seria interessante realizar-se esse estudo, como trabalho futuro, por forma a calcular a vida útil deste componente. No Capítulo 8 aprofundar-se-á este ponto, identificando possíveis soluções, caso a vida útil deste componente seja reduzida;
- É possível reparar que, em quatro elementos testados, existem zonas de cargas concentradas que maioritariamente coincidem com zonas de esquinas vivas. Uma das éticas que se deve cumprir no desenho para componentes injetados é, precisamente, evitar essas esquinas, substituindo-as por cantos arredondados (*fillets*) ou chanfros, de modo a evitar zonas de tensão concentrada que levem à ocorrência de fissuras ou até mesmo à falha do material. Assim, é de prever que, suavizando as esquinas vivas dos componentes, essas cargas concentradas sejam, igualmente, suavizadas, conferindo uma vida útil superior às peças.

É importante assinalar que a ética referida era conhecida de antemão por parte da equipa que projetou os componentes. No entanto, com o objetivo de perceber quais seriam os valores mais apropriados para conceber os raios de curvatura, os componentes foram enviados para a indústria sem que estes fossem realizados.

Deste modo, dá-se por terminada uma das fases importantes da dissertação: a seleção de materiais e validação de componentes. No entanto, para que a seleção faça sentido do ponto de vista industrial, será necessário realizar uma análise de custos ao Next-Road 2.0, comparando-a com a realizada para a versão 1.0. A comparação económica entre os dois produtos é apresentada no capítulo seguinte.

7 Comparação entre as versões pré-industrial e industrial

Este capítulo tem como principal objetivo expor a comparação realizada entre os custos associados à produção das versões 1.0 (concebida por José Neves) e 2.0 do produto da Pavnext. Só assim será possível aferir se a seleção de materiais, acompanhada do processo de moldação por injeção, se revelou uma vantagem económica.

Antes da análise propriamente dita, e para que esta seja exposta de forma clara, há que ter em consideração alguns pontos:

- A comparação realizada será entre o Next-Road 2.0 e o S_G da versão 1.0. No entanto, considerar-se-á, igualmente, a versão 1.5 do produto. Esta versão foi desenvolvida pelo CEO da empresa, de forma paralela ao desenvolvimento do Next-Road 2.0, sendo exatamente igual à 1.0. No entanto, a procura por fornecedores que oferecessem preços mais vantajosos para os mesmos processos, materiais e componentes, torna o Next-Road 1.5 numa otimização económica em relação à versão 1.0.
- Uma vez que só o C_T e o C_{MI} foram repensados, assume-me, para este exercício, que os custos de produção do novo C_C serão iguais aos deste conjunto na versão 1.0;
- O custo dos componentes injetados com funções de resistência a cargas foi calculado considerando a sua produção em PA66 GF50;
- Os custos da matéria prima (C_{MP}) utilizada para a produção dos componentes do Next-Road 2.0 foram fornecidos pela indústria contactada, estando expostos na Tabela 27;

Tabela 27 - Valores da massa volúmica e custo dos materiais que constituem a versão 2.0

Material	Massa volúmica [kg/m ³]	Custo [€/kg]
AISI 304	7955	2,90
EN-AW-6063 T6	2700	3,10
Neoprene	1270	6,00
PA66 GF50	1560	3,55
POM	1400	2,55

- A cotação dos componentes foi, igualmente, fornecida pela indústria. Para aqueles em que não se obteve resposta, o seu custo foi calculado tal como se apresenta na equação (6). O cálculo foi afetado por um fator de conversão (F_C), que visa simular todos os custos adicionais para além do da matéria prima: acabamento, transporte, embalamento, etc.;

$$Custo [u. m.] = Volume [m^3] * Massa volúmica \left[\frac{kg}{m^3} \right] * C_{MP} \left[\frac{u. m.}{kg} \right] * F_C \quad (6)$$

- Os custos dos moldes de injeção para a produção dos componentes projetados foram obtidos através do contacto com várias empresas, tendo sido escolhidos aqueles que representam o menor investimento para a Pavnext;

À semelhança do sucedido na primeira análise de custos realizada, por motivos de confidencialidade, os valores monetários estão afetados de uma multiplicação por uma constante.

7.1 Custos de produção das três variantes

Como se pode comprovar pelos valores da Tabela 28, o produto Next-Road 2.0 é o que apresenta menor custo de produção das três versões disponíveis, podendo-se assim aferir que o objetivo principal da dissertação foi cumprido com sucesso.

Apesar de, durante o presente documento, terem sido explicitadas as estratégias que levaram a tal redução, é necessário comprovar de que forma essas estratégias se reproduzem no custo do produto da Pavnext, com valores concretos. Convém referir que os valores apresentados na Tabela 28 não estão afetados do custo das matrizes/moldes necessários à produção dos produtos. Assim, é necessário aferir se a diferença apresentada entre o custo de produção da versão 2.0 e as versões 1.0 e 1.5, compensa o elevado investimento realizado em moldes para injeção de componentes.

Tabela 28 - Custo de produção unitário de cada um dos produtos

Next-Road	Custo de produção [u.m.]
1.0	385
1.5	249
2.0	229

Desta forma, inicia-se a análise de custos ao Next-Road 2.0. Primeiramente, procurar-se-á explicar de que forma as estratégias adotadas (desenho de componentes para injeção, seleção de materiais mais leves, etc...) contribuíram para a redução do custo de produção do produto da Pavnext.

7.1.1 Implementação de novos processos e seleção de materiais

Como foi sendo referido, o fator de principal encarecimento do Next-Road 1.0 eram os processos de pós-processamento. Assim, idealizou-se a produção de uma nova versão, em que a grande maioria dos componentes são produzidos com recurso à moldação por injeção.

Por forma a entender a preponderância deste processo, bem como da substituição de materiais, apresenta-se a Tabela 29, que reflete os custos de dois componentes injetados no produto 2.0, comparando-os com os respetivos componentes na versão 1.0. É importante referir que os custos apresentados não se encontram afetados pelos valores das matrizes/moldes.

Tabela 29 - Comparação económica entre dois componentes das versões 1.0 e 2.0

Componente	Next-Road 1.0		Next-Road 2.0		Redução do custo [%]
	Elementos	Custo total [u.m.]	Elementos	Custo total [u.m.]	
Placa Base	11	59	1	10	82%
Patim	15	31	37	9	72%

A interpretação da Tabela 29 corrobora o que já havia sido explicado no Capítulo 4:

- O processo de injeção permitiu a junção dos onze elementos que acoplavam na Placa Base 1.0 num só, formando a Placa Base 2.0, o que se traduz numa vantagem no tempo de montagem do novo produto;
- A produção híbrida do Patim 2.0 levou à adição de elementos de ligação, o que se revela uma desvantagem no que à montagem do novo produto diz respeito.

Não obstante, a produção da Placa Base 2.0 e do Patim 2.0 revela reduções na ordem dos 82% e 72%, respetivamente, em relação aos componentes da versão 1.0. Além da eliminação dos processos de maquinagem de pós-processamento – identificados no Capítulo 4 –, esta redução abrupta no custo dos componentes em questão está inteiramente relacionada com a seleção de materiais.

Com o auxílio da equação (6) é possível perceber o porquê. Um dos fatores limitantes da seleção realizada foi o preço por quilograma da matéria prima, tendo este que ser similar ao do alumínio. Uma vez que o volume dos novos componentes é ligeiramente inferior aos respetivos na versão 1.0, e os materiais selecionados para a sua constituição – PA66 GF50 e POM – são menos densos que as ligas de alumínio, o custo unitário de cada componente será já, à partida, menor. Adicionando os custos de pós-processamento aos componentes da versão 1.0, a diferença torna-se ainda mais notória.

7.1.2 Quantidade de componentes

Não sendo um dos métodos identificados para a otimização económica do produto da Pavnext no princípio da dissertação, a redução da quantidade de componentes, de possível visualização na Tabela 30, não deixou de contribuir para tal.

Tabela 30 - Número de elementos das três versões do produto Next-Road

	Nº Componentes	
	versão 1.0/1.5	versão 2.0
New	113	140
Standard	371	232
Total	484	372

O referido decréscimo é justificado pela possibilidade de aglomerar vários elementos num só, que o processo de moldação por injeção apresenta, reduzindo a necessidade de elementos de ligação. Esta redução, além de significar uma otimização relacionada com o tempo de montagem do produto Next-Road, permitiu reduzir o seu custo de produção em 25 u.m. (custo associado a elementos standardizados de grande porte na versão 1.0, que foram substituídos por elementos embutidos na tampa injetada).

7.2 Investimento em moldes e produção em série

Os valores relativos aos custos de produção das três versões do produto Next-Road foram, até agora, apresentados sem a afetação das matrizes/moldes necessários para a produção dos componentes.

Nesta secção serão comparados o investimento em matrizes de extrusão necessário à produção das versões 1.0 e 1.5, com aquele em matrizes de extrusão e moldes de injeção indispensável à produção do Next-Road 2.0.

Assim, a Tabela 31 compara esse investimento. É importante referir que o custo das matrizes de extrusão é exatamente o mesmo para as versões 1.0 e 1.5.

Tabela 31 - Comparação entre o investimento em matrizes necessárias à produção dos componentes dos produtos Next-Road

Conjunto	Investimento em matrizes [u.m.]	
	versão 1.0/1.5	versão 2.0
Tampa	3450	43600
Módulo Interior	1851	48620
Caixa	1010	1010
Total	6310	93230

Na secção 2.1.3., com o auxílio das figuras 7 e 8, já se tinha afirmado que, normalmente, o investimento inicial no processo de moldação por injeção é superior ao necessário no processo de extrusão.

Analisando a Tabela 31, confirma-se o esperado: o custo dos moldes para a produção da versão 2.0 é, sensivelmente, 15 vezes maior que o das matrizes para as versões 1.0 e 1.5.

Uma vez que o novo produto é menos dispendioso mas implica um investimento avultado, será interessante aferir qual o volume da série de produção a partir do qual se revela uma vantagem económica a produção do Next-Road 2.0. Assim, nas próximas secções será exposto o estudo do *break-even point*.

7.2.1 Break-even point do produto Next-Road 2.0

O *Break-even point* (BEP), em economia e finanças, é o ponto onde o lucro de uma empresa é nulo, ou seja, quando os produtos vendidos cobrem todos os custos e despesas. A partir deste ponto, as vendas geram lucro para a empresa.

Este conceito foi adaptado, de forma a revelar a partir de que volume de produção do Next-Road 2.0 se justifica o investimento e a mudança de processos de fabrico e materiais, em relação aos modelos 1.0 e 1.5.

Os BEPs foram identificados com recurso a um gráfico *Investimento x Volume de produção*, onde estão presentes as três retas que retornam o valor que terá de ser investido para a produção de “x” Next-Road, para cada uma das três versões.

De maneira a gerar o gráfico referido, foi elaborada a Tabela 32 e seguiu-se o raciocínio exposto abaixo.

Tabela 32 - Investimento em matrizes e custo unitário do produto para cada versão do Next-Road

Next-Road	Custo das matrizes [u.m.]	Custo unitário do produto [u.m.]
1.0	6310	385
1.5	6310	249
2.0	93230	229

$$Investimento [u.m.] = Custo_{matrizes} + Custo_{unitário} * Volume_{produção} \quad (7)$$

Partindo da equação geral (7), é possível estabelecer as equações que retornam o investimento a realizar, em função do volume de produção de cada um dos produtos:

$$Investimento_{1.0} = 6310 + 385 * x \quad (8)$$

$$Investimento_{1.5} = 6310 + 249 * x \quad (9)$$

$$Investimento_{2.0} = 93230 + 229 * x \quad (10)$$

As três equações deram origem ao gráfico apresentado na Figura 87. Os BEPs do Next-Road 2.0 em relação aos modelos 1.0 e 1.5 encontram-se assinalados.

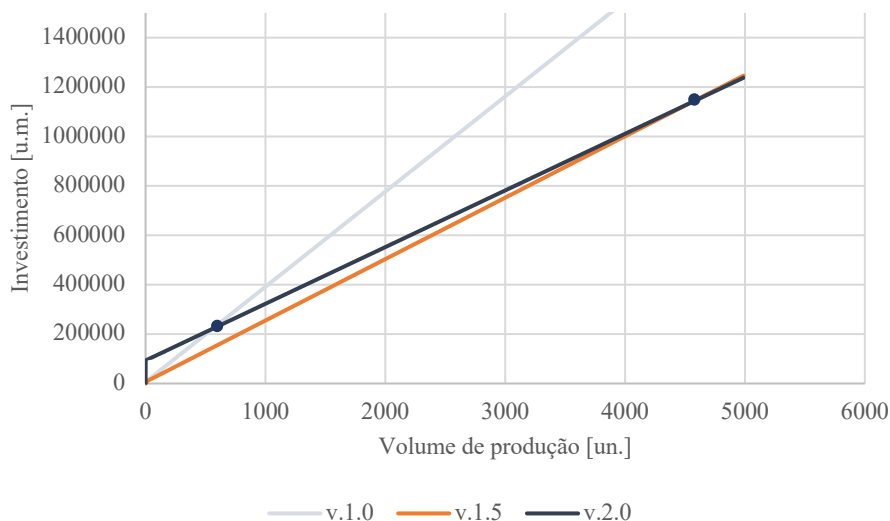


Figura 87 - BEPs do produto Next-Road 2.0

Analisando o gráfico, percebe-se que o BEP da versão 2.0 em relação à 1.0 se dá para séries de produção na ordem dos 500 Next-Road.

No entanto, uma vez que o custo de produção do modelo 1.5 é inferior ao do 1.0, faz sentido analisar apenas a partir de que volume de produção será vantajoso produzir a versão 2.0 em relação à 1.5.

Desta forma, ao interseção das equações (9) e (10), tem-se que $x = BEP \simeq 4551$ produtos Next-Road. Assim, interpreta-se que a produção da versão concebida no decorrer da presente dissertação se mostra benéfica para produções superiores a 4551 unidades.

Conclui-se, deste modo, que o modelo 2.0 se revela efetivamente uma otimização económica do produto Next-Road. No entanto, esta otimização só se verifica para valores que, neste momento, se mostram impraticáveis para a empresa. Encomendas na ordem dos 5000 modelos requerem um elevado investimento inicial e instalações capazes de garantir o armazenamento e montagem de uma grande quantidade de componentes. Assim, conclui-se, igualmente, que, considerando a Pavnext uma empresa em fase embrionária, fará mais sentido a produção do modelo 1.5 em detrimento do 2.0.

Contudo, procedeu-se ao cálculo do BEP dos conjuntos tampa e módulo interior, na procura contínua por uma otimização económica com efeito imediato no produto da Pavnext.

7.2.2 BEP dos conjuntos tampa e módulo interior

Dado o resultado obtido no cálculo do BEP do produto Next-Road 2.0, faz sentido perceber se o BEP de algum dos novos conjuntos se verifica para volumes de produção inferiores, por forma a que algum do trabalho desenvolvido possa ser aproveitado no imediato.

Deste modo, seguindo o raciocínio exposto na secção anterior é exposta a Tabela 33.

Tabela 33 - Investimento em matrizes para a produção do C_{MI} e custo do conjunto, para cada versão do produto

Next-Road - C_{MI}	Custo das matrizes - C_{MI} [u.m.]	Custo do conjunto [u.m.]
1.0	1851	193
1.5	1851	129
2.0	48620	120

As equações que regem o investimento a realizar em função do volume de produção do C_{MI} , para cada uma das versões do Next-Road, são dadas por:

$$\text{Investimento } C_{MI_{1.0}} = 1851 + 193 * x \quad (11)$$

$$\text{Investimento } C_{MI_{1.5}} = 1851 + 129 * x \quad (12)$$

$$\text{Investimento } C_{MI_{2.0}} = 48620 + 120 * x \quad (13)$$

O gráfico resultante é exibido na Figura 88.

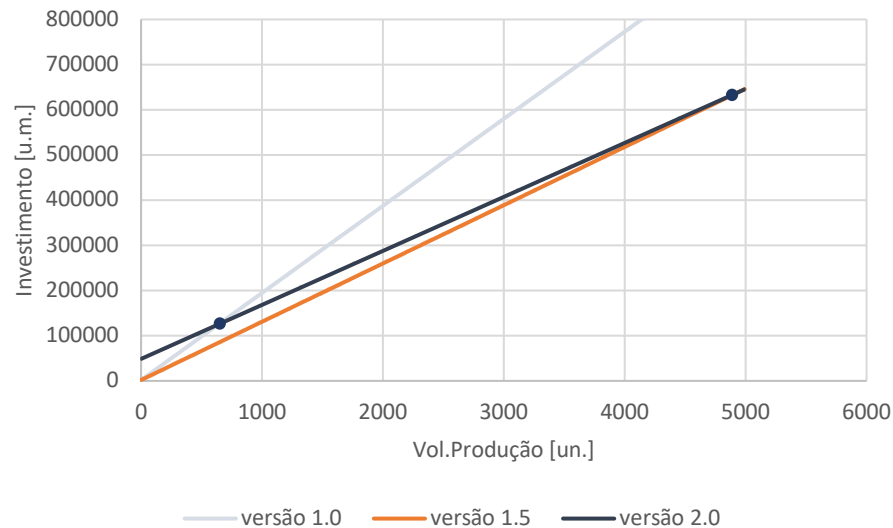


Figura 88 - BEP do C_{MI}

Dado o custo de produção inferior que o C_{MI} 1.5 apresenta em relação ao módulo interior da versão 1.0, o BEP do C_{MI} 2.0 é o resultado da interseção das equações (12) e (13).

Assim, $x = BEP C_{MI} \approx 4924$.

Segue-se exatamente o mesmo procedimento, por forma a determinar o BEP do conjunto tampa. A Tabela 34, tal como as equações seguintes, servem de base à sua determinação.

Tabela 34 - Investimento em matrizes para a produção do C_T e custo do conjunto, para cada versão do produto

Next-Road - C_T	Custo das matrizes - C_T [u.m.]	Custo do conjunto [u.m.]
1.0	3450	119
1.5	3450	100
2.0	43600	36

$$Investimento C_{T1.0} = 3450 + 119 * x \quad (14)$$

$$Investimento C_{T1.5} = 3450 + 100 * x \quad (15)$$

$$Investimento C_{T2.0} = 43600 + 36 * x \quad (16)$$

O gráfico gerado é apresentado na Figura 89.

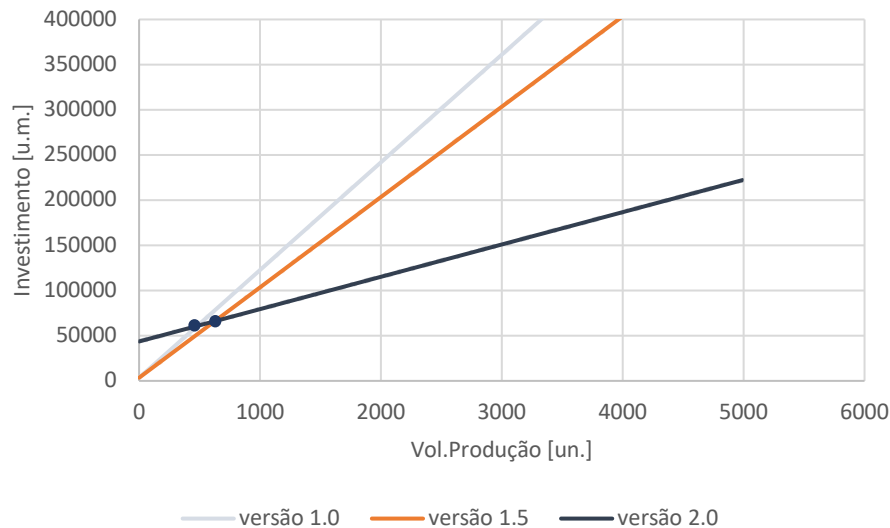


Figura 89 - BEP do C_T

Intersectando as equações (15) e (16) tem-se que $x = BEP C_T \simeq 626$.

Analisando os gráficos expostos e os valores dos BEPs para os conjuntos de montagem é possível retirar algumas conclusões:

- Apesar do custo de produção do C_{MI} 2.0 ser inferior, o elevado investimento em moldes de injeção leva a que a materialização deste conjunto, em relação ao do modelo 1.5, seja apenas benéfica a partir de uma série de 4924 C_{MI}. Este resultado remete para o que já havia sido concluído no estudo do BEP do produto: a otimização económica realizada só se verifica para volumes de produção impraticáveis para a Pavnext;
- O BEP do C_T dá-se para produções de baixa ordem de grandeza, quando comparado com aquele associado ao C_{MI}. Assim, a produção do C_T 2.0 revela-se favorável a partir de uma série de produção superior a 626 C_T.

Desta forma, é possível idealizar um produto Next-Road que compatibilize os modelos pré-industrial e industrial, algo que se aborda na secção seguinte.

7.3 Next-Road 2.5 - proposta de trabalho futuro

Deste modo, surge, como proposta de trabalho futuro o estudo e implementação de uma nova solução: a junção do C_{MI} 1.5 com o C_T 2.0. O C_C seria aquele já mencionado como comum a todos os modelos. Este modelo denominar-se-ia Next-Road 2.5 e permitiria diminuir de forma considerável o BEP de 4551 produtos, determinado em 7.2.1, aproximando-se, certamente, da realidade da empresa. A Figura 90 exhibe a constituição do Next-Road 2.5.

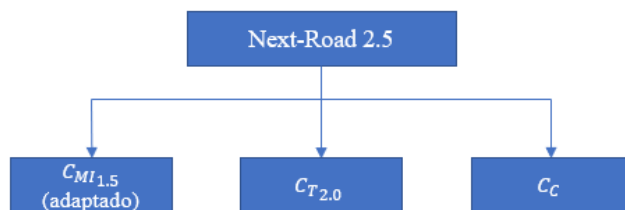


Figura 90 - Constituição do Next-Road 2.5

No entanto, enquanto que o C_T não sofreria qualquer alteração, seria necessário adaptar o C_{MI} , quase exclusivamente constituído por ligas de alumínio, por forma a garantir o correto funcionamento do produto. Assim, teriam de ser seguidos alguns passos:

- Eliminar os elementos de guiamento em aço, reorçamentando a placa base em alumínio (custo da placa em si seria inferior);
- Acoplar à nova placa base uma solução similar aos “guias verticais”, presentes na Placa Base 2.0. Assim, estes elementos, juntamente com os “elementos de guiamento” presentes no C_T garantiriam o correto guiamento do produto. Será necessário o contacto com a indústria, por forma a orçamentar o molde de injeção necessário à produção dos guias verticais. Acredita-se que o molde em questão não acarrete custos elevados dada a baixa complexidade do componente e a ausência de movimentos laterais.

A Figura 91 procura exibir o módulo interior pertencente ao Next-Road 2.5, facilitando a compreensão do que foi descrito até agora. É importante referir que a imagem é apenas um esboço, não apresentando todos os elementos que constituem o C_{MI} .

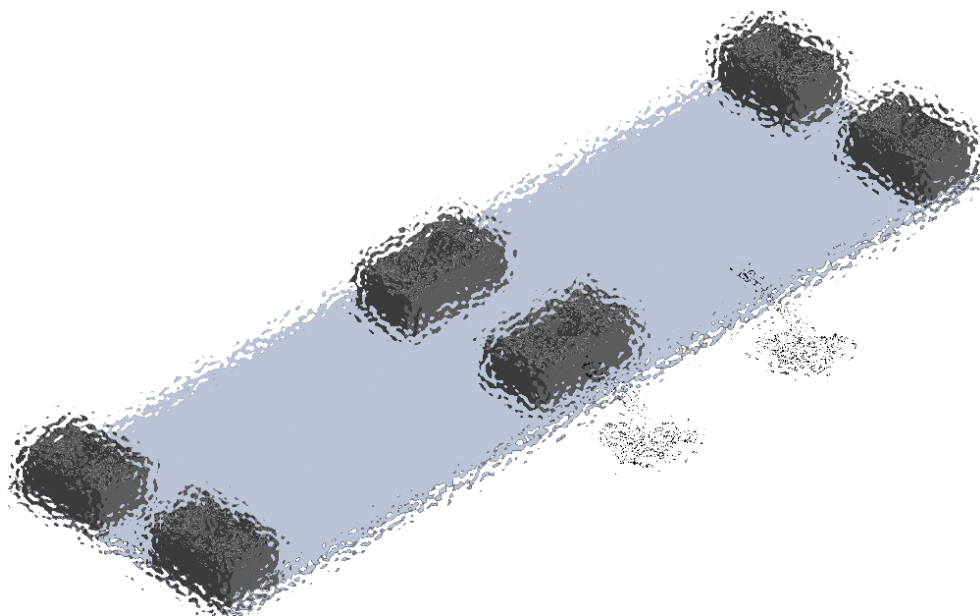


Figura 91 – C_{MI} do Next-Road 2.5

Esta é uma solução, considerada pela Pavnext, de elevado potencial, visto que conjuga o baixo custo do C_T 2.0 com a robustez apresentada pelo modelo 1.5. Assim, não tendo sido realizados testes à vida útil de qualquer produto, espera-se que esta seja mais elevada do que para o Next-Road 2.0.

Deste modo, seria interessante o seu desenvolvimento, tendo por base o trabalho realizado, num futuro próximo.

7.4 Next-Road 3.0 - proposta de trabalho futuro

A seleção de materiais, necessária à conceção do Next-Road 2.0, foi limitada rigorosamente pelo preço da matéria-prima. Assim, como foi exposto no Capítulo 5, qualquer material que ultrapassasse o custo de 3,5€/kg, não era selecionável.

No entanto, a comparação económica entre o modelo 1.5 e 2.0 revelou a existência de alguma margem entre os seus custos de produção (Tabela 28). Deste modo, percebe-se que há, igualmente, margem para a escolha de um material com maior custo, que confira ainda melhores propriedades mecânicas ao produto, concebendo o Next-Road 3.0.

Assim sendo, com recurso ao GRANTA EduPack, iniciou-se uma pesquisa por materiais que possam ser moldados por injeção, com propriedades mecânicas superiores aos materiais achados no Capítulo 5. As restrições impostas à procura de novos materiais são exibidas na Figura 92.

▼ Price			
	Minimum	Maximum	
Price	3,5	10	EUR/kg
Price per unit volume			EUR/m ³
▼ Physical properties			
	Minimum	Maximum	
Density			kg/m ³
Dynamic viscosity (absolute viscosity)			Pa.s
▼ Mechanical properties			
	Minimum	Maximum	
Young's modulus	12		GPa
Specific stiffness			MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	125		MPa
Tensile strength			MPa
Specific strength			kN.m/kg
Elongation			% strain
Compressive strength	150		MPa

Figura 92 - Restrições impostas na procura de novos materiais (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 13 fev., 2020)

Assim, foi gerado um gráfico *Preço x Módulo de elasticidade*, exposto na Figura 93.

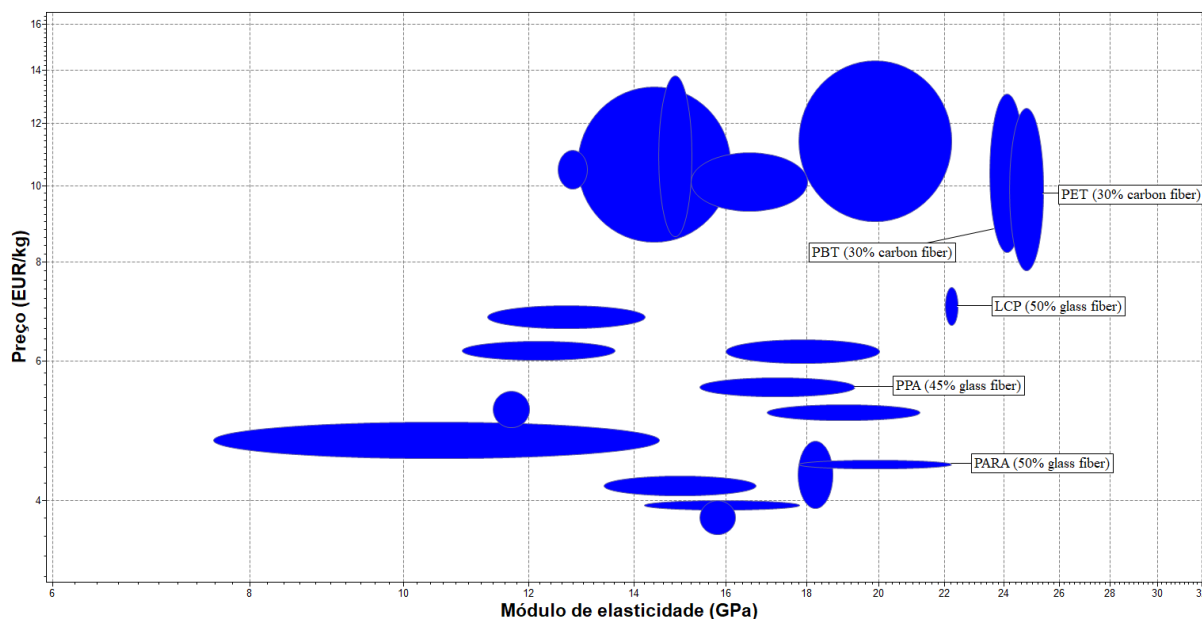


Figura 93 - Materiais resultantes: Preço x Módulo de elasticidade (In GRANTA EduPack 2020. Acedido em 13 fev., 2020)

No gráfico estão assinalados os cinco materiais com maior rigidez. Como já havia sido referido em 2.3.1, os plásticos reforçados com fibra de carbono (CF) apresentam custos superiores aqueles reforçados com fibra de vidro. As propriedades de maior importância, segundo o critério de Von Mises, são exibidas e comparadas com as do PA66 GF50 na Tabela 35.

Tabela 35 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade e tensão limite elástico dos materiais (Adaptado de (Ansys 2020))

Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão limite elástico [MPa]
PA66 GF50	12,2	174
PARA GF50	20	235
PPA GF50	17,2	231
LCP GF50	22,2	125
PET CF30	24,8	138
PBT CF30	24,1	125

Desta forma, procedeu-se ao cálculo do custo de produção de cinco possíveis constituições do Next-Road 3.0, bem como do seu BEP em relação ao modelo 1.5. É importante assinalar algumas considerações:

- O Next-Road 3.0 será igual ao modelo 2.0, com exceção da placa base. Uma vez que os elementos sujeitos a maior esforço se encontram nesse componente, esse será o único constituído por um material distinto. Os restantes componentes (C_T , Patim, etc.) serão constituídos nos materiais já seleccionados;
- O preço de cada uma das cinco matérias primas, bem como a sua massa volúmica, necessários à determinação do custo do produto, foram retirados do *software* EduPack (Tabela 36);

Tabela 36 - Valores da massa volúmica e custo dos materiais de possível implementação na versão 3.0
(Adaptado de (Ansys 2020))

Material	Massa volúmica [kg/m ³]	Custo [€/kg]
PARA GF50	1645	4,45
PPA GF45	1645	5,55
LCP GF50	1765	7
PET CF30	1420	10,20
PBT CF30	1415	10,40

- Adotaram-se os moldes de injeção necessários à produção do Next-Road 2.0, para a orçamentação do modelo 3.0.

Os resultados estão presentes na Tabela 37.

Tabela 37 - Comparação entre o custo de produção do modelo 1.5 com os possíveis modelos 3.0

Next-Road	Material que constitui a placa base	Custo das matrizes [u.m.]	Custo de produção [u.m.]
1.5	EN-AW-6063 T6	6 310	249
3.0	PARA GF50	93 230	233
	PPA GF45	93 230	236
	LCP GF50	93 230	242
	PET CF30	93 230	246
	PBT CF30	93 230	247

Os BEPs, tal como nas secções anteriores, foram determinados pela intersecção das retas que avaliam a evolução do investimento necessário em cada um dos modelos. Estes valores podem ser consultados na Tabela 38.

Tabela 38 - BEPs dos possíveis modelos 3.0

Next-Road	Material que constitui a placa base	BEP
1.5	EN-AW-6063 T6	-
3.0	PARA GF50	5 502
	PPA GF45	7 010
	LCP GF50	13 753
	PET CF30	35 478
	PBT CF30	46 234

Analisando as Tabelas 36 e 37 é possível concluir que:

- Qualquer uma das possibilidades exibe um custo de produção inferior ao do modelo 1.5;
- Os BEPs dos possíveis modelos 3.0 verificam-se para séries de produção muito elevadas, só fazendo sentido a sua implementação numa fase em que a Pavnext já esteja preparada para receber ordens de encomenda de valor elevado.

Deste modo, conclui-se que seria interessante o estudo mais aprofundado da possibilidade de injeção em série utilizando qualquer um dos cinco materiais referidos, consultando várias empresas especialistas na área. É fundamental perceber se os compósitos mencionados são passíveis de serem moldados por injeção, para a produção de componentes de elevada dimensão, sem que se comprometa o seu processo de desmoldação. Além disso, considera-se importante aferir se a indústria está familiarizada com o processamento de tais materiais e se consegue garantir a produção em série do produto Next-Road, utilizando qualquer um dos compósitos mencionados.

Sendo o PARA, PPA e o LCP plásticos de elevada performance, é expectável que confirmem uma durabilidade superior aos componentes.

Desta forma, seria importante realizar testes à fadiga do Next-Road 2.0, por forma a aferir a durabilidade do produto. Se os materiais que o constituem falharem antes do tempo pretendido pela Pavnext, sugere-se o estudo aprofundado dos compósitos de alta performance mencionados e da implementação do Next-Road 3.0. Relembra-se que a produção dos modelos 2.0 e 3.0 só compensa, em relação ao 1.5, para produções superiores a 4551 produtos.

Posto isto, a Tabela 39 procura evidenciar quais serão as melhores opções em função do volume das séries a produzir.

Tabela 39 - Modelo a produzir em função do volume da série de produção

Produção de baixo volume	Produção de médio volume	Produções médias/industriais
Next-Road 1.5	Next-Road 2.5	Realização dos testes à fadiga - Se for durável
		Next-Road 2.0
		Se este apresentar baixa durabilidade
		Estudo do Next-Road 3.0

É igualmente importante assinalar que o modelo 1.5 é já um produto otimizado e desenvolvido durante um período longo, ao passo que o custo do modelo 2.0 (e consequentemente do modelo 3.0) é uma abordagem inicial a uma possibilidade de um produto moldado por injeção. Acredita-se que os custos possam ser ainda otimizados, concebendo moldes que sejam responsáveis pela produção de mais que um componente, e contactando diversas empresas na área da injeção de plásticos, na procura por preços mais competitivos. Isto permitirá diminuir o BEP do modelo concebido no decorrer da dissertação.

Assim sendo, termina a análise de custos, com vista à comparação entre o modelo pré-industrial da Pavnext e o modelo 2.0. Conclui-se que o objetivo principal foi atingido, uma vez que o seu custo de produção é inferior ao da versão 1.0/1.5. No entanto, o avultado investimento em moldes de injeção, necessário à sua materialização, faz com que esta só compense a partir de séries de nível industrial, para as quais a empresa não está preparada.

Sugere-se, deste modo, num futuro próximo, a exploração de um modelo que conjugue os pontos fortes dos modelos 1.5 e 2.0.

Recomenda-se, igualmente, num futuro não tão próximo, o estudo de materiais compósitos que garantam níveis de rigidez e resistência superiores, se necessário.

O capítulo seguinte conclui o trabalho desenvolvido ao longo de cinco meses na empresa Pavnext, descrevendo, além das que foram abordadas neste capítulo, as propostas de trabalhos futuros sugeridas para otimizar os produtos da Pavnext.

8 Conclusão e propostas de trabalhos futuros

O principal objetivo proposto residiu na otimização económica do produto Next-Road 1.0, adotando materiais distintos, processados por processos de fabrico que permitem a industrialização do modelo da Pavnext. Conclui-se que o objetivo principal foi atingido, uma vez que foram minimizados os custos de produção da versão 1.0/1.5 do produto. Contudo, será necessário dispendir um elevado valor em moldes de injeção, para que seja possível a produção do Next-Road 2.0.

Além disso, foi conseguida uma redução da massa do produto Next-Road 1.0. Este produto pesa 90 kg, ao passo que a versão 2.0 apresenta uma massa de cerca de 70 kg, o que se traduz numa redução de cerca de 20%.

Apesar de ter sido atingida, não só a otimização económica do produto da Pavnext, mas também a redução da sua massa, através da adoção de novos materiais, é igualmente verdade que existe ainda margem para a melhoria contínua da unidade Next-Road 2.0.

Este modelo foi concebido de forma a minimizar os custos de produção associados ao modelo pré-industrial presente na empresa, modelo esse que apresenta vários custos fixos, originados por processos de pós-processamento. A versão 2.0, não tendo ainda sido produzida, é a primeira etapa com vista à transição para um modelo que possa ser moldado por injeção, e, desta forma, industrializado. Como não poderá deixar de ser, considera-se um alvo de contínua otimização. Deste modo, sugere-se:

- Conclusão da conceção do produto Next-Road 2.0, procedendo à criação do conjunto caixa;
- Aprofundar o contacto com a indústria na área da injeção de plásticos, por forma a garantir preços mais baixos, quer dos moldes, quer dos materiais. Acredita-se que seja possível conceber moldes que produzam dois ou mais tipos de componentes, o que diminuiria o investimento realizado;
- Realizar uma simulação de injeção dos componentes, num *software* especializado. Assim, será possível perceber como se orientarão as fibras na matriz polimérica. Desta forma, poder-se-ia adaptar o design do modelo, de forma a que as fibras ficassem orientadas na direção perpendicular à das tensões aplicadas nas áreas críticas, aumentando a durabilidade do produto.
- A realização de testes de fadiga aos componentes que são solicitados, num *software* apropriado, por forma a determinar o período de vida útil do produto Next-Road 2.0. Se este período for inferior a aquele idealizado pela Pavnext, sugere-se:
 - O estudo do aumento das dimensões do produto, por forma a que seja possível aumentar a robustez dos elementos do CMI;
 - Substituição dos elementos com menor durabilidade por elementos em alumínio, aparafusando-os à placa base;

- O estudo da implementação de materiais compósitos de alta performance (como já apresentado em 7.4), desde que a sua inclusão no produto não eleve o seu custo de produção para valores superiores ao do modelo 1.5.

Como já foi referido na secção 7.3., sugere-se ainda, tendo por base o trabalho realizado, o estudo e implementação do Next-Road 2.5, um modelo híbrido constituído pelo C_T 2.0 e o C_{MI} 1.5 (adaptado). Dado o baixo custo que o C_T 2.0 apresenta, prevê-se que o BEP deste novo modelo se verifique para ordens de encomenda inferiores ao do Next-Road 2.0. Além disso, a durabilidade deste produto seria, com certeza, elevada, uma vez que a grande maioria dos componentes sujeitos a cargas elevadas seriam produzidos em alumínio.

9 Referências

- Alumínio, R. (2020). "Conheça o processo e as vantagens da extrusão do alumínio." Retrieved 4 dez., 2020, from <https://revistaaluminio.com.br/conheca-o-processo-e-as-vantagens-da-extrusao-do-aluminio/> (acedido em 4 dez., 2020).
- Ansys (2020). GRANTA EduPack
- Ashby, M. (2012). Seleção de materiais no projeto mecânico.
- Barauna, D., D. Razera and A. Heemann (2015). "Seleção de materiais no design: informações necessárias ao designer na tomada de decisão para a conceituação do produto." *Design* 5: 1.
- Batista, R. (2010). Tendências do Corte por Arranque de Apra - Maquinagem. M. S. Thesis, FEUP, UP.
- Biron, M. (2018). Thermoplastics and Thermoplastic Composites.
- Davim, J. P. (1995). Princípios da Maquinagem.
- ESA. (2020). "Technology Readiness Levels (TRL)." from https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/Technology_Readiness_Levels_TRL (acedido em 7 nov., 2020).
- Gil, L., M. H. Andrade and M. d. C. Costa (2014). "Os TRL (Technology Readiness Levels) como ferramenta na avaliação tecnológica." *INGENIUM*: 94-96.
- Jain, V. K. (2002). Advanced machining processes.
- Kaufman, J. G. (2000). Introduction to Aluminum Alloys and Tempers.
- Kumar, K., D. Zindani and J. P. Davim (2018). Advanced Machining and Manufacturing Processes.
- Navarra. (2020). "Processos produtivos - Extrusão." Retrieved 3 dez., 2020, from <http://www.navarraaluminio.com/pt/processos-produtivos/extrusao.html> (acedido em 3 dez., 2020).
- Neves, J. R. V. (2019). Desenvolvimento e Implementação de uma Metodologia para Industrialização de um Produto de Energy Harvesting. M. S. Thesis, FEUP, UP.
- Nunes, T. (2015). Seleção de materiais e design: Um método com base nas redes neurais artificiais, FAAC, UNESP.
- PlastiComp. (2020). "Benefits of Long Fiber Reinforced Thermoplastic Composites." Retrieved 2020, 29 dez., from <https://www.plasticomp.com/long-fiber-benefits/> (acedido em 29 dez., 2020).
- Plastics, A. (2020). "The Cycles of the Injection Moulding Process." Retrieved 5 dez., 2020, from <http://www.automaticplastics.com/the-cycles-of-the-injection-moulding-process/> (acedido em 5 dez., 2020).
- Plastics, T. (2020). "What Are Plastic Injection Moulding Advantages And Disadvantages ?" Retrieved 6 dez., 2020, from <https://www.toolcraft.co.uk/plastic-injection->

[moulding/advice/advice-plastic-injection-moulding-advantages-disadvantages.htm](https://www.grupososoares.pt/pt/extrusao/service/1) (acedido em 6 dez., 2020).

Silva, L. F. M. d., F. J. L. Alves and A. T. Marques (2013). Materiais de Construção. Porto, Publindústria.

Sosoares, G. (2020). "Extrusão de perfis de alumínio " Retrieved 3 dez., 2020, from <https://www.grupososoares.pt/pt/extrusao/service/1> (acedido em 3 dez., 2020).

TWI. (2020). "WHAT ARE TECHNOLOGY READINESS LEVELS (TRL)?" Retrieved 7 Nov., 2020, from <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/technology-readiness-levels> (acedido em 7 nov., 2020).

UPTEC. (2020). "Pavnext." Retrieved 24 nov., 2020, from <https://uptec.up.pt/pt-pt/empresas/pavnext/> (acedido em 24 nov., 2020).

ANEXO A: Bill of materials do Next-Road 1.0



ANEXO B: Componentes estruturais vs. funcionais

ANEXO C: Next-Road 2.0 - ilustrações técnicas

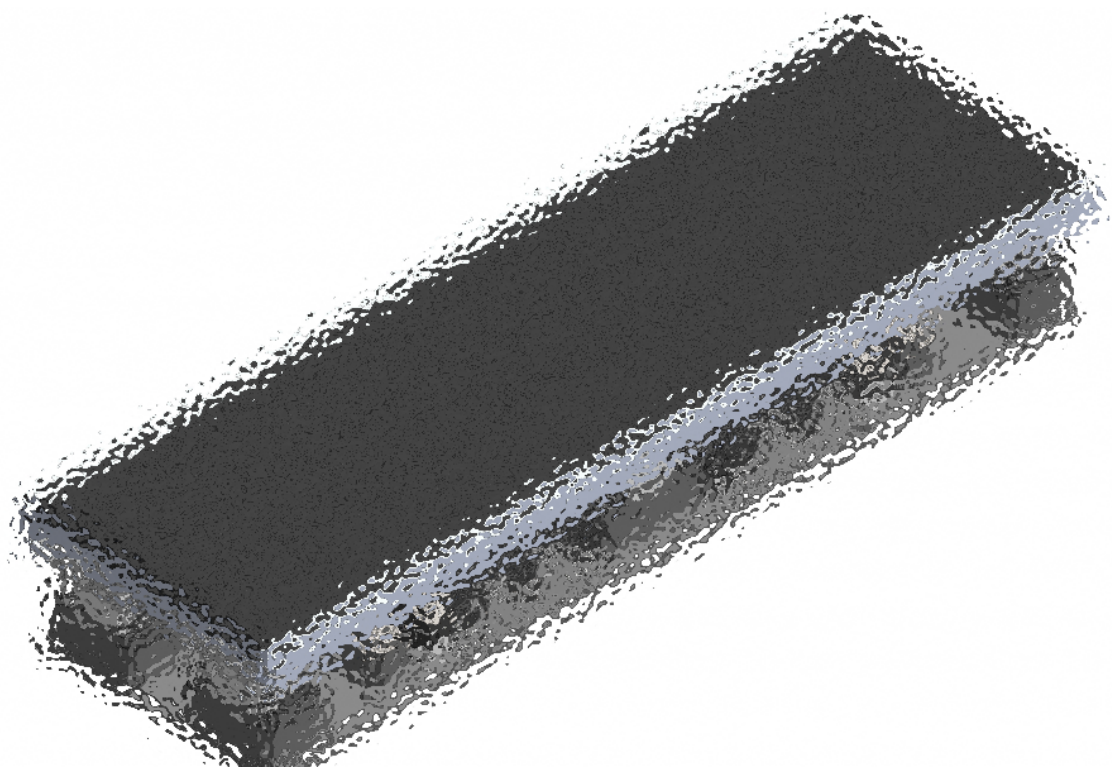


Figura 94 - Next-Road 2.0. Dimensões aproximadas: 1200x350x150 [mm]



Figura 95 – CMI 2.0

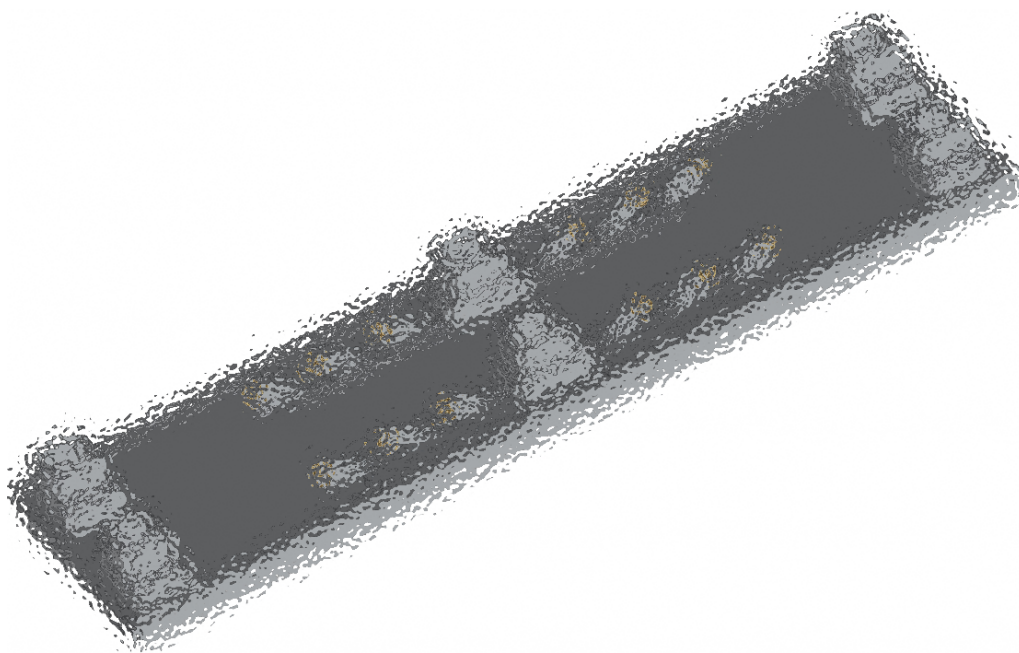


Figura 96 - Vista inferior do C_T

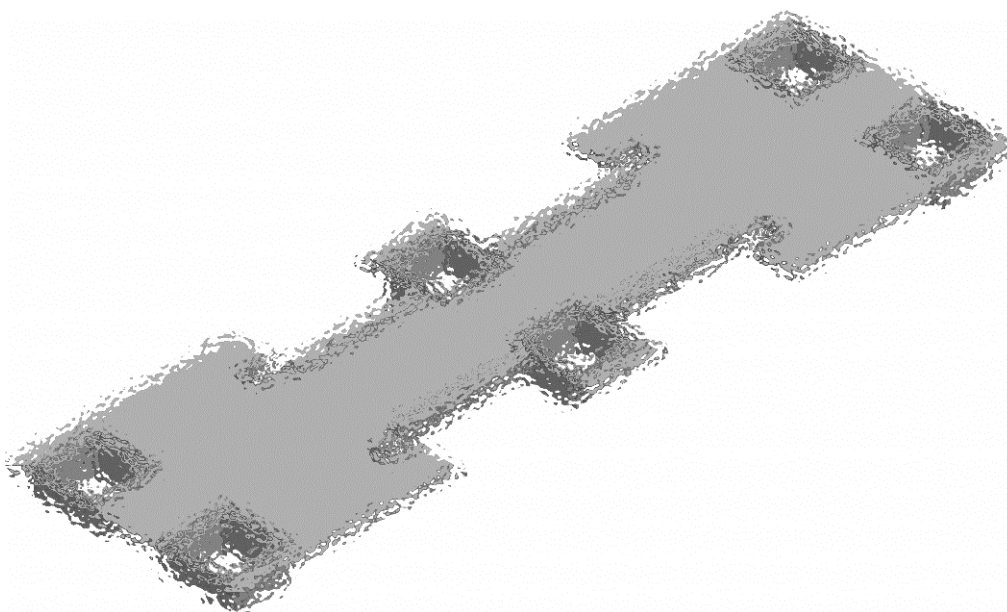


Figura 97 - Tampa injetada

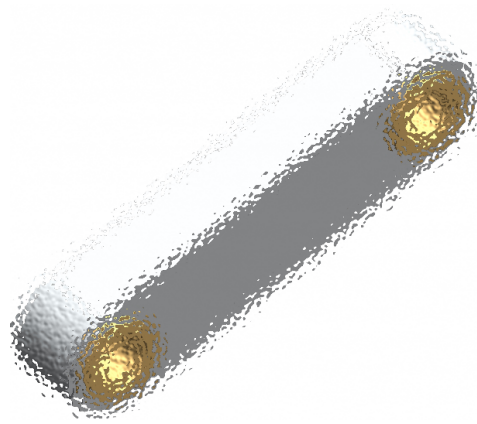


Figura 98 - Biela + Casquilhos

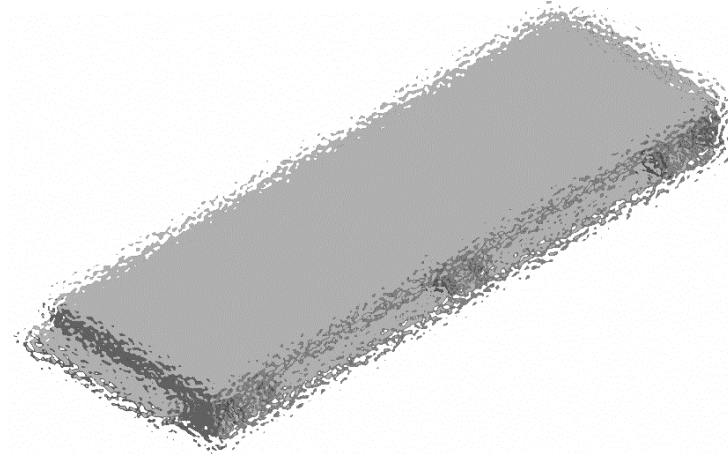


Figura 99 - Auxiliar de fixação

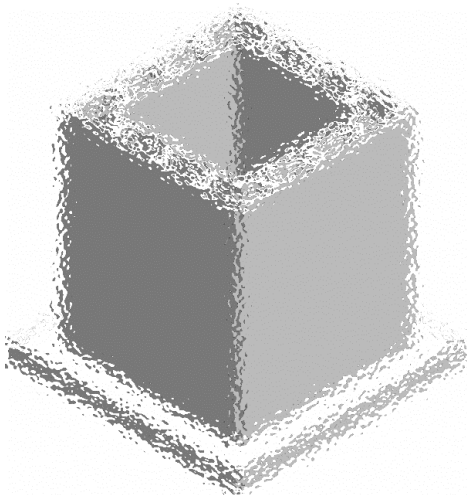


Figura 100 - Elemento de guiamento

ANEXO D: Ficha técnica do PA66 GF50

Technical Data Sheet**ALTECH®****ALBIS****ALTECH PA66 A 2050/100 GF50**

(Last update: 18.09.2013)

Base Polymer	Polyamide 66
Filler/Additive System	50 % glass fibres
Special Features	heat ageing stabilisation,easy release (demoulding),high stiffness
Market Segment	various
Application Area	various

Pre-Drying Conditions	80 °C in a dry air (dessiccant) dryer for 2-12 h dependant on moisture content max. moisture content <0,15 %
Processing Conditions	injection moulding melt temperature 280-300 °C injection moulding mould temperature 80-120 °C
Storage	dry, protected from light not above 30 °C

Properties	dry/cond.	Dimension	Test Norm
Mechanical Properties			
Flexural modulus	15000 / 13500	MPa	ISO 178
Flexural strength	340 / 295	MPa	ISO 178
Tensile modulus	16500 / 15000	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile strength at break	230 / 195	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile elongation at break	2.5 / 2.5	%	ISO 527-1/-2
Charpy notched impact 1eA	13 / 15	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Impact strength Charpy 1eU	90 / 80	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Thermal Properties			
Vicat B50	256 / *	°C	ISO 306
HDT / A (1,8 MPa)	256 / *	°C	ISO 75-1/-2
DSC (Melt Point)	264 - 264 / *	°C	ISO 11357
Electrical Properties			
Surface resistance min	1E12	Ohm	IEC 60093
Specific volume resistance	1E15 / -	Ohm*m	IEC 60093
Tracking resistance	550 / -	-	IEC 60112
Physical Properties			
Density	1560 / -	kg/m ³	ISO 1183
Humidity absorption	1.2 / *	%	Sim. to ISO 62
Water absorption	4 / *	%	Sim. to ISO 62

These are guide values and not a specification. Any information given on the chemical and physical characteristics of our products, including technical advice on applications whether verbally, in writing or by testing the product, is given to the best of our knowledge. It does not exempt the buyer from carrying out his own investigations and tests in order to ascertain the products' specific suitability for the purpose intended.

The buyer is solely responsible for the application, utilisation and processing of the products, and must observe the laws and government

ALBIS Plastic Hamburg
TDS00564

Phone: + 49 (0) 40 78105-0
Print Date: 05.09.2016 12:29:44

www.albis.com
Page 1 of 2

Technical Data Sheet

ALTECH[®]

ALBIS

ALTECH PA66 A 2050/100 GF50

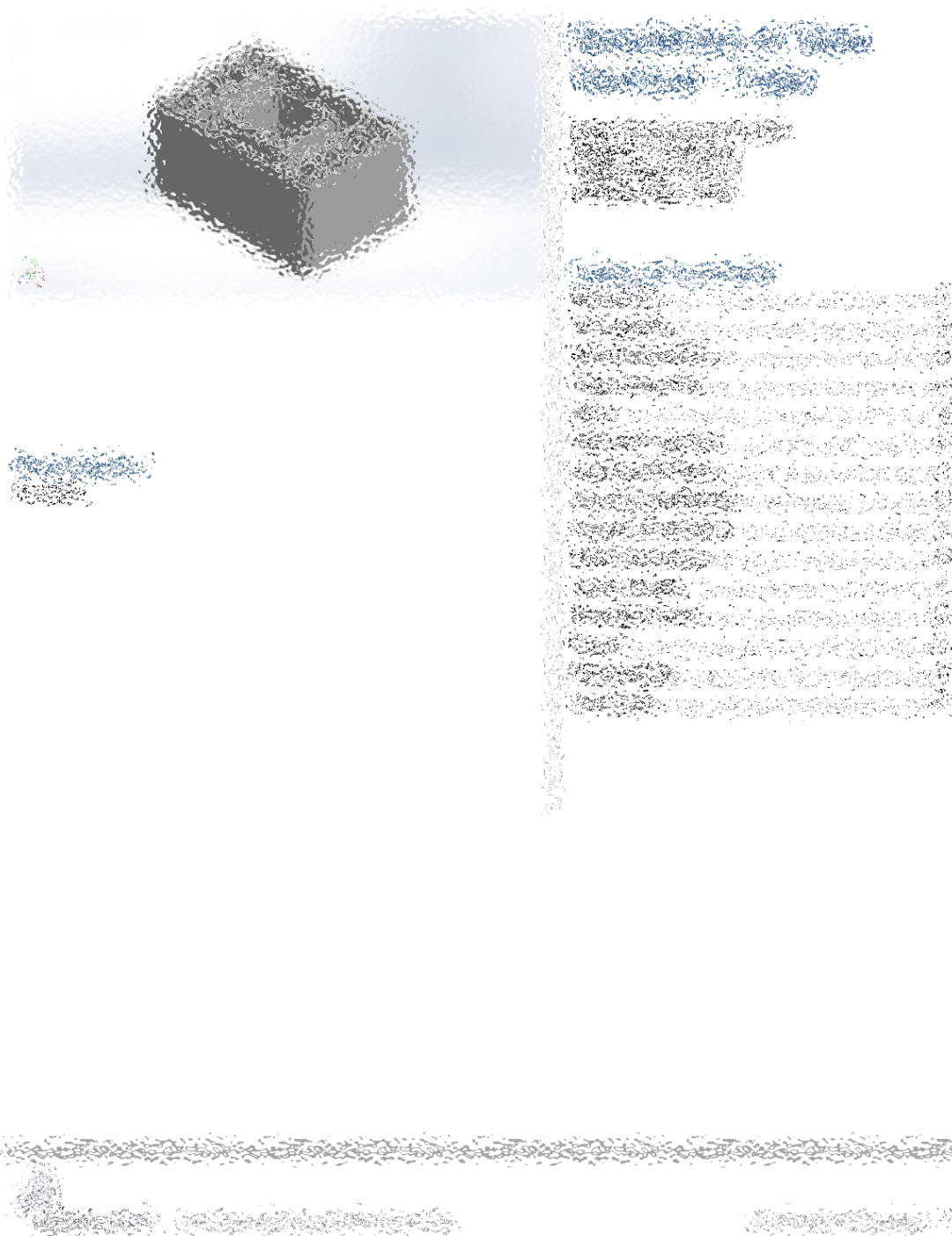
(Last update: 18.09.2013)

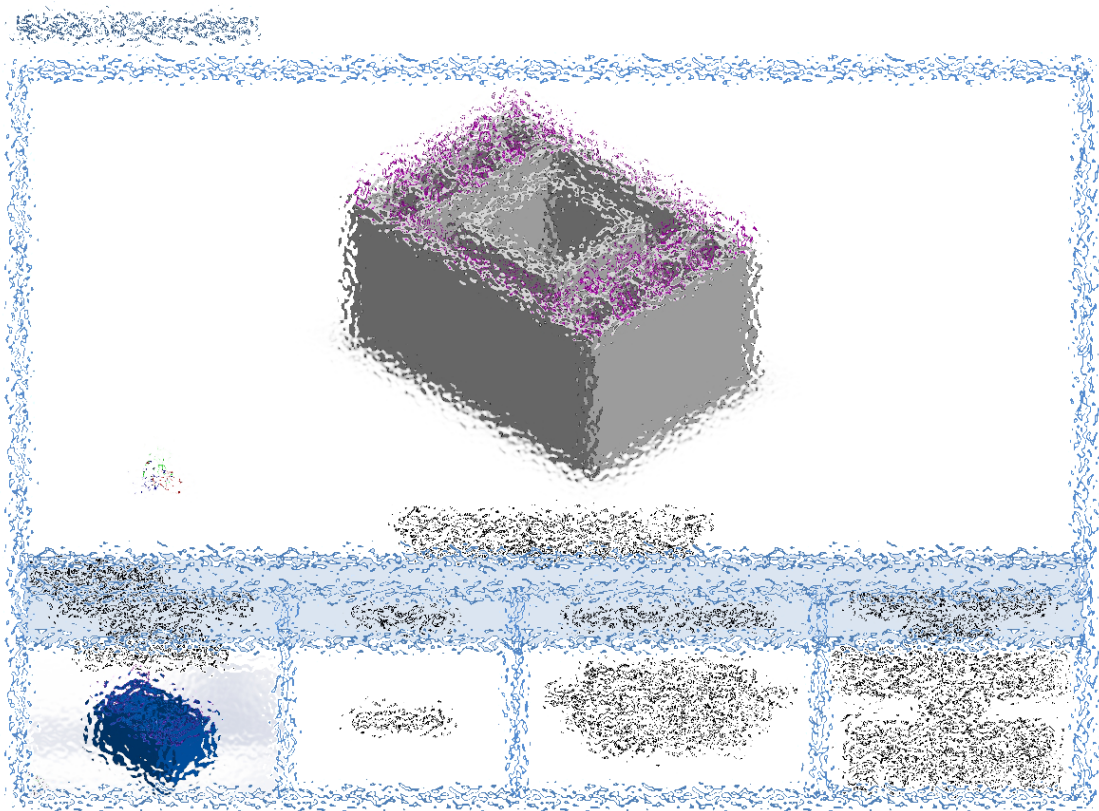
regulations and the consequential rights of any third party.

The test values mentioned are guide values only and not binding minimum or maximum figures. These test values have been determined on standardised test specimen and they can be affected by pigmentation, mould design and processing conditions.

ALBIS expressly advises against the use of this product in any medical, pharmaceutical or diagnostic application. At all times our Conditions of Sale apply.

ANEXO E: Relatório de uma das simulações realizadas ao Guia Vertical - Topo (PA6 GF30)





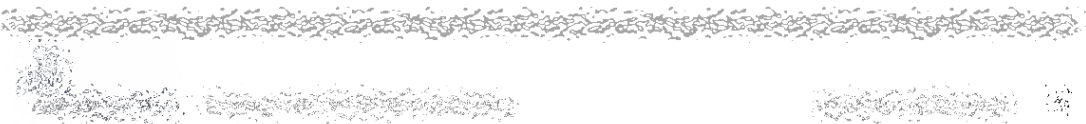
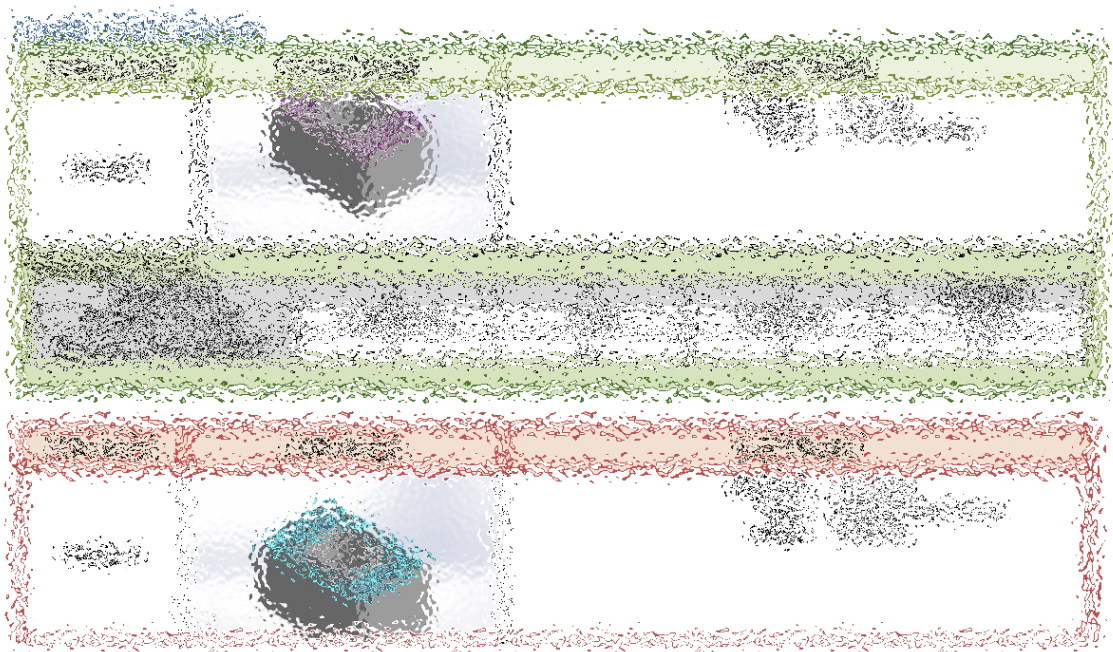
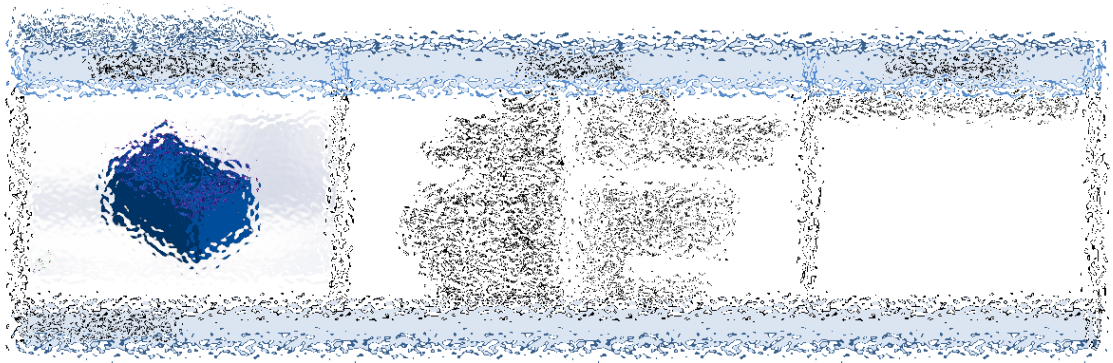
Study Properties

Study name	Static 1
Analysis type	Static
Mesh type	Solid Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SOLIDWORKS Flow Simulation	Off
Solver type	FFEPlus
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SOLIDWORKS document (D:\PAVNEXT\Desenhos\1. Conjuntos Simulações\1. Modulo Interior\Componentes SW)

Units

Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m ²





Connector Definitions
No Data

Contact Information
No Data

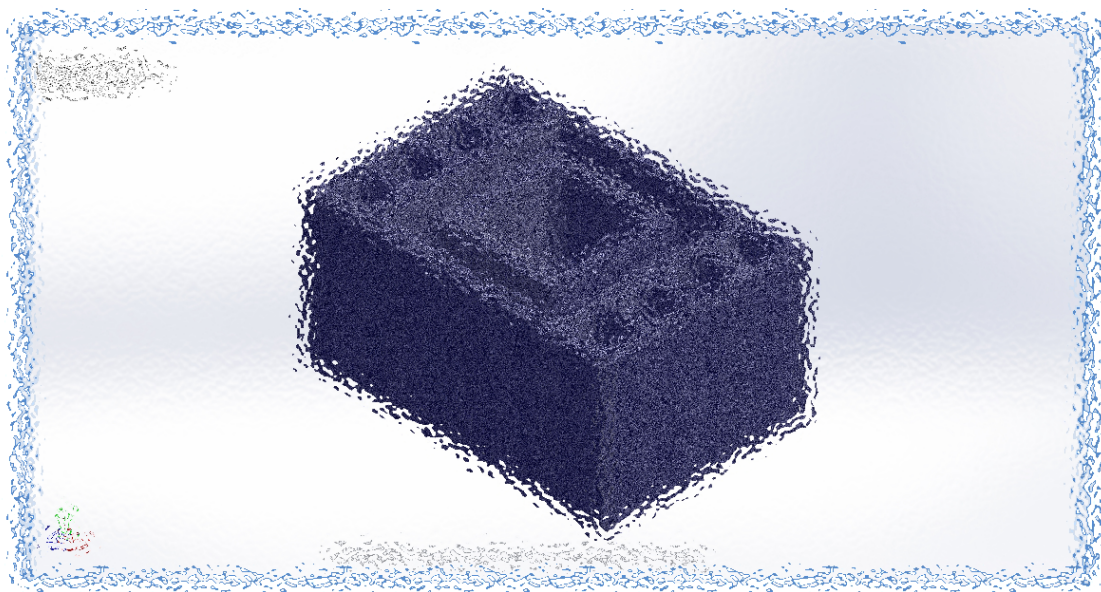
Mesh information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points for High quality mesh	16 Points
Element Size	1 mm
Tolerance	0,05 mm
Mesh Quality	High

Mesh information - Details

Total Nodes	1968428
Total Elements	1341732
Maximum Aspect Ratio	5,1997
% of elements with Aspect Ratio < 3	99,9
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
Percentage of distorted elements	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:09:10
Computer name:	





Resultant Forces

Reaction forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	-0,00186133	10 875	0,0387461	10 875

Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	0

Free body forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	0,0377261	-0,331339	0,470365	0,576586

Free body moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	1e-33

Beams

No Data

