

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luís Daniel Fernandes Pedroso

**Compósitos Avançados
para Produtos Desportivos**

Tese de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor João Pedro Nunes
Engenheiro Ângelo Marques

Outubro de 2020

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



**Atribuição
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

No século XII, Bernardo de Chartres afirmou que as gerações presentes conseguem ver mais e mais longe que as anteriores, não por possuírem um intelecto superior, mas porque são alavancados pelas descobertas dos seus antecessores. Esta afirmação ficou ainda mais célebre, quando em 1675 Isaac Newton comentou que “Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”. Como em tudo na vida existem diversas explicações para os mesmos acontecimentos, pelo que a minha interpretação da famosa frase de Newton me remete para os gigantes que me ajudaram a percorrer todo o meu caminho académico culminado pela escrita desta dissertação. Sem dúvida de que nos vossos ombros todo o percurso foi bem mais simples de trilhar.

Não posso deixar de aproveitar esta oportunidade para mencionar e demonstrar todo o meu agradecimento aqueles que foram imprescindíveis para a conclusão desta dissertação.

Aos meus pais, ao meu irmão e à minha namorada pelo suporte emocional e apoio absoluto que demonstraram em todo o meu percurso académico e ainda pelas palavras, pelo carinho e acima de tudo pela paciência que tiveram comigo nos dias de menor inspiração.

Aos meus orientadores, professor Doutor João Pedro Nunes e Engenheiro Ângelo Marques, pela orientação, pela disponibilidade e principalmente pela partilha de conhecimentos que certamente farão de mim um melhor profissional.

Ao Técnico Rafael Alves por toda a ajuda e aconselhamentos dados na realização de todo o trabalho prático presente nesta dissertação. Um agradecimento também à Engenheira Andreia Vilela pela ajuda não só na realização dos ensaios práticos, mas também na análise dos resultados obtidos nesses mesmos ensaios.

Um breve agradecimento ao Engenheiro Miguel Vasconcelos e à Doutora Joana Malheiro, pelo auxílio dado em certos pontos da dissertação e também por todos os conhecimentos que foram capazes de me transmitir.

A todos os meus gigantes, um muito obrigado!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Compósitos Avançados para Produtos Desportivos

Os materiais compósitos representam uma classe de materiais diversificada com maior apetência para a resolução de problemas complexos relacionados com as tecnologias de ponta dos domínios aeroespacial, militar, desportivo e biomédico, mas também de outros mercados relacionados com tecnologia das indústrias de transportes, e de componentes eletrónicos, desempenhando um papel fundamental e real na qualidade de vida das pessoas no século XXI. O desenvolvimento de produtos desportivos, nomeadamente de pranchas de *skateboard*, tem vindo a implementar cada vez mais os materiais compósitos no seu processo produtivo, de modo a poder aumentar as propriedades mecânicas e durabilidade sem comprometer o peso da estrutura.

O principal objetivo desta dissertação, é o desenvolvimento de um protótipo funcional de uma prancha de *skateboard* que será comparado com um produto existente no mercado. Será ainda realizado o desenvolvimento de uma prancha de *longboard*, cujo objetivo principal consiste em melhorar uma prancha pertencente à empresa galega *VigTab*.

Para o desenvolvimento das pranchas, foram produzidos provetes com materiais diferentes sendo testados ao impacto por queda de dardo bem como à flexão, seguindo as normas adequadas ao tipo de material utilizado (sanduiche ou laminado reforçado com fibras longas). Foi ainda realizada uma análise de *benchmarking* com vista a ser possível comparar os novos materiais com os existentes no mercado atual. Após a comparação de todos os materiais envolvidos no desenvolvimento dos dois produtos, foram selecionados os que melhor colmatavam os objetivos estipulados, sendo incorporados nos protótipos finais. Para o desenvolvimento da prancha de *skateboard*, foi ainda realizada uma simulação estrutural com o material selecionado e o modelo 3D, desenhado no âmbito desta dissertação, sendo comparados os dados obtidos na simulação com os dados retirados de um ensaio fletor realizado ao protótipo com as condições idênticas às impostas na simulação. Por fim foi efetuada uma reflexão acerca do potencial de valorização da prancha de *skateboard* no seu fim de vida.

Palavras-Chave: Desenho 3D; Ensaio Mecânicos; Materiais Compósitos; Potencial de Valorização; Protótipo; Simulação Estrutural; *Skateboard*.

ABSTRACT

Advanced Composites for Sports Products

Composite materials represent a diverse class of materials with a greater capacity for solving complex problems related to innovative technologies in the aerospace, military, sports and biomedical fields, as well as others related to technology in the transport industries, and electronic components, singing a fundamental and real role in the quality of life of people in the 21st century. The development of sports products, namely skateboards, has increasingly implemented composite materials in its production process, in order to increase the mechanical properties and durability without compromising the weight of the structure.

The main goal of this essay is the development of a functional prototype of a skateboard deck that will be compared with an existing product on the market. The development of a longboard will also be carried out, whose main objective is to improve a board belonging to the Galician company *VigTab*.

For the board's development, specimens were produced with different materials and being tested for impact by dart fall as well as bending, following the standards appropriate to the type of material used (sandwich or laminate reinforced with long fibres). A benchmarking analysis was also performed in order to compare the new materials with existing ones in the current market. After comparing all the materials involved in the development of the two products, the ones that best met the stipulated objectives were selected, being incorporated into the final prototypes. For the development of the skateboard, a structural simulation was also performed with the selected material and the 3D model, designed within the scope of this dissertation, comparing the data obtained in the simulation with the data obtained from a bending test carried out on the prototype with identical conditions as those imposed in the simulation. Finally, a reflection was made about the potential of valuing or recovery the skateboard in its end of life.

Key Words: 3D Design; Composite Materials; Mechanical Tests; Prototype; Recovery Potential; Skateboard; Structural Simulation.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE.....	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. Introdução.....	1
2. Apresentação da Empresa - PIEP	2
3. Objetivos	3
4. Revisão Bibliográfica	4
4.1. História do <i>Skateboard</i>	5
4.2. Materiais Usados.....	6
4.3. Tecnologias Atuais.....	7
4.4. Métodos de Produção.....	10
4.5. Materiais Compósitos	11
4.5.1. Matrizes.....	13
4.5.2. Reforços	18
4.5.3 Laminados.....	23
4.5.4. Estruturas Sanduíche	25
4.5.5. Processos de Fabrico	27
5. Produção da Prancha de <i>Longboard</i>	31
5.1.– Definição das Placas para Ensaios.....	31
5.2. – Infusão das Placas e Produção dos Provetes Normalizados.....	35
5.3. – Ensaios aos Provetes Produzidos.....	38
5.4. Apresentação e Discussão dos Resultados.....	40
5.4.1 – Ensaios de Flexão	40

5.4.1.1. Reformulação do Procedimento dos Ensaios e Produção de Novos Provetes	42
5.4.1.2. Novos Ensaios de Flexão.....	43
5.4.2. – Ensaios de Impacto.....	47
5.5. – Análise <i>Benchmarking</i>	51
5.5.1. Ensaios ao Material da Empresa <i>VigTab</i>	51
5.5.2. Apresentação e Discussão dos Resultados.....	53
5.5.2.1 – Ensaios de Flexão	53
5.5.2.2. – Ensaios de Impacto	55
5.6. – Definição do Material a Utilizar no Protótipo.....	56
5.7. – Produção do Molde para Infusão do Produto Final	60
5.8. – Produção do <i>Longboard</i> Protótipo.....	61
5.9. – Avaliação do Produto Final	65
6. Produção da Prancha de <i>Skateboard</i>	66
6.1. Definição das Especificações	66
6.2. Estudo Preliminar.....	71
6.2.1. Definição dos Laminados a Produzir no Projeto Preliminar	71
6.2.2. Definição das Dimensões dos Laminados	73
6.2.3. Desenvolvimento do Molde para Produção das Placas por RTM	74
6.2.4. Produção dos Laminados e dos Provetes Normalizados	78
6.2.5. Ensaios aos Provetes Produzidos.....	82
6.2.6. Apresentação e Discussão dos Resultados.....	85
6.2.6.1. Ensaios de Flexão	85
6.2.6.2. Ensaios de Impacto	89
6.2.7. Análise <i>Benchmarking</i>	90
6.2.7.1. Ensaios Efetuados	92

6.2.7.2. Apresentação e Discussão dos Resultados	93
6.2.7.2.1. Ensaio de Flexão	93
6.2.7.2.2. Ensaio de Impacto	94
6.2.8. Caracterização Estrutural (validação do método experimental)	95
6.2.9. Comparação dos Resultados	99
6.3. Definição e Produção de Novos Compósitos	101
6.3.1. Utilização de <i>Software</i> para Modificação de Ferramentas Produtivas	102
6.3.2. Produção do Novo Molde	107
6.3.3. Processamento das Novas Placas	109
6.3.4. Ensaio às Novas Placas	111
6.3.5. Apresentação e Discussão dos Resultados.....	113
6.3.5.1. Ensaio de Flexão	113
6.3.5.2. Ensaio de Impacto	117
6.4. Seleção do Material a Utilizar na Prototipagem.....	122
6.5. Desenho 3D e Validação do Design da Prancha	127
6.6. Simulação Estrutural	128
6.7. Molde para o Produto Final – Protótipo.....	133
6.8. Produção do Protótipo.....	135
6.9. Testes ao Protótipo.....	140
6.10. Avaliação do Potencial de Valorização no Fim de Vida do Produto	142
7. Conclusões	146
8. Sugestões para Trabalhos Futuros	148
9. Referências Bibliográficas.....	150
ANEXOS.....	152

Índice de Figuras

Figura 1 - Pranchas de <i>skate</i> vintage.	7
Figura 2 - Tecnologia Impact [®] .	8
Figura 3 - Representação esquemática dos materiais compósitos.	13
Figura 4 - Tipos de arquitetura 2D mais comuns.	19
Figura 5 - Tipos de arquiteturas de fibras 2D.	21
Figura 6 - Esquemas de possíveis constituições de laminados.	24
Figura 7 - Estrutura sanduiche comum.	26
Figura 8 - Esquema da técnica de moldação por contacto e seus principais constituintes.	28
Figura 9 - Normal procedimento de RTM.	30
Figura 10 - Modelo original da prancha de <i>longboard</i> da empresa <i>VigTab</i> .	31
Figura 11 - Dimensões das placas a produzir.	32
Figura 12 - Esquemas que revelam os materiais e disposição dos mesmos nas placas a produzir.	34
Figura 13 - a) Esquema do processo. b) Imagem real do processamento por infusão.	36
Figura 14 - a) Placa desmoldada referente à placa <i>LongB_1</i> . b) Corte transversal da placa <i>LongB_1</i> . c) Corte transversal da placa <i>LongB_2</i> . d) Corte transversal da placa <i>LongB_3</i> . e) Corte transversal da placa <i>LongB_4</i> .	37
Figura 15 - Provetes com as dimensões normalizadas retirados das placas infundidas.	37
Figura 16 - Equipamentos utilizados nos ensaios às placas em material compósito.	40
Figura 17 - Gráfico de Tensão/Deformação para a placa <i>LongB_3</i> .	40
Figura 18 - Gráfico de Tensão/Deformação para a placa <i>LongB_4</i> .	41
Figura 19 - a) Imagem ilustrativa dos defeitos existentes dentro das placas. b) Inconformidades nos ensaios de flexão.	42
Figura 20 - a) Chapa utilizada. b) Apoios retangulares.	42
Figura 21 - Nova placa a infundir com dimensão para 8 novos provetes de flexão.	43
Figura 22 - Gráfico de Tensão/Deformação para a placa <i>LongB_1</i> .	43
Figura 23 - Gráfico de Tensão/Deformação para a placa <i>LongB_2</i> .	44
Figura 24 - Gráfico de Tensão/Deformação para a placa <i>LongB_Flex_3</i> .	45
Figura 25 - Gráfico de Tensão/Deformação para a placa <i>LongB_Flex_4</i> .	45
Figura 26 - Gráficos obtidos para os ensaios de impacto realizados à placa <i>LongB_1</i> .	47
Figura 27 - Gráficos obtidos para os ensaios de impacto realizados à placa <i>LongB_2</i> .	48
Figura 28 - Face inferior de um provete da placa <i>LongB_2</i> testado ao impacto.	48
Figura 29 - Gráficos obtidos para os ensaios de impacto realizados à placa <i>LongB_3</i> .	49

Figura 30 - Existência de fibras secas no interior do provete testado ao impacto.	50
Figura 31 - Gráficos obtidos para os ensaios de impacto realizados à placa <i>LongB_4</i> .	50
Figura 32 - Prancha utilizada para a análise <i>benchmarking</i> .	51
Figura 33 - Provetes retirados da prancha de <i>longboard</i> produzida pela empresa <i>VigTab</i> .	52
Figura 34 - Método representativo dos ensaios à flexão realizados para a análise <i>benchmarking</i> .	53
Figura 35 - Danos causados nos provetes de impacto pelo dardo durante os ensaios de impacto.	53
Figura 36 - Gráficos obtidos para os ensaios à flexão realizados durante a análise de <i>benchmarking</i> .	54
Figura 37 - Descolagem da camada superior do restante laminado de madeira.	54
Figura 38 - Gráficos obtidos para os ensaios ao impacto obtidos durante a análise de <i>benchmarking</i> .	55
Figura 39 - Disposição comparativas das curvas médias relativas aos diferentes materiais testados à flexão no âmbito da produção de uma prancha de <i>longboard</i> protótipo.	56
Figura 40 - Disposição comparativas das curvas médias relativas aos diferentes materiais testados ao impacto no âmbito da produção de uma prancha de <i>longboard</i> protótipo.	57
Figura 41 - Imagem retirada de uma tabela interativa do Excel.	59
Figura 42 - Tabela retirada do Excel da qual resulta a melhor placa de acordo com a importância dada a cada propriedade dos materiais.	59
Figura 43 - Molde 3D para a prancha de <i>longboard</i> .	60
Figura 44 - a) Molde após maquinação; b) Molde final.	61
Figura 45 - Protótipo final da prancha de <i>Longboard</i> .	64
Figura 46 – Laminados selecionados a produzir no desenvolvimento preliminar desta dissertação.	73
Figura 47 - Disposição dos provetes nas placas a desenvolver.	74
Figura 48 – Bloco de Sikablock onde será maquinado o molde para as placas a produzir por RTM.	75
Figura 49 - Molde 3D para RTM. a) Parte superior; b) Parte inferior	76
Figura 50 – a) Maquinação do molde; b) Molde maquinado	78
Figura 51 - Molde final	78
Figura 52 - Folheado de madeira de eucalipto.	79
Figura 53 - Encaixe do núcleo no molde para RTM.	79
Figura 54 - Corte das fibras de carbono com as dimensões exatas.	80
Figura 55 - Sistema adotado para realização do processamento por RTM.	81
Figura 56 – Placas obtidas por RTM, para retirar provetes normalizados	82
Figura 57 - Provetes finais para os ensaios.	82
Figura 58 - Ensaio de flexão em 3 pontos.	83
Figura 59 - Provetes normalizados para os ensaios de flexão	83
Figura 60 - a) Provetes de impacto; b) Provetes de impacto após realização dos ensaios ao impacto.	84

Figura 61 - Gráfico de tensão/deformação para a placa <i>SkateB_RTM_Balsa</i> .	85
Figura 62 - Falha resultante nos provetes da placa <i>SkateB_RTM_Balsa</i> .	86
Figura 63 - Gráfico de tensão/deformação para a placa <i>SkateB_RTM_Madeira</i> .	87
Figura 64 - Resultados dos ensaios de impacto para o compósito <i>SkateB_RTM_Balsa</i> .	89
Figura 65 - Resultados dos ensaios de impacto para o compósito <i>SkateB_RTM_Madeira</i> .	89
Figura 66 - Prancha de <i>skate</i> utilizada para fazer a análise de <i>benchmarking</i> .	91
Figura 67 - a) Marcação dos provetes; b) Provetes finais cortados na serra de fita.	91
Figura 68 - a) Provetes de flexão; b) Ensaio de flexão	92
Figura 69 - a) Provetes para ensaios de impacto; b) Provetes danificados pelo impactador.	93
Figura 70 - Gráficos Tensão/Deformação obtidos na análise de <i>benchmarking</i>	93
Figura 71 - Curvas referentes aos ensaios de impacto.	94
Figura 72 - Modelo utilizado na simulação estrutural.	96
Figura 73 - Distribuição das tensões nos provetes.	97
Figura 74 - Distribuição dos deslocamentos dos provetes.	97
Figura 75 - Gráfico referente à simulação estrutural em Abaqus.	98
Figura 76 - Placas a desenvolver no âmbito da produção da prancha de <i>skateboard</i> .	101
Figura 77 - Localização na placa e dimensão dos provetes a produzir.	102
Figura 78 - Infusão realizada às composições de fibras presentes nas placas a produzir.	104
Figura 79 - Locais de entrada e "saída" de resina.	105
Figura 80 - Dados referentes ao tempo de enchimento das placas nas diferentes camadas.	105
Figura 81 - Dados referentes à pressão ao longo da placa durante o enchimento.	106
Figura 82 - Dados referentes ao tempo de permanência do material no interior das placas.	106
Figura 83 - Molde para produção das placas em RTM.	107
Figura 84 - Lâmina de madeira a utilizar nos laminados.	109
Figura 85 - Fibras a utilizar no fabrico das placas <i>SkateB</i> .	110
Figura 86 - a) Placa desmoldada referente à placa <i>SkateB_1</i> ; b) Corte transversal da placa <i>SkateB_1</i> . c) Corte transversal da placa <i>SkateB_2</i> . d) Corte transversal da placa <i>SkateB_3</i> . e) Corte transversal da placa <i>SkateB_4</i> .	111
Figura 87 - Provetes com as dimensões normalizadas.	112
Figura 88 - Danos causados nos provetes durante os ensaios de flexão.	112
Figura 89 - Gráfico de tensão/deformação referente à placa <i>SkateB_1</i> .	113
Figura 90 - Gráfico de tensão/deformação referente à placa <i>SkateB_2</i> .	114
Figura 91 - Gráfico de tensão/deformação referente à placa <i>SkateB_3</i> .	114
Figura 92 - Gráfico de tensão/deformação referente à placa <i>SkateB_4</i> .	114

Figura 93 - Curva referente ao provete número 1 da placa <i>SkateB_1</i> .	116
Figura 94 - Gráfico referente à placa <i>SkateB_1</i> .	117
Figura 95 - Provete da placa <i>SkateB_1</i> após ensaio de impacto.	118
Figura 96 - Gráfico referente à placa <i>SkateB_2</i> .	119
Figura 98 - Gráfico referente à placa <i>SkateB_3</i> .	120
Figura 97 – Provete retirado da placa <i>SkateB_3</i> .	120
Figura 99 - Gráfico referente à placa <i>SkateB_4</i> .	121
Figura 100 - Provete completamente danificado pelo dardo.	122
Figura 101 - Disposição comparativa das curvas médias relativas aos diferentes materiais testados à flexão.	123
Figura 102 - Disposição comparativas das curvas médias relativas aos diferentes materiais testados ao impacto.	124
Figura 103 - Tabela de ponderação.	126
Figura 104 - Tabela retirada do Excel da qual resulta a melhor placa.	127
Figura 106 - Modelo do <i>skateboard</i> impresso em 3D.	128
Figura 105 - Modelo 3D desenvolvido no âmbito desta dissertação de mestrado.	128
Figura 107 - Modelo utilizado na simulação estrutural.	129
Figura 108 - Gráfico de Tensão/Deformação obtido através da simulação estrutural.	131
Figura 109 - Modelo 3D retirado da simulação estrutural.	132
Figura 110 - Modelo 3D da prancha para <i>skateboard</i> com referência aos locais mais sujeitos a tensão devido ao carregamento utilizado na simulação.	133
Figura 111 - Desenho 3D do molde para produção do skateboard protótipo.	134
Figura 112 - Preparação do molde para infusão do protótipo da prancha de <i>skateboard</i> .	135
Figura 113 - Molde final para o processo de infusão a vácuo.	135
Figura 114 – Corte da lâmina de madeira no LASER.	136
Figura 115 – Procedimento adotado.	137
Figura 116 - Novo modelo de processamento da prancha de <i>skateboard</i> protótipo.	139
Figura 117 - Protótipo final da prancha de <i>skateboard</i> .	139
Figura 118 - Aparato para realização do ensaio ao protótipo final.	140
Figura 119 - Comparação entre os dados obtidos na simulação estrutural e os dados obtidos no ensaio no pórtico.	141
Figura 120 - Possíveis destinos a aplicar à prancha de <i>skateboard</i> no fim do seu ciclo de vida;	143
Figura 121 - Diversos produtos produzidos a partir de pranchas <i>skateboard</i> .	144

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das resinas apresentadas nesta secção da dissertação.	17
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos três principais tipos de fibras à venda no mercado.	23
Tabela 3 - Propriedades das matérias-primas a utilizar nos compósitos a fabricar.	33
Tabela 4 – Valores médios calculados para diversas propriedades à flexão de cada material.	46
Tabela 5 - Valores médios calculados para cada propriedade ao impacto.	51
Tabela 6 - Valores máximos calculados com base nos dados retirados dos ensaios à flexão.	55
Tabela 7 - Valores máximos obtidos durante os ensaios ao impacto.	56
Tabela 8 - Propriedades finais detidas pelas diversas placas estudadas neste capítulo.	58
Tabela 9 - Comprimento e largura ideal para a prancha de <i>skate</i> .	70
Tabela 10 - Agrupamento de todos os requisitos.	70
Tabela 11 - Propriedades dos materiais a utilizar nas placas a produzir nesta produção preliminar.	72
Tabela 12 - Valores médios obtidos nos ensaios de flexão	87
Tabela 13 - Valores médios, dos máximos obtidos nos ensaios de impacto.	90
Tabela 14 - Valores médios obtidos nos ensaios de flexão.	94
Tabela 15 - Dados obtidos para o material do “ <i>skate</i> ” nos ensaios de impacto	95
Tabela 16 – Valores de força máxima, obtidos na simulação em Abaqus.	98
Tabela 17 - Propriedades obtidas nos ensaios e simulações para um deslocamento de 10 mm.	99
Tabela 18 - Propriedades médias obtidas para todos os materiais ensaiados ao impacto.	100
Tabela 19 – Valores médios calculados para diversas propriedades à flexão.	117
Tabela 20 - Valores médios calculados para cada propriedade ao impacto.	122
Tabela 21 - Propriedades finais detidas pelos diversos materiais estudados neste capítulo.	125
Tabela 22 - Dados referentes ao peso e espessura dos materiais estudados nesta dissertação.	126
Tabela 23 - Valores correspondentes ao máximo obtido em cada parâmetro na simulação.	131

1. Introdução

Esta dissertação, foi realizada em contexto industrial e contempla o desenvolvimento de dois produtos semelhantes, mas distintos na sua composição e solicitações mecânicas a que estão sujeitos em contexto real de utilização. A forma como o desenvolvimento dos produtos é realizada tem também diferenças, sendo que a principal assenta no facto de que a prancha de *skateboard* consiste no desenvolvimento integral de um novo produto, ao contrário do que acontece com a prancha de *longboard* cuja finalidade é aprimorar um produto existente no mercado. A incorporação de materiais compósitos na estrutura laminar das pranchas a executar é de extrema importância, uma vez que o mercado tem vindo a desenvolver produtos cada vez mais leves e menos espessos, sendo que os materiais compósitos estão na linha da frente para satisfazerem essas necessidades, uma vez que conseguem prover a prancha de uma maior resistência aos esforços realizados na sua superfície, sem comprometer a sua espessura e o seu peso total.

Relativamente à estrutura utilizada para a redação desta dissertação, optou-se por apresentar inicialmente o local da realização deste trabalho que se encontra no capítulo 2 desta dissertação. Posteriormente na secção 3 da dissertação estão descritos os principais objetivos deste trabalho de investigação. De forma a capacitar o autor de ferramentas eficazes para a realização de todas as tarefas propostas para esta tese de mestrado, foi realizada uma exaustiva revisão bibliográfica, presente no capítulo 4 deste trabalho, onde se estudou os aspetos mais importantes da indústria do *skateboard*, bem como técnicas e materiais relacionados com a área dos compósitos capazes de satisfazer eficazmente todos os aspetos da produção destes novos produtos.

O desenvolvimento e produção das pranchas de *longboard* e de *skateboard*, encontra-se presente no capítulo 5 e 6, respetivamente. Neles são apresentados os desenvolvimentos efetuados para a produção das pranchas, onde são especificados os materiais utilizados, métodos produtivos, ensaios realizados, dados obtidos e ainda a prototipagem e testagem dos produtos finais. De salientar o facto de que a organização escolhida para a apresentação de todos os procedimentos, resultados e análise dos mesmos seguiu a linha cronológica dos eventos, de modo a facilitar a utilização deste trabalho como um guia de processamento, para replicação dos passos seguidos. De notar que no desenvolvimento das duas pranchas surgem secções idênticas, pelo que as explicações dadas para a primeira prancha a

desenvolver (prancha de *longboard*) não serão repetidas de forma tão exaustiva aquando da produção da prancha de *skateboard* de modo a evitar secções idênticas.

Finalmente nas secções 7 e 8, são descritas as principais conclusões resultantes do trabalho de investigação, bem como sugestões para trabalhos futuros, respetivamente. As referências bibliográficas (capítulo 9) e os anexos são apresentados na parte final da dissertação.

2. Apresentação da Empresa - PIEP

O Polo de Inovação em Engenharia de Polímeros, *PIEP* [22], é uma entidade privada sem fins lucrativos, sediada no campus de Azurém da Universidade do Minho. A criação desta associação, teve a finalidade de colmatar as necessidades de I&DT dos industriais da área dos polímeros, contribuindo para o reforço da competitividade da indústria dos plásticos e dos moldes, pela conceção de novos materiais, produtos inovadores e ainda novas ferramentas e processos produtivos. A grande valia da criação do PIEP, foi disponibilizar num único local os recursos humanos, a infraestrutura física e os meios necessários, para atender em tempo oportuno às necessidades de inovação e desenvolvimento tecnológico das empresas do setor.

A ligação com o Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho (DEP-UM), proporciona a constante interligação entre o contexto universitário e o meio empresarial, fomentando uma constante formação de recursos humanos, dotando-os de competências práticas importantes para o contexto industrial. Permite ainda, formalizar uma ligação entre a universidade, o setor industrial e as dezenas de parceiros nacionais e internacionais que as empresas possuem, promovendo a participação das empresas nacionais em projetos de I&DT europeus.

Desde a sua criação, que o objetivo da instituição é converter ideias em produtos, fomentando o desenvolvimento de produtos quer internamente, quer com participação em consórcios com empresas nacionais e internacionais. Os projetos que residem no portfólio da empresa, são fruto do trabalho desenvolvido pelos colaboradores do polo de inovação em engenharia de polímeros, que em estreita articulação com os diversos empresários industriais, têm um papel muito importante na corporalização de ideias. A atividade do polo, tem-se desenvolvido nas diversas áreas afetas à engenharia de polímeros, das quais se destacam a defesa, a aeronáutica, a aeroespacial, o setor das embalagens, construção civil, o setor automóvel, a saúde e dispositivos médicos, equipamentos eletrónicos, entre outros.

O desenvolvimento de novos projetos de engenharia, é o ponto forte do PIEP, sendo que a oferta tecnológica existente no polo de inovação de engenharia de polímeros, proporciona suportar, total ou parcialmente, o processo de desenvolvimento de novos produtos, atestando o desenvolvimento da matéria-prima, engenharia do produto, processos de fabrico e testes funcionais ao produto final. Dentro das instalações da empresa, existe uma vasta gama de maquinaria, que pretende ir ao encontro do desenvolvimento do produto, qualquer que seja a natureza do artigo. Pode-se destacar a caracterização de materiais (mecânica, térmica, reológica, química e ótica), o desenvolvimento de materiais (composição, formulações, bio polímeros, nano materiais, compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras e adesivos poliméricos), a engenharia de produto (cálculo computacional avançado, modelação e otimização comportamental, modelação e otimização de processos e conceptualização de ferramentas produtivas) e por fim as tecnologias de processamento (extrusão, injeção e tecnologias de prototipagem e produção de materiais compósitos).

3. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação, é a obtenção de materiais compósitos tecnologicamente avançados, que possam ser utilizados em produtos desportivos, mais propriamente em pranchas de *longboard* e *skateboard*. Numa fase inicial do projeto, foi delineado um plano de trabalhos que convergia para a prototipagem de uma prancha de *Skateboard* de alta performance. Com o evoluir do projeto, e após sucessivos contactos com a empresa *Cis Madeira* - empresa parceira do PIEP no projeto *Valor Nature* - ficou acordado a produção não só de uma prancha de *skateboard*, mas também de uma prancha *longboard*. Desta forma foi envolvida uma terceira empresa no projeto, a *VigTab*, detentora do design a usar na prancha *longboard*.

Os materiais a utilizar, terão de ser selecionados com base nos requisitos das diferentes pranchas e posteriormente testados em contexto real de funcionamento após a produção de dois protótipos funcionais (um para prancha de *longboard* outro para a prancha de *skateboard*).

Tendo por base o que foi mencionado no paragrafo anterior os objetivos desta dissertação de mestrado são os seguintes:

- Definição de requisitos (*Skateboard/ Longboard*);
- Identificação e seleção de materiais (*Skateboard/ Longboard*);

- Desenvolvimento do produto baseado em modelação 3D (*Skateboard*);
- Simulação estrutural de previsão do comportamento do produto (*Skateboard*);
- Testes e ensaios de materiais (*Skateboard/ Longboard*);
- Produção das ferramentas produtivas (*Skateboard/ Longboard*);
- Produção do protótipo (*Skateboard/ Longboard*);
- Testes ao produto final (*Skateboard/ Longboard*);
- Avaliação do potencial de valorização no fim de vida do produto (*Skateboard*);

4. Revisão Bibliográfica

A presente revisão bibliográfica destinou-se essencialmente a permitir o adquirir de conhecimentos que permitissem atingir os objetivos do trabalho relativos ao desenvolvimento de uma nova prancha de *skateboard* em material compósito. Foi possível realizar uma revisão de estudos desenvolvidos anteriormente por outros autores nesse campo e melhor conhecer o estado atual de desenvolvimento tecnológico das pranchas de *skate*.

A revisão efetuada, para além de ter permitido conhecer melhor o atual estado de desenvolvimento dos processos utilizados no fabrico e construção das pranchas de *skate* usadas atualmente, evitará a repetição de erros anteriormente cometidos e contribuirá para ultrapassar rapidamente muitos dos problemas que já foram resolvidos por outros investigadores. A presente revisão bibliográfica permitiu, portanto, conhecer o que já foi realizado no âmbito do tema objeto deste trabalho e pretende-se que possa vir a ser útil como base do novo trabalho a desenvolver no futuro.

A revisão bibliográfica efetuada não só permitiu conhecer a história do desenvolvimento das pranchas de *skateboard*, mas também referenciar os métodos, materiais e tecnologias usados na sua produção. Efetuou-se ainda uma revisão dos principais materiais e formulações que poderão vir a ser usados no futuro trabalho a desenvolver, bem como dos processos produtivos que melhor se adequam à produção das pranchas (*Longboard* e *Skateboard*). O facto de apenas ser realizada a revisão do estado da arte para a prancha de *skateboard*, assenta no facto de que os principais fatores da construção das pranchas, como os materiais utilizados e os métodos de fabrico, serem muito semelhantes pelo que não se considerou necessário realizar uma pesquisa exaustiva para a prancha de *longboard*.

4.1. História do *Skateboard*

Embora haja indícios da existência de produtos similares desde 1903, a prática de *skateboard* começou a ser mais comum por volta de 1950 em dois locais distintos, na Califórnia e no Havai. Este desporto, surgiu pela mão de aficionados pelo surf, que queriam transpor a sua paixão para o asfalto de modo a poder “surfear” durante todo o ano. Em meados do século XX, os *skates* existentes eram bastante diferentes das pranchas atuais e apenas possuíam uma prancha lisa onde eram anexadas quatro pequenas rodas. Sendo, desde os primeiros tempos, usados tanto como meio de transporte como objeto para realização de acrobacias, os *skates*, atualmente, são usados sobretudo com intuítos recreativos.

Tratando-se dum produto com desenvolvimento muito influenciado pelos períodos instáveis e sazonais da “moda”, as maiores evoluções e inovações dos *skates*, nomeadamente ao nível do projeto e materiais utilizados, verificaram-se em épocas em que a sua utilização teve maior sucesso de modo a proporcionar a realização de manobras cada vez mais acrobáticas e até então impossíveis de executar. As principais modificações que estiveram na base do desenvolvimento dos *skates* que hoje conhecemos, foram: a utilização das rodas de poliuretano que os tornaram muito mais velozes, a evolução do seu projeto (design), nomeadamente ao nível da forma do nariz (*nose*) e da cauda na zona traseira (*tail*) das pranchas e, sobretudo, a utilização de estruturas laminares na sua construção que, para além de estabelecer um compromisso muito mais eficaz entre rigidez e flexibilidade do folheado, permitiu uma utilização muito mais agressiva das pranchas, incrementaram o seu tempo de vida e diminuíram substancialmente o seu peso.

A seca regional que ocorreu durante os anos de 1975 e 1976 na Califórnia foi curiosamente um dos períodos que mais contribuiu para o aumento de utilizadores, das acrobacias e desenvolvimento dos *skates*, ao proporcionar uma infinita variedade de novos terrenos para a prática do *skateboard*, nomeadamente, a possibilidade de se utilizar valas de drenagem e piscinas vazias como locais para a realização de truques, acrobacias e habilidades variadas com *skates*. Dada toda esta nova panóplia de formas de utilizar uma prancha de *skateboard*, é assim que nascem, em 1977, as seguintes 4 categorias de competição profissional da modalidade: *downhill*, *slalom*, *freestyle* e *bowl*.

Pela primeira vez a história da modalidade, no ano de 2021, o *skateboard* fará parte dos jogos olímpicos pelo que valorizará ainda mais quer este trabalho quer a modalidade em geral.

Atualmente, existem inúmeros tipos de *skate*, que variam em termos de design, materiais usados e ainda na incorporação de novos componentes não essenciais ao funcionamento do produto. Tornou-se ainda um desporto praticado por milhões de pessoas que se têm como lema: “*O skateboard não é apenas um modo de andar por aí em cima da prancha a fazer umas acrobacias, mas sim um modo de vida*” [1][2].

4.2. Materiais Usados

Como se referiu, a década de 1970 ficou para sempre marcada por ser a que mais contribuiu para o sucesso do *skateboard*. Foram anos em que as inovações implementadas nos *skates* contribuíram para o sucesso de vendas e em que a grande simbiose criada entre praticantes e fabricantes permitiram melhorar consideravelmente o manuseamento e os níveis de segurança na prática de *skateboard*.

Com o passar dos anos, foram sendo introduzidos novos materiais na construção do *skate*, que de certa forma respondiam à procura dos praticantes. O evoluir da tecnologia, dotou os projetistas de outras ferramentas que não detinham em anos anteriores, que de certa forma levou a adoção de uma maior variedade de materiais.

Verifica-se que a madeira teve sempre e continua a ter um papel fundamental na construção dos *skates*. Isso deve-se, sobretudo, ao seu reduzido custo e ainda à excelente relação entre a rigidez e a flexibilidade apresentada pelo material em condições adequadas de humidade interna. Atualmente, vários tipos de madeira são usados na construção de *skates* consoante as especificações finais requeridas pelo produto, embora o ácer canadiano (*Canadian Maple*) seja o mais usual, uma vez que é uma árvore que cresce em ambientes muito frios o que lhe confere excelentes propriedades mecânicas.

Com a introdução de estruturas sanduiches e laminares na construção das pranchas, que permitiam diminuir o peso e melhorar simultaneamente o seu desempenho, novos materiais passaram a ser usados em conjugação com a madeira, de modo a garantir o seu superior comportamento quer a nível da flexibilidade e rigidez como a nível de custo de produção. Materiais como o alumínio e o titânio são usados para revestir a madeira e aumentar a rigidez da prancha formando aquilo que é conhecido pelo *ti-wood*, no caso do uso de titânio e madeira [3].

Apesar de usadas com a criação do *G&S Fiberflex* nos anos 70, as fibras de vidro são muito pouco utilizadas nos tempos presentes (no mercado das pranchas de *skateboard*). Em substituição das fibras de vidro, as fibras de carbono têm vindo a ser cada vez mais usadas atualmente, contribuindo para um

importante desenvolvimento de pranchas de *skate* por conciliarem a sua baixa densidade com excelentes propriedades mecânicas. Por sua vez, as fibras aramida têm sido usadas em escala muito inferior por apresentarem custos bastante elevados face às melhorias de propriedades que permitem alcançar. Todas as fibras de reforço referidas são normalmente usadas em combinação com resinas termoendurecíveis, na sua maioria epoxidicas, que conferem ao *skate* excelentes propriedades ao impacto. São ainda, por vezes, usadas resinas de poliuretano nos bordos da prancha com o intuito de os suavizar.

A injeção de termoplásticos também é muito usada na produção de grandes quantidades de *skates* para crianças, por se tratar duma tecnologia que permite fabricar, a muito baixo custo, este tipo de produto, que é muito menos exigente do ponto de vista mecânico. Atualmente, o *ABS* (acrilonitrilo butadieno estireno) é o material mais usado em *skates* moldados por injeção [2][3].

4.3. Tecnologias Atuais

O desenvolvimento das pranchas de *skateboard*, encontra-se essencialmente baseado na evolução dos materiais e estruturas usados na construção das pranchas e que permitiram que elas fossem cada vez mais leves e capazes de suportar cargas mais elevadas e prolongadas. Atualmente, o *skate* considerado comum/padrão apresenta normalmente uma estrutura laminar construída com 7 camadas de madeira (*7-Ply*). Variando o tipo de madeira e a espessura de cada camada, podem-se obter diferentes propriedades no que diz respeito à rigidez, flexibilidade, durabilidade e características de mobilidade da prancha.

As construções que historicamente obtiveram maior sucesso foram-se mantendo presentes até aos *skates* atuais, como é o caso da solução *7-Ply* atrás referida. Outras soluções de construção propostas

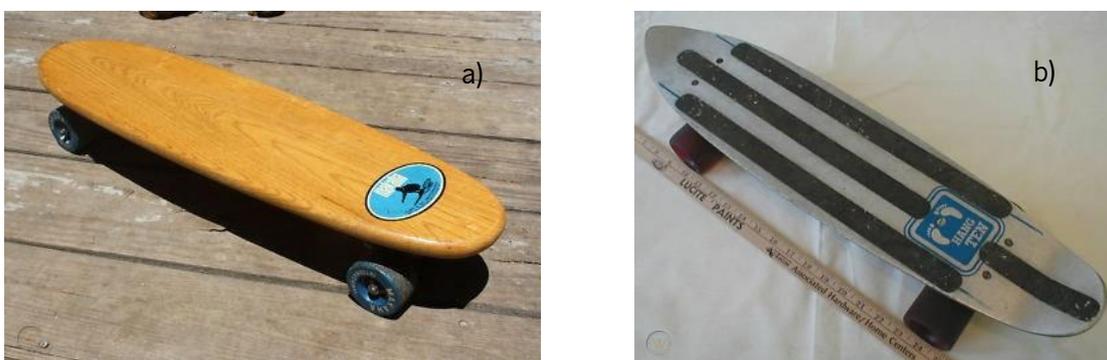


Figura 1 - Pranchas de skate vintage. a) Makaha Phil Edwards; b) Hang Ten Aluminum. Retiradas de: www.worthpoint.com/

falharam e foram abandonadas, como sejam os casos das pranchas *Makaha Phil Edwards* e *Hang Ten Aluminum* (presentes na *Figura 1*) que eram, respetivamente, constituídas por apenas uma camada de madeira com espessura superior a 10 mm e por um núcleo em madeira revestido por alumínio.

Atualmente, com exceção das pranchas injetadas em termoplástico, que se destinam ao uso exclusivo de crianças, todas as pranchas possuem uma estrutura laminar.

A estrutura laminar das pranchas atualmente existentes no mercado, podem ser do mesmo material ou apresentar conjugações de materiais diferentes. Considerando as construídas exclusivamente em madeira, existem as pranchas *8-Ply*, constituídas por 8 camadas de madeira coladas com adesivo adequado, que apesar de serem mais reforçadas e proporcionarem uma maior suavidade nos movimentos são bastante mais pesadas que os *skates* tradicionais de 7 camadas (*7-Ply*), o que dificulta algumas acrobacias. Outras estruturas exclusivamente construídas em madeira, apresentam diferentes formas (*design*) nas extremidades (*nose* e *tail*), espessuras das camadas e/ou ainda tipos de madeira. Por vezes, as colas com base aquosa são ainda substituídas por outras quimicamente mais fortes ou ainda uma resina termoendurecível, normalmente epóxico, para efetuar a colagem entre camadas. A maioria das alterações que as pranchas vão apresentando visam a redução do seu peso e o aumento do impulso dado ao praticante (efeito mola), que está intimamente ligado a um som característico das pranchas de *skateboard*. Este impulso é habitualmente designado por *pop* no mundo do *skateboard*. São bons exemplos de emprego deste tipo de soluções, os seguintes modelos de pranchas: a *Featherligh*, a *R7*, a *Resin Hardrock*, bem como outros menos conhecidos do público em geral.

Os *skates Impact*[®], construídos pela *Almost Skateboard* [21], são bons exemplos de incorporação de vários materiais na mesma prancha, nomeadamente de fibras de carbono. O local onde as fibras são



Figura 2 - Tecnologia Impact[®] com os discos, película ovalada e camada total em fibra de carbono. Retirado de: www.almostskateboards.com

aplicadas, dependem do modelo do *skate*, do fim a que se destinam (uso profissional, para pessoas com excesso de peso, etc) e do valor que se está disposto a desembolsar pelo *skate*. Os modelos (*Support*, *Plus* e *Double*) dos *skates Impact®*, usam 8 lâminas e dois discos de resina epóxico reforçada com fibras de carbono localizados acima dos eixos das rodas, de modo a reforçar essa zona contra eventuais danos ou roturas precoces. Todas as lâminas podem ser em madeira, como acontece nos modelos *Impact® Support* e *Impact® Plus*, ou usa-se a oitava camada em resina epóxico reforçada com fibras de carbono, tal como acontece no modelo *Impact® Double*. O modelo *Impact® Plus* possui ainda uma pequena película ovalada de epóxico reforçado com fibras de carbono na superfície da prancha. Na *Figura 2*, é possível visualizar a otimização dos modelos em questão. Existe ainda um outro tipo de modelo, o *Impact Light®*, que utiliza apenas 7 camadas de madeira, sem discos de fibra de carbono e incorpora a película ovalada de epóxico reforçado com fibras de carbono no interior da prancha. Estas tecnologias aumentam significativamente o “*pop*”, bem como a durabilidade da prancha. Acima de tudo, estas características são alcançadas sem comprometer o peso e espessura da prancha do *skate*.

Ainda com a incorporação das fibras de carbono na estrutura de madeira, surgiu recentemente o *Fligth Deck* da empresa *Powel Peralta®* [40]. Esta prancha apresenta 5 lâminas de madeira com 1,7 mm de espessura cada uma, cobertas por carbono (uma camada de carbono de cada lado da prancha), melhorando as propriedades à flexão da prancha.

A incorporação de fibras de vidro, embora menos usual, ainda é comum nos modelos *Fibertech®* da *EMillion Skateboards* [23]. Eles usam as habituais 7 camadas de madeira reforçadas por uma camada superior de epóxi reforçado com fibras de vidro, que permite aumentar ligeiramente a resistência mecânica da prancha.

Outro material de reforço menos usado no fabrico das pranchas são as fibras de aramida. Elas são, no entanto, usadas num modelo bem conhecido de pranchas de *skate*, as *P2 (Pro2)*. Elas usam apenas 6 camadas de ácer do Canadá reforçadas por uma lâmina ovalada de fibras de aramida impregnadas por epóxico, que se destina a suportar as restantes camadas, a garantir uma boa distribuição da pressão ao longo de toda a prancha e a contribuir para um aumento da resistência e durabilidade das pranchas. Estes *skates* destacam-se por apresentarem uma espessura muito reduzida, boa resistência mecânica e permitirem um *pop* muito superior ao das outras pranchas comuns.

Para além dos diferentes materiais e estruturas usadas na sua produção, existem ainda outros componentes que podem ser incorporados nas pranchas do *skate*, de modo a facilitar certas manobras e conferir resistência ao laminado. Os mais comuns são os *rails*, cuja função é facilitar o deslizamento da prancha e certas acrobacias, e os *shock pads* cujo principal objetivo é aumentar a distância das rodas à prancha de modo a que se possa curvar melhor em andamento, uma vez que as rodas deixam de colidir na prancha. A utilização de *shock pads* elastoméricos permitem ainda absorver mais adequadamente os impactos, proporcionando um andamento mais suave ao praticante. Outro componente com menos incorporação nos *skates*, é o *nose guard*, que se destina a aumentar significativamente o seu tempo de vida útil, diminuindo problemas como a delaminação [1] [2].

4.4. Métodos de Produção

As tecnologias usadas no fabrico das pranchas de *skate* não têm sido objeto de modificações muito significativas ao longo dos tempos. Isso deve-se ao facto de não se pretender, geralmente, a produção de um grande número de peças e as técnicas usadas permitirem incorporar os materiais e componentes normalmente usados de forma simplificada. Embora os diferentes fabricantes introduzam sempre ligeiras alterações no seu próprio fabrico, o conceito geral do método usado é praticamente o mesmo. A tecnologia de fabrico é mais facilitada quando se utiliza apenas a madeira como matéria-prima do que quando se utilizam diferentes materiais na construção da estrutura multicamada das pranchas do *skate*. A utilização de diferentes materiais envolve normalmente a utilização de mais etapas e tecnologias diferentes.

O método usado para produzir uma prancha comum, constituída por 6 a 9 camadas de madeira contraplacada, comporta o empilhamento e a colagem sob pressão das diferentes camadas de modo a obter-se a estrutura laminar final desejada. Após aplicação da cola adequada entre lâminas, o material a empilhar é normalmente colocado num molde fabricado em XPS (Poliestireno extrudido) ou noutro material adequado (como alumínio ou aço) dependendo do uso de vácuo ou pressão hidráulica, respetivamente, e com forma próxima da final que se pretende para a prancha. O material é então pressionado dentro do molde através da utilização de prensas ou por criação de vácuo. Após deixar a estrutura no molde sob pressão por forma a garantir uma adequada secagem da cola (muitas vezes, cerca de 8 horas), o empilhamento consolidado é retirado do molde de forma a poder ser sujeito às operações de corte de forma e de acabamento pretendidos para a prancha final.

A espessura e número de camadas usadas na prancha influenciam o seu peso, flexibilidade e características de movimentação. As pranchas existentes no mercado apresentam normalmente espessuras que rondam os 12,7 mm (meia polegada), no entanto os desenvolvimentos atuais, têm-se focado em diminuir esta espessura e conseqüentemente o peso das pranchas.

As pranchas que combinam diversas matérias-primas na sua estrutura laminar, como madeiras e laminados compósitos, podem muitas vezes ser produzidas por um método tradicional semelhante ao referido anteriormente, no entanto, alguns exigem a aplicação de outras tecnologias como, por exemplo, a infusão por vácuo, de modo a que se possa assegurar uma boa impregnação da resina ao longo das fibras. As placas de madeira podem ser coladas a priori entre si, efetuando-se posteriormente a incorporação das fibras e a infusão da resina. Ou então, efetuar de uma só vez e simultaneamente, durante a infusão por vácuo da resina (normalmente, de epóxido), não só a impregnação das fibras de reforço como a ligação entre si das lâminas de madeira. As pranchas produzidas por este método são sempre sujeitas a operações de acabamento que se destinam a conferir melhores propriedades, principalmente estéticas, ao produto final. Apesar deste método produtivo ser o mais adequado como processo, a moldação manual das fibras é o mais comum, visto acarretar não só menos dificuldades técnicas, mas também menos custos de processamento, no entanto as propriedades que são obtidas por este processo são bem inferiores às que se obtêm, por exemplo, por infusão de resina a vácuo. Esta técnica torna possível a incorporação de fibras entre as camadas de madeira sem maquinaria dos folheados, o que é importante tendo em conta as tecnologias para as pranchas que têm aparecido nos últimos anos [1][2][4].

4.5. Materiais Compósitos

Um material compósito é constituído por uma conjugação de dois ou mais materiais, com naturezas distintas. Esses materiais complementam-se, permitindo a obtenção de um novo material com melhores características e desempenho mecânicos para uma dada aplicação, que os constituintes não conseguem apresentar em separado. As misturas por vezes têm efeitos simbióticos, na medida em que o aumento das características é exponencial. Na formação de um material compósito, tem-se em conta o uso de matrizes e de reforços, considerando para tal que os últimos são uma fase dispersa e descontínua, localizada numa fase contínua, a matriz. Quando no mesmo material compósito existe mais que um reforço de naturezas distintas, estamos perante um compósito híbrido. De notar ainda que os dois

constituintes, matriz e reforço, mantêm a sua estrutura química intacta, pelo que distribuição de cargas em todo o compósito é assegurada por uma boa interface entre a resina e as fibras.

Por norma, a maioria das matrizes usadas nos materiais compósitos aplicados atualmente são de índole polimérica, podendo, no entanto, ser metálicas ou ainda cerâmicas. Quanto aos reforços, estes podem ser naturais, metálicos, cerâmicos ou poliméricos, e apresentarem-se sob a forma de pequenas partículas e/ou fibras moídas, curtas, longas ou contínuas. Estes reforços, responsáveis por conferirem boas propriedades mecânicas aos materiais compósitos, são normalmente mais rígidos, resistentes e duros que a matriz.

O trabalho que se pretende desenvolver, tem foco principal na utilização de materiais compósitos de matriz polimérica. Estes têm vindo a ser cada vez mais aplicados, tanto a nível industrial como a nível doméstico e em domínios tão diversos como os que se estendem desde o desporto até à construção civil, passando ainda pela aeronáutica e transportes. As principais razões que levam à substituição de materiais convencionais por compósitos em tantos domínios são: a baixa massa específica, uma elevada resistência à corrosão e ainda as excelentes propriedades mecânicas que apresentam. Outras razões ligadas ao sucesso dos materiais compósitos, relacionam-se com a possibilidade destes, contrariamente ao que acontece com os materiais homogêneos como os metais, se ajustarem às características pretendidas em determinadas aplicações devido às propriedades anisotrópicas das fibras (melhores propriedades no sentido longitudinal da fibra comparativamente à direção transversal a esta), permitindo diminuir o peso da peça final uma vez que não é utilizado material que trabalhe numa direção que não será solicitada, o que não acontece com os metais visto que são materiais isotrópicos. Permitem ainda a obtenção de formas complexas e, conseqüentemente, mais adequadas a diferentes funcionalidades pretendidas, uma vez que são providas de materiais mais simples para modificar.

Segundo Matthews [5], os materiais compósitos podem ser classificados pelo esquema presente na *Figura 3*.

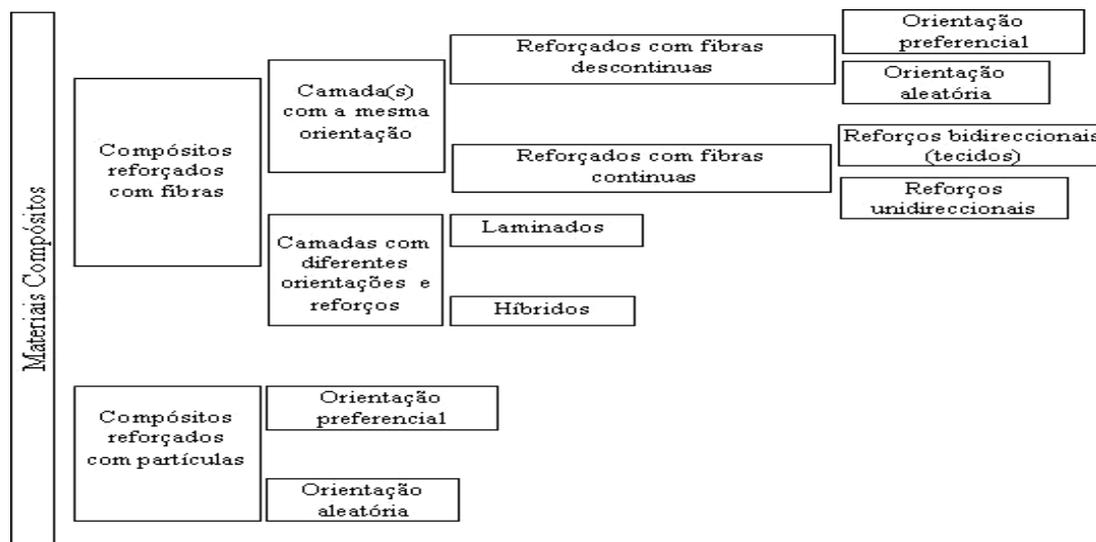


Figura 3 - Representação esquemática dos materiais compósitos. Adaptado de: [5]

Pode ainda referir-se que os materiais compósitos permitem a incorporação de diversos aditivos destinados a melhorarem determinadas características. Aditivos como a areia são muito comuns quando se pretende aumentar a resistência à abrasão do material e outros, como o carbonato de cálcio, que para além de diminuírem o custo final do compósito, permitem melhorar substancialmente o acabamento superficial das peças (no caso de se necessitar de um acabamento *mate*). De modo a aumentar a resistência ao impacto podem ser adicionados à mistura pigmentos de origem elastomérica, normalmente conhecidos por modificadores de impacto. São ainda aditivos de grande utilização nos materiais compósitos: os absorvedores UV, os retardadores de chama, pigmentos que lhes conferem cor final, os destinados a melhorar a sua resistência à corrosão e ainda aqueles que impedem a contração da peça no final do processamento. [5 -10, 27, 30].

4.5.1. Matrizes

Como se referiu anteriormente, entende-se por matriz a fase contínua presente no material compósito. A resina polimérica, para além de fixar no espaço as fibras que esta impregna, tem como funções transmitir aos reforços as cargas que são aplicadas ao produto, fazer a ligação entre todos os reforços e ainda proteger os mesmos reforços do ambiente exterior (químico e mecânico). Contudo, a resina a ser utilizada para determinada aplicação deve ser selecionada de modo a que se possa obter uma boa compatibilidade entre ela e as fibras a utilizar. É ainda importante que a matriz tenha uma densidade

reduzida e possa resistir bem às condições de serviço em que o compósito vai ser usado (temperatura, humidade, corrosão, abrasão, etc.).

Os polímeros podem ainda ser do tipo termoplástico e/ou termoendurecível. Qualquer destes dois materiais, pode mais facilmente tomar a forma final pretendida para uma peça, que muitos dos outros materiais convencionais. Tendo em conta as operações de acabamento (retificações de montagem, polimentos, pinturas, etc.) a que têm, muitas vezes, de sujeitar-se peças construídas em qualquer material, os polímeros também ganham significativa vantagem neste aspeto relativamente a outros materiais convencionais por serem normalmente bastante mais fáceis de acabar e exigirem operações com muito menor custo envolvido. A grande diferença entre os termoplásticos e os termoendurecíveis reside no facto dos primeiros fundirem sempre por ação da subida da temperatura e os segundos serem materiais infusíveis após atingirem o estado sólido (após cura).

Os termoendurecíveis apresentam-se normalmente como líquidos de baixa viscosidade que passam ao estado sólido através duma reação química (cura) induzida por aditivos, habitualmente conhecidos como iniciadores, após a qual se tornam sólidos infusíveis. Durante a reação de cura ou reticulação as moléculas do polímero vão-se ligando umas às outras de modo a formar a estrutura tridimensional rígida correspondente ao material sólido infusível.

Em termos de volume de produção, os termoplásticos são muito mais usados que os termoendurecíveis por serem mais facilmente usados no fabrico de grande número de peças através de tecnologias de produção em série, como sejam a injeção, a extrusão, moldação-sopro, moldação rotacional, etc. Podendo os termoplásticos ser sempre fundidos, para além de reciclados, podem ser sempre reprocessados, o que os torna mais amigos do ambiente que os termoendurecíveis. Muitos dos termoplásticos são também mais resistentes ao impacto que os termoendurecíveis devido à melhor capacidade de deformação face às solicitações que lhes são induzidas, sendo, porém, menos resistentes que estes últimos à temperatura devido ao efeito que esta tem na sua estrutura molecular. Apresentando sempre níveis muito elevados de viscosidade no estado fundido, os termoplásticos são, no entanto, muito menos utilizados que os termoendurecíveis como matriz nos materiais compósitos reforçados com fibras longas devido às dificuldades que têm em conseguir impregná-las.

Tendo em conta o que acima se referiu e sendo objetivo do trabalho utilizar polímeros reforçados com fibras longas na construção dum pequeno número de *skateboard*-protótipo, a seleção das matrizes

recairá sobre as resinas termoendurecíveis. Como referenciado anteriormente, por se apresentarem como líquidos com viscosidade relativamente baixa à temperatura ambiente, as resinas termoendurecíveis permitem realizar a impregnação dos reforços com alguma facilidade. As superiores características termomecânicas também justificam a sua utilização em compósitos, que normalmente são aplicados em condições que requerem maiores exigências mecânicas, térmicas ou anticorrosivas do que aquelas onde se usam termoplásticos.

Tendo em conta as resinas termoendurecíveis atualmente disponíveis no mercado, constata-se que as mais utilizadas são poliésteres insaturados, seguindo-se as vinil ésteres, as epóxidas e, por fim, as fenólicas [11].

O custo bastante reduzido dos poliésteres insaturados e, sobretudo o bom compromisso propriedades/preço que apresentam, justificam a sua escolha como termoendurecível a utilizar na grande maioria das aplicações comerciais mais comuns, principalmente em compósitos com fibra de vidro. Para além disso, estas resinas também se apresentam como os termoendurecíveis, que tendo uma boa compatibilidade com todos os tipos de fibras de reforço, são mais fáceis de curar e processar. Dentro desta família de resinas, existem as resinas ortoftálicas, isoftálicas, teraftálicas e bisfenólicas. O que diferencia estes diferentes tipos de resinas de poliéster insaturado, é a utilização dos tipos de ácido saturado ou álcoois com o mesmo nome na sua formulação. A resistência à corrosão e as propriedades mecânicas também aumentam normalmente pela mesma ordem de tipo de resina que foi referida, entre as resinas ortoftálicas e as bisfenólicas.

As resinas epóxidas, embora apresentem normalmente custos superiores às dos poliésteres insaturados têm melhores propriedades mecânicas, resistência térmica e à corrosão. Possuem ainda uma absorção de água muito reduzida, sendo muito eficazes na impermeabilização de matérias compósitos. Elas são normalmente mais usadas do que os poliésteres insaturados em compósitos avançados usados em mercados mais exigentes, como são a indústria aeronáutica, aeroespacial e de defesa.

As resinas vinil éster, apresentam um comportamento intermedio entre as resinas epóxido e as de poliéster insaturado, tanto a nível de custos como a nível de características mecânicas e de resistência à corrosão. Deve-se ainda referir o facto das resinas fenólicas serem menos usadas que as anteriores, visto que normalmente são mais difíceis de processar e não permitem a obtenção de grande variedade

de cores, mas possuem um custo relativamente baixo, são auto extingüíveis, apresentam excelente isolamento elétrico e ainda propriedades mecânicas relativamente boas [5][8][29][30].

Na *Tabela 1* estão presentes indicações acerca das vantagens e desvantagens das resinas apresentadas anteriormente.

Torna-se extremamente importante efetuar uma correta seleção da matriz a utilizar num compósito porque a eficiência com que ele se comportará face aos diversos carregamentos mecânicos que tiver de suportar, muito dependerá também das características da matriz selecionada e, sobretudo, da interface gerada entre ela e as fibras de reforço usadas.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das resinas apresentadas nesta secção da dissertação.

Resinas	Vantagens	Desvantagens
Epoxídicas	Propriedades mecânicas excelentes	Difícil de processar (viscosidade)
	Excelente poder de adesão	Difícil evitar desgaste do molde (poder de adesão)
	Boa capacidade anti corrosão	Preço elevado
	Baixa contração	
	Boa estabilidade dimensional	
	Boa resistência térmica	
	Boas propriedades elétricas	
	Fácil coloração	
	Baixa absorção de água	
Poliéster Insaturado	Baixo custo	Alta contração
	Fácil de processar e curar	Estabilidade dimensional
	Boas propriedades mecânicas	Comportamento à chama
	Boa adesão à maioria das fibras	Baixa resistência à corrosão a bases, solventes e água a ferver
	Fácil coloração	
	Transparência	
	Bom comportamento à corrosão	
Fenólicas	Custo reduzido (relativamente ao epóxi)	Difícil de processar
	Auto extingüíveis	Difícil coloração
	Boa gama de resistência à temperatura	Baixa taxa de produção
	Bom isolamento elétrico	Altamente corroídas com bases fortes
	Boas propriedades mecânicas	
	Resistentes à corrosão (exceto bases fortes)	
Vinil Ésteres	Custo reduzido (relativamente ao epóxi)	Alta Contração
	Boa resistência à fadiga	Suscetível ao risco (baixa dureza)
	Boas propriedades anticorrosivas	Suscetível a degradação por raios UV
	Boa impregnação e adesão aos reforços	
	Fácil de processar	
	Bom comportamento à chama	
	Processo de cura muito rápido	

4.5.2. Reforços

Os reforços são os principais responsáveis pelas propriedades mecânicas que os componentes em material compósito apresentam. A seleção das fibras de reforços a utilizar no compósito é principalmente condicionada pelo fim a que se destina o produto final e deve ter por base a densidade, propriedades mecânicas, compatibilidade com matriz, facilidade de processamento (intimamente ligado à permeabilidade) e custo que as fibras disponíveis no mercado apresentam [27].

Os reforços disponíveis apresentam-se normalmente sob a forma de fibras, que podem ser curtas, longas ou contínuas. As fibras de reforço conferem ao material compósito uma elevada resistência na sua direção longitudinal, o que do ponto de vista de projeto se torna interessante, na medida em que se podem variar as características mecânicas em direções diferentes do produto final e também se podem orientar longitudinalmente as fibras nas direções em que os compósitos terão de suportar maiores cargas em serviço.

Comercialmente, as fibras estão disponíveis na forma de tecidos, mantas, fibras contínuas enroladas em bobines e, ainda, já pré-impregnadas com resinas. Os tecidos existentes atualmente no mercado, podem possuir diversos tipos de arquitetura no que diz respeito à forma como estão orientadas as fibras. A arquitetura pode ser a duas dimensões (seguindo apenas uma ou várias direções no plano) ou a três dimensões.

Dentro dos tecidos que com direções num plano, existem os lineares que seguem apenas uma direção, por exemplo 0° , 30° , ou 90° ou outra que se pretenda utilizar no produto final por ser mais adequada à aplicação a que se destina determinado produto. No que diz respeito aos tecidos com fibras em duas direções, os mais comuns são os tafetás (*plane*), os cetins (*satín*) e ainda as sarjas (*twill*). *Figura 4*

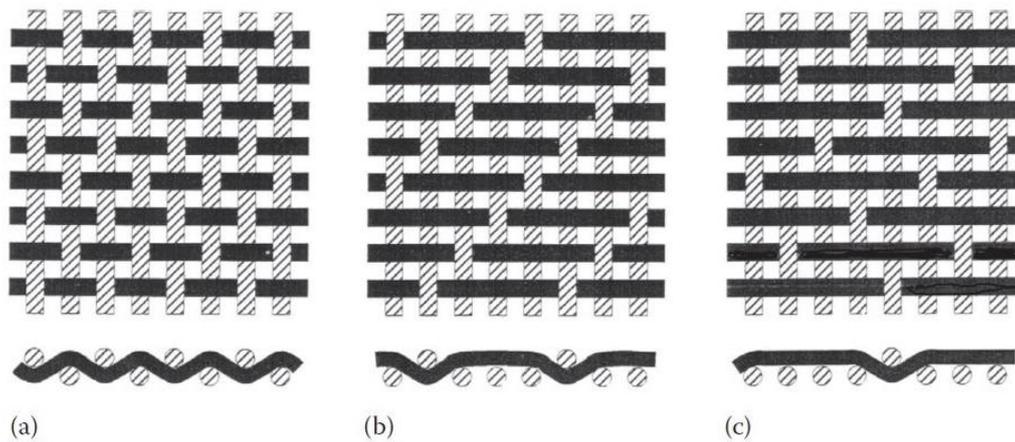


Figura 4 - Tipos de arquitetura 2D mais comuns. A) Tecido tafetá; b) Tecido de sarja; c) Tecido de cetim. Retirado de: [30]

A escolha do tipo de tecido a utilizar deve ter sempre em consideração certos critérios fundamentais para um bom processamento, entre eles estão a deformabilidade do tecido que promove um melhor ou pior ajuste aos contornos do molde, especialmente nos cantos, a estabilidade das fibras, que pode influenciar o volume de fibras final visto que tecidos pouco estáveis tendem a deformar aquando da passagem da resina, e a porosidade que está intimamente ligada com o fluxo de resina e por conseguinte o tempo de processamento.

Os tecidos de fibras são ainda utilizados na preparação de *prepregs*, pelo que uma boa impregnação e molhamento das fibras está muito ligada com o tipo de padrão do tecido. Esta ligação é determinada pela permeabilidade, que aumenta com o aumento da porosidade (quantos mais entrelaçamentos tiver o tecido mais poroso ele será).

Existem ainda outros tipos de tecidos, que podem ser entrançados (que promove uma maior porosidade o que influencia não só o processamento como as propriedades finais do produto), cosidos (de modo a não se soltarem pequenas fibras durante o corte das mesmas) ou ainda os que possuem fibras em mais que duas direções, os multiaxiais. Este último tipo de tecido é bastante caro, e por essa razão não é muito utilizado na indústria, uma vez que é preferível adicionar uma nova camada unidirecional a um tecido de duas direções (no caso de um triaxial) do que acarretar com os custos de um tecido deste género.

Outro tipo de material que é utilizado e que se apresenta num plano 2D, são os reforços não tecidos (*NCF's*) que são acoplados uns nos outros quer por pontos, que podem seguir diversos padrões, e, na sua maioria, são dados com fibras poliméricas (*nylon*, polietileno, poliéster, entre outros) quer pela adição

de ligantes como fitas adesivas ou finas camadas de materiais termoplásticos que são fundidos usando prensas aquecidas. Importante notar que os *NCF's* não são tecidos, cosidos ou trançados, o que confere maior resistência e rigidez ao produto final, uma vez que a resina não fica aglomerada nos espaços livres entre as mechas de fibras, aumentando o volume de fibras presente no compósito, diminuindo, no entanto, a permeabilidade da fibra dificultando o escoamento de resina durante o processamento.

Os tecidos com arquitetura tridimensional, são obtidos pela tecelagem ou costura de fios não só na direção do plano 2D, mas também na direção transversal ao mesmo, o que permite obter compósitos com maior resistência à delaminação bem como aumentar a resistência do produto final quando solicitado na direção da sua espessura. Como principal desvantagem para além do custo mais elevado, está a perda de propriedades nas direções do plano comparativamente com as conceções existentes para as estruturas 2D (tafetá, cetim, sarja, entre outros).

Existem ainda arquiteturas que consistem na deposição de fibras aleatoriamente no compósito usadas principalmente quando se pretende produzir peças com propriedades “isotrópicas”, ou seja, propriedades iguais em todas as direções, embora seja muito difícil de alcançar com materiais fibrosos. Este tipo de materiais confere uma melhor conformidade às curvas do molde, comparativamente aos tecidos 2D e 3D, no entanto as propriedades mecânicas dos produtos produzidos por esta técnica são consideravelmente inferiores aos compósitos com arquiteturas lineares numa ou mais direções. Esta arquitetura é normalmente apresentada sob a forma de mantas, que são aglomeradas através de ligantes das mais diversas naturezas [30].

Na *Figura 5*, estão visíveis esquematicamente os tipos de tecidos que podem ser obtidos.

Posto isto, os tecidos mais comuns são os tecidos de arquitetura 2D equilibrados, isto é, que possuem o mesmo número de fibras longitudinalmente e transversalmente, e aqueles com as fibras apenas orientadas numa só direção (tecidos unidirecionais), que facilitam a incorporação no produto final com as orientações pretendidas.

Embora as fibras de vidro se tenham vindo a aplicar desde 1930, apenas a partir do final dos anos 50 do século passado é que se começaram a produzir fibras com rigidez mais elevada atualmente usadas nas aplicações estruturais avançadas, como sejam, as fibras de boro e de carbono. Já neste século,

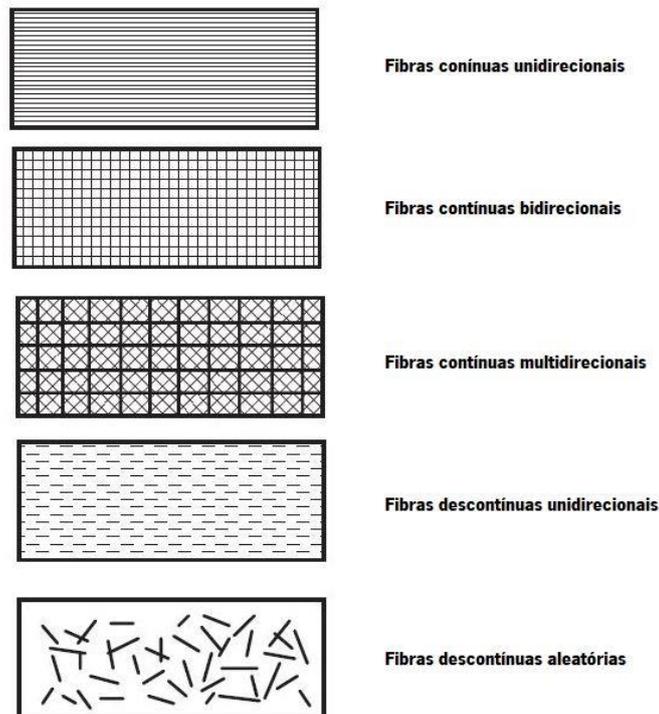


Figura 5 - Tipos de arquiteturas de fibras 2D. Adaptado de: [27]

surgiram as fibras de polietileno de altíssimo peso molecular, conhecidas pelo nome comercial *Spectra*[®], e iniciou-se a aplicação de algumas fibras naturais em compósitos.

Os 3 principais tipos de fibras atualmente utilizadas na construção de pranchas *skates* e que podem contribuir para a melhoria do seu futuro desempenho são as fibras de vidro, de carbono e, eventualmente, as de aramida.

Embora as fibras de vidro sejam sensíveis à humidade e possuam menor rigidez e maior densidade que as fibras de carbono, apresentam também uma série de vantagens que as tornam líderes destacados no mercado dos materiais compósitos. Nessas vantagens incluem-se o seu preço muito reduzido, as suas excelentes propriedades mecânicas ao impacto e, ainda, as suas boas propriedades elétricas, químicas e térmicas, bem como, a sua boa compatibilidade com a maioria das matrizes usadas nos compósitos. De acordo com a sua composição química, as fibras de vidro classificam-se nos seguintes tipos: E, C e S (que podem ser R e T consoante a origem dos fornecedores). As mais baratas e utilizadas em compósitos são do tipo E. As do tipo C, possuem, normalmente, excelente resistência à corrosão sendo usadas como mantas de superfície nas camadas exteriores das peças, de modo a poder conferir-lhes resistência química superior nas áreas em que o compósito pode contactar com elementos eventualmente agressivos. Por fim, as do tipo S, que embora mais caras, apresentam maior resistência

à tração e ao impacto que as de outro tipo sendo apenas utilizadas nas aplicações que exigem maiores requisitos mecânicos.

À medida que as aplicações se tornam mais exigentes e requerem propriedades mais elevadas, tal como acontece nos componentes estruturais avançados usados nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, e, por isso, se disponibilizam para um investimento superior, recorre-se a utilização de reforços mais dispendiosos, mas também capazes de nos garantirem a obtenção duma rigidez muito superior e peso inferior, tal com acontece com as fibras de carbono. À semelhança das fibras de vidro, as fibras de carbono também se classificam em dois tipos distintos: fibras de alta resistência (HS) e de alto módulo (HM). Para além do elevado custo, estas fibras são sensíveis ao impacto, apresentam baixa resistência ao desgaste e podem sofrer corrosão quando em contacto com metais (galvânica) e quando submetidos a temperaturas superiores a 400 °C na presença de oxigénio. Em contrapartida, são as fibras comercialmente disponíveis, que possuem maior rigidez nominal e específica. Têm ainda baixa densidade, excelentes propriedades mecânicas em tração e flexão, resistência térmica acima da média, excelente estabilidade dimensional e uma elevada resistência à fadiga.

As fibras aramida têm base polimérica e são as fibras disponíveis no mercado que apresentam densidade mais baixa. Associado à sua baixa densidade, apresentam propriedades mecânicas muito mais elevadas que outros polímeros, embora possuam normalmente menor resistência quando sujeitas a esforços de compressão. Apresentam também excepcional resistência ao impacto e abrasão, o que justifica a sua aplicação em componentes à prova de bala e com grande resistência ao desgaste, são pouco usadas noutros mercados, por apresentarem um elevado custo e por serem difíceis de maquinar, apresentam ainda dificuldades acentuadas de adesão com a maioria das matrizes [5][8][27][29][30].

No *Tabela 2*, estão presentes as tabelas de comparação dos reforços com as vantagens e desvantagens dos tipos de fibras acima mencionados.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos três principais tipos de fibras à venda no mercado.

	Vantagens	Desvantagens
Fibra de Vidro	Baixo Custo	Baixo módulo de elasticidade
	Boa resistência à tração	Alta densidade (peso elevado)
	Boa adesão a todas as matrizes	Sensível à humidade
	Fácil de impregnar	
	Excelente comportamento ao impacto	
	Boa resistência à corrosão	
Fibra de Aramida	Muito baixa densidade	Custo muito elevado
	Excelentes propriedades mecânicas	Sensível aos raios UV
	Excelente resistência ao impacto	Baixa adesão à maioria das matrizes
	Bom comportamento à chama	Absorve humidade
	Manutenção das propriedades mecânicas até 180 °C	Difícil de cortar e maquinar
	Excelente resistência ao desgaste	Baixa resistência à corrosão a ácidos concentrados
	Resistência à corrosão por solventes	Baixa resistência à compressão
Fibra de Carbono	Baixa densidade (peso reduzido)	Custo elevado
	Excelente resistência à tração e flexão	Sensível ao impacto
	Excelente módulo de elasticidade	Baixa resistência ao desgaste
	Coefficiente de expansão negativo	Corrosão galvânica em contacto com metais
	Boa estabilidade dimensional	Corrosão por oxigénio acima de 400 °C
	Boa resistência térmica	
	Condutividade térmica e eléctrica	

4.5.3 Laminados

Como já foi referido, o projeto de uma peça em material compósito envolve a definição das propriedades que se pretendem obter para que possa resistir adequadamente às condições de carga a que será sujeito. Após seleção da matriz e fibras de reforço a usar e estabelecidas as condições de carga e as propriedades pretendidas para o compósito, deve proceder-se à escolha da estrutura a definir, sendo a mais comum a estrutura laminar. Para definir o laminado a produzir é necessário, estabelecer: o número de camadas que se pretendem empilhar e a espessura, orientação e teor de fibras a utilizar no compósito. Tendo normalmente em conta que a geometria final pretendida para a peça e o orçamento do projeto são os principais entraves à livre conceção do projetista, a enorme quantidade de opções que poderá utilizar na construção do laminado permitem uma variedade geométrica e de configurações quase ilimitadas.

Os laminados resultam da sobreposição de sucessivas camadas de fibras de reforço impregnadas com resina, podendo-se usar múltiplas configurações consoante a orientação e alinhamento das fibras em cada lâmina [5] [6] [8] [10]. [27]

Na *Figura 6*, estão representados dois exemplos de laminados.

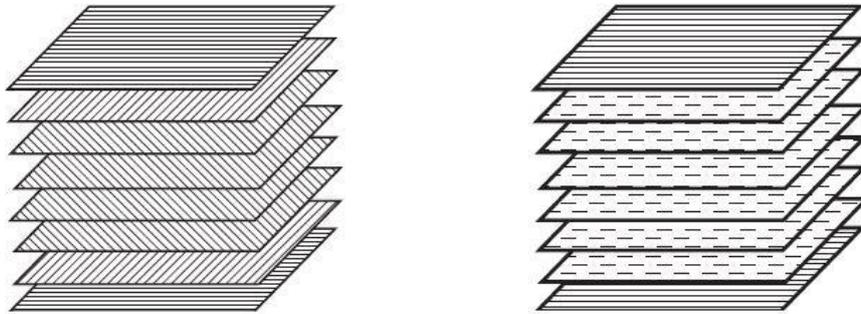


Figura 6 - Esquemas de possíveis constituições de laminados. Retirado de: [27]

Para o sucesso de um laminado, é imprescindível promover uma boa interface entre as fibras e a matriz permitindo que haja transferência de carga da matriz para os reforços quando sujeitos a determinados carregamentos. A importância da transferência de carga, é tanto maior quanto mais crítica for a aplicação a que se destina o laminado, uma vez que a quebra de uma fibra transfere não só a energia do rompimento para as fibras vizinhas, mas também a carga que esta suportava antes de romper. Esta situação é praticamente colmatada com um bom vínculo entre os constituintes do composto, promovendo, neste caso, boa resistência transversal, resistência ao corte e resistência à fadiga.

Para existir uma boa ligação é necessário coexistirem três requisitos; boa impregnação das fibras de reforço por parte da matriz, uma boa ligação mecânica e por fim uma boa ligação química. A primeira é assegurada por uma diferença entre as tensões superficiais da fibra e da resina, pelo que a tensão superficial da fibra (sólido) é sempre superior à tensão superficial da resina, e pela viscosidade da resina, que quanto menor ela for mais facilmente impregna as fibras do laminado [30].

O sucesso dos materiais compósitos com estruturas laminares face aos materiais metálicos, para além de propriedades mecânicas iguais ou superiores com densidades muito inferiores, está na sua natureza heterogênea que confere mecanismos de absorção de energia a nível microscópico, que para carregamentos semelhantes em ambos os casos, promove uma degradação gradual das propriedades dos compósitos resultando numa falha controlada e não de forma catastrófica [27].

4.5.4. Estruturas Sanduíche

As estruturas em sanduíche são compostas por um núcleo, revestido em ambos os lados por peles, que habitualmente apresentam propriedades mecânicas muito superiores em termos de resistência e rigidez. Normalmente, as peles da estrutura são constituídas por laminados finos, sendo normalmente usado como núcleo um material diferente, mais barato, com propriedades mecânicas relativamente baixas e, por norma, apresentando uma densidade bastante baixa. Embora os materiais a utilizar possam variar de acordo com a aplicação, são normalmente empregues como núcleo espumas, estruturas em ninho de abelha, madeiras de balsa e outras estruturas caneladas.

Apesar de a maior parte das solicitações mecânicas serem suportadas pelas cascas desta estrutura, o núcleo quando bem selecionado, confere à sanduíche elevada resistência ao corte e alta rigidez de forma a transmitir adequadamente todos os carregamentos ao longo de todo o volume da peça. O núcleo deve ainda ser suficientemente resiliente de forma a suportar as pressões envolvidas no processamento da estrutura, uma vez que qualquer movimentação ou deformação do núcleo, conduzirá à perda do controlo dimensional ao nível das peles, com influência no volume de fibras e, por conseguinte, nas propriedades mecânicas do produto final

A maior desvantagem destas configurações reside no seu processamento, uma vez que é complicado obter peças em sanduíche sem qualquer tipo de defeitos utilizando como métodos produtivos, infusão a vácuo, RTM (resin transfer moulding) ou qualquer outra tecnologia de moldação que utilize fluxo de resina. A principal razão para este facto, deve-se à estrutura em dupla casca que confere dois possíveis caminhos para o fluxo de resina, que convergem para uma saída, no entanto não existe forma concreta de os sincronizar pelo que haverá poços de ar aprisionado pelo fluxo que chegar em primeiro lugar. Este ar pode ser purgado, contudo, resultará em perda excessiva e desnecessária de matéria prima, pelo que a melhor forma de fabricar estes compósitos é colocar a saída no local mais elevado do molde, utilizando a gravidade como aliada no processo. Este fator permite a impregnação de todo o reforço antes de atingir a saída uma vez que esse será o caminho mais fácil para a resina percorrer [29].

O principal objetivo da estrutura sanduíche é aumentar a rigidez em flexão dum componente em compósito mantendo simultaneamente constante a sua leveza. A utilização de um núcleo leve e com boas propriedades sob compressão, permite aumentar significativamente o momento de inércia (I) da secção transversal do componente, que aumenta com o cubo da altura da seção transversal, e

consequentemente a sua rigidez à flexão, dada pelo produto do módulo de elasticidade pelo momento de inércia ($E \cdot I$). Proporcionalmente ao aumento do momento de inércia da seção transversal (I), gerado pelo incremento da altura dada pelo núcleo, verifica-se também e simultaneamente uma diminuição das tensões normais instaladas na viga. A manutenção dos dois laminados em compósito nas faces exteriores do componente, permite por sua vez garantir a sua resistência aos esforços de flexão, sabendo-se que as tensões máximas criadas pelas solicitações de flexão se desenvolvem exatamente nas faces exteriores. Pode-se mesmo afirmar que a utilização de estruturas sanduiche será uma das formas mais inteligentes de utilização de materiais compósitos com grande rigidez e resistência à flexão. É ainda comum combinar a utilização de mais que um material no núcleo, obtendo sanduiches de núcleo híbrido.

A estabilidade da adesão dos materiais na interface casca/núcleo, é fator de grande importância neste tipo de estruturas. Uma boa adesão entre materiais promove uma melhor transmissão das cargas mecânicas ao longo de toda a secção transversal. Geralmente, nessas interfaces são usados adesivos e resinas compatíveis com o material do núcleo, de modo a melhorar a resistência à compressão local e ao impacto, impedindo ainda a delaminação na interface.

As estruturas em sanduiche, são componentes de eleição muito usados na atual indústria aeronáutica e aeroespacial, visto conseguirem resistir em boas condições a cargas de flexão muito elevadas e possuem peso muito inferior a componentes que apresentem idêntico comportamento mecânico construídos noutros materiais [5] [8] [12][27][30][31].

Na *Figura 7* está representada uma estrutura sanduiche. De notar que por vezes não são utilizados adesivos estruturais, uma vez que a sua utilização depende do tipo de núcleo utilizado e do método produtivo adotado.

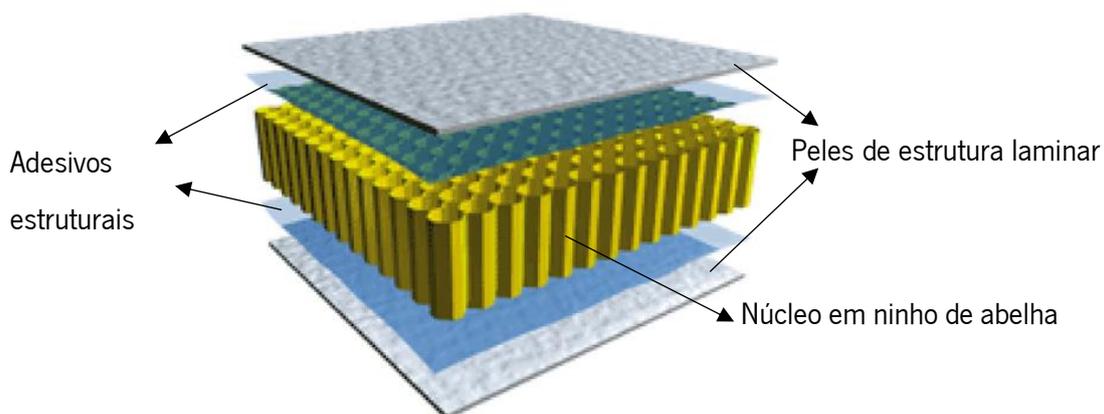


Figura 7 - Estrutura sanduiche comum. Adaptada de: [31]

4.5.5. Processos de Fabrico

O processo a usar no fabrico de uma peça em compósito é essencialmente determinado pelas dimensões e forma do produto final, número de peças a produzir, tempo de produção de cada peça, e ainda pelo acabamento superficial (uma ou duas faces), rigor dimensional e de espessura, teor final de fibra e vazios pretendidos.

Apresenta-se, em primeiro lugar, o processo mais tradicional, mas também mais rudimentar que se poderia usar na construção do *skate*: a moldação por contacto ou manual (*hand-lay-up*). Trata-se de um processo em molde aberto que se baseia na utilização das técnicas mais rudimentares de moldação. Usando apenas molde de um dos lados (processo em molde aberto) e não existindo qualquer contramolde, o processo apenas permite obter bom acabamento superficial num dos lados da peça em compósito. Após construção dum molde que permita obter um produto final com a forma pretendida, procede-se à sua limpeza e à aplicação de um agente desmoldante adequado na sua superfície. Seguidamente, se desejado, deve-se aplicar um *gel-coat* com a cor final pretendida na superfície visível do produto final. Após secagem do *gel-coat*, deve-se iniciar a construção manual do laminado por aplicação sucessiva de camadas de resina e de fibras de reforço sobre a superfície do molde. Para aplicação da resina, uma boa impregnação das fibras de reforço, eliminação de vazios e outros defeitos devem-se utilizar trinchas, espátulas e rolos adequados de moldação. Após aplicação de todas as camadas a peça é deixada a curar, após cura, procede-se à sua desmoldagem. Uma variação desta técnica que permite obter maiores teores de fibra nos laminados produzidos, consiste na incorporação de vácuo ao compósito após a sua laminação. Para tal, é necessário envolver a peça com uma película perfurada de modo a promover caminhos para a passagem da resina, ao qual se envolve um tecido conhecido por *breather* que permite absorver o excesso de resina e ainda uniformizar a aplicação de vácuo ao longo da superfície da peça. De modo a ser possível aplicar o vácuo é necessário colocar a peça dentro de uma película vedada a toda a volta para que não haja fugas de ar. Após este passo é possível criar vácuo no interior da película termoplástica e a peça é deixada a curar desta forma. Esta técnica é conhecida por *Vacuum Bagging*.

Na *Figura 8* está representado de forma esquemática a técnica de moldação por contacto.

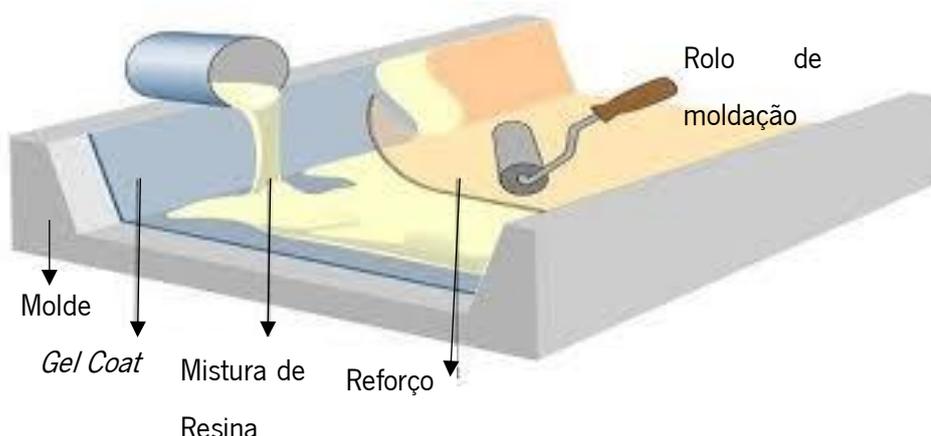


Figura 8 - Esquema da técnica de moldação por contacto e seus principais constituintes. Adaptado de: www.elink.co.in/

Contrariamente à moldação por contacto, na moldação por vácuo e por diafragma após aplicação do *gel-coat* sobre o molde e corte de todas as camadas de reforço a utilizar, procede-se à colocação do conjunto total de camadas de fibras de reforço sobre o molde e seguidamente à aplicação da resina a utilizar sobre ele. Procedendo-se em seguida à aplicação de uma membrana termoplástica (saco de vácuo ou membrana diafragma) sobre o conjunto de fibras e resina aplicados no molde garantindo a boa vedação de todo o sistema. Aplica-se vácuo ou pressão sobre a membrana do diafragma de modo a garantir que a resinas impregnem totalmente todas as camadas de fibras de reforço usadas. A utilização do vácuo permite diminuir o teor de vazios na peça. Estes dois tipos de processamento (em molde semifechado) permitem obter um bom acabamento na superfície da peça no lado em que ela se encontra em contacto com o molde e um razoável acabamento da superfície em contacto com a membrana de vácuo ou do diafragma. A peça é deixada curar sob vácuo ou pressão da membrana de diafragma, procedendo-se posteriormente ao corte do vácuo/pressão e, seguidamente, à retirada dos filmes de vácuo/diafragma e desmoldagem da peça.

A infusão por vácuo é um processo normalmente adotado no fabrico de pequenas a médias séries de peças em material compósito. É um processo de moldação em molde semifechado. Tal como na moldação por vácuo e por diafragma referidos anteriormente, no processo de infusão as fibras são previamente agrupadas com a disposição que se pretende para o laminado e colocadas no molde, sendo posteriormente impregnadas durante a infusão da resina. O processo também contempla a utilização de uma película termoplástica que envolve todo o laminado e garante a completa vedação com exterior durante a infusão de resina e que ainda é responsável por assegurar que o laminado seja forçado contra o molde. Durante a infusão, a resina, que se encontra à pressão atmosférica, é “sugada” do depósito

em que se encontra armazenada após aplicação de vácuo, devido ao gradiente de pressões existente no interior do molde sendo forçada a passar pelo estratificado de fibras de reforço colocado no molde de modo a impregná-lo completamente. A escolha do local ou locais por onde se processa a entrada e saída da resina no molde durante a infusão é um dos fatores mais críticos que importa controlar na utilização desta tecnologia. Essa escolha deve garantir um correto escoamento da resina através das fibras de reforço colocadas no molde de modo a garantir a sua correta e completa impregnação. Concluída a impregnação das fibras de reforço o molde deve ser mantido sob vácuo até que se verifique a cura total da peça. Após a cura, procede-se á desmontagem do molde e equipamentos, sendo posteriormente desmoldada a peça final.

Nas técnicas de processamento em molde fechado utiliza-se um molde e contramolde (conjunto macho/fêmea) que permitem a obtenção de peças com bom acabamento superficial de ambos os lados. Uma dessas tecnologias usadas na produção de pequenas e médias séries de peças em material compósito é a compressão a frio. Esta tecnologia requer a utilização de uma prensa, em cujos pratos são montados o molde e o contramolde. Após limpeza dos dois moldes e aplicação de desmoldante, o conjunto total de reforços é colocado na cavidade montada no prato inferior da prensa e, seguidamente, vaza-se toda a resina a utilizar como matriz sobre os reforços. A prensa é então fechada e a resina forçada a impregnar sob pressão o conjunto de reforços colocados na cavidade inferior. A peça é então mantida sob pressão até que esteja totalmente concluída a sua cura. Terminada a cura da resina, a prensa é aberta e procede-se à desmoldagem da peça.

Outra das técnicas de processamento em molde fechado bastante usada é o *Resin Transfer Moulding* (RTM), muitas vezes também designada por moldação por injeção a baixa pressão. O processo também permite conferir bom acabamento superficial nas duas superfícies exteriores do produto final, devido à utilização de um molde e contramolde. O processo assemelha-se à infusão de resina. Após colocação da totalidade dos reforços numa das metades do molde, molde e contramolde são fechados e a resina é injetada sob pressão da ordem dos 6 bar para o seu interior de forma a se conseguir impregnar totalmente os reforços. Injetada toda a resina, o processo é mantido sob pressão até que se conclua a cura total do laminado. Concluída a cura, o molde é aberto e a peça desmoldada. Para além da aplicação da resina sob pressão, o RTM pode ser assistido com vácuo, sobretudo nos locais da peça em que se considere ser mais difícil conseguir-se uma boa impregnação dos reforços. A adição de vácuo à pressão positiva comum no método de RTM, foi estudada por Hayward e Harris [33], que concluíram que para além dos melhoramentos visíveis na superfície dos compósitos produzidos, estes ainda possuíam

propriedades mecânicas superiores aos produzidos apenas por pressão positiva. A principal razão encontrada para este facto consistiu na redução de vazios nos laminados bem como de poços de resina, o que permite obter peças com um volume de fibras mais constante ao longo de todo o compósito. Na *Figura 9* é mostrado o procedimento de RTM normalmente adotado pela indústria.

Quanto aos métodos produtivos, em que não existe fluxo de resina o mais conhecido reside na incorporação de pré-pregs num molde, muito utilizados nas indústrias de topo, nomeadamente aeronáutica e aeroespacial. Os pré-pregs são tecidos pré impregnados que são colocados nos locais exatos do molde sendo que após a sua colocação são levados a um forno para serem curados. As aplicações mais críticas utilizam um autoclave para promover a cura destes materiais, uma vez que nestes equipamentos são adicionadas pressões elevadas às temperaturas necessárias para curar adequadamente o material [5][6][8][13][27][29][30][32].

Face aos equipamentos e condições existentes no *PIEP*, local onde se realizará o fabrico das pranchas

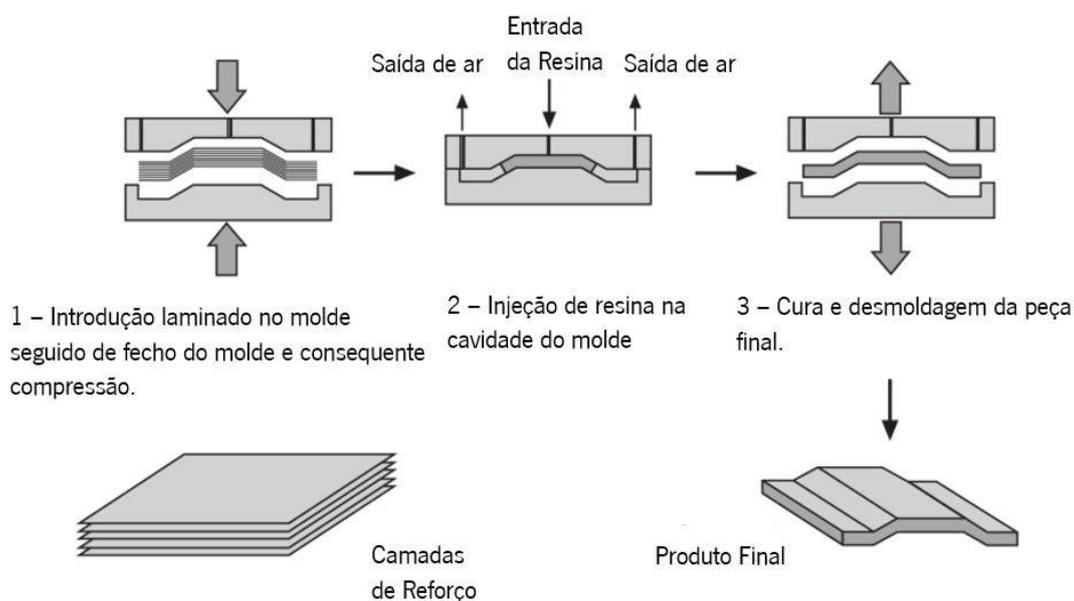
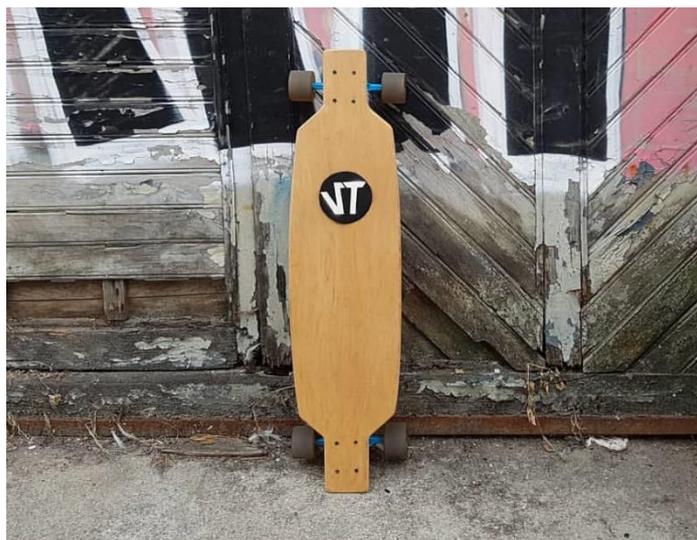


Figura 9 - Normal procedimento de RTM. Adaptado de: [34]

de *skateboard* protótipo, apenas se poderá utilizar moldação manual, pré-pregs fora de autoclave ou então os processos de infusão de resina a vácuo ou de RTM no seu fabrico. Tendo em conta o projeto e as matérias-primas que forem selecionadas para fabrico desses *skates*, proceder-se-á a uma escolha adequada e bem justificada da tecnologia final a usar.

5. Produção da Prancha de *Longboard*

Como foi referido anteriormente no capítulo 3 (objetivos), a produção do *longboard* em material compósito, tem o propósito de melhorar um produto existente no mercado produzido pela empresa galega *VigTab*, que pode ser visto na *Figura 10*. O principal objetivo a ser atingido com este produto, é a obtenção de um protótipo funcional, que possua o mesmo design que a prancha original, mantendo a sua espessura e peso, melhorando significativamente as propriedades ao impacto e à flexão e ainda aumentando o tempo útil de vida da prancha.



*Figura 10 - Modelo original da prancha de longboard da empresa VigTab.
Retirado de: www.instagram.com/vigtab.boards/*

A metodologia que aqui se apresenta, para além de reunir os resultados que se obtiveram no decorrer do projeto, tem ainda o intuito de servir como um guia experimental para quem pretender replicar o trabalho executado, o que pode ser interessante caso a empresa *VigTab* deseje aplicar nos seus produtos o tipo de construções aqui apresentado.

5.1.– Definição das Placas para Ensaio

O desenvolvimento de um novo produto, requer a escolha dos materiais a ser utilizados no fabrico do mesmo, no entanto deve-se ser muito criterioso na escolha dos materiais bem como na sua disposição na estrutura do compósito, de modo a ser possível obter as características pretendidas para o produto final.

O ponto de partida para a escolha dos materiais, consiste numa lista de requisitos, resultantes da reunião entre os representantes das empresas *PIEP VigTab*, estando presentes os seguintes pontos:

- Preservar o design da prancha *longboard* da empresa *VigTab*;
- Espessura próxima à original ($\pm 13,5\text{mm}$);
- Manter peso próximo ao original ($\pm 2\text{Kg}$ mais acessórios);
- Melhorar propriedades ao impacto e flexão;
- Aspetto de madeira para as faces visíveis.

Foi ainda sugerido que o tipo de madeira utilizado fosse madeira de carvalho, contribuindo para a utilização de uma espécie de árvore muito abundante nas matas do norte de Portugal e da Galiza, o que pode colmatar certos desperdícios desta matéria prima a nível regional.

As placas para a produção dos provetes foram dimensionadas com base na quantidade de provetes necessários e da espessura final requerida para a prancha *longboard*. A escolha dos materiais e disposição dos mesmos na estrutura é crucial pelo que deles dependerá as propriedades físico/mecânicas e a espessura resultante no processamento. As dimensões para os provetes de flexão, foram escolhidas com base na norma *ASTM D7250* que impõe restrições à geometria do provete ao nível do comprimento e da largura. Para o comprimento, este deve respeitar um rácio de 20 entre o comprimento da amostra e da sua espessura (13,5 mm neste caso) ao qual se soma mais 50 mm de modo a ser possível segurar os provetes nos apoios para os ensaios. Já para a largura utiliza-se o valor de pelo menos duas vezes o valor da espessura ($2 \times 13,5 \text{ mm}$), ou então $3 \times$ a espessura utilizada para o núcleo da estrutura sanduiche ($3 \times 8\text{mm}$ – valor máximo que se irá utilizar para o núcleo, como se verá ainda nesta secção) devendo ser utilizado o maior valor obtido. Já as dimensões para os provetes

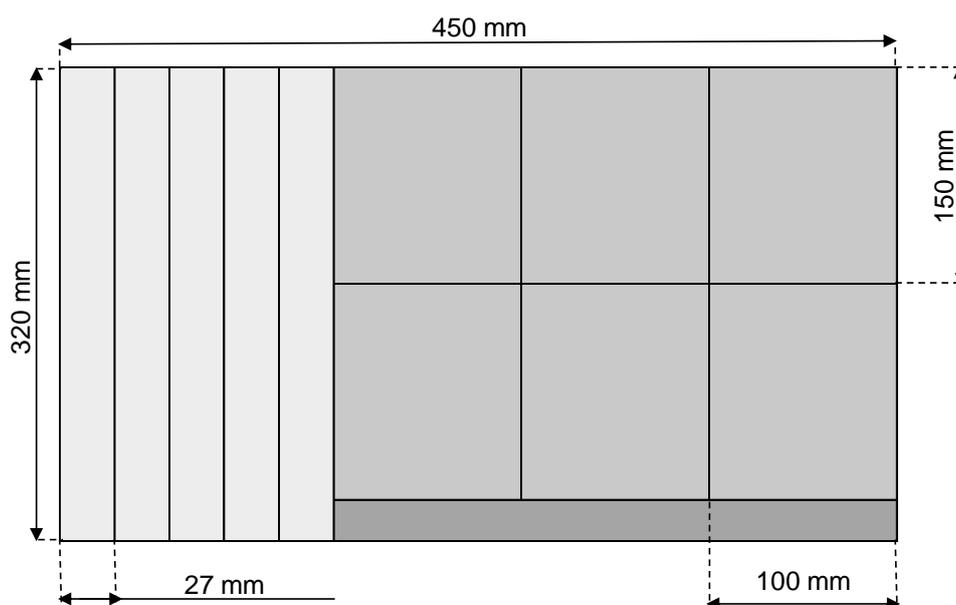


Figura 11 - Dimensões das placas a produzir, com localizações dos provetes a testar e suas dimensões individuais.

que serão testados ao impacto, seguem a norma *ASTM D7766* procedimento *C*, pelo que as dimensões são constantes independentemente do material a utilizar. As dimensões utilizadas para as placas e para os provetes estão representadas na *Figura 11*. Nota ainda para o facto de que é dado um *offset* de 3 mm entre cada provete de flexão, de modo a colmatar a perda de material sofrida durante o corte dos provetes, podendo assim ser obtidas as dimensões pretendidas para cada provete.

De modo a prever as espessuras das fibras após impregnação das mesmas, foram efetuados cálculos teóricos que serão apresentados de seguida na *Equação 1*. Os dados referentes às propriedades das matérias-primas presentes nesta equação encontram-se na *Tabela 3*. Em relação à fração mássica de fibras, w_f , foi arbitrado o valor de 50%.

Tabela 3 - Propriedades das matérias-primas a utilizar nos compósitos a fabricar.

Material	Gramagem	Densidade
F. Carbono Tafetá (C_t)	195 g/m ²	1.77
F. Carbono Unidirecional (C_u)	200 g/m ²	1.77
F. Aramida Tafetá (A_t)	170 g/m ²	1.44
F. Vidro Tafetá (V_t)	200 g/m ²	2.6
Resina Epoxi	—	1.2

$$\bullet e = G \left[\frac{1}{\rho_f} + \frac{1-w_f}{\rho_p \cdot w_f} \right] \quad \text{Equação 1}$$

Onde “*e*” corresponde à espessura da placa; “*G*” é a gramagem da fibra utilizada; “ ρ_f ” diz respeito à massa específica da fibra; “ ρ_p ” corresponde à massa específica do polímero; “ w_f ” é a fração mássica de fibra. Realizados os cálculos foram obtidos os valores de 0.28 mm para as lâminas reforçadas com fibra de carbono (unidirecional e bidirecional), 0.26 mm para as lâminas constituídas por fibra de vidro e resina epóxi, e por fim 0.24 mm para as que possuem fibras de aramida na sua constituição.

De notar que os valores obtidos para as espessuras das fibras são referentes a cada tipo de fibra de forma individual, pelo que o valor final da espessura resulta da soma de todas as camadas envolvidas nos laminados. É ainda possível observar, que com os valores arbitrados para a fração mássica de fibras, as espessuras obtidas são superiores às reais uma vez que o método produtivo (infusão a vácuo) promove uma boa compactação dos tecidos e, por sua vez, frações volúmicas de fibras, v_f , perto ou até mesmo

superiores aos 60%, o que é equivalente a cerca de 68.9% w_f (para os 60% de v_f em fibra de carbono)
 O mesmo acontece com as propriedades dos materiais, uma vez que quanto maior a percentagem de fibra incluída no laminado melhores propriedades este irá possuir.

As restantes espessuras (madeiras e espumas), foram escolhidas com base na espessura final pretendida para a prancha, isto é, para as placas onde se utiliza o folheado de madeira (cerca de 0.6 mm) a espuma deverá compensar a espessura em falta e ir de encontro aos requisitos impostos. Em sentido contrário, para as placas onde se utiliza a madeira mais espessa, com aproximadamente 3mm, a espuma deverá ser menos espessa, sendo possível obter um produto com espessura similar ao pretendido.

A estrutura das placas a produzir pode ser consultada na *Figura 12*. É importante referir, que no cimo de cada tipo de placa se encontra o valor da espessura teórica, obtido pelo somatório de todas as camadas envolvidas em cada laminado.

LongB_1- 14.6 mm	LongB_2- 14.64 mm	LongB_3- 13.44 mm	LongB_4- 13.5 mm
GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°
GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°
Wood 3 mm	Wood 3 mm	Wood 0.56 mm	Wood 0.56 mm
CF Uni 0°	CF Uni 0°	CF Uni 0°	CF Uni 0°
CF Uni 0°	CF Uni 0°	CF Uni 0°	CF Uni 0°
CF Uni +45°	CF Uni +45°	CF Uni -30°	CF Uni -30°
CF Uni +45°	CF Uni +45°	CF Uni +30°	CF Uni +30°
AF plain 0°/90°	CF plain 0°/90°	AF plain 0°/90°	CF plain 0°/90°
AF plain ±45°	CF plain ±45°	AF plain ±45°	CF plain ±45°
PVC FOAM 6mm	PVC FOAM 6mm	PVC FOAM 8mm	PVC FOAM 8mm
AF plain ±45°	CF plain ±45°	AF plain ±45°	CF plain ±45°
AF plain 0°/90°	CF plain 0°/90°	AF plain 0°/90°	CF plain 0°/90°
CF Uni -45°	CF Uni -45°	CF Uni +30°	CF Uni +30°
CF Uni 0°	CF Uni 0°	CF Uni -30°	CF Uni -30°
CF Uni 0°	CF Uni 0°	CF Uni 0°	CF Uni 0°
Wood 3 mm	Wood 3 mm	CF Uni 0°	CF Uni 0°
GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°	Wood 0.56 mm	Wood 0.56 mm
GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°
		GF plain 0°/90°	GF plain 0°/90°

Figura 12 - Esquemas que revelam os materiais e disposição dos mesmos nas placas a produzir. Estão ainda presentes no cimo de cada placa o nome de cada tipo de compósito bem como a espessura teórica.

Como se pode observar na *Figura 12*, as quatro construções são semelhantes alterando ligeiramente quer nas espessuras quer na disposição de certos materiais. Considerando as semelhanças existentes nas quatro placas, é de realçar a presença de fibra de vidro no exterior de todas. A colocação de uma

dupla camada de fibra de vidro em tecido tafetá de baixa gramagem, promove uma proteção à madeira existente nas construções permitindo a transparência necessária para ser possível ver a madeira, impedindo ainda que esta absorva humidades que diminuam drasticamente o tempo de vida útil dos compósitos. Foi também incorporada uma espuma de PVC (policloreto de vinilo) em todas as construções embora com espessuras diferentes, a colocação da espuma permite aumentar o momento de inércia da construção aumentando a rigidez do compósito, isto sem comprometer o peso final do produto.

A restante construção das placas, assenta na colocação de fibras de carbono unidirecionais e de aramida em tecido tafetá, em locais devidamente ponderados.

As fibras unidirecionais a 0° estão dispostas nas zonas mais externas das placas de modo a melhorar as propriedades fletoras do material, estas são seguidas das unidirecionais a $\pm 30^\circ$ e/ou pelas fibras tecido tafetá $\pm 45^\circ$, que terão influência em certos momentos onde a prancha será solicitada à torção. Os tecidos tafetá, a $0^\circ/90^\circ$ e $\pm 45^\circ$, encontram-se maioritariamente no centro, isto porque sujeitando o material a esforços fletores estes tecidos ficam mais próximos do eixo neutro (plano do provete que não sofre qualquer deformação aquando do carregamento fletor) não comprometendo as propriedades à flexão do produto no sentido longitudinal da prancha, contribuindo igualmente para a rigidez do compósito (uma vez que aumenta a espessura da placa e por sua vez o momento de inércia), resistência ao impacto (principalmente com objetos que possam perfurar o produto) e para a resistência à torção como visto anteriormente.

Quanto à madeira utilizada, é possível agrupar as placas em dois grupos, isto é, agrupar a placa *LongB_1* com a placa *LongB_2* que possuem uma construção onde a madeira é parte interveniente da estrutura responsável por conferir ao produto a resistência mecânica pretendida, e a placa *LongB_3* com a placa *LongB_4* visto possuírem madeira apenas para fins estéticos conferindo um aumento residual e não relevante da resistência mecânica.

5.2. – Infusão das Placas e Produção dos Provetes Normalizados

A produção das placas compósitas, das quais serão retirados os provetes para os ensaios mecânicos, foi realizada pelo processo de infusão de resina a vácuo. Este procedimento, visível na *Figura 13*, é um processo moroso, visto que requer o cumprimento de diversos passos, alguns dos quais devem cumprir certos tempos para um correto processamento. Este método produtivo, assenta na colocação das fibras

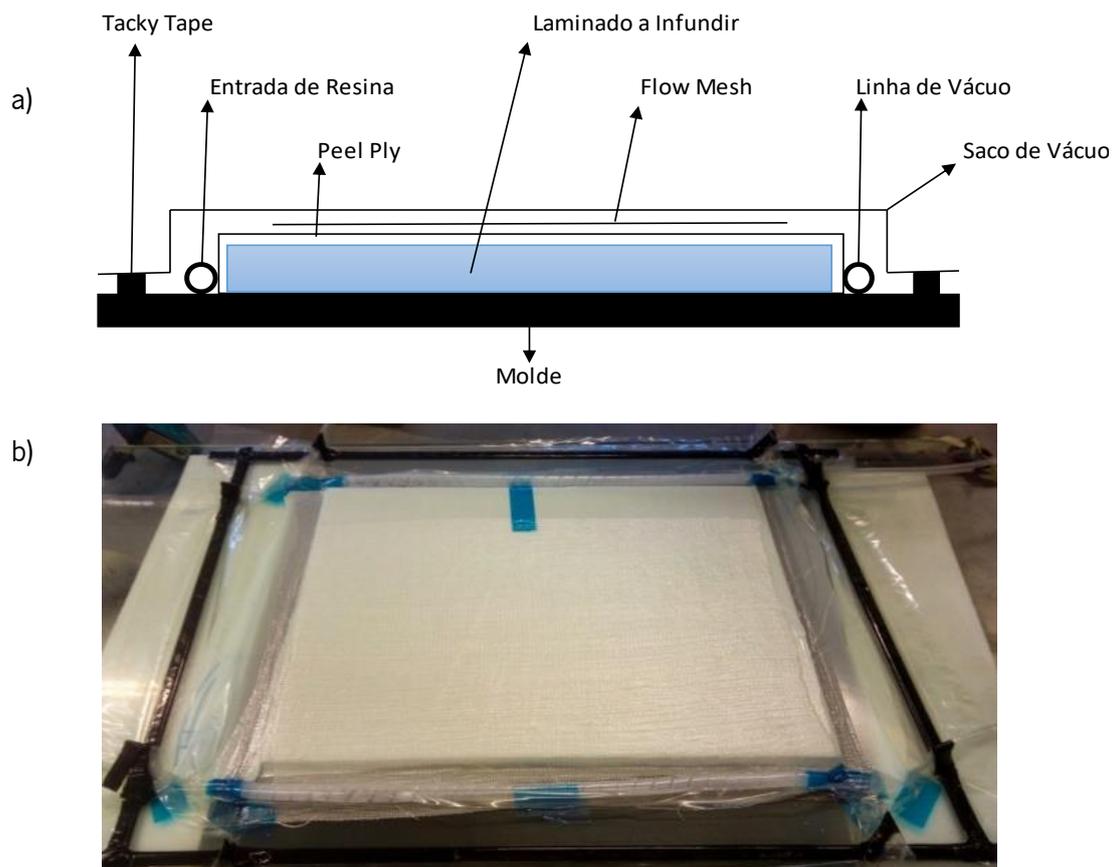


Figura 13 - a) Esquema do processo e principais constituintes utilizados na infusão das placas LongB. b) Imagem real do processamento por infusão de uma das quatro estruturas produzidas para esta dissertação de mestrado.

num molde o qual é coberto e vedado por uma película plástica maleável, conhecida na indústria por “saco de vácuo”. Após selado, é aplicado vácuo no interior do molde (entre o saco de vácuo e a estrutura rígida que dará a forma ao produto pretendido), fazendo a mistura de resina entrar por variação de pressão, a mistura encontra-se à pressão atmosférica num recipiente onde foram combinados os componentes (resina e endurecedor).

No fim da impregnação das fibras pela resina, devemos respeitar o tempo de cura da matriz polimérica, podendo, após esse tempo, desmoldar a peça. Nesta fase deve-se fazer uma inspeção visual ao compósito, verificando possíveis pontos secos e/ou outros defeitos que possam ter ocorrido na peça. Contudo, não é possível verificar o interior da peça a olho nu, pelo que por vezes podem ser obtidas peças com bom acabamento exterior, mas com fibras mal impregnadas no seu interior.

Na *Figura 14*, é possível observar uma placa completamente infundida, bem como a secção transversal de todas as placas preparadas por infusão de resina a vácuo.

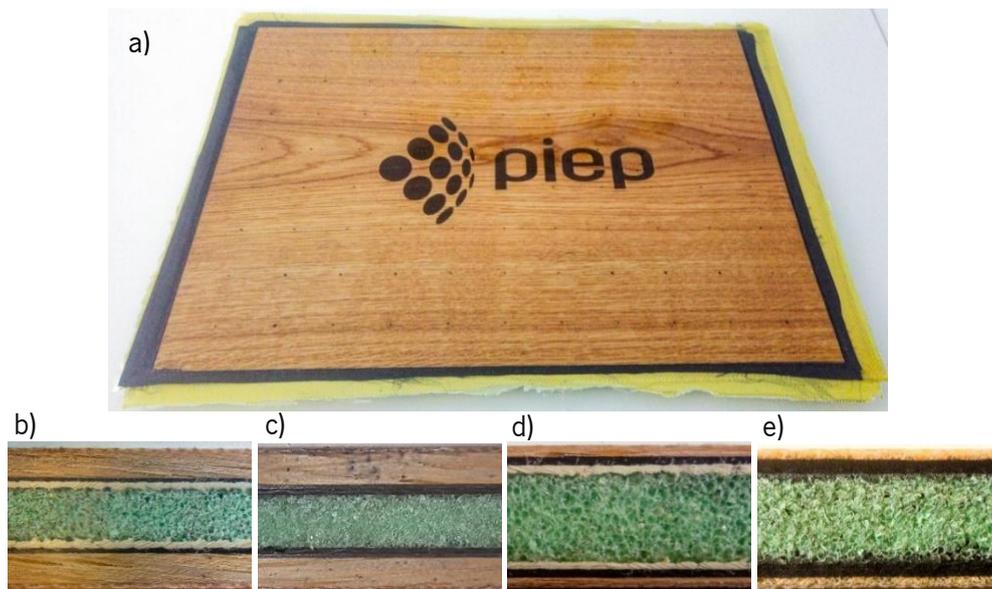


Figura 14 - a) Placa desmoldada referente à placa LongB_1. O logotipo do PIEP aparece na placa após reprodução a LASER na madeira de modo a ensaiar acabamentos que possam ser aplicados no futuro ao protótipo. b) Corte transversal da placa LongB_1. c) Corte transversal da placa LongB_2. d) Corte transversal da placa LongB_3. e) Corte transversal da placa LongB_4. As imagens b), c), d), e e) podem ser comparadas com os esquemas presentes na secção 5.1. Figura 12.

Após a desmoldagem das placas, estas são marcadas com as dimensões dos provetes (que seguem as diretrizes presentes nas normas *ASTM D7250* para flexão em materiais compósitos com estrutura sanduiche e *ASTM D7766* (procedimento C), para impacto com queda de dardo instrumentalizado em materiais compósitos de estrutura sanduiche, como visto no ponto 5.1), e cortadas com o equipamento adequado. Os provetes e as respectivas dimensões podem ser observados na *Figura 15*.



Figura 15 – Provetes com as dimensões normalizadas retirados das placas infundidas. À esquerda estão os provetes de ensaios de flexão e à direita os provetes para ensaios de impacto.

5.3. – Ensaio aos Provetes Produzidos

Após a obtenção dos foi possível a realização de todos os ensaios práticos aos materiais infundidos na secção 5.2.

Os ensaios de flexão foram efetuados no equipamento universal de ensaios mecânicos (*AGX-50kN*) representado na *Figura 16*, com capacidade para cargas até 50 kN fabricado pela *Shimadzu*. A realização de testes à flexão, permite caracterizar o material quando este fica sujeito a solicitações de cariz fletor. A caracterização do material é importante, pois os valores obtidos podem ser comparados entre si, permitindo identificar qual o material que melhor se comporta sob esforços fletores, podendo, ou não, integrar o compósito usado no produto final.

O ensaio de flexão é um teste mecânico muito simples de realização, neste é aplicado à amostra um deslocamento com o qual se obterá uma resposta, a força de reação da amostra. O software ligado ao dispositivo de ensaios, compila automaticamente os dados obtidos, que mais tarde podem ser analisados.

Para estes ensaios, os primeiros testes realizados serviram para acertar o procedimento de acordo com a norma, no parâmetro da velocidade de ensaio, uma vez que esta requer que o pico máximo de força, se dê entre os minutos 3 e 6 contando a partir do início de cada ensaio. Esta necessidade foi prejudicial ao projeto, uma vez que os provetes estavam limitados a apenas 5, visto que era o requerido pela norma. Os restantes parâmetros como o *span* (“*L*”, que corresponde à distância entre apoios), apenas variou consoante o tipo de amostra, uma vez que os diversos provetes dos mesmos materiais possuem espessuras similares, logo não afetam significativamente o *span*. Esta distância pode ser calculada por um rácio de 20, entre o *span* e a espessura da amostra (“*h*”) como mostra a *Equação 2*.

$$\bullet \frac{L}{h} = 20 \quad \text{Equação 2}$$

Foi utilizada uma velocidade de deslocamento de 6mm/min, apoios circulares de raio 7.5mm e um calcador da amostra de 15 mm de raio. Os primeiros ensaios foram realizados às placas *LongB_3* e *LongB_4* uma vez que foram as primeiras a ser produzidas por uma questão de disponibilidade de materiais na empresa. O *span* utilizado para estas placas foi de 248 mm para a *LongB_3* e 252 mm para a placa *LongB_4*. Os resultados obtidos nos ensaios a estas placas são apresentados graficamente nas *Figuras 17 e 18*, na secção 5.4.1.

Os ensaios de impacto com queda de dardo, foram efetuados na máquina representada na *Figura 16*, com o modelo *Fractovis Plus* produzido pela *CEAST*. O limite de energia desta máquina ronda os 700 J. Os ensaios ao impacto por queda de dardo, permitem estimar a quantidade de energia absorvida por um material, facilitando a comparação entre diversos materiais. Permite ainda avaliar a força máxima no impacto a que o material consegue resistir, possibilitando a avaliação da rigidez do mesmo.

O ensaio de impacto por queda de dardo, é um teste mecânico simples de aplicar, no qual é deixado cair, em queda livre, um impactador hemisférico com diâmetro de 20 mm, capaz de estilhaçar a amostra. O software ligado ao dispositivo de ensaios, compila automaticamente os dados obtidos, à escala do milissegundo, que mais tarde serão analisados.

Os ensaios de impacto não envolvem tantos parâmetros como os de flexão, pelo que é mais simples obter resultados fiáveis com menos provetes. Existe apenas uma variável que importa controlar no início que é o peso do impactador. Pela norma adotada, *ASTM D7766 (Procedimento C)*, o impactador deve perfurar a amostra sem que a variação de velocidade supere os 20%. Até atingir estes valores, deve-se testar provete a provete aumentando o peso do impactador de um ensaio para o ensaio seguinte. A variação de velocidade consiste em alterar a velocidade sofrida pelo impactador no momento de embate com a amostra, demonstrando a dificuldade que este enfrenta para transpor a amostra (caso seja capaz de o fazer). Aumentando a massa do impactador, promove-se uma melhor penetração na amostra devido ao aumento da energia potencial, calculada pela *Equação 3*.

$$\bullet E_p = mgh \quad \text{Equação 3}$$

Onde " E_p " corresponde à energia potencial, " m " é a massa do impactador, " g " diz respeito à força de aceleração gravítica e por fim a altura inicial do impactador está representada por " h ".

Os parâmetros adotados nos ensaios, foram os mesmos para os provetes de todas as amostras, excetuando alguns ensaios que foram excluídos e que serão mencionados individualmente posteriormente no relatório. Foi utilizado um impactador hemisférico de raio 10 mm, associado a um peso de 30 kg e a uma altura de queda de 1 m. Estes parâmetros, correspondem a uma energia potencial de 294,7 J e a uma velocidade de queda do impactador de 4,43 m/s.

Os resultados obtidos, podem ser observados nas *Figuras 26, 27, 29 e 31*, na secção 5.4.2. desta dissertação.

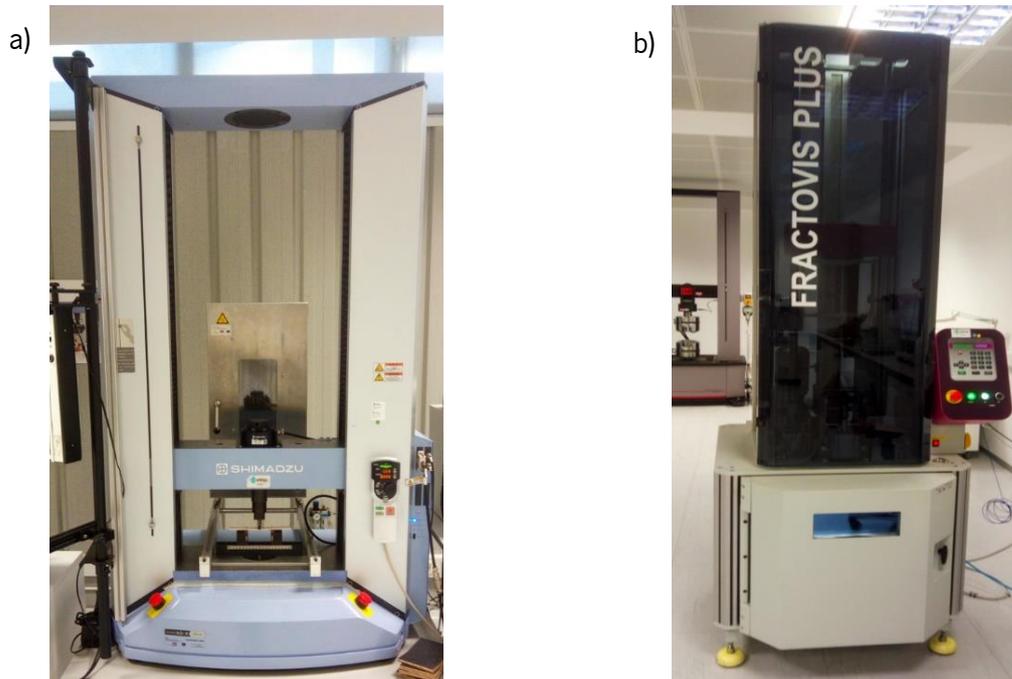
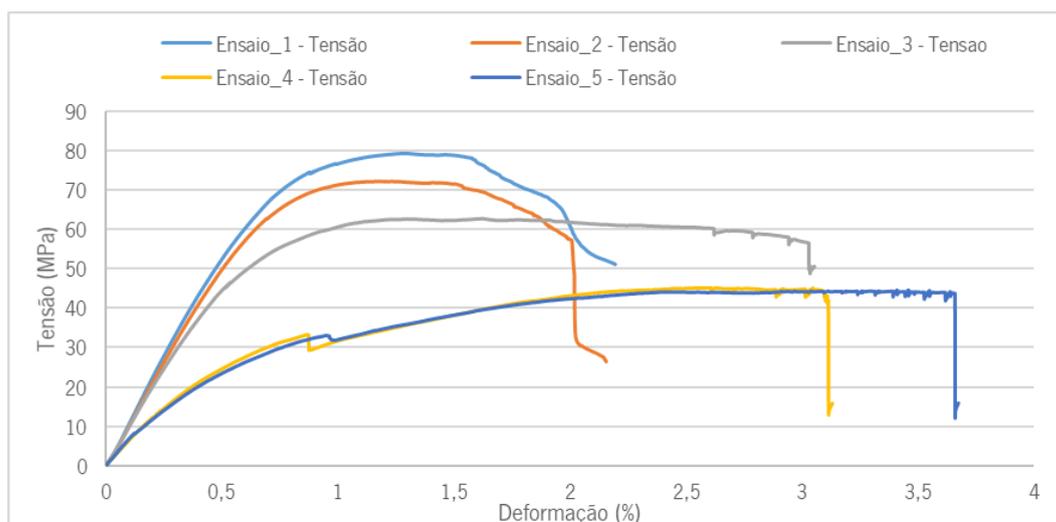


Figura 16 – Equipamentos utilizados nos ensaios às placas em material compósito. a) Equipamento universal de ensaios mecânicos utilizado para realização dos ensaios à flexão; b) Equipamento para realização dos ensaios ao impacto.

5.4. Apresentação e Discussão dos Resultados

5.4.1 – Ensaios de Flexão

Como é possível verificar na *Figura 17*, existe uma grande disparidade entre as curvas obtidas nos vários ensaios de flexão realizados na placa *LongB_3*. As diferenças que se obtiveram, são notórias quer ao



*Figura 17 - Gráfico de Tensão/Deformação obtido após tratamento dos dados obtidos nos ensaios de flexão à placa *LongB_3*.*

nível das tensões de cedência e rotura, quer ao nível das deformações (na cedência e rotura). Estas diferenças, devem-se acima de tudo aos defeitos presentes na placa produzida por infusão de resina a vácuo, que induz deformações locais, promovendo cedências em pontos distintos de cada provete.

Outra inconformidade que se verificou nos ensaios de flexão, foi que a “rotura”, ocorreu por esmagamento da camada superior por parte do calcador. A ocorrência deste fenómeno promove a obtenção de valores de tensões e deformações de rotura inferiores aos que seriam espectáveis.

Nos ensaios realizados à placa *LongB_4*, não existem os problemas das deformações locais que ocorreram na placa *LongB_3*, pelo que os gráficos obtidos são bastante reprodutíveis. No entanto, o problema do esmagamento continua visível nos resultados presentes nas curvas do gráfico da *Figura 18*, pelo que os mesmos são mais baixos que a realidade.

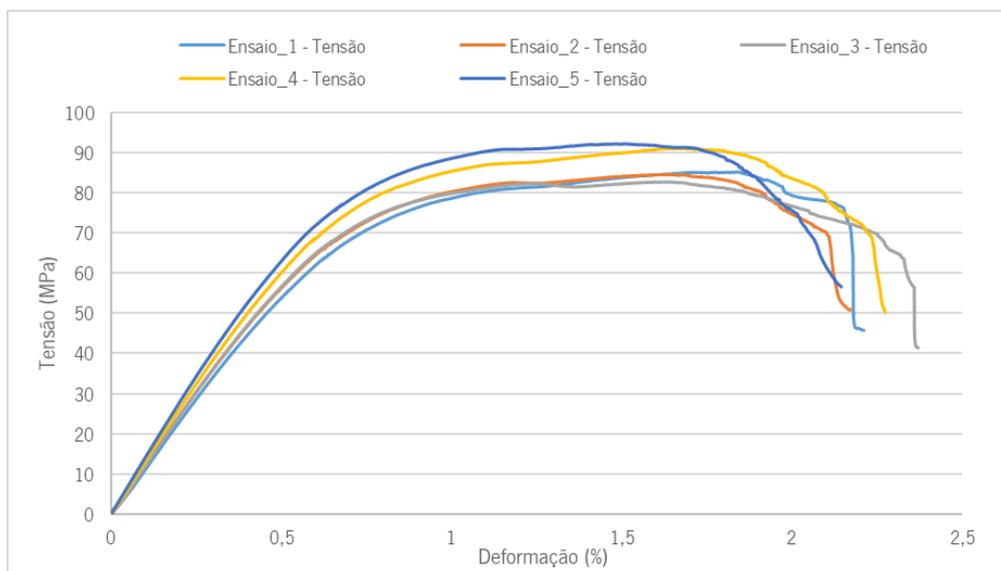


Figura 18 - Gráfico de Tensão/Deformação obtido após tratamento dos dados obtidos nos ensaios de flexão à placa LongB_4.

Neste ponto é possível identificar dois aspetos, de modo a ser possível aumentar a reprodutibilidade e realidade das curvas obtidas nos ensaios. Primeiro, a infusão das placas não ocorreu da melhor forma pelo que são visíveis pontos de fibra não impregnada no interior do compósito, originando deformações locais nos provetes, inviabilizando os ensaios. Este fenómeno, relembra a ideia de que uma boa impregnação é essencial para a obtenção de produtos compósitos com propriedades mecânicas no topo do seu potencial, uma vez que a existência de pontos secos (que funcionam como vazios presentes na estrutura do compósito), cria debilidades no material, o que pode comprometer o produto em serviço. Na *Figura 19*, é possível verificar estas inconformidades existentes nos provetes ensaiados.

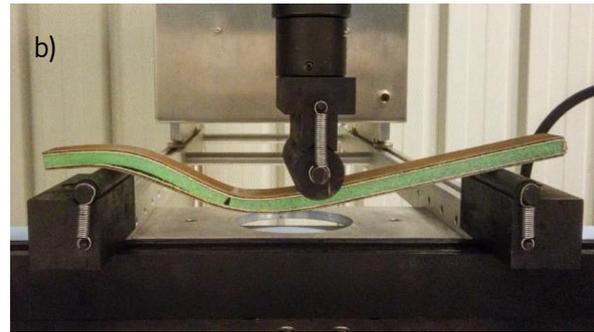


Figura 19 - a) Imagem ilustrativa dos defeitos existentes dentro das placas, onde é visível um local com fibras não impregnadas de um provete retirado da placa LongB_3. b) Inconformidades nos ensaios de flexão resultantes de um local com fibra não impregnada, o que resultou em locais com menor rigidez e por sua vez locais mais frágeis quando sujeitos a estas solicitações mecânicas.

Segundo aspeto, os apoios escolhidos não são adequados ao material em estudo, pelo que estes esmagam os provetes terminando os ensaios, isto é, os provetes atingiram a rotura por compressão, devido ao esmagamento das camadas superiores (fibra de vidro) provocado pelo calcador, e não rotura à tração (na camada inferior do provete) como seria de esperar.

5.4.1.1. Reformulação do Procedimento dos Ensaios e Produção de Novos Provetes

Para superar os dois aspetos que prejudicaram os ensaios do ponto 5.4.1., foi melhorado o processo de infusão para as restantes placas, principalmente durante a fase de equilíbrio de pressões (fase final do enchimento da placa). Foram também removidos os apoios e respetivo calcador, substituindo-os por dois apoios planos e uma chapa plana, na base do calcador, aumentando a área de contacto com as amostras diminuindo o esmagamento local. Os novos apoios e a chapa de metal podem ser vistos na *Figura 20*.



Figura 20 -a) A chapa usada aumenta a área de contacto entre o calcador (objeto escuro e cilíndrico na figura) e a amostra ao ser colocada entre os dois objetos; b) Ao retirar os apoios esféricos utilizados inicialmente, foi aumentada a área de contacto entre os novos apoios (objeto escuro na figura) e a amostra, permitindo realizar os ensaios de acordo com é estipulado na norma em uso.

Foi ainda definida novas dimensões para uma placa de 8 provetes para ensaios de flexão (como mostra a *Figura 21*) e foram produzidas duas novas placas (a *LongB_Flex_3* e a *LongB_Flex_4*) com os materiais e disposição do laminado igual às placas *LongB_3* e *LongB_4* (ver secção 5.1 e 5.2.). Desta vez, foi produzido um número superior de provetes, de forma a acautelar qualquer tipo de dificuldades que advenham dos ensaios de flexão.

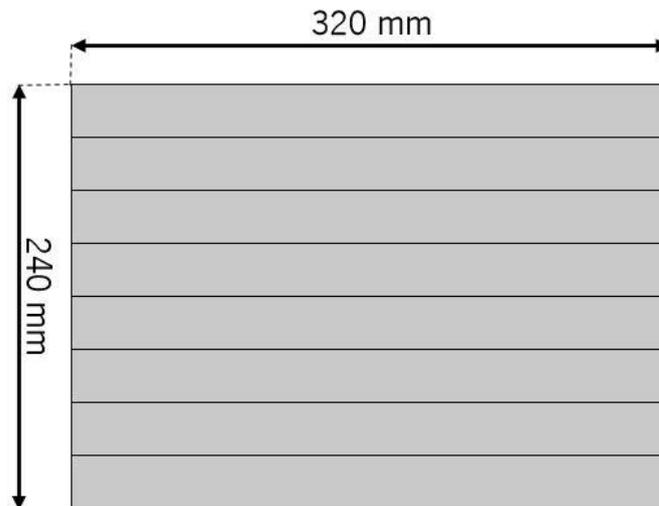
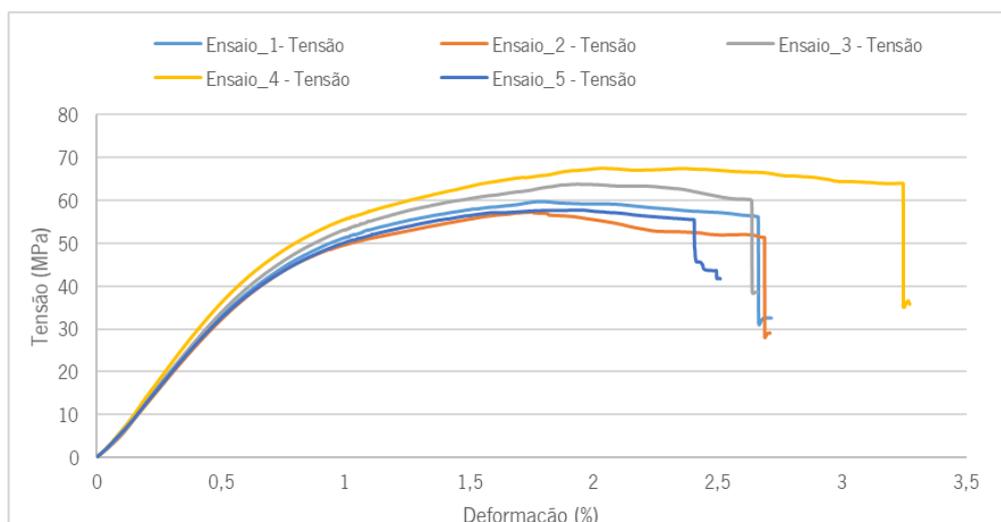


Figura 21 - Nova placa a infundir com dimensão para 8 novos provetes de flexão. Os 240 mm já englobam um offset para corte na serra, isto é, já são considerados 3mm em cada provete que será retirado aquando do corte pela espessura da serra.

5.4.1.2. Novos Ensaios de Flexão

Nas *Figuras 22 a 25*, estão representados os gráficos de tensão/deformação obtidos nos ensaios de flexão, seguidos da respetiva análise individual de cada tipo de amostra. Nota ainda para a velocidade utilizada nos ensaios de flexão que se fixou novamente nos 6 mm/min e as distâncias entre apoios foram de 294 mm, 303 mm, 252 mm e 258 mm para as placas *LongB_1,2*, *Flex_3* e *Flex_4*, respetivamente.



*Figura 22 - Gráfico de Tensão/Deformação obtido após tratamento dos dados obtidos nos ensaios de flexão à placa *LongB_1*.*

Com o novo método adotado para realização dos ensaios de flexão, é possível, para a placa *LongB_1*, verificar que se obteve gráficos reproduzíveis, cujos provetes apresentam rotura na camada oposta à força aplicada, isto é, na camada que é sujeita à tração, ao invés de entrar em rotura por ação do esmagamento do calcador na camada superior. É visível que apenas uma curva difere ligeiramente das restantes (curva do ensaio número 4), no entanto, esta apresenta um comportamento idêntico às restantes curvas, tendo como principal diferença o valor da deformação de rotura. É provável que esta pequena discrepância na deformação, seja criada devido à presença de um produto natural na constituição da placa (madeira de carvalho), cujas propriedades não são constantes em todo o seu volume.

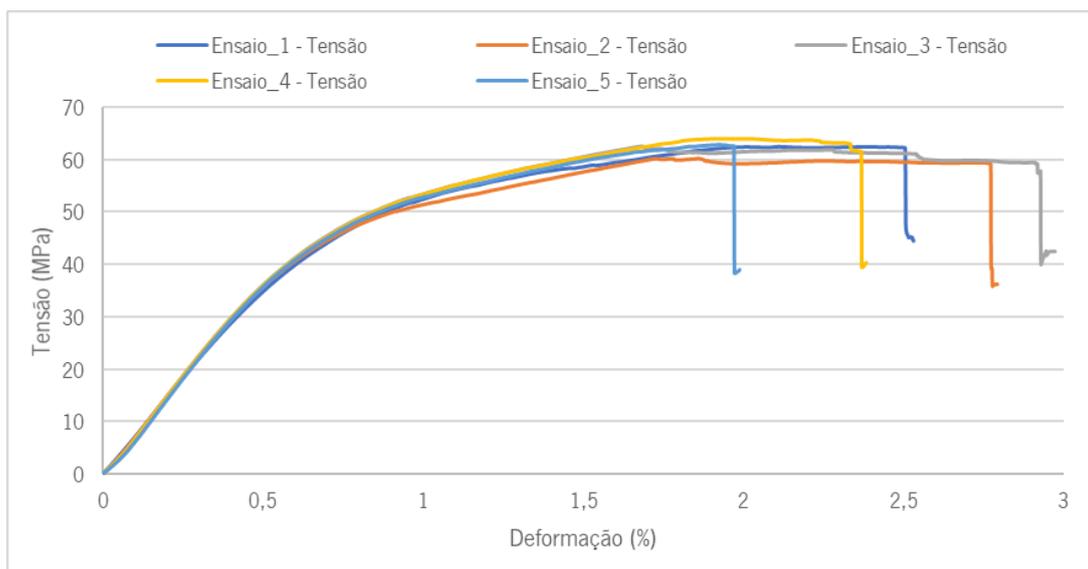


Figura 23 - Gráfico de Tensão/Deformação obtido após tratamento dos dados obtidos nos ensaios de flexão à placa *LongB_2*.

Uma vez mais é visível na *Figura 23* a boa reprodutibilidade das curvas obtidas nos ensaios, principalmente na zona elástica de deformação (neste caso desde os 0% de deformação até aproximadamente aos 0,5% de deformação), com alguma variação nos valores de deformação máxima. Estas variações, podem ocorrer uma vez mais devido à presença de madeira de carvalho no exterior da placa *LongB_2*, cujas fibras naturais e nós da madeira presentes nas camadas utilizadas no compósito podem influenciar os resultados.

Como referido anteriormente, foram elaboradas novas placas com os mesmos materiais e a mesma disposição que as primeiras placas ensaiadas (a *LongB_3* e a *LongB_4*), com vista a colmatar os erros obtidos anteriormente. Os novos resultados para essas placas estão presentes nas *Figuras 24 e 25* apresentadas de seguida.

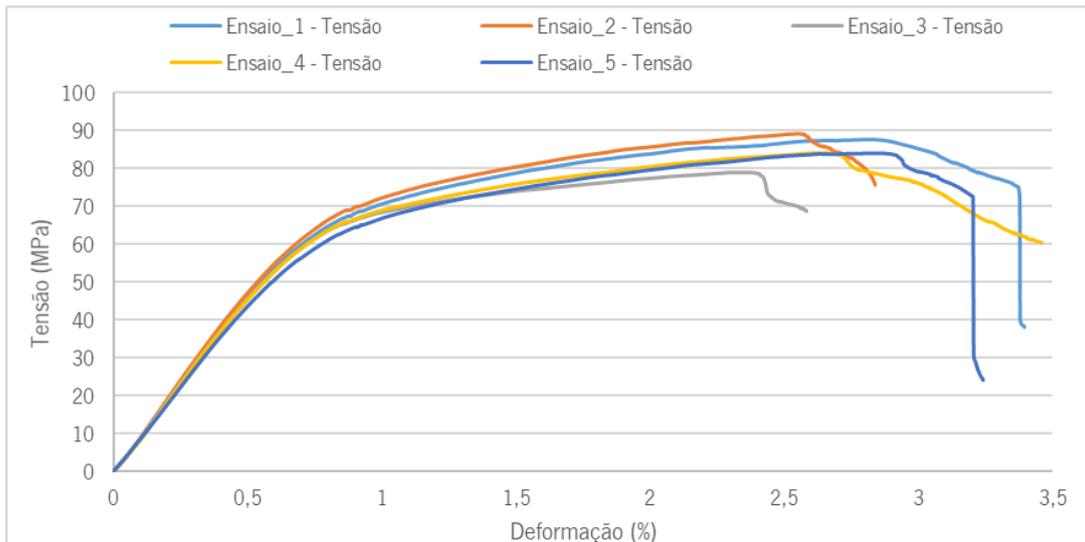


Figura 24 - Gráfico de Tensão/Deformação obtido após tratamento dos dados obtidos nos ensaios de flexão à placa LongB_Flex_3.

Como é visível no gráfico em questão, as curvas obtidas são uma vez mais bem reproduzíveis apresentando diferenciação nas deformações máximas obtidas em cada ensaio. A presença de madeira pode ter influência nas propriedades, no entanto não de forma tão significativa como acontece nas placas LongB_1 e 2, uma vez que esta placa possui um folheado ao invés de uma lâmina de 3 mm de espessura. A elevada espessura da espuma também influencia os resultados, uma vez que com o aumento de espessura do núcleo, é cada vez mais crítico assegurar uma boa interface entre as peles e o núcleo da estrutura sanduiche.

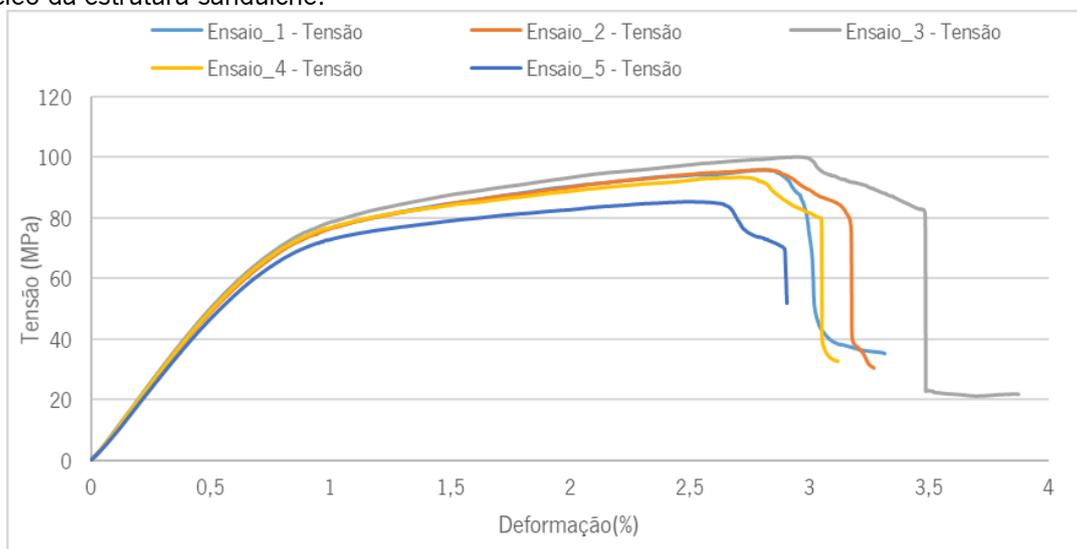


Figura 25 - Gráfico de Tensão/Deformação obtido após tratamento dos dados obtidos nos ensaios de flexão à placa LongB_Flex_4.

Os ensaios realizados à placa LongB_Flex_4, demonstram, uma vez mais a reprodutibilidade das curvas obtidas, em termos de tensões de rotura e cedência, e ainda a mesma discrepância que ocorre nos

ensaios às placas anteriores ao nível das deformações de cedência e rotura. As variações nas deformações podem ser influência dos mesmos fatores mencionados para a placa *LongB_Flex_3*.

Na tabela que se segue, *Tabela 4*, é possível verificar as médias dos valores máximos obtidos nos ensaios de flexão.

Tabela 4 – Valores médios calculados para diversas propriedades, com auxílio dos dados obtidos nos ensaios à flexão de cada material.

	LongB_1	LongB_2	LongB_3	LongB_4	LongB_Flex_3	LongB_Flex_4
Força (N)	1075,1	1120,2	643,6	772,0	878,5	1073,5
Deslocamento (mm)	27,1	25,7	23,5	19,6	26,1	28,3
Tensão (MPa)	61,1	62,4	60,8	87,1	84,8	94,1
Deformação (%)	2,8	2,5	2,8	2,2	3,1	3,3
Módulo Flexão (MPa)	7891,7	9427,1	4509,3	10913,9	8318,2	9479,0

Ao consultar a *Tabela 4*, é notória a melhoria nas propriedades dos laminados *LongB_ (3 e 4)* para os laminados *LongB_Flex (3 e 4)*. O aumento dos valores máximos das propriedades confirmam a importância de um bom processamento, principalmente ao nível de impregnação das fibras de reforço. É possível verificar que as placas com propriedades à flexão mais elevadas correspondem às placas cujas fibras são exclusivamente de carbono, o que é concordante com a maior rigidez deste material relativamente às fibras de aramida.

Um dado importante a ter em consideração é o tipo de falha ocorrido nos ensaios para todos os laminados caracterizados, podendo não impossibilitar totalmente o uso do produto uma vez que em nenhum ensaio ocorreu quebra das fibras de reforço, mas sim das madeiras utilizadas no exterior. Na prancha de *longboard*, este facto pode permitir ao usuário manter o uso do produto, tendo este praticamente as mesmas propriedades de um novo, sendo que os danos são pouco visíveis e não são impeditivos ao uso do utilizador comum. A única inconformidade, é uma ligeira curvatura que não pertence ao *design* inicial.

No Anexo A, estão presentes os gráficos força/deslocamento obtidos nestes ensaios de flexão, com as curvas obtidas para todos os ensaios realizados.

5.4.2. – Ensaios de Impacto

Em relação aos gráficos apresentados na *Figura 26*, referentes à placa *LongB_1*, é notória a boa reprodutibilidade dos ensaios, uma vez que todas as curvas seguem o mesmo comportamento. Existe, no entanto, a curva de absorção de energia do ensaio 1, que possui um ligeiro desvio em relação às restantes curvas. Esse desvio pode ser explicado com base nas propriedades naturais da madeira, que se encontra disposta nas faces exteriores do compósito, na medida em que um produto natural, como a

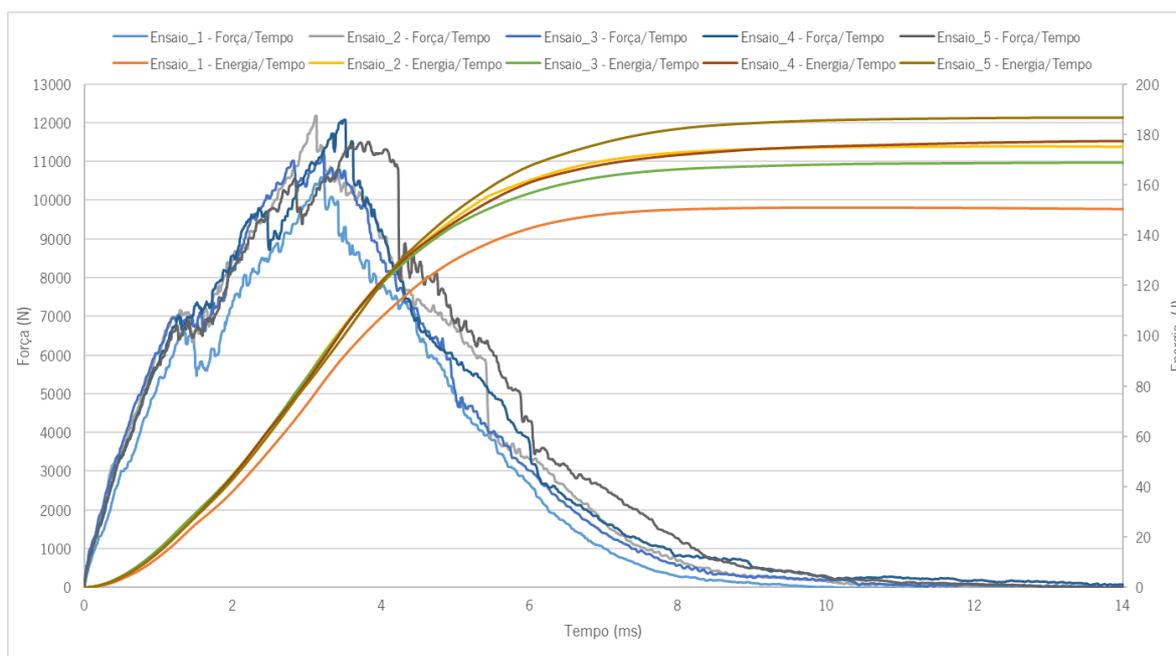


Figura 26 - Gráficos obtidos para os ensaios de impacto realizados à placa LongB_1.

madeira, esta sujeito a diversas variações de propriedades ao longo do seu volume.

Os gráficos obtidos para o material *LongB_2*, são bastante aproximados dos obtidos na *Figura 26*, dois ensaios diferem ligeiramente dos restantes, neste caso os provetes número 3 e 4 (ensaios 3 e 4, respetivamente), para ambas as propriedades. As diferenças observadas, podem ser derivadas de três situações distintas.

A primeira, reside nas propriedades naturais da madeira uma vez que esse carater lhes confere uma maior heterogeneidade na sua composição ao longo do seu volume e, por conseguinte, propriedades distintas nos mesmos pontos do material.

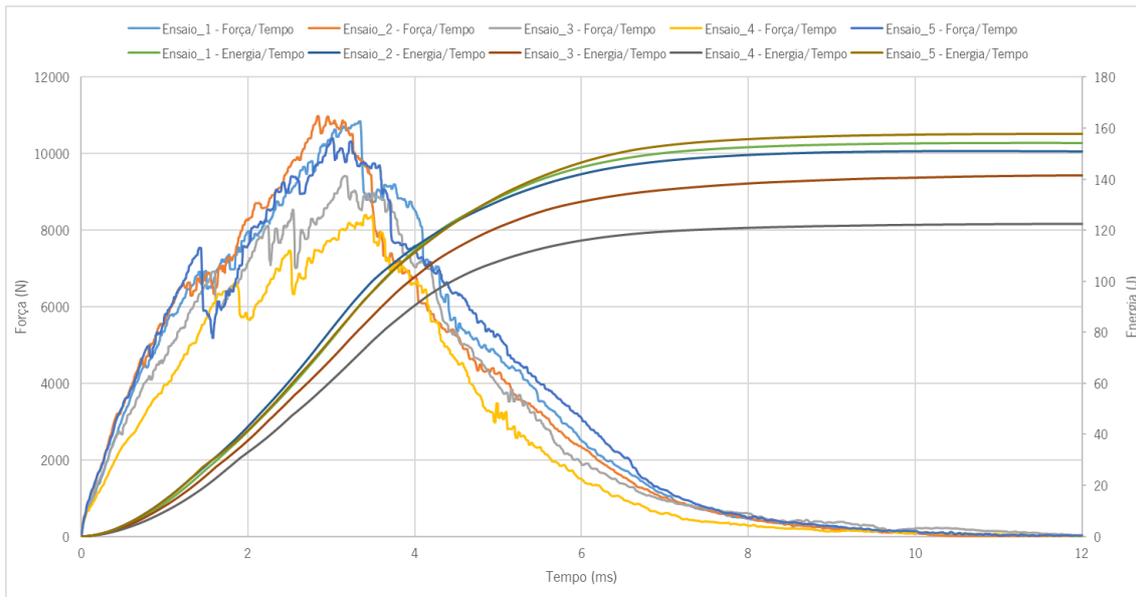


Figura 27 - Gráficos obtidos para os ensaios de impacto realizados à placa LongB_2.

A segunda razão, consiste na fraca interface madeira/fibra de vidro que se desenvolveu no compósito e que pode ser observada na *Figura 28*. Esta fraca interface permitiu que durante o ensaio a camada de fibra de vidro fosse arrastada separadamente do restante compósito, acabando por romper em local próximo ao impacto (pode ser visível na mesma *Figura 28*).

Por fim, a terceira razão que levou a esta pequena diferença foi a presença de um número muito reduzido de fibras de carbono não impregnadas, no entanto capaz de gerar algumas diferenças nas propriedades do compósito. As fibras mal impregnadas são semelhantes às observadas na *Figura 30*, referente à placa LongB_3, e podem ser observadas, com alguma dificuldade na *Figura 28*. As fibras secas apenas estão

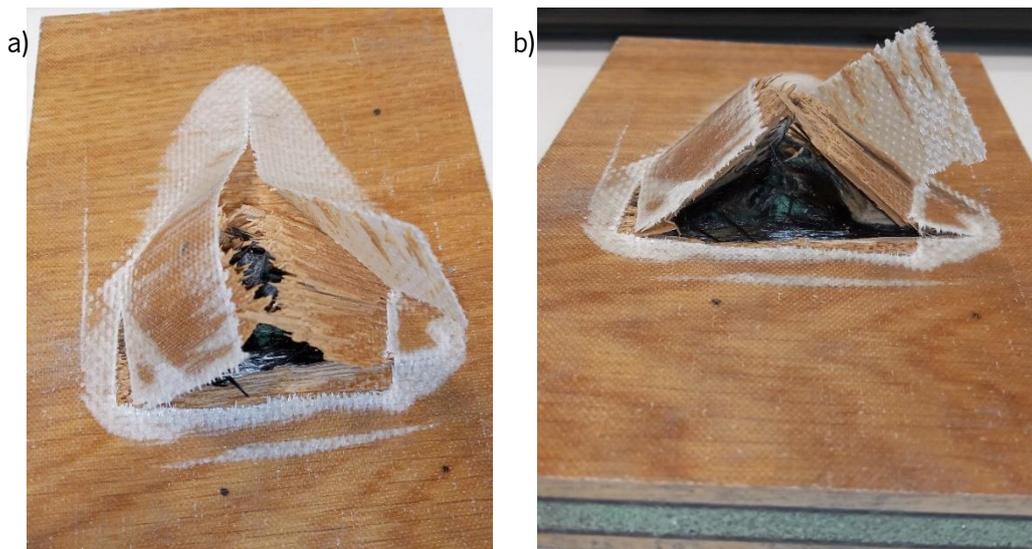


Figura 28 - Face inferior de um provete da placa LongB_2 testado ao impacto no qual é notório a fraca interface gerada no processamento entre o epoxi reforçado com fibra de vidro e a madeira de carvalho. É ainda perceptível na imagem a) que o arrastamento criado pelo impactador rasgou a fibra de vidro. Este arrastamento interfere nos resultados na medida em que não são registados os reais valores de absorção de energia ao longo da espessura do provete. Na imagem b) podem ser observadas as fibras secas existentes no centro do provete.

presentes no local de onde se retiraram os provetes 3 e 4, onde se deu o “fecho” da resina, isto é, foi o último local a ser impregnado na placa compósita o que leva a concluir que por fora (mais fácil de impregnar), estava bem impregnado, no entanto no seu interior não se impregnou completamente todas as fibras.

Nos ensaios realizados à placa *LongB_3*, são visíveis as diferenças nas curvas obtidas para os diversos ensaios. Esta foi a primeira placa a ser testada pelo que o peso utilizado no impactador foi redimensionado após o primeiro ensaio (com energia potencial de 245 J e peso utilizado de 25 Kg), o ajuste deveu-se ao facto de ultrapassar os 20% no parâmetro variação de velocidade. Dos seis ensaios realizados devem ser descartados o ensaio 1 pelo motivo referido anteriormente, bem como o primeiro ensaio com o novo valor de energia (294 J), este devido à presença de fibras completamente não impregnadas no interior da placa e que podem ser vistas na *Figura 30*. As fibras não impregnadas estão presentes neste provete (proвете 1), uma vez que foi neste local que se deu o fecho da resina, à semelhança do que aconteceu nos provetes 3 e 4 da placa *LongB_2*.

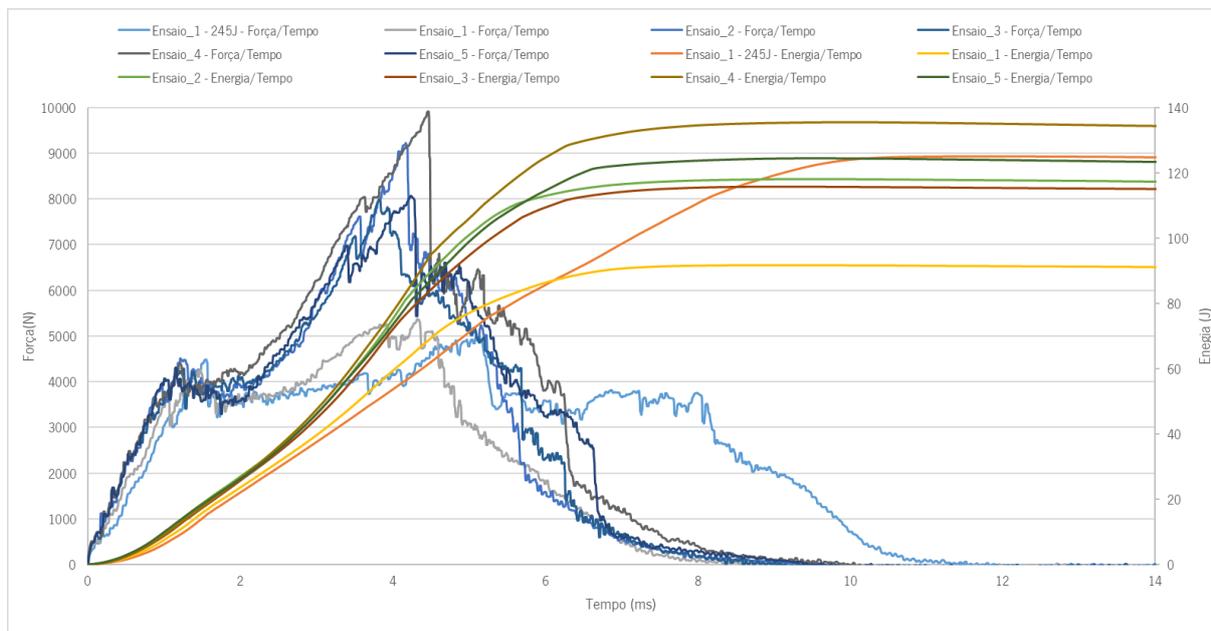


Figura 29 - Gráficos obtidos para os ensaios de impacto realizados à placa *LongB_3*.



Figura 30 - Existência de fibras secas de carbono e aramida no interior do provete testado ao impacto.

Por último, os ensaios realizados à placa *LongB_4*, obtiveram-se os mesmos princípios de resultados que os alcançados nas restantes placas, registando-se neste caso curvas reprodutíveis para todos os ensaios realizados, pelo que não foi necessária a exclusão de nenhuma curva. Estes resultados podem ser observados na *Figura 31*.

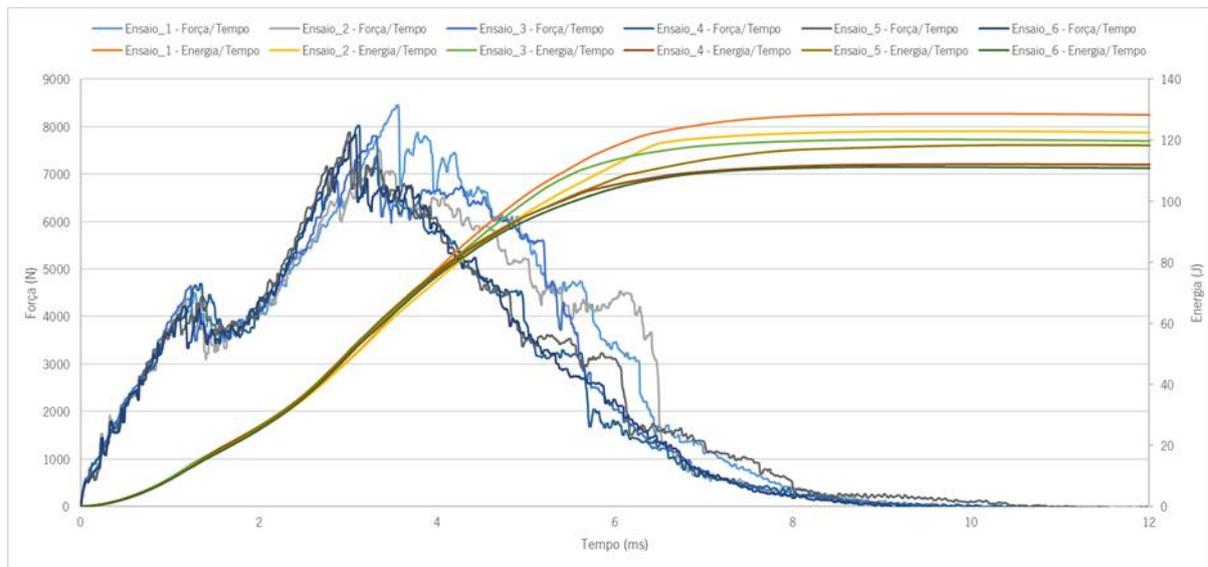


Figura 31 - Gráficos obtidos para os ensaios de impacto realizados à placa *LongB_4*.

Na *Tabela 5*, estão representados os valores médios obtidos nos ensaios para os quatro materiais supramencionados. De notar que esses resultados já têm em conta as curvas excluídas, para as quais as razões de exclusão foram explicadas anteriormente.

Tabela 5 - Valores médios calculados para cada propriedade, através dos dados obtidos nos ensaios ao impacto.

Placa	Força Máxima	Energia Absorvida
LongB_1	11523,9 N	171,7 J
LongB_2	10747,1 N	154,1 J
LongB_3	8797,1 N	123,4 J
LongB_4	7918,2 N	118,9 J

5.5. – Análise *Benchmarking*

A análise de *benchmarking* tem como objetivo a obtenção de resultados exatos das propriedades do material existente no mercado, neste caso o *longboard* da empresa *VigTab*, podendo posteriormente se efetuar uma comparação com os materiais desenvolvidos neste projeto de investigação.

5.5.1. Ensaios ao Material da Empresa *VigTab*

De modo a obter resultados comparáveis entre si, todos os ensaios aos diversos materiais foram efetuados seguindo as mesmas normas, pelo que nesta análise de *benchmarking* utilizaram-se as

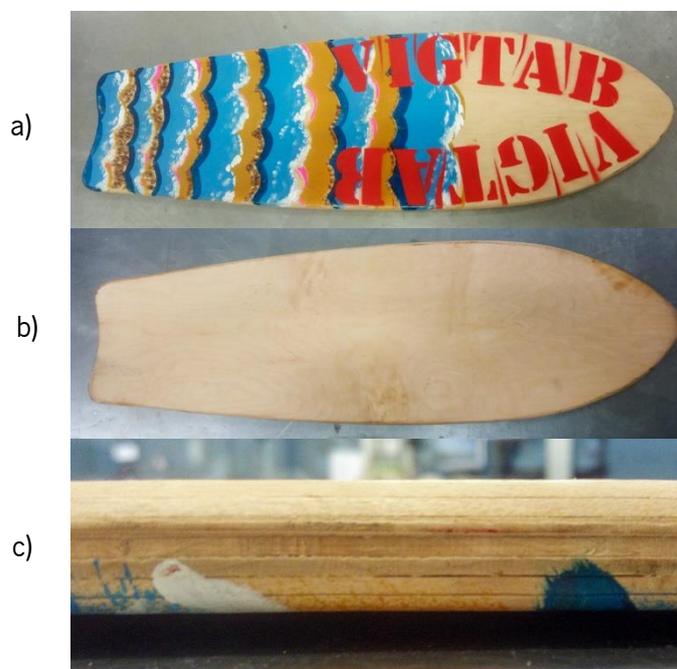


Figura 32 - Prancha utilizada para a análise *benchmarking*. a) Desenho na parte inferior da prancha; b) Parte superior da prancha; c) Secção transversal do laminado adotado para as pranchas pela empresa *VigTab*

normas de flexão e impacto para materiais compósitos de estrutura sanduiche, apesar de o material da prancha enviada pela empresa galega (presente na *Figura 32*), ser um painel de madeira contraplacada.

A produção de provetes a partir do produto final foi condicionada pelas dimensões da prancha e pelos contornos da mesma, sendo necessário um cuidado acrescido para o corte dos provetes, evitando desperdícios. Assim, após avaliar as dimensões da prancha *longboard*, procedeu-se ao corte dos provetes de modo a maximizar o número de provetes retirados.

Na *Figura 33* é possível verificar os provetes utilizados nos ensaios, bem como verificar as suas dimensões normalizadas.

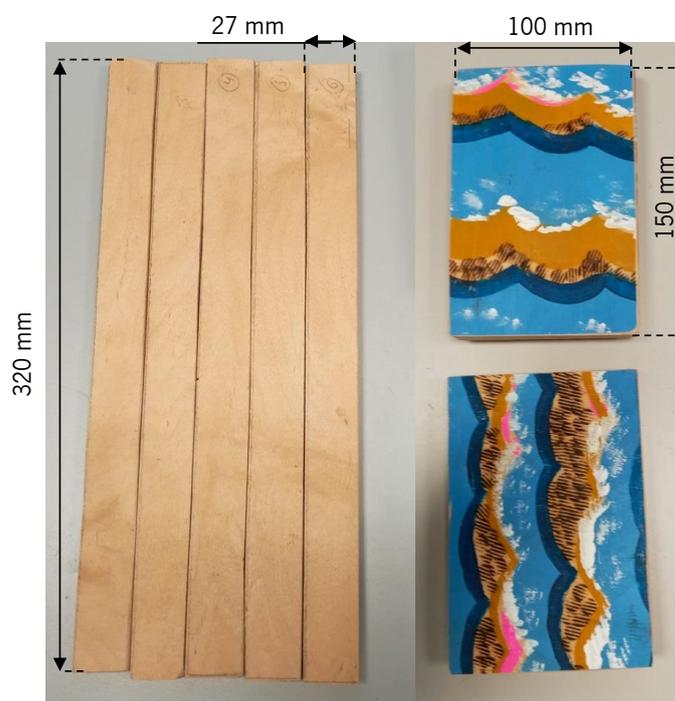


Figura 33 - Provetes retirados da prancha de longboard produzida pela empresa VigTab.

Para os ensaios de flexão foram retirados da prancha 6 provetes e realizados os ensaios utilizando o mesmo método que o implementado nas placas com os novos materiais e definidos no ponto 5.1, ou seja, seguindo a norma *ASTM D7250* correspondente a ensaios de flexão em estruturas sanduiche, com auxílio do equipamento universal de ensaios mecânicos AGX-50KN. Na *Figura 34*, pode-se observar como foram realizados os ensaios a este material.



Figura 34 - Método representativo dos ensaios à flexão realizados para a análise benchmarking.

De modo similar aos ensaios de flexão, foram retirados os provetes da prancha *longboard* enviada pela empresa *VigTab*, devido às limitações referidas foi possível retirar 4 provetes para os ensaios de impacto, os quais foram realizados de acordo com a norma *ASTM D7766* (Procedimento C), correspondente a ensaios de impacto em estruturas sanduiche. Na *Figura 35*, é possível verificar os danos causados nos provetes durante os ensaios de impacto por queda de dardo.

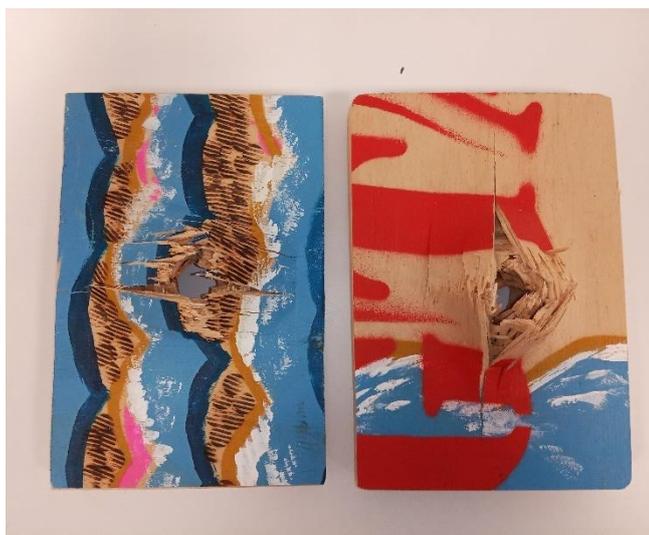


Figura 35 - Danos causados nos provetes de impacto pelo dardo durante os ensaios de impacto.

5.5.2. Apresentação e Discussão dos Resultados

5.5.2.1 – Ensaios de Flexão

A *Figura 36*, corresponde ao gráfico das curvas de tensão/deformação obtidas para os ensaios realizados ao material produzido pela empresa *VigTab*.

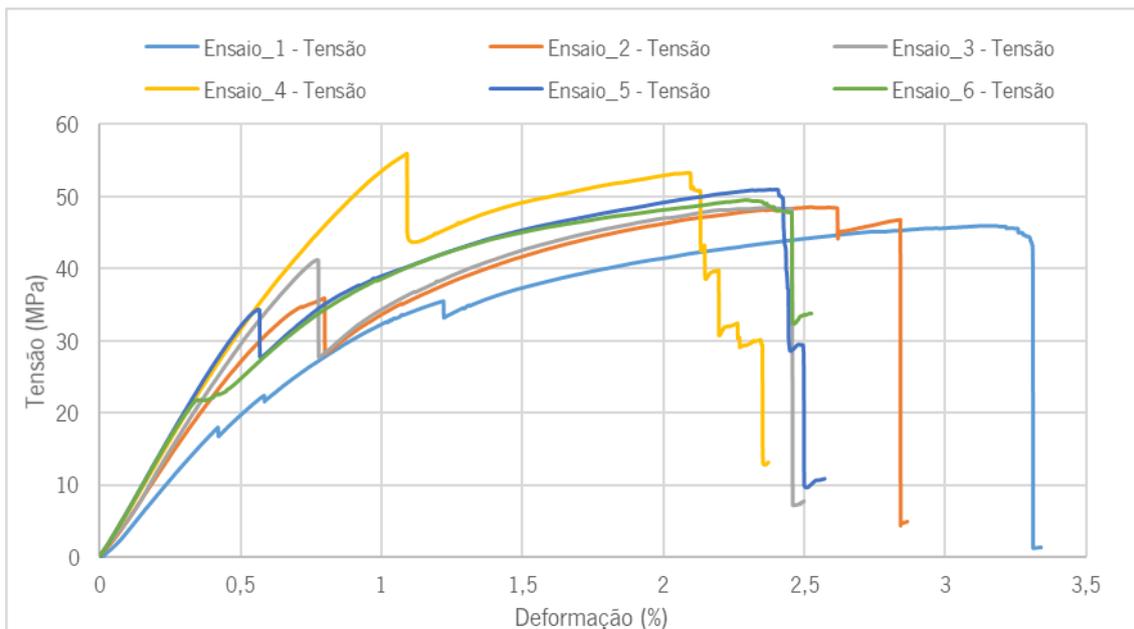


Figura 36 - Gráficos obtidos para os ensaios à flexão realizados no âmbito da análise de benchmarking.

Como se pode observar na *Figura 36*, as curvas representadas, apesar de todas apresentarem o mesmo comportamento, mas diferente daquele que se esperava, verificando-se a existência de descontinuidades ao longo da curva. Este comportamento é facilmente explicado com base no ensaio de flexão realizado, isto porque nos locais do gráfico onde é visível uma “queda de tensão”, corresponde aos momentos dos ensaios onde se observava a descolagem da camada superior da madeira (tem sete camadas, descolava uma camada visível na *Figura 37*).

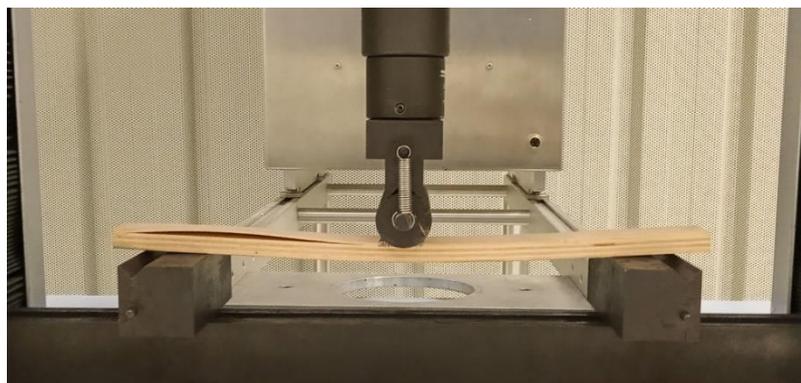


Figura 37 - Descolagem da camada superior do restante laminado de madeira (à esquerda na imagem) aquando dos ensaios de flexão.

É possível afirmar que a produção da tábua dos *VigTab*, não possui grande uniformidade, o que é concordante com a manufatura manual que possuem, sugerindo-se a utilização de pressões maiores para a prensagem das camadas individuais, avaliação da percentagem de humidade das madeiras no momento da colagem (deve ser inferior a 12%, variando consoante tipo de cola utilizado) ou ainda a

utilização de colas mais apropriadas ao material em questão, de modo a melhorar o seu produto final. A *Tabela 6* corresponde aos valores obtidos nos ensaios de flexão para a prancha de *longboard VigTab*.

Tabela 6 - Valores máximos calculados com base nos dados retirados dos ensaios à flexão no âmbito da análise de benchmarking.

Tipo de Material	Prancha <i>VigTab</i>
Força (N)	814,58
Deslocamento (mm)	20,73
Tensão (MPa)	49,89
Deformação (%)	2,70
Módulo Elasticidade (MPa)	8999,50

5.5.2.2. – Ensaios de Impacto

Na *Figura 38*, estão presentes as curvas obtidas nos ensaios de impacto ao material da empresa *VigTab*.

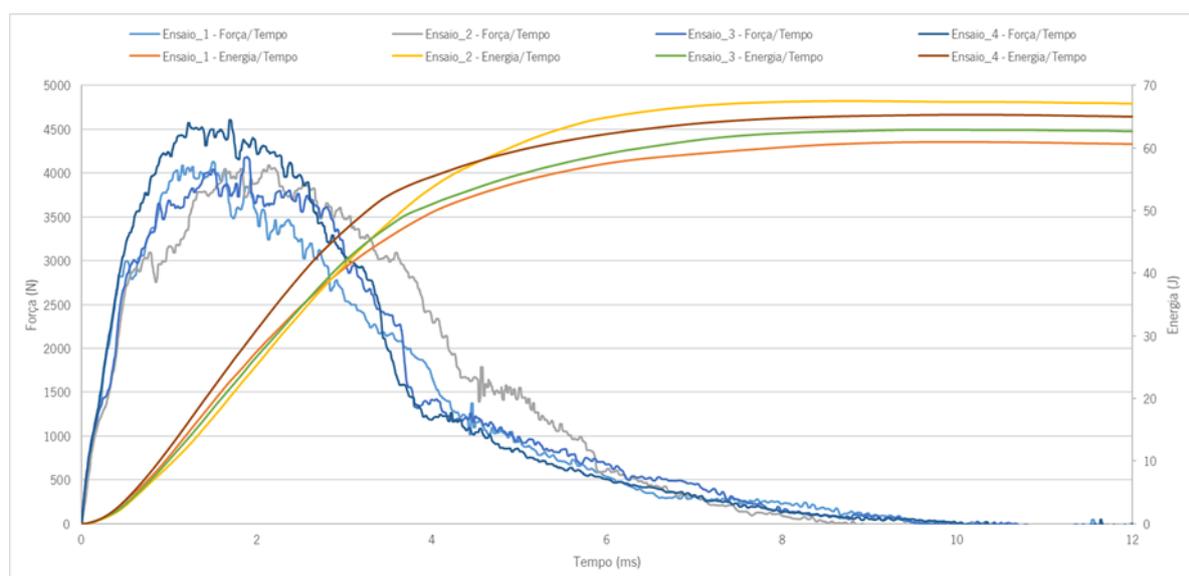


Figura 38 - Gráficos obtidos para os ensaios ao impacto realizados no âmbito da análise de benchmarking.

Como é possível visualizar na *Figura 38*, os gráficos obtidos nos ensaios para o material dos *VigTab*, são bastante reprodutíveis, quer os de absorção de energia, quer os de força máxima, pelo que se pode aferir que o material é equilibrado em termos de propriedades físicas em todo o seu volume, uma vez que os ensaios foram realizados segundo as mesmas condições.

A *Tabela 7*, é referente ao valor médio obtido nos ensaios ao impacto com queda de dardo, para os provetes retirados da prancha de *longboard* da empresa *VigTab*.

Tabela 7 - Valores máximos obtidos durante os ensaios ao impacto realizados no âmbito da análise de benchmarking.

Placa	Força Máxima	Energia Absorvida
<i>VigTab</i>	4252,1 N	64,2 J

5.6. – Definição do Material a Utilizar no Protótipo

Para progredir no trabalho e ser possível produzir um *longboard* protótipo, foi necessário avaliar os resultados obtidos, comparando-os entre si com base em alguns critérios. Essas propriedades têm em conta os ensaios realizados aos materiais e ainda outras características como peso, espessura e preço das placas produzidas por infusão.

Para uma fácil comparação dos resultados dos ensaios entre as diversas amostras, estão disponíveis nas *Figuras 39 e 40* os gráficos das curvas médias de cada amostra relativo aos ensaios de flexão e impacto, respetivamente.

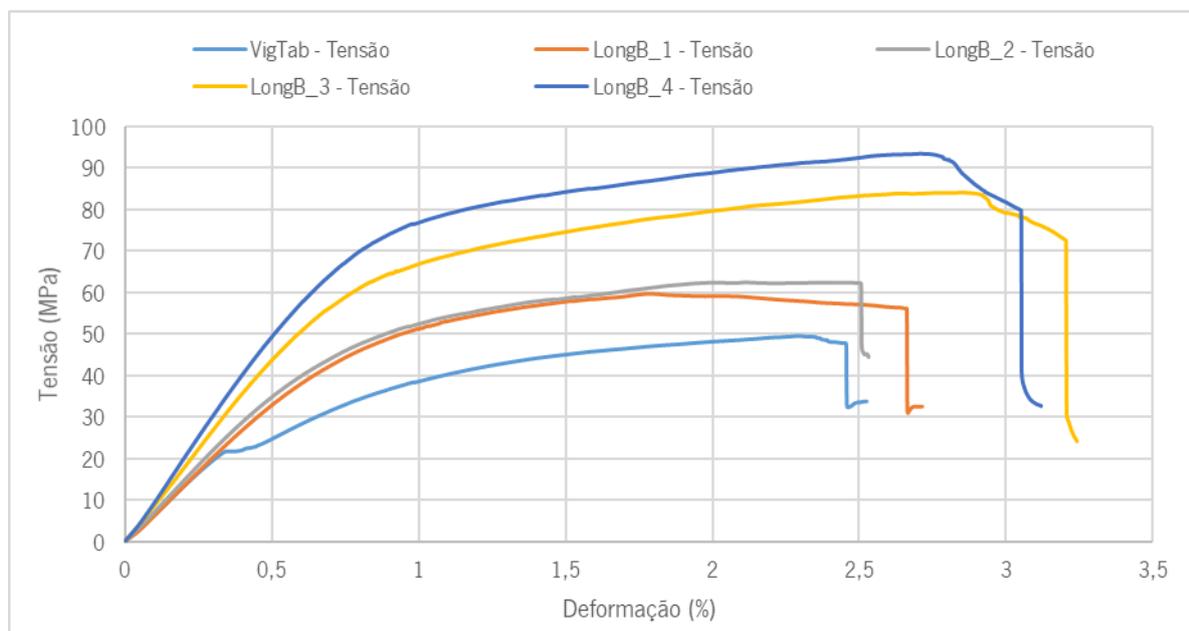


Figura 39 - Disposição comparativas das curvas médias relativas aos diferentes materiais testados à flexão no âmbito da produção de uma prancha de longboard protótipo.

Como se pode verificar, existem 3 comportamentos distintos na extensão das curvas obtidas para os diferentes materiais testados à flexão. No gráfico da *Figura 39*, é possível afirmar que os materiais das placas *LongB_1* e *LongB_2* possuem um comportamento muito idêntico com valores de pico (de tensão e deformação) muito próximos um do outro, o que acontece de igual forma (mas com comportamento

menos vincado) entre os materiais das placas *LongB_3* e *LongB_4*. Por fim, considerando a curva da prancha de *longboard* da empresa *VigTab*, pode-se constatar que as propriedades obtidas são muito inferiores às propriedades das restantes placas produzidas por infusão de resina a vácuo.

O comportamento das diversas placas de compósitos testados é facilmente explicável pelos materiais que as constituem, ou seja, a diferença que se verifica entre as placas *LongB_1* e *LongB_2* relativamente às placas *LongB_3* e *LongB_4*, reside essencialmente no tipo de madeira utilizado, uma vez que o folheado de madeira utilizado nas placas *LongB_3* e *LongB_4* é mais flexível que a madeira de 3 mm utilizada nas duas configurações iniciais, resultando num material mais deformável e capaz de resistir a tensões superiores. Outro fator para o comportamento divergente reside na presença de mais camadas de fibras de carbono nas placas *LongB_3* e *LongB_4*, o que influencia novamente as propriedades em flexão destes compósitos.

No Anexo B estão disponíveis as curvas médias obtidas nos ensaios de flexão com os valores referentes à força exercida na placa durante o ensaio e ao deslocamento sofrido pela mesma placa (gráficos de força/deslocamento).

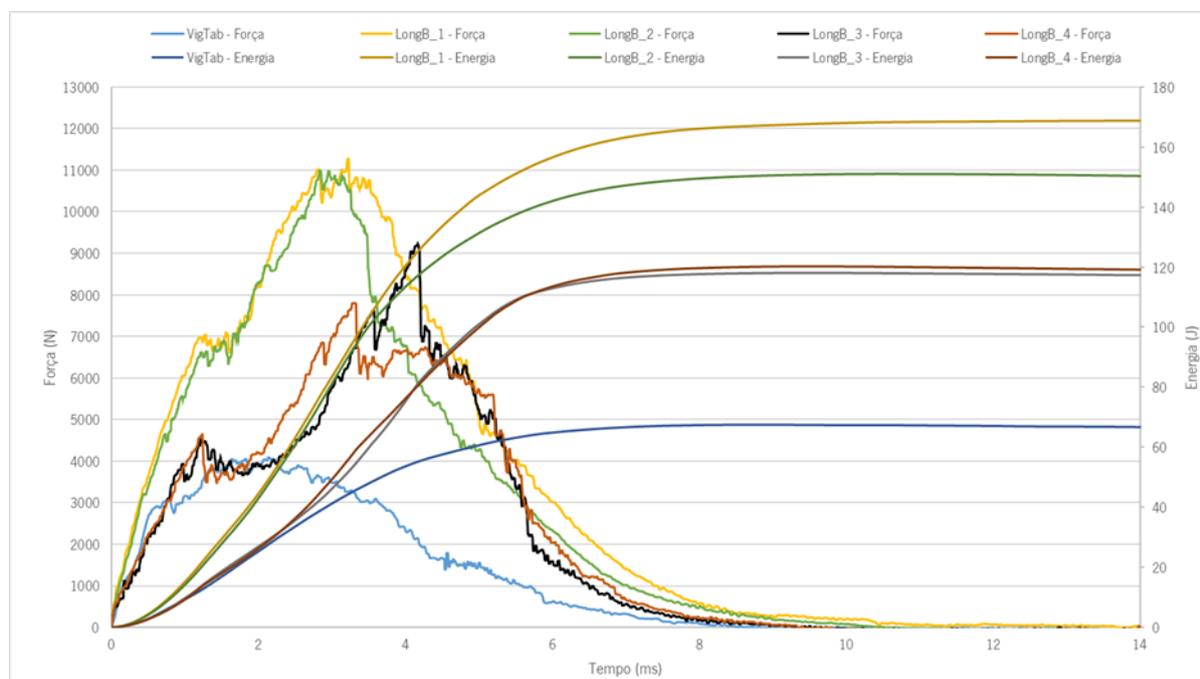


Figura 40 - Disposição comparativas das curvas médias relativas aos diferentes materiais testados ao impacto no âmbito da produção de uma prancha de *longboard* protótipo.

Como se verifica na *Figura 40*, é possível agrupar em três grupos os valores médios dos materiais testados ao impacto, tal como aconteceu nos ensaios de flexão presentes na *Figura 39*. O material com piores propriedades, continua a pertencer ao material provido pela empresa *VigTab*, uma diferença mais

visível do que a registada nos ensaios fletores. Este material composto, é seguido das placas *LongB_3* e *LongB_4*, como seria de esperar, sendo que as placas *LongB_1* e *LongB_2* são as que possuem as melhores propriedades ao impacto dentro de todos os compósitos testados. Um dos fatores que influencia as propriedades ao impacto é a espessura da amostra sendo que a das placas *LongB_1* e *LongB_2* são as mais elevadas. A madeira com espessura de 3mm está presente em duas configurações tendo sido dimensionada para suportar cargas o que não acontece com os folheados cuja sua presença serve exclusivamente para o *design* da peça, por este motivo a madeira de 3 mm tem um comportamento ao impacto muito superior ao folheado pelo que promove melhores propriedades aos laminados nos quais está presente. A presença de fibras de aramida tem uma influência superior entre as placas *LongB_1* e *LongB_2* comparativamente à influência nas placas *LongB_3* e *LongB_4*, pela que a causa mais provável para este facto seja uma melhor interface fibra de aramida/epóxi na placa *LongB_1* quando comparada com a mesma interface na placa *LongB_3*.

Na *Tabela 8*, estão listadas as propriedades das diversas placas ensaiadas, de modo a ser possível realizar tabelas de ponderação, que irão ajudar a escolher qual o compósito mais indicado, tendo em vista os requisitos estipulados. A esta tabela, devem ser associados os valores obtidos para os ensaios, presentes nas *Tabelas 4, 5, 6 e 7* desta tese de mestrado.

Tabela 8 - Propriedades finais detidas pelas diversas placas estudadas neste capítulo 5 da dissertação de mestrado. De notar que os valores presentes na tabela dizem respeito a placas com igual comprimento e largura.

Placa	VigTab	LongB_1	LongB_2	LongB_3	LongB_4
Peso do Material (g)	1420	1650	1686	1140	1120
Espessura do Material (mm)	11,5	14,7	15,15	12,6	12,9

Aos valores concretos presentes na *Tabela 8*, deve juntar-se os preços das placas, uma vez que também são um ponto importante na produção da prancha de *longboard*. Desta forma, deve ter-se em atenção que a madeira é o material utilizado mais barato, seguido das fibras de vidro e espumas PVC – que são utilizados em todos os novos laminados – estes, por sua vez, são seguidos das fibras de carbono e por fim das fibras de aramida que correspondem ao material mais caro utilizado nos compósitos produzidos anteriormente por infusão de resina a vácuo. Definido o fator de ponderação preço, é possível ordenar as placas de acordo com o custo final de produção. Assim sendo, da mais barata para a mais cara vem: *VigTab; LongB_4; LongB_3; LongB_2; LongB_1*.

De acordo com todos os resultados obtidos e com a definição dos restantes fatores foi possível proceder ao desenvolvimento das tabelas de ponderação que se encontram representadas nas *Figuras 41 e 42*.

A *Figura 41* foi construída com base na perspetiva do autor deste trabalho de investigação, na medida em que a comparação entre os fatores de ponderação é subjetiva, isto é, a importância dada a cada fator pode ser diferente consoante as ideias de cada investigador. Nesta primeira tabela, após efetuada a comparação entre fatores, é possível retirar um valor ponderal, o qual indica a importância individual do fator em questão.

X	Modulo Flexão	Força Máxima (Tensão)	Tensão Maxima (Tensão)	Força Máxima (Impacto)	Energia Absorvida (Impacto)	Preço Material	Peso Material	Espessura do Material	TOTAL	Parcial
Modulo Flexão		1	0	2	1	1	0	0	5	0,089
Força Máxima (Flexão)	1		0	1	0	0	0	0	2	0,036
Tensão Maxima (Flexão)	2	2		2	2	1	1	1	11	0,196
Força Máxima (Impacto)	0	1	0		0	1	0	0	2	0,036
Energia Absorvida (Impacto)	1	2	0	2		1	1	1	8	0,143
Preço Material	1	2	1	1	1		1	1	8	0,143
Peso Material	2	2	1	2	1	1		1	10	0,179
Espessura do Material	2	2	1	2	1	1	1		10	0,179
Total	9	12	3	12	6	6	4	4	56	1,000

Figura 41 - Imagem retirada de uma tabela interativa do Excel.

Na *Figura 42*, os valores introduzidos são concretos e correspondem à realidade tendo sido obtidos por processos fidedignos. Os valores obtidos, são ordenados do melhor para o pior em relação às placas sendo colocados na tabela. A soma destes valores é multiplicada pelo valor ponderal obtido anteriormente, sendo retirada a melhor placa para a função desejada (prancha *longboard*). Assim, recorrendo a essa tabela, chegou-se à conclusão de que a placa compósita mais indicada é a *LongB_4*, seguido pela placa *LongB_3*.

X	VigTab	Placa_LongB_1	Placa_LongB_2	Placa_LongB_3*	Placa_LongB_4*
Modulo Flexão	3	1	4	2	5
Força Máxima (Flexão)	1	4	5	2	3
Tensão Maxima (Flexão)	1	2	3	4	5
Força Máxima (Impacto)	1	5	4	3	2
Energia Absorvida (Impacto)	1	5	4	3	2
Preço Material	5	1	2	3	4
Peso do Material	3	2	1	5	4
Espessura do Material	5	2	1	4	3
Total (x Parcial)	2,82	2,38	2,48	3,61	3,71

Figura 42 - Tabela retirada do Excel da qual resulta a melhor placa de acordo com a importância dada a cada propriedade dos materiais.

5.7. – Produção do Molde para Infusão do Produto Final

Através do modelo 3D enviado pela empresa *VigTab*, e após alguns reajustes foi possível desenhar a geometria de um molde para a prototipagem da prancha, o molde foi desenvolvido no *software SolidWorks*, propriedade da *Dassault Systèmes SA*, sendo obtido o modelo 3D visível na *Figura 43*.

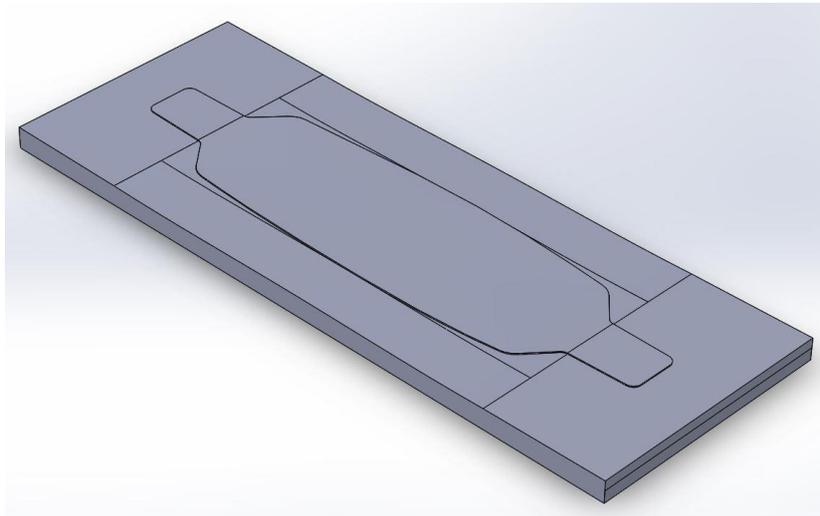


Figura 43 - Molde 3D para a prancha de longboard, desenhado em SolidWorks a partir de um modelo existente no mercado, produzido e comercializado pela empresa galega VigTab.

O material escolhido para o molde foi o MDF (*medium density fiberboard*), que é um material com boa rigidez e de fácil maquinação e retificação. Os contornos a realizar na placa MDF, foram concebidos no programa *PowerMill®*, detido pela empresa de *software Autodesk Inc.*, e introduzidos nos controles do robô (com o modelo *Motoman MH50*, fabricado pela empresa japonesa *Yaskawa*). Após a maquinação, preparou-se a superfície para receber o primário e posteriormente foi dado o acabamento final, utilizando uma tinta acrílica com vista à lacagem do molde, impermeabilizando-o e conferindo-lhe um bom acabamento superficial.

Na *Figura 44 a)*, é mostrado o molde após maquinação, e na *Figura 44 b)* o molde final pronto a ser utilizado no processo de infusão de resina a vácuo.

No Anexo C podem ser vistos os restantes procedimentos efetuados na produção do molde para infusão.

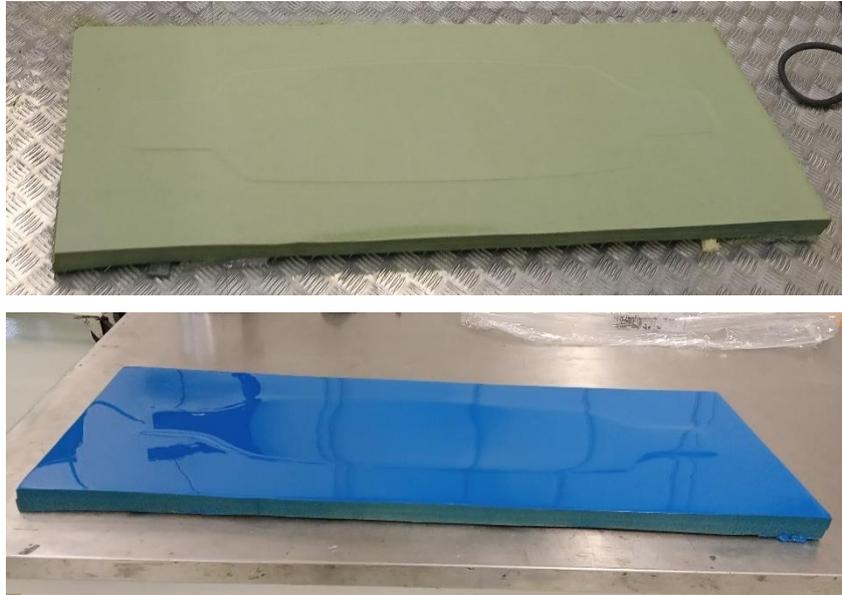


Figura 44 - a) Molde acabado de maquinar pelo robô de maquinação; b) Molde final pronto para o processamento do protótipo.

5.8. – Produção do *Longboard* Protótipo

Para finalização do desenvolvimento do *longboard*, foi necessário a produção de protótipos, um para a empresa *VigTab* e outro para demonstrador no *PIEP*.

Após a construção do molde, foi efetuada a infusão a vácuo para produção dos *longboards*. O processo de infusão a vácuo e preparação das matérias-primas é descrito de seguida, ponto a ponto, pelo que poderá constituir um guia útil para a reprodução integral deste trabalho de investigação. Certos pontos possuem uma explicação para a sua execução e importância na evolução do projeto. É ainda de salientar, que o procedimento que a seguir se explica é o mesmo que foi utilizado no processamento das placas para os ensaios.

No Anexo D, é possível ver as fotos de todos os desenvolvimentos realizados na infusão a vácuo para a produção do protótipo.

1. Preparação da matéria-prima (reforços):

- Corte dos reforços utilizados no laminado (fibras de vidro e carbono);
- Corte do núcleo utilizado no laminado (espuma de PVC);
- Rebaixo à espessura da espuma, com auxílio do robô (baixou de 10mm para 8mm);

- Furação da espuma no *LASER* (para permitir a passagem da resina pelo centro do laminado), com furo de 2mm diâmetro e espaçamento entre furos de 25 mm horizontal e verticalmente;
- Retificação da espuma, de modo a retirar pontos não desbastados pelo robô, suavizando toda a superfície da placa PVC.
- Corte dos folheados de madeira;
- Furação dos folheados no *LASER* (para permitir a passagem da resina através da madeira, visto ser um material opaco ao avanço do fluxo de resina), com furo de 0,5mm e espaçamento de 40 mm nas duas direções.

É importante reter que os cortes às matérias-primas foram efetuados com as mesmas dimensões, correspondendo a 1100 mm por 340 mm. Estas dimensões já consideram uma aba a toda a volta do produto, facilitando os acabamentos à prancha protótipo, uma vez que é nas abas dos compósitos que são acumulados defeitos como bolhas de ar, poços de resina e buracos de alfinete (*pin holes*). Desta forma, estes defeitos ficam fora do contorno da peça, aumentando as probabilidades de o produto final possuir um bom acabamento superficial.

2. Preparação da infusão:

- Aplicação de desmoldante ao molde (em três etapas distintas, segundo diretrizes do fabricante);
- Colocação do laminado no molde, segundo a estrutura presente na placa *LongB_4*;
- Colocação do *peel ply*, cuja função é facilitar a desmoldagem da peça final, impedindo a colagem do saco de vácuo e *flow mesh* (rede de distribuição de resina) à peça final;
- Colocação da *flow mesh*, que serve para facilitar o escoamento de resina pela peça. A rede foi colocada com uma aba ao longo do laminado, atrasando a frente de fluxo da resina, permitindo assim que locais não impregnados no centro do compósito tenham tempo para serem totalmente impregnados de resina.
- Aplicação dos tubos para entrada e saída de resina, colocados ao longo do comprimento da prancha, diminuindo o caminho percorrido pela resina no molde e, por sua vez diminuindo as quedas de pressão (que são tanto maiores quanto mais longo for o caminho a percorrer pela resina);
- Colocação do saco de vácuo (que funciona como um “molde” superior, que pressiona o laminado contra as paredes do molde em MDF);
- Aplicação de vácuo e testes de fuga de ar.

O teste para averiguar as fugas de ar que possam existir no molde, consiste em desligar o vácuo e verificar a evolução da pressão no interior do molde. Normalmente, com o vácuo ligado é possível obter uma pressão absoluta com valor próximo dos 13 mbar (dependendo da potência da bomba em utilização), valor que não deve ultrapassar os 20 mbar após realização dos testes de fuga (no caso desta prancha o valor manteve-se nos 13 mbar). De notar que estes valores absolutos de vácuo não são regra geral os da indústria, no entanto são os valores considerados ideais para o departamento de compósitos do *PIEP*.

3. Preparação da resina e infusão a vácuo:

- Cálculo teórico da resina a utilizar na infusão. Este cálculo tem em consideração a resina perdida nos consumíveis (tubos, *flow mesh* e *peel ply*), e foi calculado para um balanço mássico de 50/50 entre a matriz polimérica e os reforços;
- Mistura da resina com o endurecedor segundo indicações do fabricante;
- Remoção de gases da mistura de resina epóxida, recorrendo a uma estufa de vácuo. Fator muito importante, contribui para a diminuição da fração volúmica de vazios no interior do produto final. A ação do vácuo na resina, é apoiada pela lei de Henry, que diz que “*o ar dissolvido na resina é diretamente proporcional à sua pressão parcial*”. A pressão parcial, é aquela que a quantidade de gás presente na mistura, exerceria em determinado reservatório, caso fosse o único elemento presente no seu interior, nas mesmas condições de temperatura que a mistura de resina utilizada no processamento da prancha. A aplicação de pressão relativa negativa (vácuo de aproximadamente 15 mbar, que corresponde a -985 mbar pressão relativa), faz com que as bolhas que se encontram dissolvidas na resina se desloquem para o exterior desta, uma vez que se tornam menos solúveis na mistura de epóxi, acabando por colapsar sobre si mesmas no topo do reservatório em contacto com o “ar” [35][36].
- Colocação do *resin trap* (local de aprisionamento de resina entre a peça e a bomba de vácuo, que impede a deslocação da resina para o interior da bomba, o que poderia inutilizar a mesma);
- Introdução dos tubos no recipiente com a mistura de resina efetuada anteriormente;
- Início da infusão;
- Equilíbrio de pressões quando a peça está totalmente impregnada.

O equilíbrio de pressões é muito importante, visto que grande parte dos defeitos superficiais existentes em peças fabricadas por infusão, são causados neste ponto. Este equilíbrio consiste em aumentar a pressão no molde gradualmente para os 600 mbar (valor recomendado internamente na empresa),

impedindo uma sobre compactação do compósito durante o processo de cura da resina. A sobre compactação, pode induzir a formação de bolhas dentro do molde, reduzindo drasticamente a qualidade do acabamento superficial, podendo ainda aumentar a fração volúmica de vazios do produto final influenciando diretamente as propriedades mecânicas da prancha.

4. Desmoldagem e acabamentos:

- Desmoldagem manual da prancha;
- Corte da prancha com a geometria pretendida, o corte é efetuado seguindo a marcação na peça originada por uma linha de corte previamente maquinada no próprio molde que delimita a área da geometria final;
- Por fim são realizados os acabamentos finais à prancha, como o aperfeiçoamento das laterais da prancha e a aplicação de verniz.

Na *Figura 45* está visível o protótipo da prancha *longboard*.



Figura 45 - Protótipo final da prancha de Longboard. É possível verificar o design de toda a prancha bem como o pormenor existente nas bordas da prancha.

5.9. – Avaliação do Produto Final

Os testes realizados ao produto final, consistem, sobretudo, num controlo de qualidade em que são verificados os valores relativos ao peso da prancha e à distribuição de espessuras ao longo de toda a prancha. A avaliação das propriedades da prancha em serviço, serão realizadas pela empresa *VigTab*, no entanto, por uma questão de tempos de execução não serão mencionados os resultados nesta dissertação.

Para o controlo de qualidade realizado, foram avaliadas as propriedades físicas dos dois modelos produzidos e comparados entre si de modo a ter indicação da qualidade do processo realizado. Relativamente ao peso da prancha, o primeiro protótipo obteve uma massa de 1770g, já no segundo registou-se uma massa de 1731g. A diferença é espectável e própria do tipo de acabamentos manuais que foram realizados nas pranchas. Em relação à espessura da primeira prancha obteve-se uma espessura média de 12.16 mm e um desvio padrão de 0.1mm, o que constitui num erro bastante reduzido para um produto com uma área como a do *longboard*. O segundo protótipo produzido obteve uma espessura média de 12.23 mm e um desvio padrão de 0.08 mm. Em suma, os resultados obtidos para ambos os protótipos produzidos revelam um processamento adequado das pranchas na medida em que as qualidades físicas dos produtos produzidos são muito semelhantes entre si.

6. Produção da Prancha de *Skateboard*

O desenvolvimento e produção da prancha de *skateboard*, requer um procedimento mais complexo comparativamente ao *longboard*, isto porque se trata de um projeto desenvolvido do zero, contrariamente ao que sucedeu com a prancha desenvolvida no capítulo 5, onde existia uma base de referência quer a nível de geometria como de propriedades a obter. Neste capítulo, estarão presentes todos os desenvolvimentos efetuados, bem como as dificuldades que foram surgindo, e por fim os resultados obtidos durante todo o processo de desenvolvimento da prancha de *skateboard*.

Este trabalho, contempla uma fase inicial referente a um desenvolvimento preliminar dos materiais, na qual serão produzidas placas compósitas para ensaios com as matérias primas existentes no *PIEP*, e uma segunda fase com construções de laminados mais complexas e difíceis de processar, que teoricamente devem possuir melhores propriedades mecânicas que as estruturas desenvolvidas inicialmente.

6.1. Definição das Especificações

Na área da engenharia, entende-se por requisito qualquer definição documentada que um produto deve atender, ou seja, é um guia que exige um certo comportamento ou propriedade a um determinado artigo. Assim sendo, os requisitos são informações fundamentais no desenvolvimento do projeto, conferindo ao mesmo as linhas básicas às quais o produto final deve corresponder. Caso aquilo que se pretenda, seja possuidor de valores e propriedades exatos, esses requisitos passam a especificações, que o produto final deve sustentar após o seu fabrico.

No trabalho que aqui se apresenta, a definição de requisitos/especificações, irá incidir essencialmente no material a utilizar na construção do compósito, no entanto, o produto final também será alvo de certas especificações a ser consideradas na produção do mesmo. Ainda de referir que as especificações ligadas ao material, têm como origem as cargas e o ambiente a que a prancha de *skateboard* estará sujeita.

Inicialmente as especificações a considerar, irão incidir no conjunto de materiais a utilizar no produto final, seguindo-se aquelas que apenas se referem ao *skateboard*.

Relativamente ao material a utilizar, o projeto em desenvolvimento requer a utilização de madeira, em conjunto com outros materiais. Para a escolha de todos os materiais, deve ser considerada uma gama de temperaturas de serviço que se situa entre os -10 °C e os 85 °C devido à necessidade de abranger

uma grande área geográfica onde as temperaturas durante o ano possam ser extremas, especialmente em zonas onde as temperaturas são extremamente baixas. A escolha do limite superior no intervalo de temperaturas, está relacionada com a temperatura a que um interior automóvel pode chegar, caso esteja a ser incidido diretamente pelo sol [14]. Essa temperatura elevada pode danificar o *skate* caso este tenha sido esquecido dentro do carro e não tenha sido realizada uma boa seleção de materiais.

Na mesma linha de pensamento, deve ter-se atenção ao material que irá estar em contacto com o exterior. O facto de todos os praticantes usarem uma lixa (*grip tape*), com vista a aumentar o atrito entre a prancha e o calçado, deve-se ter em consideração a seleção de materiais exteriores, isto porque o adesivo presente na lixa deve ter boa adesão ao material usado no exterior da prancha.

Entrando na área da resistência mecânica, o material selecionado deve conferir ao produto final, um elevado comprometimento entre a flexibilidade e a rigidez, suficiente para suportar todas as cargas a que o material fica sujeito. De modo a dimensionar mecanicamente o *skate*, deve-se ter em conta as cargas que este irá suportar, tendo em conta o peso médio de um homem adulto português, estabelecido em 75 kg [15] para uma altura média de 172.8 cm [16], tenciona-se construir o *skate* de modo a que este aguente, no mínimo, o peso do desportista associado aos movimentos que este efetuar na prancha. Neste ponto do projeto, é necessário procurar os modos de falha do *skateboard*. Considerando que a maioria dos desportistas não se aventura em saltos superiores a 2 m de altura, deve ser garantido que o *skate* suporta quedas a esta altura. O cálculo da energia potencial é visível na *Equação 4*.

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad \text{Equação 4}$$

Realizados os devidos cálculos, obteve-se o valor de 1519 J para a energia potencial.

Na *Equação 4* a massa (m), corresponde à soma do peso próprio do *skate* (que não poderá exceder os 2.5 kg), com o peso do desportista fixado anteriormente. O h é a altura do salto considerada, o g corresponde à aceleração gravítica e por fim a energia potencial representada na equação por E_p . É de salientar, que as cargas impostas na prancha de *skateboard* são distribuídas por toda a superfície e espessura do produto, uma vez que as fibras contínuas ajudam a distribuir cargas ao longo do seu comprimento. Este é um fator importante, uma vez que permitirá à prancha absorver mais energia do que a que seria absorvida na mesma área, mas sem distribuição de cargas pelas fibras.

Outro dos modos de falha do *skateboard*, será o embate com outros objetos, como por exemplo um muro. De modo a salvaguardar o produto final, deve ter-se em consideração a energia cinética, E_c , que

ocorre no momento do embate (que corresponde ao valor obtido na *Equação 5*). Para o valor obtido, considerou-se como massa os 77.5 kg utilizados também na *Equação 4*, e como velocidade 20 milhas por hora [17], que corresponde a 8.94 m/s.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \text{Equação 5}$$

Assim sendo o valor da energia cinética fixou-se nos 3097,04 J. De notar que as 20 milhas/hora, corresponde a uma velocidade superior à que é praticada na rua, que normalmente é fixada nos 20 km/h (≈ 12.43 milhas/hora). Existe um recorde do *Guinness* registado nos 146.73 Km/h [18], no entanto estes recordes são realizados em meios sem obstáculos de modo a não haver embates, que ponham em risco a integridade quer do *skate* quer do praticante.

Sabendo que a flexão é a maior solicitação a que está sujeita a prancha de *skateboard*, este é um campo de extrema importância nos requisitos impostos ao material. Dessa forma os valores de flecha máxima e forças aplicadas à prancha devem ser considerados, de modo a evitar falhas do produto em serviço. Para tal, serão testadas pranchas de *skate* (por exemplo com a tecnologia *7Ply*), de modo a obter valores típicos, que possam futuramente ser comparados com as estruturas desenvolvidas. De modo a cumprir com os objetivos do projeto e criar uma prancha de elevado desempenho, deve-se garantir que os valores típicos de flexão para um material de uso comum sejam inferiores aos obtidos nos laminados a produzir. Ensaaiando-se o material ao impacto, obtém-se valores para a energia absorvida e tensões máximas ao impacto do laminado presente nas pranchas tradicionais de *skateboard*. Recorrendo aos valores obtidos, poderemos avaliar se o compósito criado neste trabalho de investigação, possui melhores propriedades que as tecnologias usadas atualmente.

A resistência à abrasão é uma questão a ter em conta, visto que o desgaste provocado pelo asfalto, passeios e corrimãos ao fundo da prancha, podem expor fibras que quando manuseadas ferem o utilizador o que constitui o maior entrave à introdução de pranchas reforçadas com fibras no seio dos praticantes do *skateboard*. No entanto, é facilmente notória a melhor capacidade da resina epóxi (material escolhido para servir de matriz à prancha a produzir, como pode ser consultado mais à frente na secção 6.2.1.) ao desgaste abrasivo quando a comparamos com a madeira, pelo que não será necessário o recurso a ensaios de abrasão para ter a certeza de qual o material que melhor se comporta ao desgaste abrasivo. Com vista a evitar acidentes, o material usado deve ser durável e resistente o suficiente para evitar a exposição de fibras. Este fator (a exposição de fibras), pode ainda causar a falência

precoce do produto, uma vez que a diminuição da camada protetora de resina pode promover a entrada de humidade, o que prejudicaria as madeiras envolvidas nos laminados. Todavia, como já foi referido, seria pior a inexistência da camada protetora em resina, algo que se verifica na maioria das pranchas existentes no mercado atual. Todos os fatores apresentados sugerem que os ensaios à abrasão não são um ponto muito importante para o sucesso da prancha a desenvolver nesta dissertação de mestrado.

Outro fator relevante é o comportamento da prancha à chuva, devendo-se ao facto de que as madeiras não podem estar diretamente expostas à água. Para precaver danos futuros, durante o processo de seleção de materiais, deve-se selecionar uma resina que não comprometa os laminados, isto é, que tenha uma absorção de água próxima de zero.

Entrando no domínio das especificações da prancha de *skateboard*, é necessário definir as dimensões que esta irá possuir. Considerando a estatura média de 172.8 cm e o número de calçado mais utilizado pelos homens, o 42 [19], recorreu-se à *Tabela 9* [2], e obteve-se o valor de 32 polegadas (81.3 cm) para o comprimento da prancha e 8.125 polegadas (20.6 cm) para a sua largura, como valores aconselhados para as dimensões da prancha. Quanto à espessura, esta não deverá ultrapassar a meia polegada (1.27 cm) que é a espessura máxima utilizada nos dias de hoje. Após uma pesquisa no mercado existente, constatou-se que o peso da prancha deverá fixar-se no máximo nos 1.5 kg, valor este que poderá chegar os 2.5 kg com a montagem total do *skate*.

Após uma avaliação de mercado, em pontos de venda de material relacionado com o *skateboard*, atestou-se que os produtos mais vendidos a iniciantes, se encontram numa gama de preços que varia entre os 40€ e os 70€. No entanto, os desportistas mais experientes procuram melhor qualidade, para permitir obter melhor manutenção das propriedades durante mais tempo, fixando uma gama de valores de compra entre os 65€ e os 110€. Existem à venda produtos com preço inferior aos 40€ e superiores aos 110€, no entanto poucos são os clientes que compram visto tratar-se de produtos com materiais muito avançados (superiores aos 110€) ou com muito fracas propriedades mecânicas (preço inferior a 40€). Através da pesquisa efetuada pode-se concluir que, o *skate* deve ser fabricado de modo a que se obtenha lucro com a venda do produto (somente da prancha) com preços entre os 70€ e os 110€.

Na *Tabela 10* estão representados os valores finais correspondentes aos requisitos especificados.

Tabela 9 - Comprimento e largura ideal para a prancha de skate, tendo em conta a altura do praticante, bem como o comprimento do seu pé. Adaptado de: [2]

Altura do Praticante	Comprimento da Prancha	Largura da Prancha	Tamanho dos Sapatos (UE)
<1400 mm	28" - 30,5"	7,5" - 7,875"	36
<1500 mm	30,5" - 31,5"	7,5" - 7,875"	36,5
1500 - 1750 mm	31.5" - 31,875"	7,625" - 8"	37,5
1600 - 1850 mm	31.75" - 32"	7,625" - 8"	38
1700 - 1950 mm	31.875" - 32,25"	7,75" - 8"	38,5
1800 - 2100 mm	32" - 32,5"	7,75" - 8,125"	39
> 1900 mm	> 32,5"	7,875" - 8,125"	40
		7,875" - 8,25"	40,5
		8" - 8,25"	41
		8" - 8,25"	42
		8" - 8,375"	42,5
		8" - 8,375"	43
		8,125" - 8,5"	44
		8,125" - 8,5"	44,5
		8,25" - 8,5"	45
		8,25" - 8,625"	45,5
		8,375" - 8,625"	46
		8,5" - 8,625"	47,5
> 8,5"	48,5		

Tabela 10 - Agrupamento de todos os requisitos referentes ao texto presente nesta secção da dissertação.

Requisito	Valor
Possuir Madeira na sua constituição	—
Face superior aderente ao adesivo da lixa	—
Resistência ao impacto (carga distribuída)	1519 J (vertical) // 3097,04 J (horizontal)
Resistência a abrasão	Superior ao material de referência (colmatar na seleção materiais)
Resistência a flexão	Superior ao material de referência
Temperaturas de Serviço	-10 °C até 85 °C [14]
Absorção de água	Aproximadamente 0%
Dimensões	32" Comprimento; 8.125" largura; 0.5" espessura máxima
Peso máximo (sem acessórios)	1.5 kg
Custo de venda (apenas prancha)	70€ a 110€.

6.2. Estudo Preliminar

De modo a poder progredir no desenvolvimento do trabalho, a produção dos laminados tem um papel fundamental naquilo que poderá ser o sucesso deste projeto e do produto final resultante. Desta forma, deve-se ser criterioso na seleção dos materiais e com a devida disposição dos mesmos no compósito, uma vez que assim se assegura o cumprimento de todos os requisitos e acautela a falha do produto em serviço.

Nesta avaliação preliminar, serão desenvolvidos materiais compósitos utilizando exclusivamente matéria-prima existente nas instalações do PIEP, de modo a acelerar o início do processo de produção. Serão ainda elaborados estudos iniciais (como o desenvolvimento de uma caracterização estrutural em ambiente computadorizado) de modo a prever futuras complicações no desenvolvimento da prancha de *skateboard*.

6.2.1. Definição dos Laminados a Produzir no Projeto Preliminar

A definição teórica dos laminados, é um processo demorado que deve ter em atenção a finalidade do produto final. Os laminados, devem corresponder aos requisitos do projeto, cumprindo de forma eficaz o que lhes é exigido tanto a nível de resistência mecânica, como suporte das forças aplicadas ao compósito, como físicas, nomeadamente no que diz respeito às espessuras finais (muito importante, pois tem influência no w_f – fração de fibras- que por sua vez interferem nas propriedades mecânicas) e ainda outras solicitações termomecânicas e ambientais (tendo especial atenção aos agentes corrosivos que interferem nas restantes propriedades da prancha de *skate*) a que a prancha poderá vir a estar sujeita.

No Anexo E, podem ser encontrados, de forma esquemática, todos os laminados conceptualizados, de forma intuitiva, que podem vir a ter ação direta no projeto em execução.

Tendo como ponto de partida os laminados referidos anteriormente, presentes no Anexo E, é necessário reduzir a panóplia de opções a um número mais contido e exequível. A razão da redução, prende-se com a falta de recursos disponíveis, como por exemplo fibras de reforço que não estão disponíveis no *PIEP*, pelo que o melhor será utilizar as matérias primas disponíveis na empresa. Outro fator para a redução, está relacionado com a utilização exclusiva de reforços de alto desempenho, o que exclui à partida os laminados que se apresentam reforçados com fibras de vidro. Na *Figura 46*, estão representados os laminados que serão produzidos para o desenvolvimento do projeto. De notar que em ambos os

laminados presentes na *Figura 46*, o material utilizado como matriz é uma resina de epóxico, visto que este trabalho requer o desenvolvimento de um produto de alta performance. De modo a prever as espessuras das fibras após impregnação das mesmas, foram efetuados cálculos teóricos que serão apresentados de seguida na *Equação 6*, realizados com auxílio dos dados da *Tabela 11*.

Tabela 11 - Propriedades dos materiais a utilizar nas placas a produzir nesta produção preliminar.

Material	Gramagem	Densidade
F. Carbono Unidirecional (C_u)	200 g/m ³	1.77
F. Carbono Equilibrado (Tecido Tafetá - C)	195 g/m ³	1.77
Resina Epoxi	————	1.2

$$e = G \left[\frac{1}{\rho_f} + \frac{1-w_f}{\rho_p \cdot w_f} \right] \quad \text{Equação 6}$$

Onde e corresponde à espessura da placa; G é a gramagem da fibra utilizada; ρ_f é a densidade da fibra; ρ_p é a densidade do polímero; w_f é a fração mássica de fibra, cujo valor foi arbitrado em 50%.

Após a realização dos cálculos segundo a *Equação 6*, foram obtidos os valores de 0.28 mm para todas as lâminas de resina epóxi reforçado com fibra de carbono.

De notar que os valores obtidos para as espessuras das fibras são referentes a cada tipo de fibra de forma individual, pelo que o valor final para a espessura das placas, resulta da soma de todas as camadas envolvidas nos laminados (tal como visto na metodologia para o *longboard*).

SkateB_RTM_Balsa - 7,24 mm

Carbono 0°/90°
Carbono 0°
Carbono 30°
Carbono 45°
Balsa
Carbono -45°
Carbono -30°
Carbono 0°
Carbono 0°/90°

SkateB_RTM_Madeira - 7,24 mm

Carbono 0°/90°
Carbono 0°
Carbono 30°
Carbono 45°
Laminado Madeira
Carbono -45°
Carbono -30°
Carbono 0°
Carbono 0°/90°

Figura 46 – Laminados selecionados a produzir no desenvolvimento preliminar desta dissertação.

6.2.2. Definição das Dimensões dos Laminados

As dimensões das placas a produzir, estão diretamente ligadas ao tipo de ensaios que se pretende realizar, bem como ao número mínimo de amostras que as normas aconselham ensaiar. Com vista a corresponder às especificações acima definidas, devem ser realizados ensaios de flexão e ensaios de impacto por queda de dardo. Seria possível realizar ensaios de abrasão e testes para averiguar a absorção de água por parte do compósito, no entanto, não serão realizados uma vez que estas solicitações podem ser colmatadas na seleção de materiais. Todavia, serão considerados na placa provetes para estes ensaios, com vista a validar esta ideia se necessário. De seguida e com recurso às normas referentes a cada ensaio e ao tipo de material utilizado, são averiguadas as dimensões dos provetes normalizados para cada ensaio. As normas utilizadas são enumeradas de seguida e dizem respeito a materiais plásticos reforçados com fibras longas (compósitos com estruturas laminares):

- Absorção de água – *ISO 62*;
- Ensaio de abrasão – *ISO 9352*;
- Ensaio de flexão – *ISO 14125*;
- Ensaio de impacto por queda de dardo – *ASTM D 7136*

Para maximizar a área disponível nas placas, evitando desperdícios de material, a disposição dos provetes na placa de compósito produzida não pode ser aleatória. Com base nas afirmações anteriores, está representado esquematicamente na *Figura 47*, a área total das placas produzidas, bem como definidos os locais exatos dos provetes referentes aos diversos ensaios.

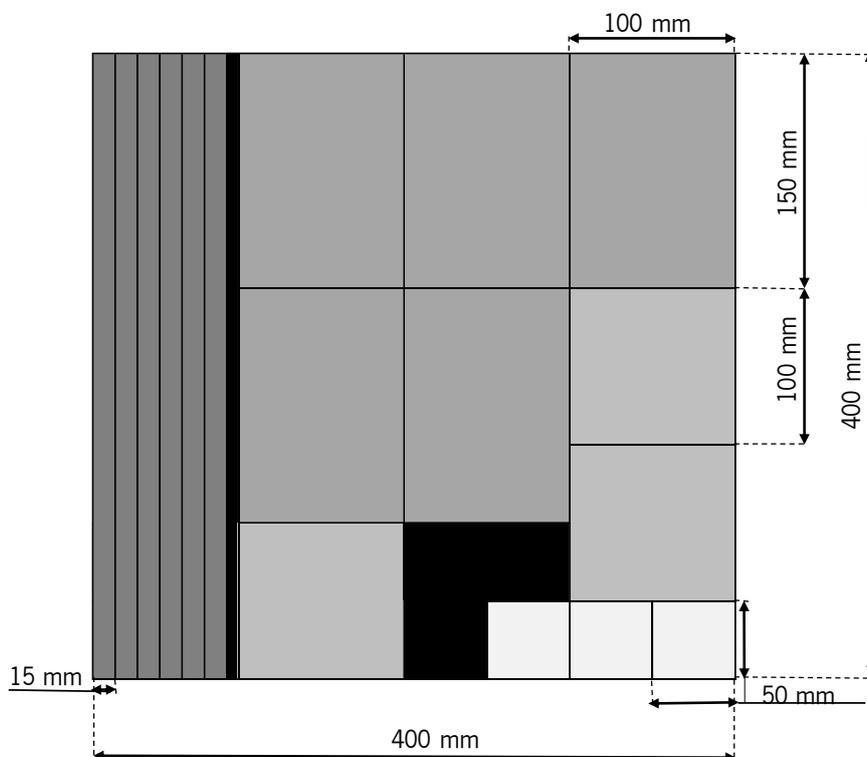


Figura 47 - Disposição dos provetes nas placas a desenvolver.

6.2.3. Desenvolvimento do Molde para Produção das Placas por RTM

De modo a ser possível materializar os laminados, definiu-se qual o método de produção a adotar para a produção das pranchas, como o projeto onde se insere este trabalho requer o aprofundamento na técnica de RTM (*Resin Transfer Moulding*), este será o método de produção aplicado na construção da prancha de *skateboard*. Por razões de verosimilhança dos dados obtidos nos ensaios a efetuar, as placas a ensaiar serão também produzidas pelo mesmo processo de manufatura, visto que desta forma é possível obter frações volúmicas de fibra idênticas, que favorece a obtenção de materiais com propriedades equivalentes.

A definição *a priori* dos processos a utilizar, promove uma melhor organização e perceção dos materiais e ferramentas produtivas que serão necessários utilizar. Uma vez dimensionadas as placas compósitas e definidos os materiais a utilizar, é necessário fabricar um molde que se adeque aos compósitos a

produzir. Desta forma a construção do molde para a injeção de resina, afigura-se como o ponto inicial da produção das placas.

O primeiro passo para a construção do molde, foi a definição da matéria prima a ser maquinada para a obtenção das dimensões definidas. De modo a simplificar a seleção, recorreu-se aos materiais disponíveis nas instalações do *PIEP*, recaindo a escolha do material para o *SikaBlock® M700* (consultar Anexo F, para conferir ficha técnica). Este material, consiste num poliuretano de elevada densidade e pode ser observado na *Figura 48*. A utilização deste material para fabricação de moldes é bastante comum, principalmente para produtos de baixa demanda (séries de produção pequenas), sendo utilizados principalmente para a produção de protótipos.



Figura 48 – Bloco de Sikablock onde será maquinado o molde para as placas a produzir por RTM.

De seguida, urge a necessidade de transpor para um modelo 3D a geometria do molde de modo a ser possível maquinar a matéria-prima com a forma pretendida. Nesta etapa deve-se ter sempre em vista as dimensões das placas a produzir, as entradas e “saídas” de resina, a colocação das guias e ainda o local para colocação do vedante.

No que diz respeito aos locais onde se dá a entrada de resina e sua evacuação (local onde se liga a bomba de vácuo), estes são colocados em locais que teoricamente permitem o enchimento do molde, ao mesmo tempo que não danificam a peça final, isto é, são colocados nas zonas onde não serão retirados provetes, zona a preto visível na *Figura 47*.

Posto isto, a *Figura 49*, exhibe o modelo a 3 dimensões das duas metades do molde para RTM.

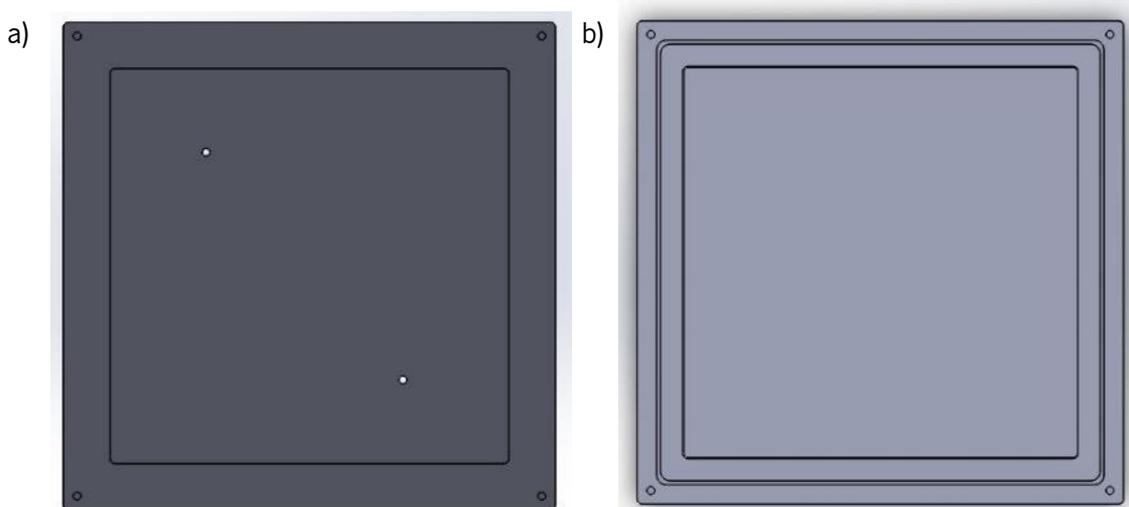


Figura 49 - Molde 3D para RTM. a) Parte superior; b) Parte inferior

No Anexo G, podem ser vistas as imagens 2D do molde com as dimensões finais definidas.

O desenho do molde, presente na *Figura 49*, teve ainda de obedecer a determinadas regras de concepção essenciais para bom funcionamento deste tipo de ferramentas. De seguida são apresentadas três regras adotadas na construção do molde. A primeira (presente na *Equação 7*) é referente à força de fecho mínima que deve ser implementada para manter o molde fechado durante o processamento, impedindo que o mesmo abra aquando da injeção de resina (com o aumento da pressão no seu interior). O segundo dimensionamento (que é calculado com base na *Equação 8*), diz respeito ao cálculo da profundidade do rasgo a efetuar no molde onde será colocado o vedante, este dimensionamento é bastante importante, visto que evita a ocorrência de fugas que é a principal causa de defeitos em peças compósitas. Por fim, na *Equação 9*, é apresentado o cálculo da deflexão teórica que o molde pode sofrer durante o processamento das placas, que dará informação acerca da distribuição de espessuras das placas produzidas, isto é, quanto maior a deflexão do molde, menos uniforme será a distribuição das espessuras ao longo de toda a placa.

- **Força de Fecho**

$$F = \text{Area projetada} \cdot \text{Pressão de Injeção} \quad \text{Equação 7}$$

Sabendo que área projetada do laminado corresponde a 164814,54 mm², ao injetar resina no molde a uma pressão máxima de 0.3 MPa, de acordo com a equação anterior e após inserir todos os valores, será necessário 5,05 Ton para manter o molde fechado.

- **Cálculo para *O-Ring***

$$\text{Profundidade rasgo} = 0.8 \times \text{Diâmetro do vedante} \quad \text{Equação 8}$$

De modo a vedar completamente o molde, e tendo em conta a utilização de um vedante de diâmetro 4 mm, a regra dita que 20% do *o-ring* deve permanecer fora do rasgo de modo a ser comprimido pela parte superior do molde vedando eficazmente. De notar que o rasgo deve ser feito com uma broca de topo raso, de modo a dar espaço para a deformação do vedante aquando do seu esmagamento. Concluindo, a profundidade do rasgo deve ser de 3.2 mm.

- **Cálculo da Flecha Max. do Molde**

$$y = \frac{A \cdot P \cdot B^4}{E \cdot t^3} \quad \text{Equação 9}$$

Na equação anterior, o *A* corresponde a uma constante de valor 0,0138, o *P* é a pressão de injeção (2 bar), o *B* é a largura da placa (406 mm), o *t* é a espessura mínima do molde (32,5 mm) e o *E* é o módulo de elasticidade do *SikaBlock*[®]. Com a introdução destes valores na *Equação 9*, a flecha esperada toma o valor de 1,09 mm.

O cálculo da deflexão do molde é bastante importante, uma vez que esta não pode ser muito elevada, com o prejuízo de obter uma peça final com dimensões erradas. No entanto, segundo Kevin Potter [13], é importante existir uma certa deflexão por parte do molde, principalmente quando o molde se encontra totalmente fechado durante a cura da resina. Este fator, permite obter uma reserva de resina capaz de colmatar a contração da matriz polimérica obtendo a exata quantidade de resina calculada no início do processamento.

De forma a materializar o molde, para que este possa ser usado na produção das placas, cortaram-se os blocos do *SikaBlock*[®] com as dimensões definidas para a largura, *b*, e para o comprimento, *L* e de seguida efetuou-se a maquinação do molde com a ajuda do *robô*, [24]. De referir que foi usado o programa *PowerMILL*[®] na versão de 2014 desenvolvido pela *Autodesk, Inc.* para definir os caminhos de passagem das fresas do robô pelo molde, para posteriormente serem introduzidos nos comandos do mesmo robô. Na *Figura 50*, em *a)*, está representado o momento da maquinação do molde, e em *b)*, o molde final após finalizada a maquinação. Para finalizar a produção do molde são necessários acabamentos, como retificação da superfície, acertos para encaixe das duas metades do molde,

aplicação de tinta primária e pintura final. No Anexo H, estão documentados numa sequência de imagens os processos de acabamento referidos anteriormente.

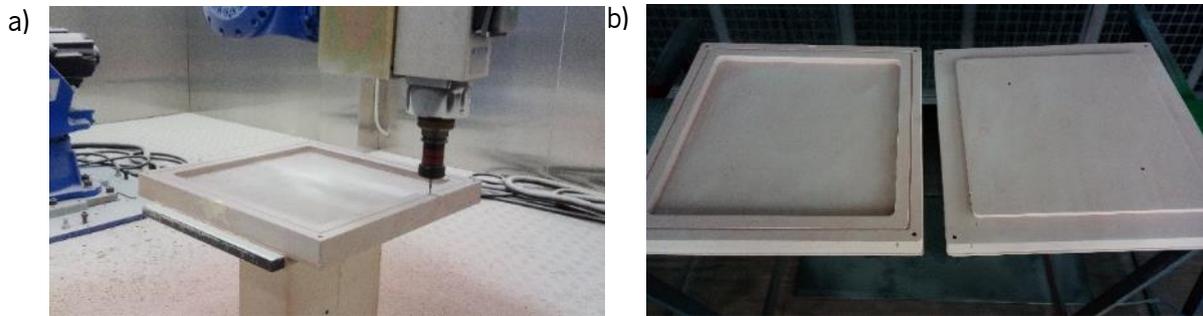


Figura 50 – a) Maquinação do molde; b) Molde maquinado

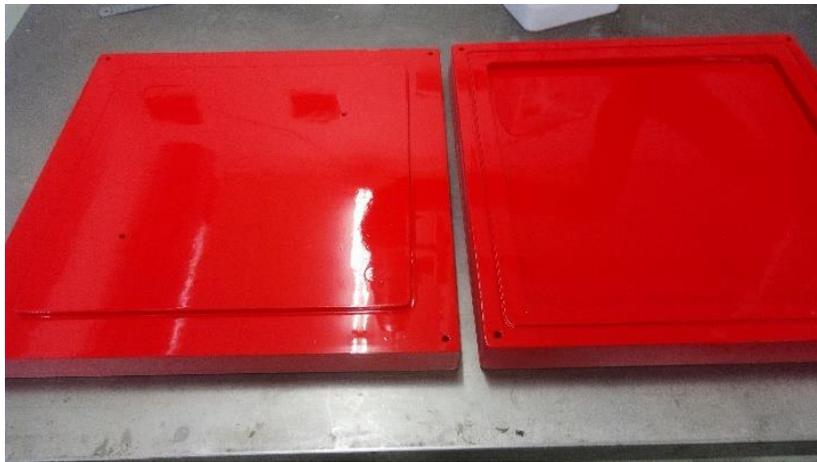


Figura 51 - Molde final

Na *Figura 51*, é possível visualizar o aspeto final do molde para o processo de RTM.

6.2.4. Produção dos Laminados e dos Provetes Normalizados

Para a progressão do trabalho e escolha ponderada do material para a prancha final, foram produzidas as placas e retirados os provetes para ensaios laboratoriais. Para a produção das placas, é necessário preparar a matéria-prima (fibras de reforço e núcleos de madeira), permitindo ter todos os materiais disponíveis, aquando do processamento por RTM.

Como é possível constatar no ponto 6.2.1, os laminados definidos para a construção das placas a testar, são estruturas em sanduiche cujos núcleos podem ser de madeira de balsa ou de um laminado de madeira (proveniente do eucalipto).

Para materialização dos laminados, procedeu-se ao corte do folheado de madeira com comprimento de 410 mm e de largura e espessuras constantes correspondente às dimensões originais da matéria-prima como mostra na *Figura 52*. Para o núcleo com folheados de eucalipto, procedeu-se à colagem das várias folhas com cola apropriada para a madeira (cuja ficha técnica pode ser observada no Anexo I) e por fim foi efetuada a prensagem dos folheados, obtendo então uma tábua consolidada com a espessura final de aproximadamente 5 mm. Após a secagem da cola, com ajuda da serra de fita e da máquina de lixar, foram retocadas as laterais da madeira para encaixar de forma perfeita no molde.



Figura 52 - Folheado de madeira de eucalipto, preparado para obter um núcleo consolidado deste tipo de madeira.

O processo de preparação da madeira de balsa, é mais simplificado pois já se possui a espessura final do material (5 mm), sendo apenas necessário ajustar o comprimento ao do molde (405 mm) e arredondar os cantos para coincidir com o raio do molde.

Como os núcleos dos folheados e da madeira balsa possuem larguras diferentes da do molde, são necessárias várias tábuas para cobrir totalmente a zona central do molde que corresponde à impressão (local no molde com a forma desejada do produto final), tal como é possível verificar na *Figura 53*.

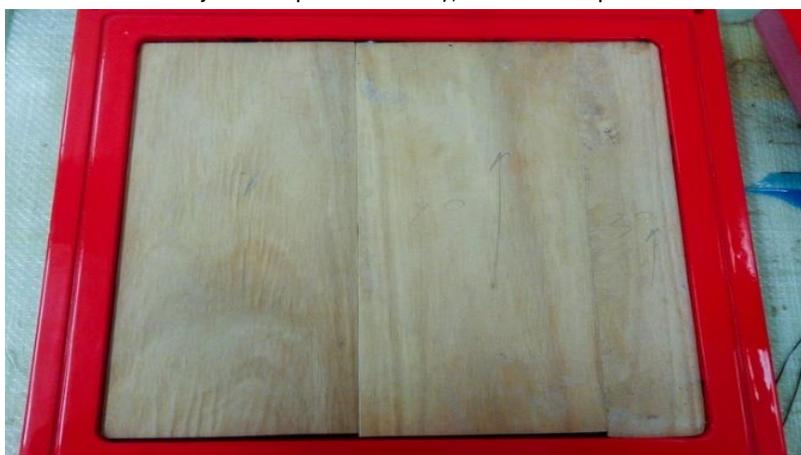


Figura 53 - Encaixe do núcleo no molde para RTM. Nesta figura, estão representados três materiais produzidos com os folheados de madeira de eucalipto.

O último passo antes do processamento das placas destinadas aos ensaios, é a preparação das fibras que formarão as peles das estruturas sanduiche. O corte das fibras requer precisão, pois dessa forma serão reduzidos os desperdícios de material, evitando custos de produção desnecessários e também facilitará o encaixe nas posições corretas com a orientação de fibras desejada.

No caso de as dimensões das fibras serem superiores às desejadas, esse facto poderá dificultar o seu encaixe nas posições corretas, dificultando ainda o fecho do molde e/ou a estanquidade do mesmo durante a injeção da resina. Se pelo contrário se obtiverem tecidos de fibras com dimensões inferiores às da cavidade do molde, poderá pôr em causa o processamento das placas, visto que provocará a ocorrência de caminhos de fácil impregnação nas laterais do molde, o que dificultará a impregnação das fibras de reforço no centro do molde. Este último facto pode ocorrer ainda, caso as diversas lâminas de fibra não sejam similares entre si, uma vez que dessa forma haverá locais com um volume de fibra superior a outros dificultando a impregnação nessas zonas.

Na *Figura 54* pode ser visualizado o corte das fibras de carbono utilizadas nos laminados a processar.



Figura 54 - Corte das fibras de carbono com as dimensões exatas, de modo a encaixar facilmente no molde e não comprometer o processamento.

Após a preparação dos materiais a utilizar e da colocação das fibras de reforço no molde, torna-se possível dar início ao processo de RTM, para impregnar os reforços com a resina escolhida (epóxido, cuja ficha técnica se encontra no Anexo J). O processo utilizado é uma variação do tradicional RTM, uma vez que não é utilizado o tradicional equipamento de injeção de resina e adotado ainda a utilização de vácuo. O processo requer a utilização de um reservatório pressurizado, atingindo um máximo de 2 bar (pode ser superior, no entanto não é aconselhado pelo produtor do referido depósito), e de outro reservatório com pressão negativa. A diferença de pressões existente neste sistema promove um

escoamento de resina do local de maior pressão para o de menor, que em conjunto, permitem distribuir a resina por todo o molde de forma mais eficaz impregnando todos os reforços.

Na *Figura 55*, é possível ver o sistema utilizado no processamento.

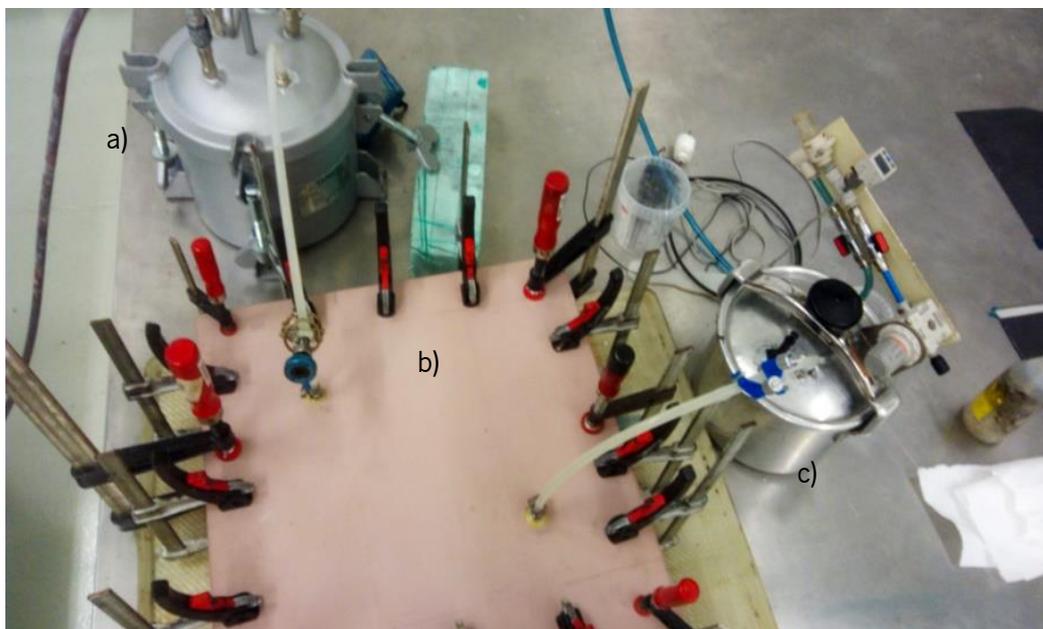


Figura 55 - Sistema adotado para realização do processamento por RTM.

Como se pode verificar na *Figura 55*, existem 3 unidades fundamentais no sistema adotado para o processamento das placas por RTM. O primeiro, representado em *a)*, é referente ao depósito pressurizado a 2 bar responsável por injetar resina no interior do molde (representado por *b)*). Em torno do molde, é possível visualizar diversos grampos, que garantem a força de fecho necessária para que o molde não abra durante o processamento das placas. Por fim, em *c)*, encontra-se representada a linha de vácuo, onde o depósito corresponde ao *resin trap*, isto é, ao local de armazenamento de resina que evita que a mesma entre na bomba de vácuo e danifique a mesma.

Após o procedimento das placas selecionadas em 6.2.1, as construções compósitas são deixadas a curar cerca de 36 h (tempo recomendado internamente na empresa), procedendo-se à desmoldagem das peças após terminado esse tempo de “espera”.

Na *Figura 56*, é possível observar as placas desmoldadas e prontas para cortar em provetes.

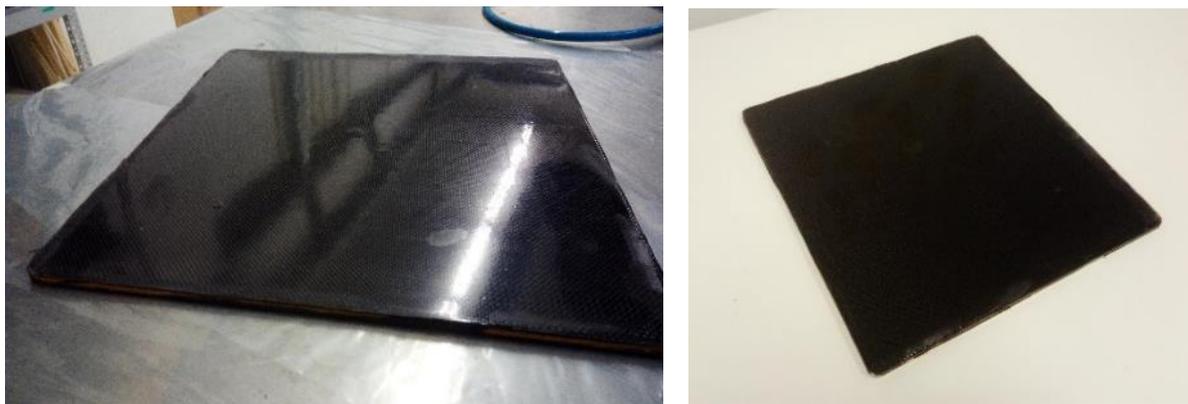


Figura 56 – Placas obtidas por RTM, para retirar provetes normalizados

Para realização dos ensaios, e como referenciado em 6.2.2, é necessária a utilização de provetes normalizados. Estes provetes, variam de geometria consoante o ensaio a realizar e ainda o material e espessuras das espécies de teste, como mencionado no ponto 6.2.2. Na *Figura 57* é possível visualizar os provetes finais para a realização dos ensaios.

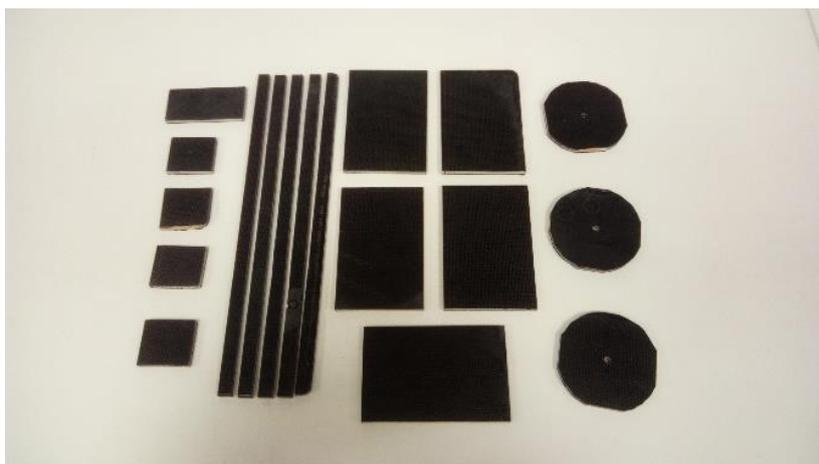


Figura 57 - Provetes finais para os ensaios. Da esquerda para a direita: provetes para ensaios de absorção de água; Provetes para ensaios de flexão; Provetes para ensaios de impacto por queda de dardo; Provetes para ensaios de abrasão.

6.2.5. Ensaios aos Provetes Produzidos

De modo a caracterizar os materiais compósitos produzidos pela técnica de RTM relativamente às solicitações a que o produto final estará sujeito, é necessário recorrer aos ensaios previstos em 6.2.2. Assim, e atendendo à necessidade de os valores obtidos serem equivalentes em qualquer parte do mundo sem grande discrepância, recorreu-se a normas de procedimento de ensaio características do material a testar. Este processo foi efetuado para cada ensaio.

De modo a caracterizar o compósito, e perceber se o material produzido cumpre os requisitos definidos, foram realizados os diversos ensaios estipulados anteriormente. A realização dos ensaios, foi efetuada após um acondicionamento adequado das amostras (21°C com umidade ambiente de 48%) e igual para todos os provetes. Foram ainda utilizadas, em cada teste, as mesmas condições de ensaio variando apenas a natureza da amostra.

A realização dos ensaios de flexão, foi efetuada com base na norma *ISO 14125*, que corresponde a uma norma para obtenção de propriedades à flexão aplicada em materiais compósitos. De lembrar que todos os ensaios realizados neste ponto (6.2.5.) e a realizar no ponto 6.2.7.1, são efetuados com as mesmas condições de carregamento e velocidade de deslocamento, para se caracterizar o material segundo o mesmo procedimento, apesar de se tratarem de materiais distintos (madeira e compósito) com espessuras distintas, que tem influência na velocidade utilizada no ensaio.

Na *Figura 58* é possível ver um ensaio aos referidos provetes e na *Figura 59*, podem ser observados os provetes utilizados nos ensaios de flexão.



Figura 58 - Ensaio de flexão em 3 pontos (dois apoios e um calçador).



Figura 59 - Provetes normalizados para os ensaios de flexão

Os ensaios de flexão em três pontos, foram efetuados no equipamento universal de ensaios mecânicos (AGX-50KN), com capacidade para cargas até 50 kN fabricado pela *Shimadzu*. Os parâmetros foram alterados conforme o tipo de amostra, de acordo com a norma adotada, fazendo-se variar o *span* (distância entre apoios) das amostras consoante a sua espessura. A velocidade de ensaio aplicada foi de 12,74 mm/min, o span foi de 300 e 328 mm para as amostras de compósito com madeira de eucalipto e com núcleo em balsa, respetivamente.

Os ensaios de impacto foram realizados segundo a norma *ASTM D 7136/D 7136M-07*, correspondente a um ensaio ao impacto por queda de dardo, aplicada a materiais poliméricos reforçados por fibras longas (material compósito de matriz polimérica). Na *Figura 60*, estão representados os provetes utilizados nestes ensaios, bem como os mesmos provetes danificados, após efetuados os testes de impacto.



Figura 60 - a) Provetes de impacto; b) Provetes de impacto após realização dos ensaios ao impacto.

Os ensaios de impacto com queda de dardo foram efetuados na máquina de ensaios de impacto de modelo *Fractovis Plus* produzido pela *CEAST*. O limite de energia desta máquina ronda os 700 J. Os parâmetros foram mantidos constantes para todas as amostras, de acordo com a norma adotada, utilizando-se um peso de 25Kg, que perpez uma energia de 245,6 J. A velocidade de ensaio ficou-se pelos 4.4 m/s.

6.2.6. Apresentação e Discussão dos Resultados

6.2.6.1. Ensaios de Flexão

Na *Figura 61* estão representados os gráficos para os ensaios ao compósito com núcleo em balsa, e na *Figura 63* os gráficos que dizem respeito ao compósito com núcleo em madeira de eucalipto.

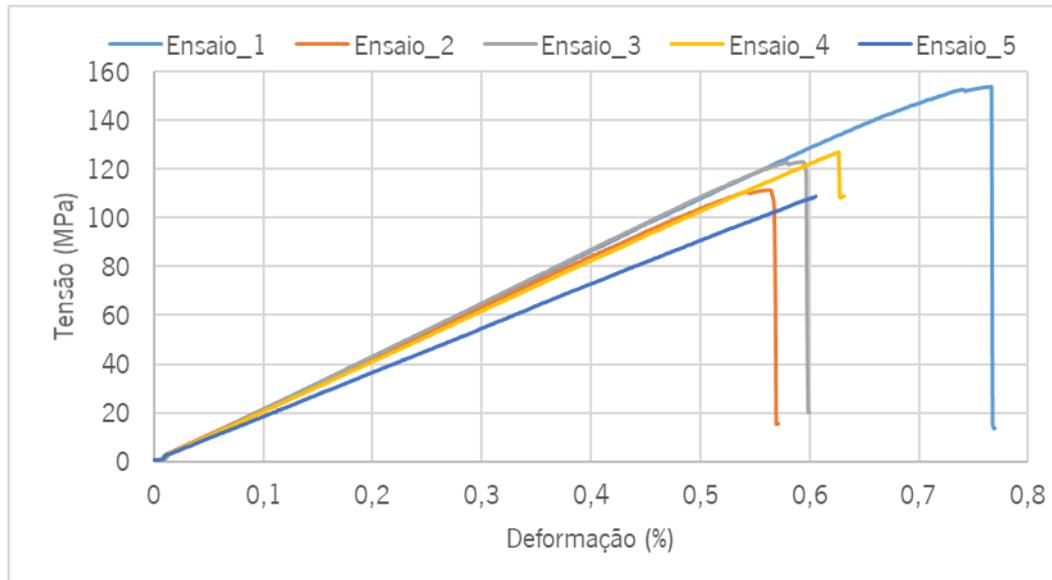


Figura 61 - Gráfico de tensão/deformação representativo dos valores obtidos nos ensaios de flexão para o compósito com núcleo em balsa (placa SkateB_RTM_Balsa).

Ao analisar os gráficos da *Figura 61*, é possível verificar dois grupos com tendências ligeiramente diferentes em relação ao módulo de elasticidade, um grupo formado apenas pela curva referente ao ensaio 5, e outro pelas restantes 4 curvas (1, 2, 3 e 4). Essa discrepância, embora quase insignificante, resulta da incorporação de produtos naturais como é a madeira de balsa. Em relação à deformação registada nos diversos provetes, com a exceção do ensaio número um que atingiu quase os 0,8%, todos os outros se ficaram por valores próximos a 0,6%. A importância do dimensionamento de esforços fletores à tração, reside no facto de que os materiais compósitos são mais sensíveis a esta solicitação comparativamente com a solicitação à compressão.

Como se verifica na figura, é ainda possível aferir que o ensaio se realizou no regime elástico de deformação (uma vez que se verificam curvas com comportamentos lineares), sendo terminado por uma falha catastrófica. Esta falha não compromete os componentes envolvidos no material compósito, mas apenas as interfaces entre a fibra de carbono reforçada por epóxi e a madeira de balsa, uma vez que a falha observada corresponde à descolagem da fibra em relação ao núcleo. A falha abrupta verificada nos ensaios, pode ainda dever-se à impregnação das faces da madeira de balsa em contacto com as fibras, uma vez que torna essa superfície mais rígida e, por conseguinte, mais sujeita a uma falha como a que se sucedeu. Assim sendo as duas explicações têm significados completamente distintos, isto é, a primeira explicação sugere que existe uma fraca interface entre o núcleo e as peles, sendo que a segunda explicação sugere que se desenvolveu uma interface mais resistente que o próprio núcleo de balsa, dando-se a rotura pelo núcleo e não pela interface peles/núcleo. Na *Figura 62* verificam-se vestígios de madeira de balsa nas fibras, no entanto é difícil determinar se o seu aparecimento se deve ao rompimento da interface ou do núcleo.

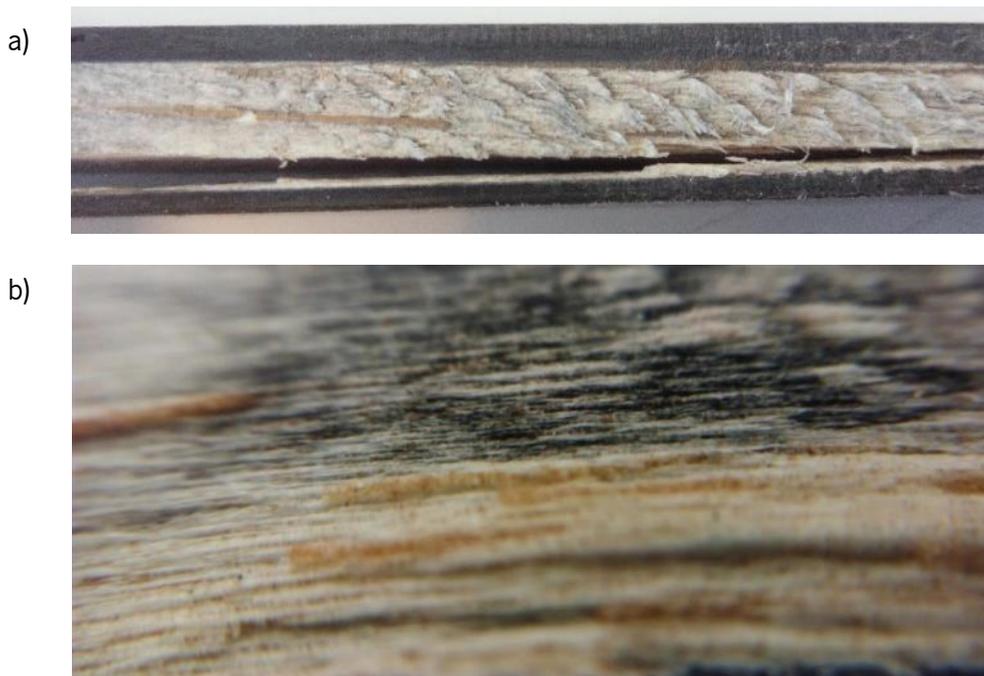


Figura 62 - Falha resultante nos provetes da placa SkateB_RTM_Balsa. A) Fotografia transversal à espessura do provete após ensaio; b) Imagem ampliada da casca onde são visíveis os veios da madeira.

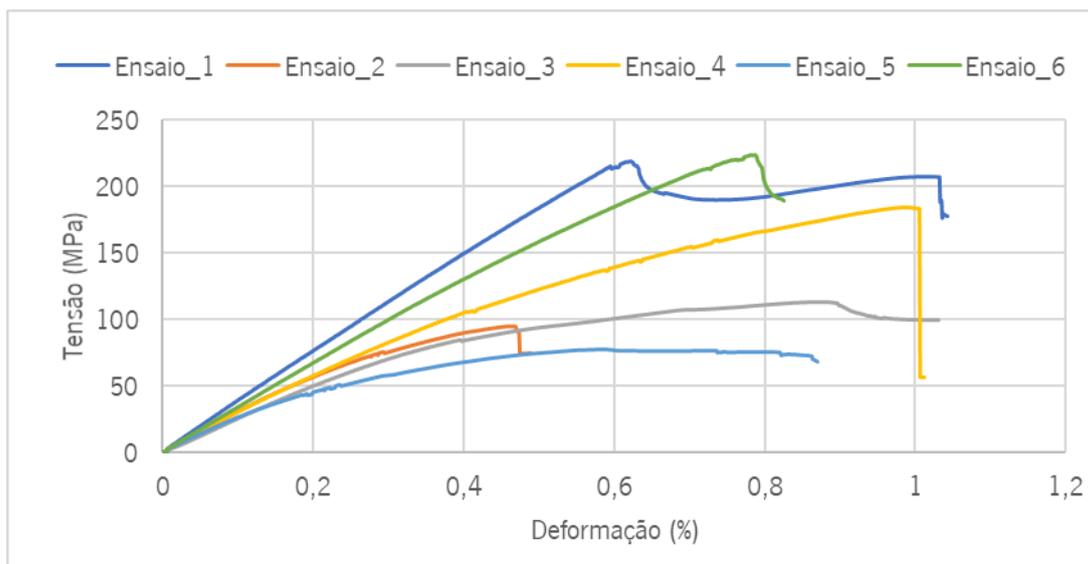


Figura 63 - Gráfico de tensão/deformação representativo dos valores obtidos nos ensaios de flexão para o compósito com núcleo de madeira de eucalipto (placa SkateB_RTM_Madeira).

A análise aos gráficos da *Figura 63*, segue a mesma linha de raciocínio que foi aplicada nos ensaios à placa *SkateB_RTM_Balsa*, porém devem ser excluídos os resultados obtidos nas curvas 2, 3 e 5 devido à desagregação precoce do núcleo de madeira que ocorreu no início dos ensaios. Durante os ensaios foram notórios os diversos problemas existentes na placa, desde zonas mal impregnadas na casca, até a um núcleo mal consolidado, no entanto, obtiveram-se resultados bastante próximos em relação à deformação máxima obtida em cada provete. A deformação obtida nestes ensaios, já segue um regime plástico, que se deve sobretudo à deformação e fácil mobilidade do núcleo produzido em 6.2.4.

Na *Tabela 12*, é possível observar os valores médios obtidos para os dois laminados testados, em termos de deslocamentos, forças medidas e módulo de elasticidade à flexão.

Tabela 12 - Valores médios obtidos nos ensaios de flexão

	Módulo de Flexão (MPa)	Deslocamento Máximo (mm)	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
SkateB_RTM Balsa	19265	13,86	246,15	124.6	0.6
SkateB_RTM Madeira	15372	20,6	301,4	150.9	0.94

Como se pode constatar pelos resultados da *Tabela 12* e dos gráficos das *Figuras 61 e 63*, o comportamento do compósito com núcleo de madeira balsa, obteve valores superiores (em termos de

módulo à flexão) relativamente ao núcleo composto pelo laminado preparado em 6.2.4. Esses valores não eram espectáveis, pois o módulo à flexão da balsa é inferior ao do laminado de madeira de eucalipto (como pode ser verificado no Anexo K referente aos ensaios realizados nos núcleos das placas), sendo que, teoricamente, os melhores resultados deveriam resultar dos testes ao compósito com a madeira de eucalipto. O facto de os resultados não serem os esperados, são explicados quer pelo mau processamento das placas (o processo de RTM não impregnou devidamente as fibras, sendo que o compósito com balsa foi o que obteve melhores resultados), quer pela colagem deficiente das camadas de madeira. Esses dois acontecimentos provocaram a descolagem entre as fibras e a madeira, e ainda a descolagem do próprio núcleo de madeira descredibilizando assim os resultados obtidos para as respetivas amostras. Assim sendo, o provete nunca obteve rotura no local de maior deslocamento imposto (parte inferior do provete), visto que apenas descolava. É de notar que os valores obtidos para o módulo de elasticidade e de força/tensão máxima, são reduzidos em relação aos reais valores do compósito. A escolha de um novo tipo de madeira balsa, onde os veios estão direccionados ao longo da espessura da placa ao invés do seu comprimento, pode trazer melhores resultados a essa placa, comparativamente com os obtidos com a matéria prima atual, uma vez que essa configuração funciona melhor à compressão o que pode impedir disjunções no próprio núcleo da madeira. Para a placa com núcleo de madeira de eucalipto, a utilização de uma cola de poliuretano, para além de diminuir o peso extra proveniente da cola promove uma colagem mais adequada entre os folheados da madeira de eucalipto.

6.2.6.2. Ensaios de Impacto

Na *Figura 64* estão representados os gráficos para os ensaios ao compósito com núcleo em balsa, e na

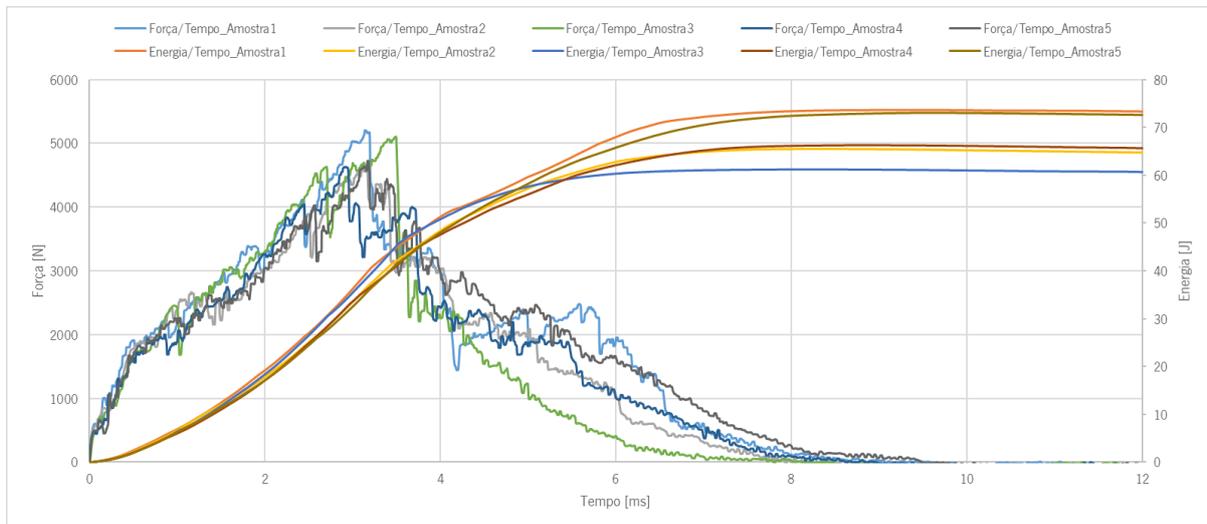


Figura 64 - Resultados dos ensaios de impacto para o compósito com núcleo em madeira balsa.

Figura 65 os gráficos que dizem respeito ao compósito com núcleo em madeira de eucalipto.

Como é possível observar no gráfico da *Figura 64*, a tendência das curvas tende a ser a mesma com ligeiras alterações, isto é, existe uma boa reprodutibilidade das curvas principalmente na fase crescente da curva relativa à força de resposta da amostra (entre os zero e os três milissegundos), havendo maiores discrepâncias na fase decrescente da curva embora sem grande amplitude. Estas pequenas alterações devem-se não só à presença de fibras naturais como a madeira balsa, mas acima de tudo aos erros acumulados na manufatura da placa de onde foram retirados os provetes, como foi explicado no ponto 6.2.4. Relativamente à absorção de energia não existe grande variação nos resultados, no entanto as

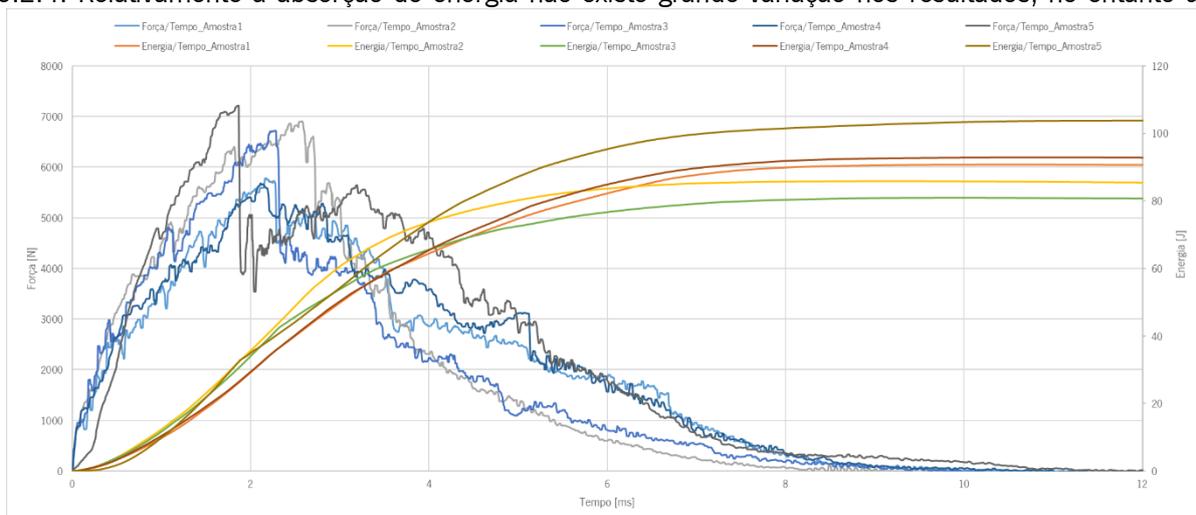


Figura 65 - Resultados dos ensaios de impacto para o compósito com núcleo em madeira de eucalipto.

variações notadas devem-se ao comportamento da amostra após o embate, ou seja, a amostra foi perfurada totalmente em todos os ensaios, porém, em alguns ensaios, pode ter havido arrastamento da casca inferior e, por conseguinte, menor absorção de energia.

Quando se compara as curvas presentes no gráfico da *Figura 65*, pode-se concluir que existe um comportamento equivalente em todas os ensaios, no entanto com diferenças de maior amplitude quando comparadas com o gráfico dos ensaios à placa *SkateB_RTM_Balsa*. As discrepâncias verificadas, devem-se às fracas interfaces que se desenvolveram no processamento das placas, que permite o arrastamento das sucessivas camadas (peles de fibra presente no laminado e sucessivos folheados de madeira) desde o início do impacto até ao seu final, ou seja, o impactador ao cair perfura a camada inicial e empurra a que está subjacente a ela acabando-a por perfurar e empurrar a que está sobre essa segunda camada, e assim sucessivamente até ao final da espessura da amostra.

Na *Tabela 13*, estão representados os valores médios das amostras para as propriedades ao impacto avaliadas (força máxima no provete e quantidade de energia absorvida pelo material).

Tabela 13 - Valores médios, dos máximos obtidos nos ensaios de impacto para os diversos provetes das duas placas.

	Força Máxima	Energia Absorvida
<i>SkateB_RTM_Balsa</i>	4854 N	67,5 J
<i>SkateB_RTM_Madeira</i>	6458 N	90.82 J

Os resultados apresentados na tabela anterior, revelam valores que, à partida, eram os esperados, no entanto, caso o processo de RTM fosse mais eficaz a impregnar as fibras, a energia absorvida pelos compósitos seria superior. A premissa anterior, é explicada com base no arrastamento do laminado inferior (cujas fibras foram mal impregnadas), que é empurrado pelo impactador durante o ensaio acabando por absorver pouca energia.

6.2.7. Análise *Benchmarking*

Como ficou visível na secção referente às especificações (secção 6.1.), as definições de requisitos para as propriedades fletoras foram complicadas, na medida em que são totalmente desconhecidos os valores normais para uma prancha de *skate*. Esse facto, levou à necessidade de adquirir um modelo de *skate*

contendo um material que servisse de referência aos laminados produzidos, isto é, testar um material comumente utilizado nas pranchas de *skateboard* (tecnologia *7-Ply*), e obter resultados, que no mínimo têm de ser superados pelos novos compósitos desenvolvidos neste trabalho de investigação. Como a prancha de *skate* ainda tem umas dimensões consideráveis, foram retirados provetes de impacto, o que também permitiu conseguir um novo ponto de referência para esse tipo de ensaios.

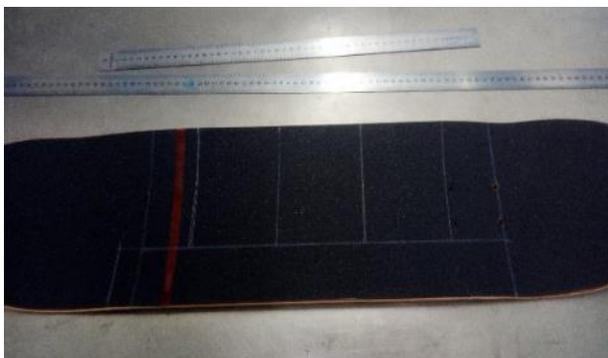
Na *Figura 66*, é mostrado o *skate* utilizado como ponto de referência.



Figura 66 - Prancha de skate utilizada para fazer a análise de benchmarking.

De modo a efetuar ensaios no *skate* de referência, foi necessário realizar o corte dos provetes indispensáveis aos ensaios. Em primeiro lugar, deve-se ter em atenção as normas a utilizar nos ensaios, dessa forma é possível averiguar as dimensões dos provetes a utilizar, bem como o número aconselhado de ensaios a realizar. Em segundo lugar, deve-se verificar quais os melhores locais para retirar os provetes. Nesta avaliação devemos ter em conta o espaço disponível no produto (prancha), o *design* do mesmo e as dimensões dos provetes, uma vez que o ideal é obter provetes o mais uniforme possível, quer na espessura e largura quer na curvatura do mesmo. Feita a avaliação, e como mostra a *Figura 67*

a)



b)



Figura 67 - a) Marcação dos provetes para corte da prancha; b) Provetes finais cortados na serra de fita.

a), a prancha é marcada com os contornos dos provetes, e posteriormente cortada obtendo-se os provetes representados na *Figura 67 b)*.

6.2.7.1. Ensaios Efetuados

Como já foi mencionado, os ensaios realizados a este material, têm como única finalidade obter um ponto de referência, que seja possível ser comparado com os valores obtidos nos ensaios aos laminados produzidos por RTM, sendo esta forma mais simples de comparar materiais diferentes com base em determinados resultados relevantes para a finalidade da peça final.

De notar que as normas utilizadas nos ensaios ao material com a tecnologia *7-Ply*, são as mesmas que se aplicaram no material dos compósitos produzidos na secção 6.2.4, dessa forma serão obtidos resultados comparáveis entre si, uma vez que foram obtidos nas mesmas condições de processamento. As normas a utilizar, dizem respeito a materiais plásticos reforçados com fibras longas, de modo a manter o termo de comparação entre os diversos materiais.

Tendo em linha de conta o que foi referido anteriormente, os ensaios de flexão efetuados aos provetes do *skate*, seguiram a mesma linha de procedimento daqueles que estão referidos em 6.2.5. Na *Figura 68 a)* podem ser visualizados os provetes de flexão utilizados para os ensaios, sendo que na *Figura 68 b)*, está ilustrado o teste a um provete de flexão.

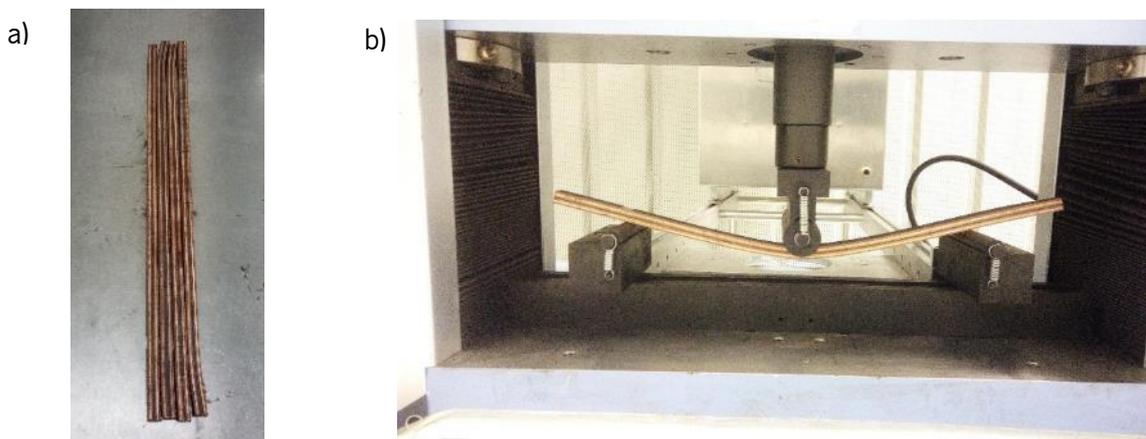


Figura 68 - a) Provetes de flexão; b) Ensaio de flexão

Para a avaliação da energia absorvida pelo material do *skate* e pico máximo de força ao impacto a que este resiste, recorreu-se, uma vez mais, aos ensaios de impacto por queda de dardo instrumentalizado, seguindo os mesmos parâmetros utilizados em 5.3. aquando dos ensaios de impacto executados para a prancha *longboard* uma vez que a norma utilizada (*ASTM D7766 – Procedimento C*) faz referência à

norma utilizada nestes ensaios (*ASTM D 7136*), ou seja, ambos os ensaios se regem pelo mesmo princípio e procedimento. Na *Figura 69 a)*, é possível observar os provetes para impacto retirados da prancha de *skate*, pelo que na *Figura 69 b)*, são visíveis os danos causados pelo impactador durante os testes de impacto aos provetes normalizados.

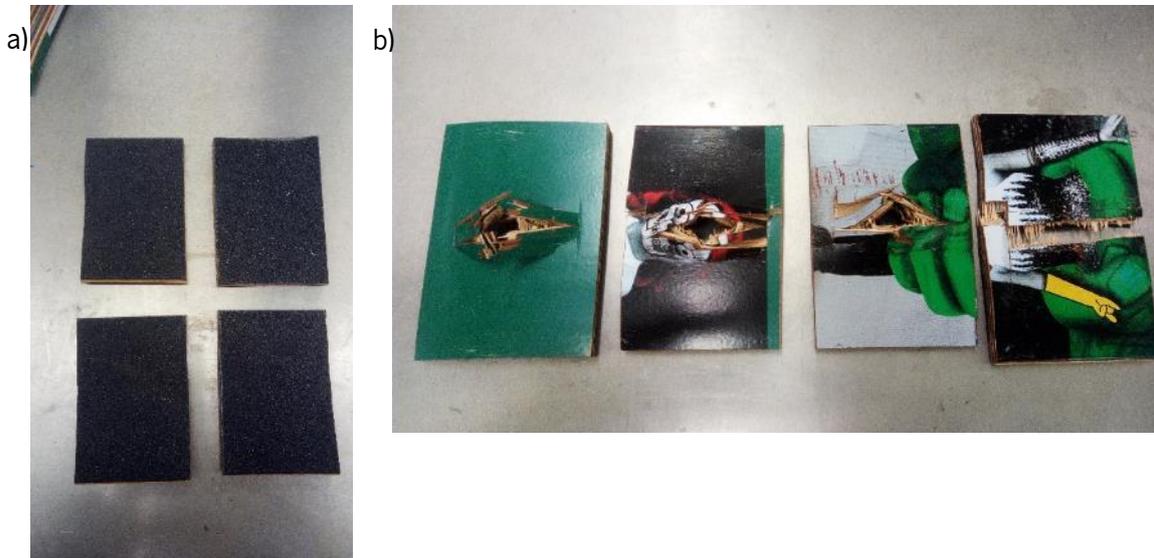


Figura 69 - a) Provetes para ensaios de impacto; b) Provetes danificados pelo impactador.

6.2.7.2. Apresentação e Discussão dos Resultados

6.2.7.2.1. Ensaios de Flexão

Na *Figura 70*, estão representados os gráficos obtidos para todos os provetes de teste utilizados no ensaio à flexão.

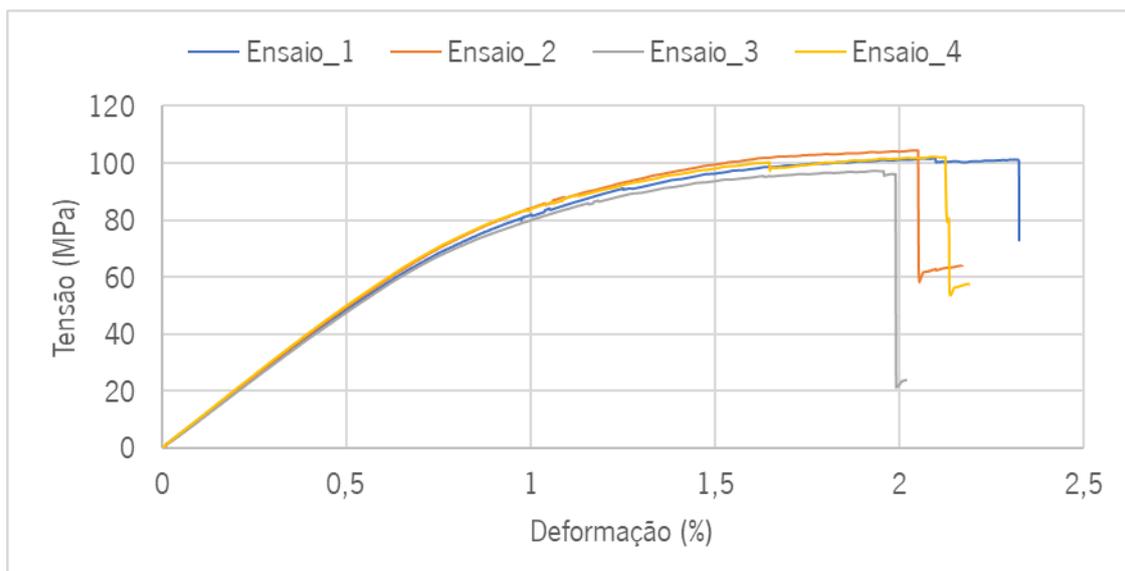


Figura 70 - Gráficos Tensão/Deformação calculados através dos dados obtidos nos ensaios de flexão para o material escolhido para análise de benchmarking

Como é possível verificar nos gráficos obtidos nestes ensaios, é notória e expectável a boa reprodutibilidade dos quatro ensaios efetuados, estes resultados podem-se explicar devido a se tratar de um material produzido industrialmente em ambiente controlado, que respeita as normas de produção impostas quer pela própria empresa quer por entidades exteriores à mesma, de modo a ser possível manter a qualidade e a segurança das pranchas produzidas. Assim sendo, é possível obter valores próximos entre si para todos os provetes retirados de qualquer prancha deste género produzida na mesma empresa, desde que sujeita às mesmas condições ambientais e ao mesmo tipo de solicitações mecânicas. Na *Tabela 14*, estão disponíveis os valores obtidos no ensaio para as propriedades de deslocamento máximo do provete, forças aplicadas no material, deformação máxima, tensão máxima atingida e módulo de elasticidade à flexão que serão usados como termo de comparação no ponto 6.2.9.

Tabela 14 - Valores médios obtidos nos ensaios de flexão, que servem de base à análise "benchmarking", constituindo um ponto de comparação relativamente ao material a produzir neste trabalho.

	Módulo flexão (MPa)	Deslocamento Máximo (mm)	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
Skate (7-Ply)	7066,25	16,4	375,11	101.4	2.13

6.2.7.2.2. Ensaio de Impacto

Na *Figura 71*, podem ser visualizados os gráficos com os valores de cada amostra testada ao impacto.

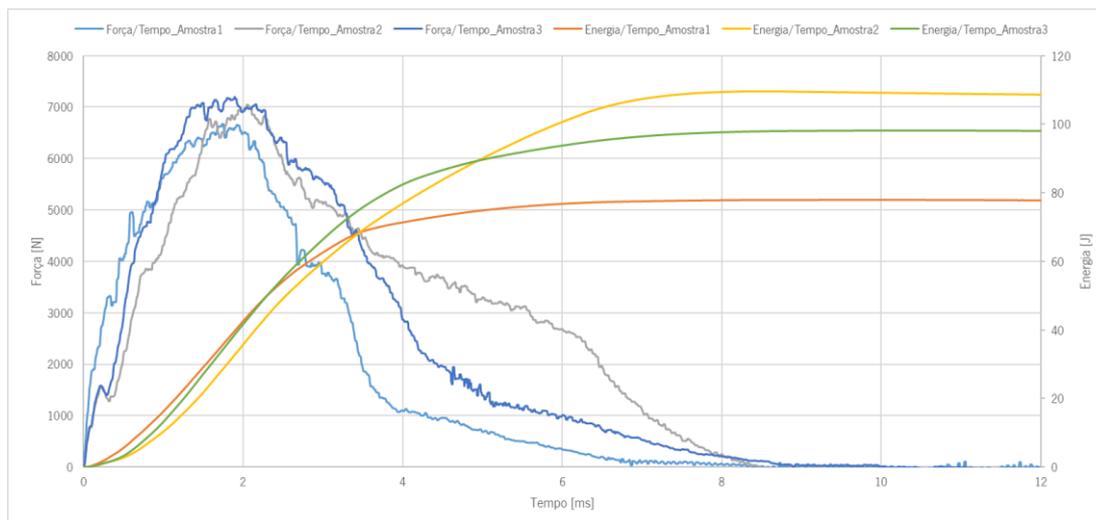


Figura 71 - Curvas referentes aos ensaios de impacto para o material utilizado na análise de benchmarking.

Observando as curvas presentes na *Figura 71*, estão presentes os resultados para apenas 3 provetes, sendo que o primeiro provete dos 4 iniciais foi utilizado para ajuste dos parâmetros de ensaio nomeadamente no que diz respeito à variação da velocidade do impactador (tal como aconteceu para as amostras do *longboard*), mantendo-se constantes nas amostras seguintes.

As curvas presentes no gráfico têm comportamentos equivalentes embora com algumas diferenças entre si, o que se pode dever à presença de nós na madeira que tem influencia quer nas colagens à madeira (que caso não sejam adequadas pode provocar arrastamento das camadas inferiores) quer nas propriedades nesses locais da madeira (madeira mais “dura” nos locais dos nós e portanto mais resistentes ao impacto).

Na *Tabela 15* estão representados os valores obtidos relativos à absorção de energia e à força máxima de impacto (que caracteriza a rigidez do material), que serão usados como base de comparação no ponto 6.2.9.

Tabela 15 - Dados obtidos para o material do “skate” nos ensaios de impacto

	Força Máxima	Energia Absorvida
Skate	6970.04 N	94.7 J

6.2.8. Caraterização Estrutural (validação do método experimental)

A caraterização estrutural por via de simulações numéricas, tem por base de sustentação a obtenção de valores teóricos, relativos às propriedades em estudo num determinado produto, que podem divergir dos resultados a ser obtidos em ensaios aos protótipos, no entanto, dão uma ideia muito próxima daquilo que se passará na realidade. Isso acontece porque as simulações não têm em linha de conta os defeitos e outros aspetos negativos que podem ocorrer durante o processamento de um produto. Dessa forma, o produto a ser testado no *software*, tem propriedades ideais, ou seja, não possui defeitos de qualquer tipo, como por exemplo, vazios, sobreposições de fibras e/ou acumulações de cargas e resinas.

Nesta dissertação, a simulação foi realizada com o pacote de *software* comercial *Abaqus*®, propriedade da *Dassault Systèmes S.A.* Este programa, obtém os resultados das equações diferenciais, associadas aos diversos carregamentos, por meio do método dos elementos finitos.

Na simulação estrutural realizada no software comercial *Abaqus*[®], foi tomado como modelo aquele que se encontra representado na *Figura 72*. No modelo, é possível conferir a geometria do provete, a localização e dimensão dos apoios e do calcador e ainda o ponto de aplicação do deslocamento.

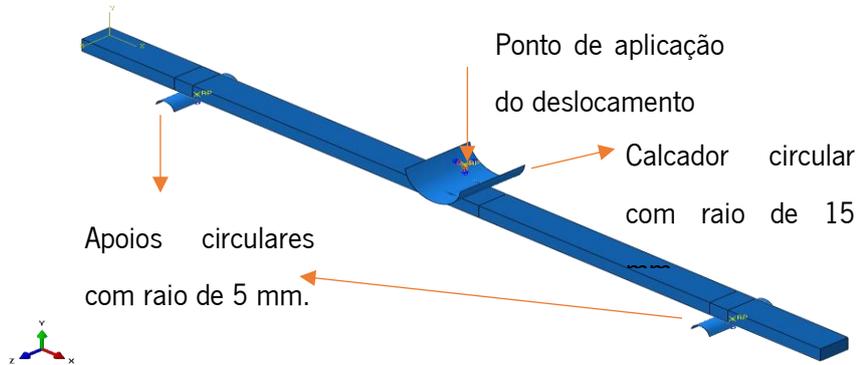


Figura 72 - Modelo utilizado na simulação estrutural.

Para a realização da simulação numérica, o material escolhido possui as propriedades obtidas nos ensaios práticos à flexão (módulo de elasticidade). Pretende-se comparar os resultados obtidos numericamente com os resultados obtidos experimentalmente e assim validar o modelo de material utilizado, posteriormente poderá (teoricamente) ser aplicado o mesmo modelo de material em geometrias mais complexas e antecipar as possíveis complicações que podem advir de uma simulação de complexidade mais elevada. Foi utilizada uma malha mais refinada à superfície do modelo, comparativamente ao seu interior, privilegiando assim as zonas de contacto e reduzindo o número de elementos presentes, o que diminui o tempo de simulação. Foram criadas partições nos locais de contacto entre o provete e os apoios rígidos (que engloba também o calcador) de modo a reduzir as áreas com propriedades de contacto, como por exemplo propriedades referentes ao atrito entre materiais que controlam o escorregamento do provete nestes locais o que pode inviabilizar todo o processo da simulação.

Na *Figura 73* é possível verificar a distribuição de tensões ao longo dos provetes de flexão, e na *Figura 74* é possível ver a distribuição dos deslocamentos impostos a cada provete. É importante notar que a espessura dos provetes não é constante e segue a espessura dos provetes utilizados nos ensaios de flexão, o que é notório nas imagens apresentadas.

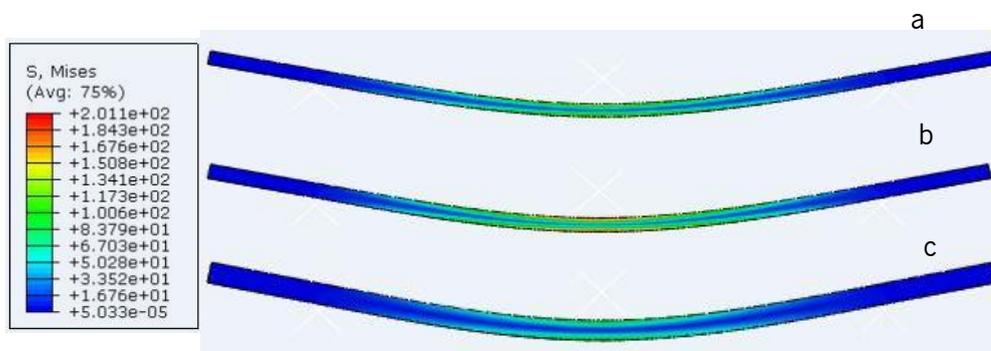


Figura 73 - Distribuição das tensões nos provetes; a) Compósito com núcleo eucalipto; b) compósito com núcleo em balsa; c) material do skateboard.

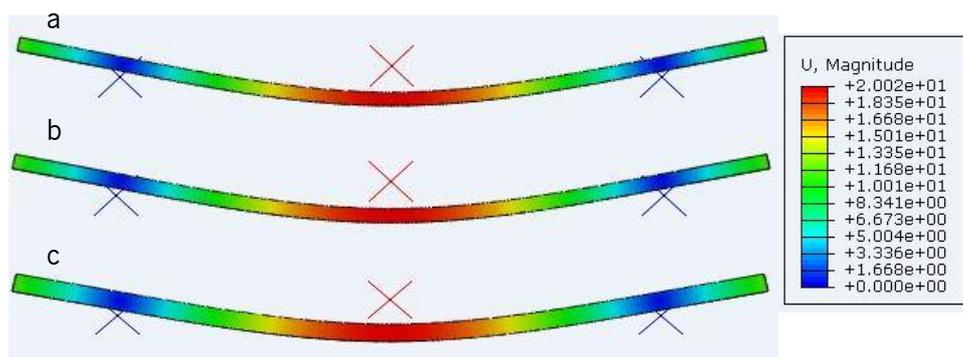


Figura 74 - Distribuição dos deslocamentos dos provetes; a) Compósito com núcleo eucalipto; b) compósito com núcleo em balsa; c) material do skateboard.

Na *Tabela 16* estão representados os valores obtidos para o carregamento à flexão (único realizado), efetuado para os diversos materiais (compósito com núcleo em balsa, compósito com núcleo em madeira e *skate* com tecnologia *7-Ply*) que serão usados como valores teóricos na comparação de resultados do ponto 6.2.9.

De referir ainda que os valores foram obtidos no regime elástico de deformação, ou seja, num regime em que após retirar as forças aplicadas ao material, quando recuperam sem qualquer tipo de deformação. No gráfico presente na *Figura 75*, é possível confirmar o regime de deformação que se verificou na simulação.

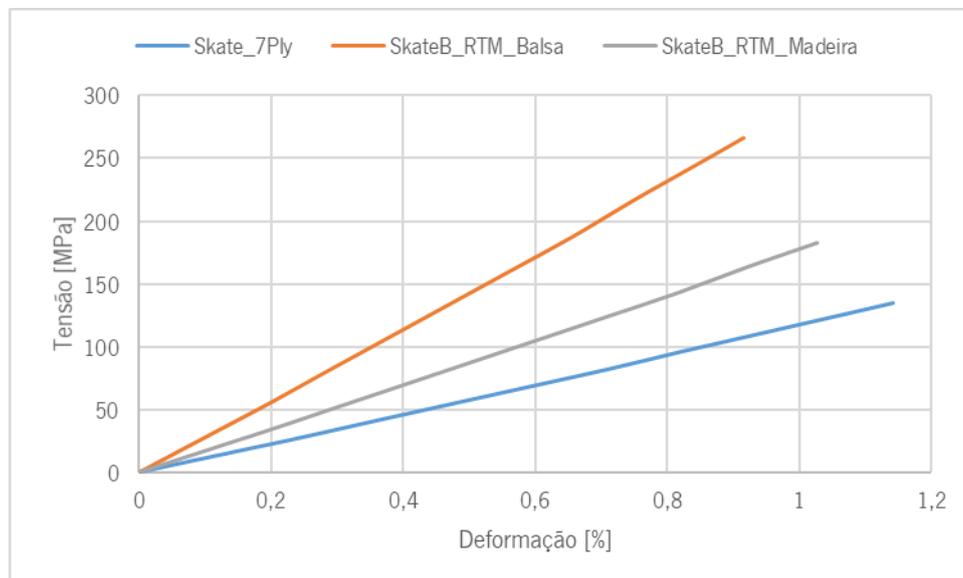


Figura 75 - Gráfico referente à simulação estrutural em Abaqus.

Relativamente ao gráfico da *Figura 75*, proveniente dos resultados da simulação, obteve-se o que se esperava tendo em conta os dados inseridos no software (a espessura dos provetes e o módulo obtido nos ensaios práticos). A não inserção de tensões de cedência, explica a permanência num regime de deformação elástico ao longo de toda a simulação.

Tabela 16 - Valores de força máxima, obtidos na simulação em Abaqus (módulo obtido nos ensaios aos materiais e deslocamento de 20mm arbitrado).

	Módulo de elasticidade (MPa)	Deslocamento Máximo (mm)	Força Máxima (N)	Deformação Máxima (%)	Tensão Máxima (MPa)
Skate – 7Ply	7066,3	20	480,3	1.14	134.97
SkateB_RTM Balsa	19265	20	546,4	0.91	266.5
SkateB_RTM Madeira	15372	20	361,1	1.03	182.7

6.2.9. Comparação dos Resultados

A comparação dos resultados teóricos, obtidos pela simulação estrutural em *Abaqus*[®], com os práticos retirados dos ensaios, permite ter uma ideia das reais propriedades do material processado. Dessa forma, quanto mais próximos forem os resultados, em teoria, menor será a quantidade de defeitos existentes nos laminados produzidos.

Na *Tabela 17*, é possível verificar os resultados obtidos, para um deslocamento de 10 mm, nos ensaios de flexão bem como nas simulações. Está ainda presente o módulo de elasticidade dos materiais, obtido por uma expressão facultada pela norma utilizada, onde se inseriram os dados recolhidos nos ensaios práticos. Este valor calculado para o módulo de elasticidade foi inserido no controlo numérico da simulação, como referido anteriormente.

Olhando detalhadamente para os valores presentes na tabela, não é possível definir uma ordem exata que defina qual material possui o melhor comportamento, quer nos ensaios de flexão quer na simulação estrutural. Por exemplo, nos ensaios práticos, o material que possui melhor comportamento mecânico em termos de força máxima suportada é o *Skate – 7Ply*, seguido do *SkateB_RTM_Balsa* e por fim o *SkateB_RTM_Madeira*.

Tabela 17 - Propriedades obtidas nos ensaios e simulações para um deslocamento de 10 mm.

	Módulo flexão	Tensão (Simulação)	Tensão (Ensaio)	Força (Simulação)	Força (Ensaio)
<i>Skate – 7Ply</i>	7066,3 MPa	68.2 MPa	101.4 MPa	236,2 N	290,7 N
<i>SkateB_RTM Balsa</i>	19265 MPa	135.1 MPa	124.6 MPa	270,3 N	186,1 N
<i>SkateB_RTM Madeira</i>	15372 MPa	95.2 MPa	150.9 MPa	176.4N	200,5 N

Já para os mesmos ensaios, mas em termos de tensão máxima suportada aparece como melhor material o *SkateB_RTM_Balsa*, seguido do *SkateB_RTM_Madeira*, sendo que como material com piores propriedades neste critério aparece o *Skate – 7Ply*. Apesar de não ser muito comum, este facto é explicado acima de tudo pelas diferenças observadas na espessura das amostras, o que leva a concluir que provetes mais espessos, suportam maiores cargas, sem que a tensão observada na amostra

auge consideravelmente. É também possível observar que o material constituído apenas por madeira quebra a uma tensão muito inferior quando comparado com os materiais desenvolvidos por RTM.

Quando se comparam os valores obtidos nos ensaios práticos com os provenientes das simulações, observa-se que apenas para o material com núcleo em madeira balsa, acontece o que era expectável, isto é, os valores obtidos na simulação serem superiores aos retirados dos ensaios. Esta situação pode ser explicada por erros no cálculo do módulo de elasticidade, visto ser o único ponto que liga as simulações aos ensaios, excluindo a geometria dos provetes (que não possui muita influência nem grande margem para erros).

A *Tabela 18*, revela os valores médios máximos obtidos nos ensaios de impacto. Os valores apresentados na coluna da força máxima, dizem respeito ao pico de força que cada material suportou (uma vez que é medida a força de reação da amostra à energia aplicada na sua superfície), sendo esse valor um indicador da rigidez do material. Essa rigidez é tanto maior quanto maior for o valor obtido.

Avaliando os resultados, é perceptível a disparidade entre o material mais fraco ao impacto (compósito com núcleo em balsa) relativamente aos outros dois materiais. Quando a comparação recai sobre os dois materiais mais rígidos, convém, uma vez mais, salientar os erros envolvidos nos valores obtidos para o compósito com laminado de eucalipto e ainda a espessura inferior relativamente ao material de referência, com 7.7 mm e 11 mm, respetivamente).

Tabela 18 - Propriedades médias obtidas para todos os materiais ensaiados ao impacto.

	Força Máxima	Energia Absorvida
<i>Skate – 7Ply</i>	6970.04 N	94.7 J
<i>SkateB_RTM_Balsa</i>	4854 N	67,5 J
<i>SkateB_RTM_Madeira</i>	6458 N	90.82 J

Todavia, a diferença de valores obtidos nos ensaios não é significativa, o que leva a crer que nas condições adequadas o compósito produzido possuirá melhores propriedades ao impacto que o usado na tecnologia *7-Ply*. A absorção de energia, é também ela um ponto fundamental para caracterizar os materiais, sendo muito importante para avaliar a distribuição uniforme da carga imposta ao material. Os valores obtidos para esse ponto vão ao encontro daquilo que foi referido para o pico de força. No Anexo L, podem ser encontrados a junção dos gráficos obtidos pelas simulações e pelos ensaios.

6.3. Definição e Produção de Novos Compósitos

A produção de novos compósitos, assenta, sobretudo na necessidade de obter materiais mais estáveis e robustos quer à flexão quer ao impacto, isto é, materiais com interfaces mais fortes que não cedam tão facilmente às tensões que lhes são aplicadas, uma vez que as interfaces peles/núcleo não eram muito adequadas. O mesmo acontece com as colagens entre os folheados de madeira de eucalipto, uma vez que estes se descolavam quase por completo ao lhes ser aplicada uma carga. Desta forma, foram desenvolvidos materiais com estruturas laminares ao invés das anteriores sanduiches. Assim será possível obter materiais com uma boa relação entre a rigidez e a flexibilidade e teoricamente com interfaces mais estáveis. As placas a produzir encontram-se representadas na *Figura 76*.

SkateB_1- 8.76 mm	SkateB_2- 8.28 mm	SkateB_3- 8.72 mm	SkateB_4- 7.80 mm
Carbono 0°	Carbono 0°	Carbono 0°	Carbono 0°
Carbono 0°	Carbono 0°	Carbono 0°	Carbono 0°
Madeira 2mm	Madeira 2mm	Madeira 2mm	Madeira 2mm
Carbono 30	Carbono 30	Aramida -45°/45°	Carbono -45°/45°
Carbono -30	Carbono -30	Aramida -45°/45°	Carbono -45°/45°
Madeira 1mm	Aramida 0°/90°	Madeira 1mm	Carbono 0°/90°
Aramida 0°/90°	Aramida 0°/90°	Carbono 0°/90°	Madeira 1mm
Aramida 0°/90°	Madeira 1mm	Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°
Madeira 1mm	Aramida 0°/90°	Madeira 1mm	Carbono -45°/45°
Carbono -30	Aramida 0°/90°	Aramida -45°/45°	Carbono -45°/45°
Carbono 30	Carbono -30	Aramida -45°/45°	Madeira 2mm
Madeira 2mm	Carbono 30	Madeira 2mm	Carbono 0°
Carbono 0°	Madeira 2mm	Carbono 0°	Carbono 0°
Carbono 0°	Carbono 0°	Carbono 0°	
	Carbono 0°		

Figura 76 - Placas a desenvolver no âmbito da produção da prancha de skateboard.

Como é possível verificar, as construções são muito similares entre si, visto que as modificações consistem sobretudo na utilização de outros materiais ou da disposição dos mesmos na espessura da placa. No entanto, pode-se observar a intercalação entre fibras e madeira em todos os laminados bem como a utilização de fibra de carbono e aramida em três dos quatro laminados. O laminado constituído totalmente por madeira e fibra de carbono permite ter uma perceção das propriedades que são possíveis de obter num laminado mais fino e mais leve, em comparação com as restantes configurações a ser estudadas. De notar que em todas as placas produzidas, foi utilizada uma matriz polimérica de natureza epóxica, de modo a obter produtos com alta performance mecânica.

Antes de ser possível construir um novo molde, é necessário redefinir as dimensões das placas a produzir, pelo que serão retirados os provetes para absorção de água e ensaios à abrasão, uma vez que os requisitos referentes a estes ensaios, foram colmatados no processo de seleção de materiais. Desta forma, não é necessária a produção de placas com dimensões excessivas evitando o desperdício de materiais que não serão ensaiados.

A *Figura 77* mostra as dimensões das novas placas a produzir e a localização dos provetes. As dimensões das placas, tem em conta as normas para ensaios de flexão e impacto a utilizar nesta secção da dissertação, a *ISO 14125* e *ASTM D-7136*, respetivamente, correspondentes a materiais poliméricos reforçados com fibras longas.

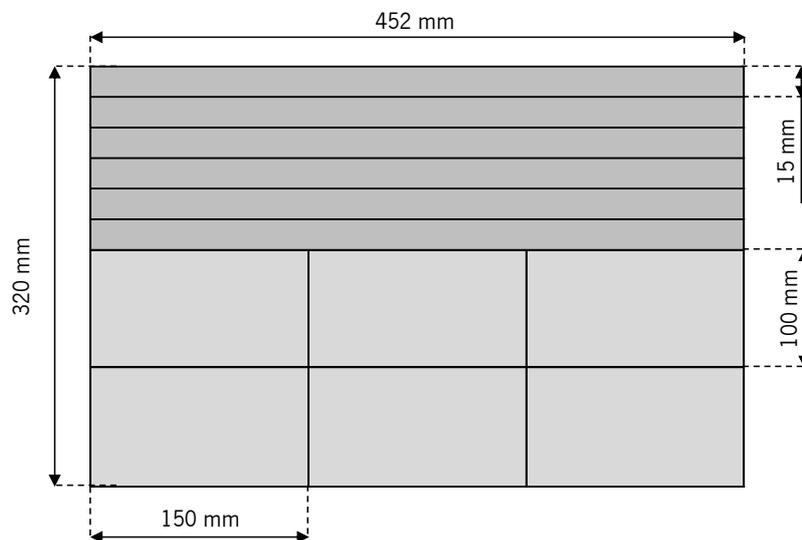


Figura 77 – Localização na placa e dimensão dos provetes a produzir.

6.3.1. Utilização de *Software* para Modificação de Ferramentas Produtivas

Nos dias de hoje, a utilização de *software* permite evitar custos desnecessários em matérias primas, quer para utilização em ferramentas produtivas (como *Sikablock*® ou *MDF* para fabricação de moldes), quer para testar as próprias ferramentas e matérias primas (como resinas e materiais fibrosos para produção de compósitos). Desta forma, para além de poupar e aumentar os lucros da empresa, contribui-se de igual forma para um desenvolvimento mais sustentável do planeta uma vez que não há utilização indevida de materiais.

De modo a ser possível produzir um molde em que seja possível prever um correto enchimento de toda a peça, recorreu-se ao software comercial *PAM-RTM* propriedade da empresa francesa *ESI-Group*. Este

programa é uma solução bastante eficiente para minimizar o risco de produzir peças com defeitos, ajudando na produção de moldes e definição de processos e parâmetros produtivos eficazes desde que realizados por RTM (*Resin Transfer Moulding*), VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*), VARI (*Vacuum Assisted Resin Infusion*), CRTM (*Compression Resin Transfer Moulding*), e todas as outras modalidades de produção envolvendo LCM (*Liquid Composites Moulding*) [37].

Tendo em conta o que foi dito anteriormente, foram realizadas diversas simulações de enchimento às placas idealizadas na secção 6.3., de modo a perceber se a complexidade dos laminados permitem uma correta impregnação das fibras presentes nos laminados, e qual a melhor estratégia para conseguir um correto enchimento no menor tempo possível.

Antes de dar início às simulações, foi necessário obter propriedades dos materiais que constituem os laminados, como a resina, as fibras e a madeira, bem como fazer a modelação 3D das placas. Na modelação 3D das placas, deve ter-se em atenção a única propriedade inerente às madeiras que possuem influência na simulação, isto é, a sua impermeabilidade ao escoamento de resina. Assim sendo, devem ser criados furos passantes nas placas de madeira de modo a permitir a distribuição de resina. Durante o desenvolvimento 3D das placas, percebeu-se que a melhor forma de as desenhar seria substituindo toda a placa com os furos por cilindros com igual diâmetro e espaçamento das furações. Desta forma, permite-se que o software crie a malha de simulação apenas nos locais de passagem de resina, ou seja nas fibras e nos cilindros correspondentes aos furos de passagem na madeira. Estes cilindros são espaçados entre si 25 mm nas duas direções e possuem a profundidade da lâmina de madeira em questão (1 ou 2 milímetros conforme o laminado).

Em relação à matriz, recorreu-se à sua ficha técnica (presente no Anexo J) para obter os valores de densidade da mesma, que ronda o 1.14 g/cm^3 , bem como a viscosidade da resina, estabelecida em $170 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Por fim, recolheu-se informação acerca das fibras envolvidas nos laminados, pelo que se considerou a densidade de 1.44 e 1.77 g/cm^3 , para as fibras de aramida e de carbono, respetivamente. Quanto à gramagem dos tecidos, considerou-se 200 g/m^2 para as fibras de carbono unidireccionais, 195 g/m^2 para as fibras de carbono bidireccionais (tecido tafetá) e 170 g/m^2 para as fibras de aramida.

As restantes propriedades a incluir nas simulações é a permeabilidade das fibras, que define uma maior ou menor dificuldade de impregnação das fibras, e que se reflete na velocidade de deslocamento da frente do escoamento. Assim, e de modo a obter esta propriedade, de forma indireta, foram realizadas diversas infusões de resina a vácuo. Para isso, as infusões foram filmadas e a velocidade da frente do escoamento (caudal volúmico) monitorizada. Considerando os parâmetros da infusão, tais como, a pressão à entrada e saída, a viscosidade da resina e o caudal volúmico da frente de escoamento, a permeabilidade é determinada a partir da Lei de Darcy (cuja equação genérica se encontra representada na *Equação 10*), que descreve o escoamento de um fluido em meio poroso.

$$Q = \frac{-k \cdot A}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad \text{Equação 10}$$

Onde “Q” corresponde à velocidade da frente de fluxo, “k” é a constante de permeabilidade do meio poroso (neste caso dos tecidos de reforço), “μ” é a viscosidade da matriz polimérica, “ΔP” corresponde à variação de pressões entre os dois extremos do caminho percorrido pela resina e por fim o “L” corresponde ao caminho percorrido pelo fluido (resina). Para simplificar o modelo numérico de simulação, estas infusões foram realizadas considerando as diferentes combinações de camadas dos laminados, isto é, tendo em conta os laminados da *Figura 76*, foram realizadas infusões às composições de: Carbono 0° - Carbono 0°; Carbono 30° - Carbono -30°; Aramida 0°/90° - Aramida 0°/90°; Carbono 30° - Carbono -30° - Aramida 0°/90° - Aramida 0°/90°; Carbono 0°/90° - Carbono -0°/90°; Aramida 45°/-45° - Aramida 45°/-45°; Carbono 45°/-45° - Carbono -45°/-45 - Carbono 0°/90°.

Na *Figura 78*, é possível observar as infusões realizadas bem como o método adotado para a filmagem das mesmas.



Figura 78 - Infusão realizada às composições de fibras presentes nas placas a produzir. No ponto a) é possível observar uma régua que permite ter noção do andamento do fluxo (que corresponde ao “L” na lei de Darcy) durante a observação do vídeo.

Após a obtenção de todos os dados necessários para as simulações, foram consideradas diversas configurações para os pontos de entrada e saída de resina no molde e analisadas todas elas. Após diversas simulações com os diferentes pontos de resina e de vácuo chegou-se à conclusão que a estratégia que melhor funciona para todas as diferentes placas, é fazer entrar a resina pela parte superior das placas num ponto central e utilizar 4 pontos de vácuo nos cantos ao fundo da placa para facilitar o escoamento da resina. Outra conclusão que advém das sucessivas simulações a todas os materiais da *Figura 76*, é que a placa *SkateB_1* é a mais difícil de impregnar totalmente, pelo que se esta placa enche completamente todas as outras terão o mesmo comportamento. Nas *Figuras 79, 80, 81 e 82*, é então possível observar alguns resultados obtidos para a placa *SkateB_1*.

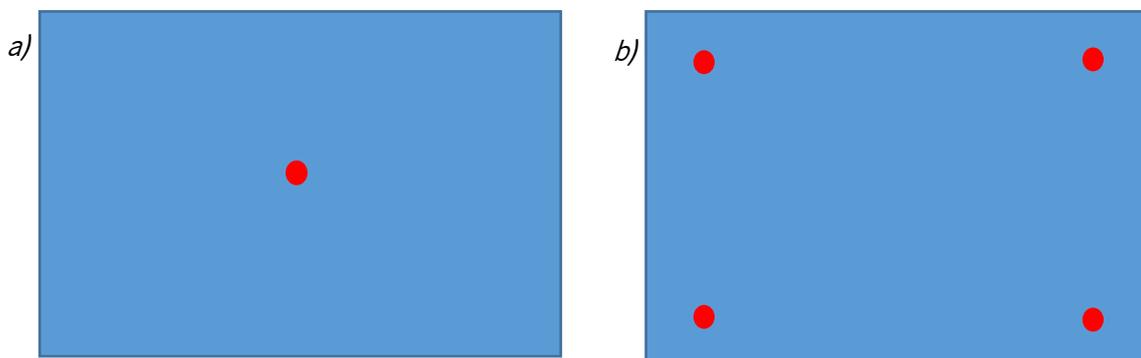


Figura 79 - Locais de entrada e "saída" de resina. a) corresponde à face superior com local de entrada de resina representado com o ponto vermelho; b) corresponde à face inferior da placa, com os quatro pontos de vácuo assinalados a vermelho.

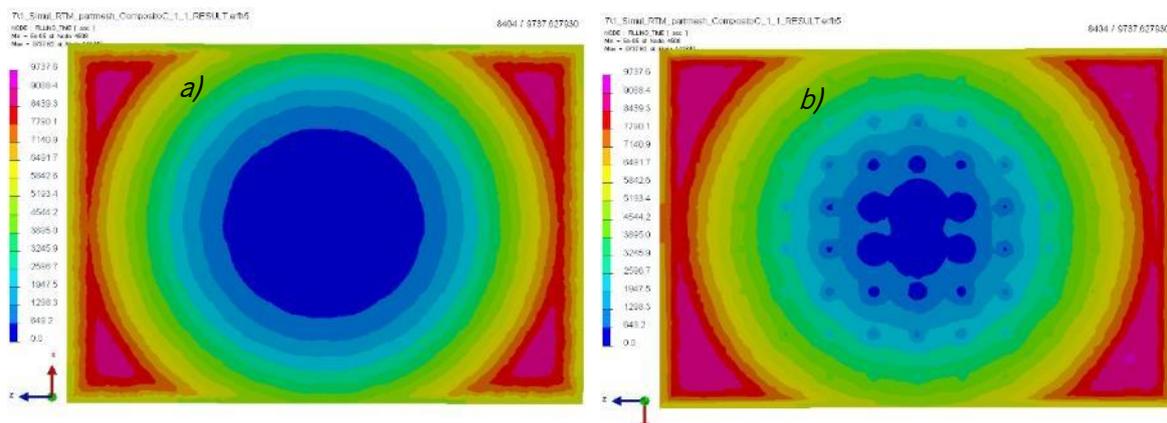


Figura 80 - Dados referentes ao tempo de enchimento das placas nas diferentes camadas; a) corresponde à camada superior e b) à camada inferior.

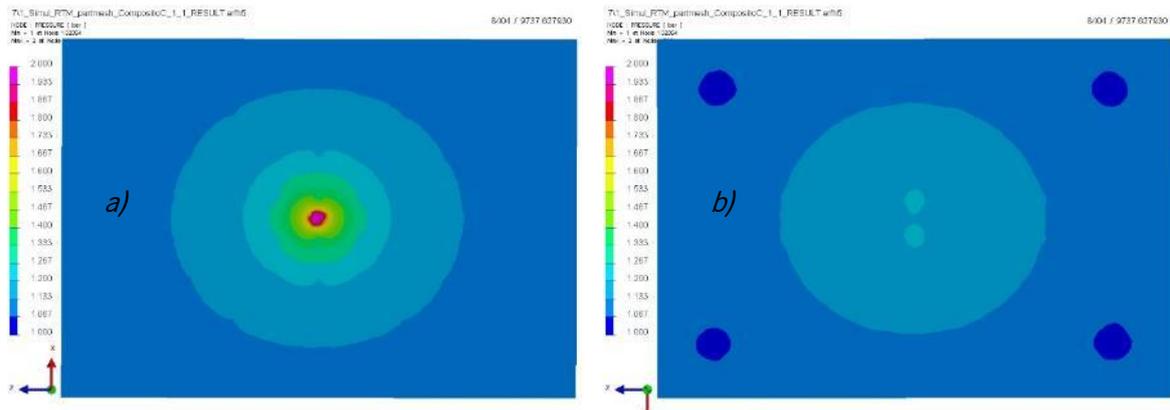


Figura 81 - Dados referentes à pressão ao longo da placa durante o enchimento. a) corresponde à camada superior da placa e b) à camada inferior.

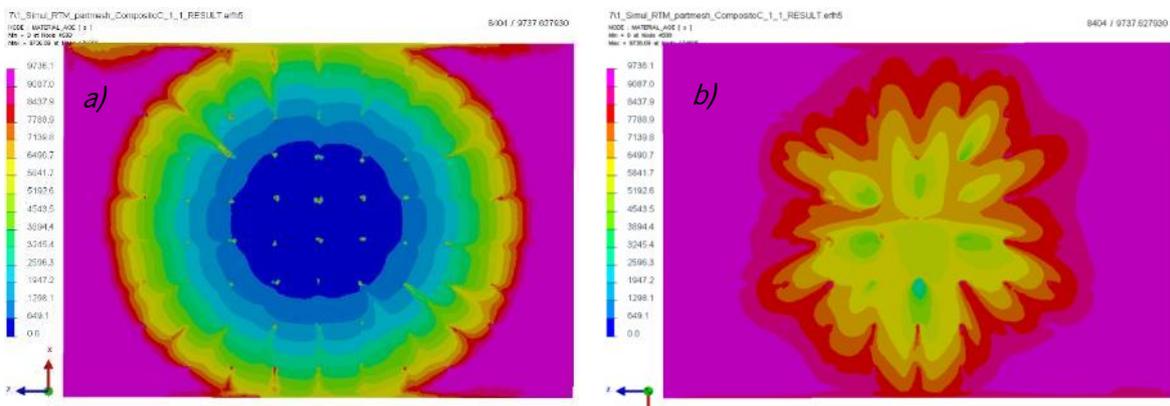


Figura 82 - Dados referentes ao tempo de permanência do material no interior das placas desde que entra no laminado até ao final do processamento. a) corresponde à camada superior e b) à camada inferior da placa SkateB_1.

Analisando as figuras anteriores, é possível ter uma ideia daquilo que irá acontecer durante o processamento das placas. Assim sendo, na *Figura 79*, é possível ver a localização do ponto de entrada da resina no molde, bem como os pontos de escoamento onde será aplicada pressão negativa. A *Figura 80*, mostra o tempo total de enchimento nas duas faces exteriores da placa. Nesta imagem é possível averiguar que a camada superior possui um enchimento radial até atingir as laterais, pelo que nesse momento procura o caminho mais fácil para progredir (junto às paredes do molde), após total enchimento da zona periférica da placa vai ao encontro dos pontos de vácuo. Já na camada inferior, é possível verificar que existe enchimento através dos furos da madeira, procurando um enchimento radial em torno de cada furo, com o evoluir do processamento os resultados convergem para os mesmos da camada superior. A *Figura 81* mostra a pressão de enchimento, sendo notória que a zona de maior pressão corresponde à entrada de resina e as de menor pressão aos pontos de aplicação de vácuo. As últimas duas imagens, visíveis na *Figura 82*, possuem grande semelhança com as referentes ao tempo de enchimento e correspondem ao tempo de permanência da resina no molde desde o momento da sua

entrada até ao fim de todo o processo, ou seja, a resina vai entrando e dirigindo-se para diferentes locais, pelo que a última resina a entrar fica alojada na zona da entrada da resina no molde.

6.3.2. Produção do Novo Molde

Devido à modificação das dimensões das placas, é necessário alterar o molde em utilização uma vez que se deve adaptá-lo às novas medidas das placas. Como é possível verificar na *Figura 77*, existem provetes com dimensões superiores ao molde em utilização, pelo que a construção de um novo molde para a produção das placas para provetes, se assume como um ponto muito importante.

Outra razão para a produção de um novo molde, reside na impossibilidade de visualizar o escoamento da resina no laminado. Esse impedimento, apesar de ser prática comum na indústria, dificulta o processo de RTM no molde antigo, uma vez que o processo não está devidamente padronizado, o que não permite saber se a placa se encontra totalmente impregnada ou não. Desta forma, pretende-se construir um molde em que pelo menos uma das faces permita visualizar a impregnação das fibras permitindo comparar o enchimento da peça no molde com o ocorrido na simulação.

O material utilizado na produção do novo molde, foi um aproveitamento de um permeabilímetro (com um funcionamento errático), sendo este constituído por uma base de alumínio com 20 mm de espessura, e uma parte superior em acrílico com cerca de 40 mm de espessura. De modo a completar o molde, foi produzido um vedante por vazamento de silicone com as dimensões ligeiramente superiores às das placas a produzir (cerca de 1mm a toda a volta). Utilizou-se ainda uma placa de acrílico, com espessura

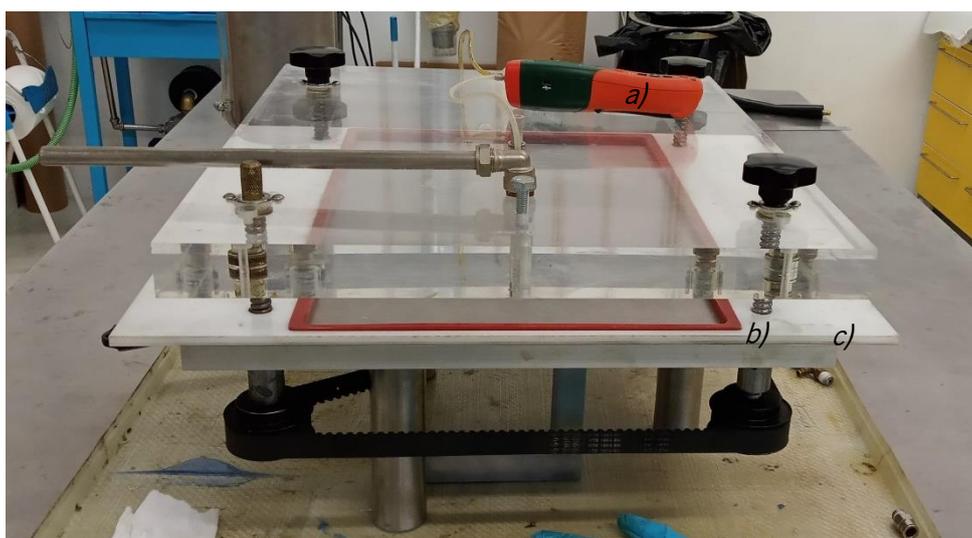


Figura 83 - Molde para produção das placas em RTM. a) Aparelho medidor de diferenças de pressões; b) Vedante (a vermelho); c) placa de acrílico para “aperto do vedante” (a branco).

de 8 mm (próxima à das placas a produzir) e dimensão interior adaptável ao vedante, para impedir um sobre esmagamento do vedante, e ainda impedir que as pressões utilizadas no processamento movam o vedante do local adequado. Nota ainda para o trabalho envolvido na reabilitação deste molde, uma vez que foram desenhadas e produzidas novas peças para um melhor funcionamento deste equipamento. Após o aperfeiçoamento do material afeto ao molde, como apoios, vedantes, mangueiras entre outros, concluiu-se a sua produção, podendo ser visto na *Figura 83*.

Para além da vantagem já mencionada, este molde possui ainda outra vantagem que é a possibilidade de ajustar o molde à espessura teórica da placa a produzir, uma vez que as quatro placas possuem espessuras teóricas diferentes entre si. Dessa forma é possível obter peças com o volume de fibras teórico arbitrado inicialmente, isto é, se não fosse ajustada a espessura individualmente e fosse utilizado um valor médio, as placas mais espessas iriam possuir um volume de fibras mais elevado uma vez que estas estariam mais compactadas, o que pode levar à não impregnação de todas as fibras presentes no laminado (tendo ainda outros problemas, como picos de pressão elevados que podem fletir o molde e/ou abrir o mesmo), pelo que as placas mais finas, iriam possuir um excesso de resina (uma vez que a espessura promovida pelo molde é superior à espessura teórica das placas) e por conseguinte volumes de fibra mais reduzidos que, conseqüentemente, confere ao produto final piores propriedades mecânicas.

Uma vez que no futuro se pretende utilizar este molde como um permeabilímetro funcional, foi realizado um teste de enchimento do molde com duas finalidades. Avaliar se o vedante de silicone promove uma boa vedação ao molde, e ainda se os valores retirados pelo permeabilímetro após tratamento dos mesmos se aproximam daqueles que se obtêm nas simulações realizadas no *PAM-RTM*.

Realizados os testes, constatou-se que o molde não seria adequado para a realização de RTM, uma vez que a placa de acrílico flexionava, impedindo a vedação total por parte do vedante de silicone. Foram utilizados grampos, para aumentar a força de fecho deste molde, e ainda realizados ensaios sem qualquer tipo de reforço no interior do molde, de modo a testar apenas o vedante sem qualquer tipo de compressão por parte das fibras na placa superior em acrílico, porém, sem grande diferença nos resultados obtidos.

Com base nestes resultados insatisfatórios, foram revistos os cronogramas da dissertação e do projeto no qual ela se insere, *Valor Nature*, bem como o orçamento disponível neste último. Foi então constatado que não haveria grande tempo e recursos para desenhar e produzir um novo molde que se adeque à

realização do RTM, pelo que se alterou o método de fabrico da prancha de *skateboard* para infusão de resina a vácuo. Como já foi visto nesta dissertação, a infusão de resina, não promove um bom acabamento em todo o exterior da peça produzida, no entanto apenas é necessário um bom acabamento superficial num dos lados da prancha, uma vez que na parte superior será utilizada uma lixa (*grip tape*) de modo a aumentar a aderência do *skate* aos pés do praticante. Com este método, é ainda possível obter as espessuras teóricas esperadas (ou pelo menos as mesmas diferenças entre as pranchas) caso o processo seja feito de forma adequada e bem uniformizada.

6.3.3. Processamento das Novas Placas

Como é habitual no desenvolvimento de um produto, é indispensável preparar todo o material necessário para determinado procedimento ainda antes de este ser realizado, desta forma é possível ter uma boa organização, da matéria-prima, evitar atrasos na produção e realizar o procedimento de início ao fim sem interrupções.

Posto isto, de modo a ser possível realizar todo o procedimento, foram preparadas as placas de madeira. Estas vêm com as dimensões originais de 1100 mm de comprimento por 350 mm de largura, sendo necessárias alterações às mesmas de modo a obter placas com 455 mm de comprimento por 325 mm de largura. A espessura original das placas também era superior à necessária (cerca de 3mm de espessura), pelo que foi necessário baixar a espessura das mesmas placas para 1 mm e para 2 mm. Após o corte, foram arredondados os cantos das placas de modo a evitar que estas danifiquem o saco

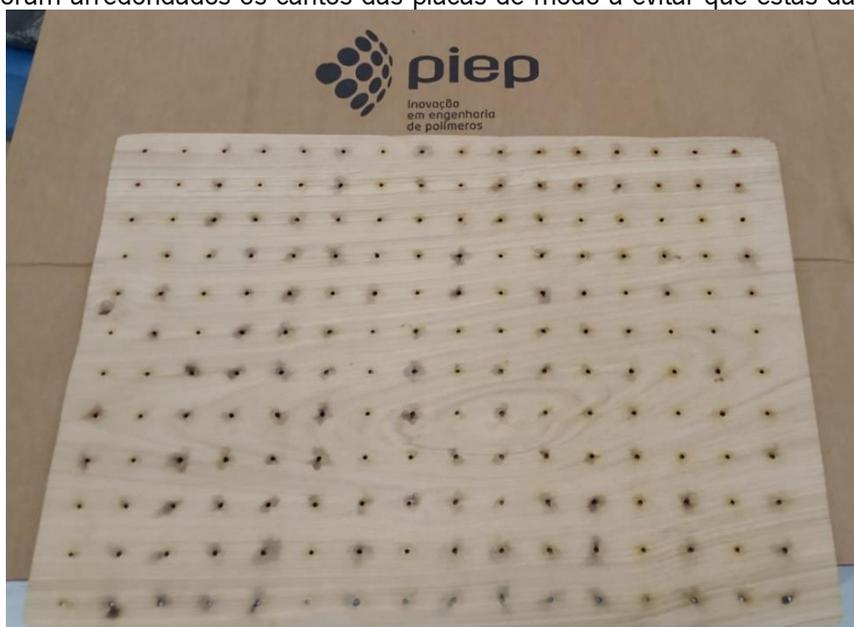


Figura 84 - Lâmina de madeira a utilizar nos laminados. Os furos apresentam um diâmetro de 2 mm e estão espaçados 25 mm.

de vácuo, aquando da infusão. Por fim, é necessário promover caminhos à resina de modo a que esta consiga impregnar todas as fibras, como a madeira não é permeável à resina é necessário furar a mesma em vários pontos. Dessa forma a resina consegue ultrapassar a madeira impregnando as fibras envolvidas no laminado. A *Figura 84* mostra a madeira finalizada pronta a utilizar nos laminados a produzir.

Em relação às fibras que estarão presentes nos laminados estas foram cortadas com dimensões ligeiramente superiores ao tamanho pretendido para as placas, uma vez que as bordas das placas após desmoldagem terão de ser recortadas. Na *Figura 85*, podem ser observadas as fibras a utilizar nas placas *SkateB*.

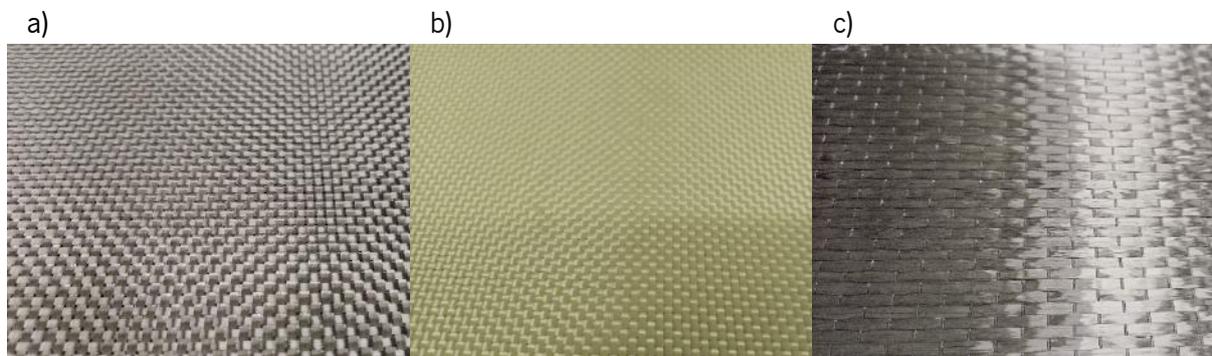


Figura 85 - Fibras a utilizar no fabrico das placas SkateB. a) Tecido de fibra de carbono com padrão tafetá e direções a zero e noventa graus para as fibras presentes no tecido; b) tecido de fibra de aramida com padrão tafetá e direções das fibras a zero e noventa graus; c) Tecido de fibra de carbono unidirecional com direção a apenas zero graus.

A produção das placas compósitas, através do processo de infusão de resina a vácuo, segue o mesmo procedimento efetuado na produção das placas para o *longboard* e que pode ser visto na secção 5.2. Na *Figura 86*, é possível observar uma placa completamente infundida e desmoldada, bem como a secção transversal de todas as placas preparadas por infusão de resina a vácuo.

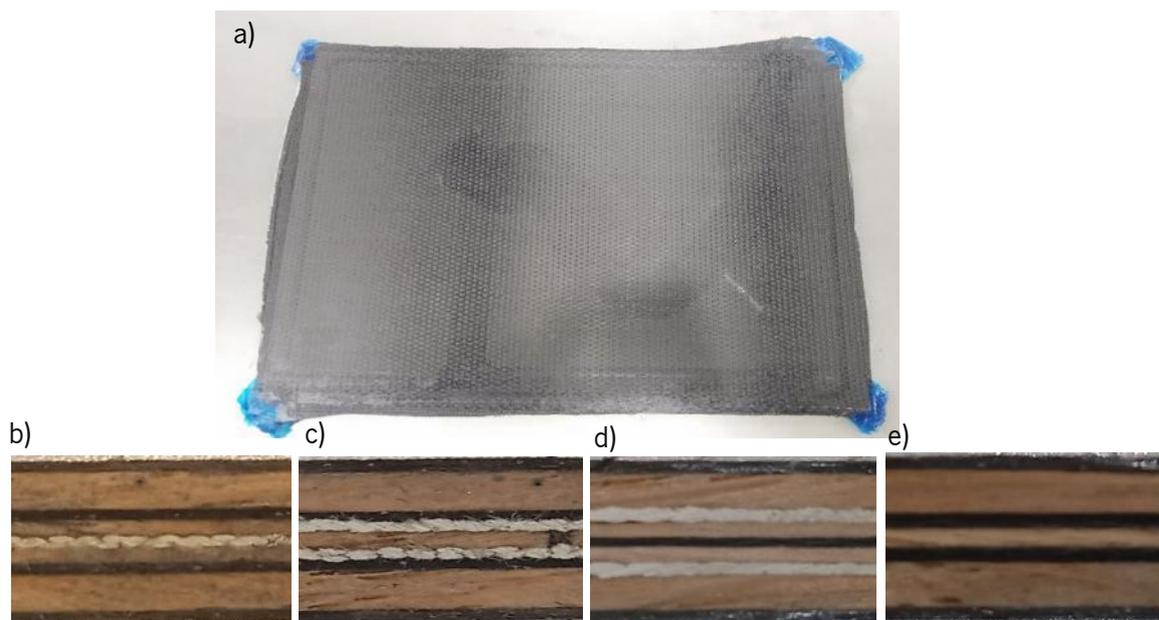


Figura 86 - a) Placa desmoldada referente à placa SkateB_1; b) Corte transversal da placa SkateB_1. c) Corte transversal da placa SkateB_2. d) Corte transversal da placa SkateB_3. e) Corte transversal da placa SkateB_4. As imagens b), c), d), e e) podem ser comparadas com os esquemas presentes na secção 6.3. e visíveis na Figura 76. Na imagem a), é visível a presença de fita cola de alta temperatura nos cantos da placa, cuja finalidade é ajudar a alocar as fibras durante a laminação, ajudando a que as mesmas não se desloquem.

6.3.4. Ensaios às Novas Placas

Com vista a ser possível avaliar o comportamento dos novos materiais, em relação às suas propriedades ao impacto e à flexão, foram retirados provetes normalizados das placas produzidas e ensaiados posteriormente. As dimensões dos provetes seguem as restrições presentes nas normas *ISO 14125* para flexão em materiais poliméricos reforçados com fibras longas e *ASTM D 7136*, para impacto com queda de dardo. Os provetes com as dimensões referentes aos mesmos podem ser vistos na *Figura 87*.

Como visto anteriormente, as propriedades em flexão dos materiais em questão foram determinadas com base na norma *ISO 14125* (flexão em três pontos), numa máquina universal de ensaios mecânicos *Shimadzu AG-X*, com uma célula de carga de 50 kN. Os ensaios de flexão foram efetuados à taxa de 2.67 mm/min. A distância entre apoios utilizada variou consoante a placa a ser ensaiada sendo de 400 mm para a placa *SkateB_1*, 368 mm para a placa *SkateB_2*, 384 mm para a placa *SkateB_3* e 340 mm para a placa *SkateB_4*. Foram ensaiados seis provetes para cada placa produzida. Os ensaios foram realizados à temperatura de (23 ± 2) °C. Os danos causados nos provetes foram idênticos em todas as placas e pouco invasivos nas amostras. Os danos provocados podem ser observados na *Figura 88*.

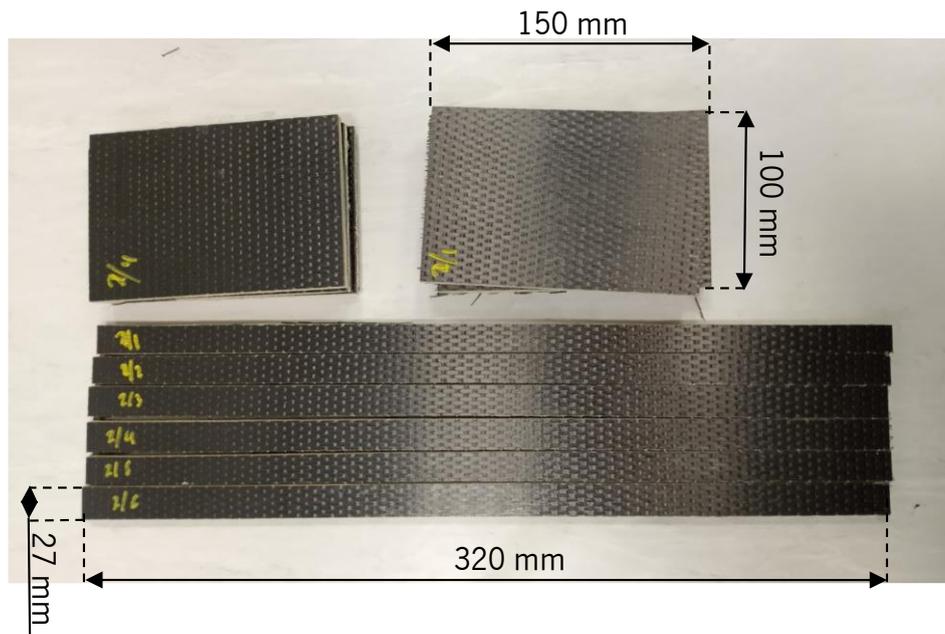


Figura 87 – Provetes com as dimensões normalizadas retirados das placas infundidas. Em baixo estão os provetes de ensaios de flexão e em cima os provetes para ensaios de impacto.

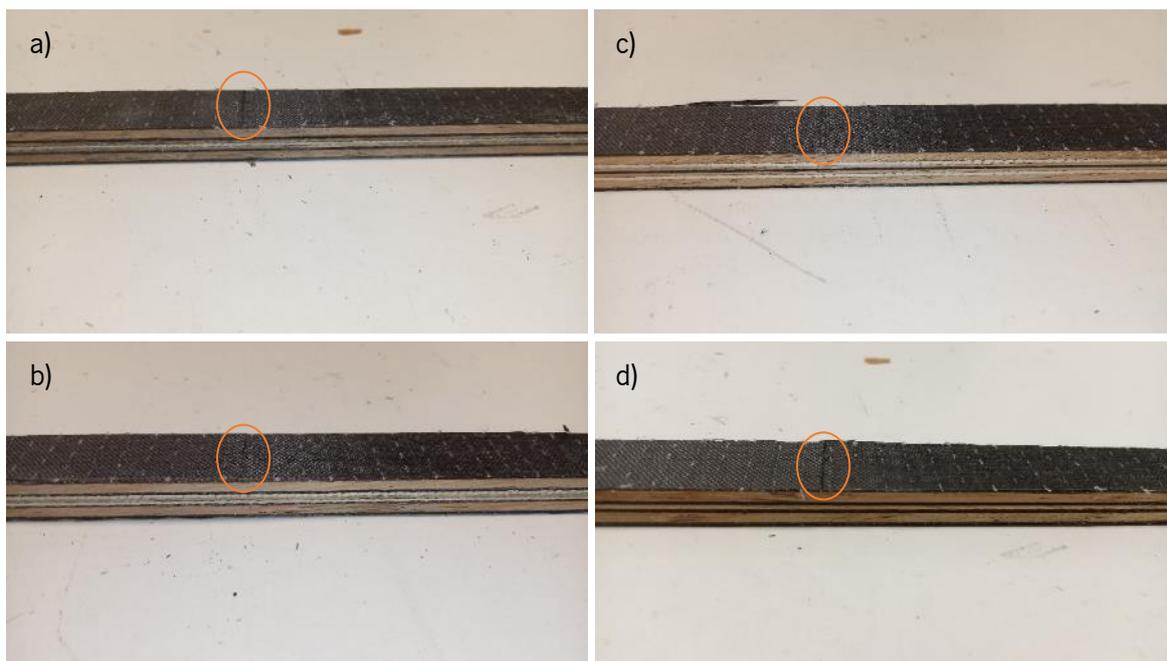


Figura 88 - Danos causados nos provetes durante os ensaios de flexão. a) SkateB_1; b) SkateB_2; c) SkateB_3; d) SkateB_4.

O comportamento ao impacto por queda de dardo (perfuração) dos materiais em análise foi avaliado com base na norma *ASTM D 7136*, utilizando uma máquina de impacto instrumentado *Fractovis Plus* da *Ceast*. Os ensaios foram efetuados à velocidade de 4.429 m/s, utilizando um impactador hemisférico com 20 mm de diâmetro e 30 kg de massa. Foram ensaiados 6 provetes para cada tipo de placa, com espessura variável de placa para placa. Os provetes submetidos ao impacto foram fixos entre um suporte e um anel de fecho, ambos com diâmetro interno de 40 mm (vão livre). Os ensaios foram realizados à temperatura de (23 ± 2) °C.

O peso do impactador é o mesmo que foi utilizado na secção 6.2.7. de modo a ser possível aumentar a verosimilhança na comparação dos resultados para os diversos tipos de materiais ensaiados ao impacto.

6.3.5. Apresentação e Discussão dos Resultados

6.3.5.1. Ensaio de Flexão

Os resultados obtidos nos ensaios encontram-se representados graficamente nas *Figuras 89, 90, 91 e 92* apresentadas de seguida.

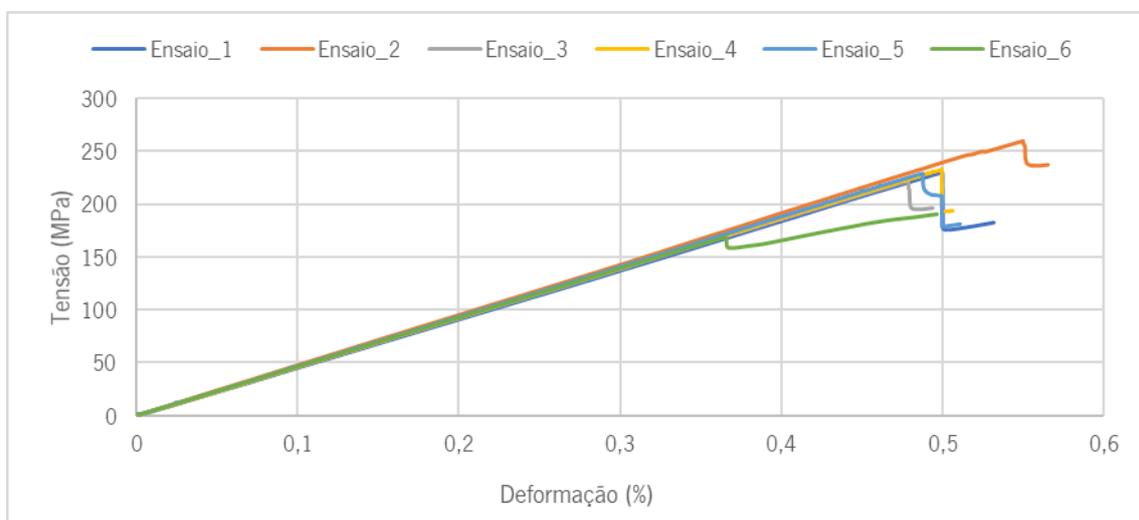


Figura 89 - Gráfico de tensão/deformação referente às curvas retiradas nos ensaios de flexão à placa SkateB_1.

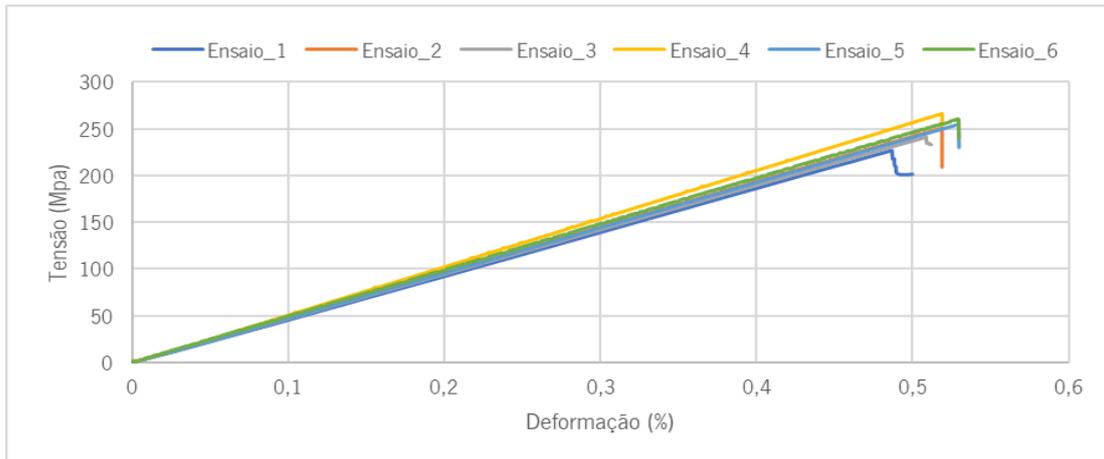


Figura 90 - Gráfico de tensão/deformação referente às curvas retiradas nos ensaios de flexão à placa SkateB_2.

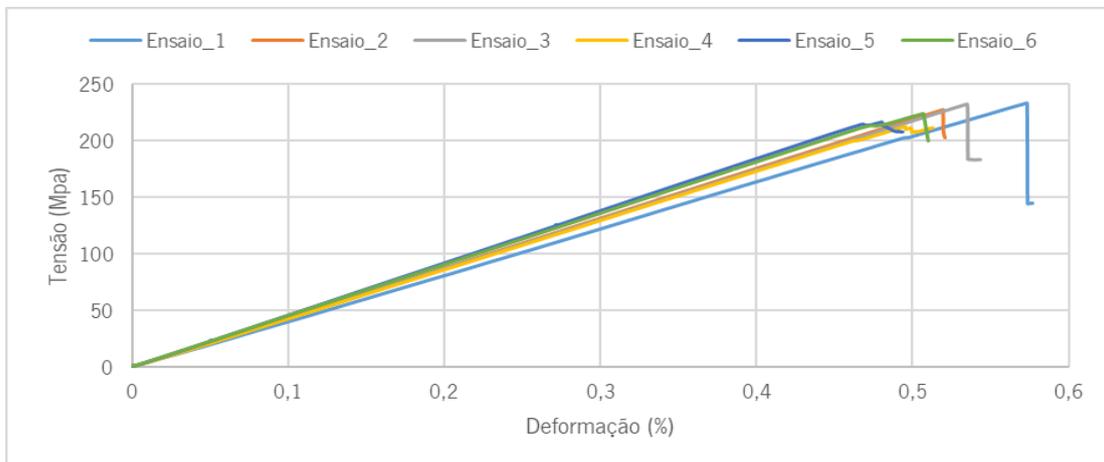


Figura 91 - Gráfico de tensão/deformação referente às curvas retiradas nos ensaios de flexão à placa SkateB_3.

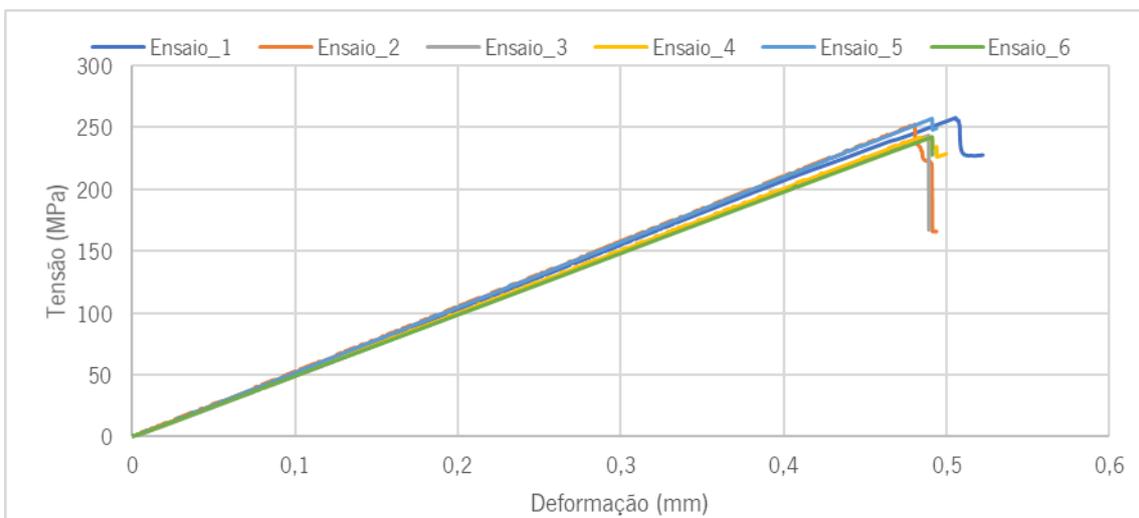


Figura 92 - Gráfico de tensão/deformação referente às curvas retiradas nos ensaios de flexão à placa SkateB_4.

Como é possível verificar nas *Figuras 89 a 92*, é evidente a semelhança existente em todos os ensaios efetuados. Este facto é visível não só quando se compara os resultados provete a provete para cada tipo de placa, mas também quando se compara os resultados obtidos placa a placa. A razão deste acontecimento é bastante simples de compreender e baseia-se no facto de que os ensaios são abortados a partir da primeira queda de tensão na amostra, ora como as superfícies superiores e inferiores de todas as placas produzidas são compostas por duas camadas de fibra de carbono unidirecional, a primeira queda de tensão, que ocorre em todos os provetes testados à flexão, corresponde a uma ligeira delaminação na superfície que se encontra em contacto com o calcador do equipamento universal de ensaios mecânicos, devido ao esmagamento do provete por parte do mesmo cilindro de carregamento. Esse pequeno defeito foi mostrado anteriormente na *Figura 88*. Nota ainda para o facto de que todos os ensaios realizados e representados nas curvas das *Figuras 89 a 92*, se encontrarem no regime elástico de deformação pelo que no fim de cada ensaio, todos os provetes recuperaram a sua forma original, excluindo o pequeno esmagamento que ocorreu na camada que se encontra à compressão.

As pequenas alterações que se verificam nos dados obtidos (como a tensão e a deformação máximos) devem-se sobretudo às diferentes espessuras que as placas possuem, sendo que, regra geral, quanto maior a espessura da placa menor é a tensão máxima atingida nos ensaios a esse tipo de material, uma vez que há aumento do momento de inércia devido à maior área de secção transversal que se verifica nas placas mais espessas. Outros fatores que podem favorecer estas pequenas discrepâncias nos ensaios, envolvem o tipo de material presente no interior das duas superfícies de carbono unidirecional, a existência de defeitos como vazios no interior das placas e ainda interfaces entre as fibras a madeira e a resina com melhores ou piores propriedades entre as diversas placas.

De modo a ser possível obter dados diferentes para as diversas placas poderiam ser adotadas as medidas tomadas para os ensaios ao *longboard*, no entanto, neste caso os ensaios teriam de ser realizados com os mesmos parâmetros adotados na análise de *benchmarking*. Outro fator que difere da secção 5.3. e que impede a utilização de apoios e calcador planos é o facto de que a norma adotada, *ISO 14125*, exigir os apoios com 7,5 mm de raio e um calcador cilíndrico de raio 15 mm.

Convém ainda salientar o facto de todos os materiais testados aguentarem cargas superiores a 700 kg, impostos numa pequena área de contacto entre o calcador e o provete, sem que haja quebra de fibras nas amostras, o que leva a crer que será complicado quebrar a prancha final em condições normais de

utilização, mesmo tendo em conta a importância que a geometria tem na resistência à flexão da prancha de *skateboard*.

Em jeito de curiosidade, a *Figura 93* mostra a curva de um ensaio de flexão realizado a um provete da placa SkateB_1, onde se abortou o ensaio apenas quando se verificou um dano bem visível na amostra. Esse dano correspondeu à descolagem entre camada superior formada pelas duas lâminas de epóxi reforçado com fibra de carbono (ERFC) e a madeira de carvalho, o que leva à conclusão de que a tensão existente na interface ERFC/madeira de carvalho e que “cola” estes dois materiais, é inferior à tensão necessária para quebrar o provete no local mais provável (nas camadas inferiores que se encontram à tração no ensaio de flexão).

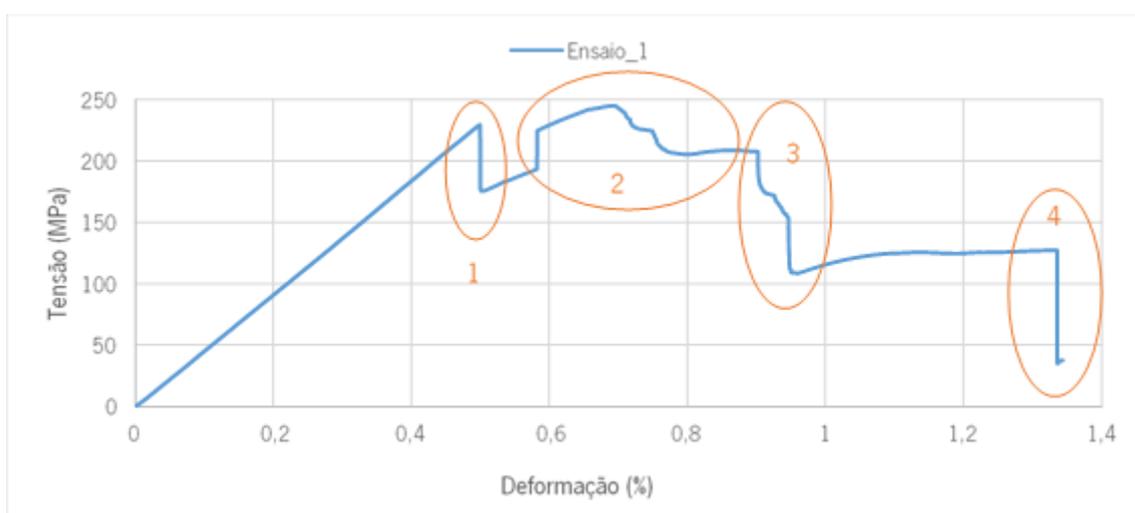


Figura 93 - Curva referente ao provete número 1 da placa SkateB_1, onde se abortou o ensaio apenas quando um dano bem visível se verificou na amostra.

A região representada com o número 1, diz respeito à primeira delaminação no provete tal como aconteceu em todos os provetes. A região representada com o número dois representa a progressão da falha no provete ao longo das fibras de carbono, madeira de carvalho com 1mm de espessura e as fibras de aramida que se encontram no centro do laminado. A queda abrupta da tensão no provete verificada na região 3, diz respeito à zona de transição entre a aramida e a camada de madeira com 1mm de espessura. Por fim a zona representada a 4 corresponde ao momento em que se dá a descolagem das lâminas de ERFC da madeira de carvalho. Nas zonas de progressão da falha causada pela carga imposta, a tensão baixa devido à falta de oposição da camada, ou seja, como não há resistência à falha a tensão decresce até encontrar uma nova lâmina e, por conseguinte, uma nova oposição.

Na tabela que se segue, *Tabela 19*, é possível verificar as médias dos valores máximos obtidos nos ensaios de flexão.

Tabela 19 – Valores médios calculados para diversas propriedades, com auxílio dos dados obtidos nos ensaios à flexão de cada placa ensaiada.

	SkateB_1	SkateB_2	SkateB_3	SkateB_4
Força (N)	757.3	741.1	653.9	653.8
Deslocamento (mm)	14.3	13.3	13.4	11.81
Tensão (MPa)	251.4	273.9	229.9	254.1
Deformação (%)	0.58	0.54	0.54	0.52
Módulo Flexão (MPa)	44083.1	45775.4	43192.2	49138.2

No Anexo M, estão os gráficos força/deslocamento obtidos nestes ensaios de flexão, com as curvas obtidas para todos os ensaios realizados.

6.3.5.2. Ensaio de Impacto

Os resultados obtidos, estão representados nas curvas dos gráficos das *Figuras 94, 96, 98 e 99*. A análise dos resultados, foi realizada individualmente para cada tipo de amostra e pode ser encontrada imediatamente a seguir ao respetivo gráfico.

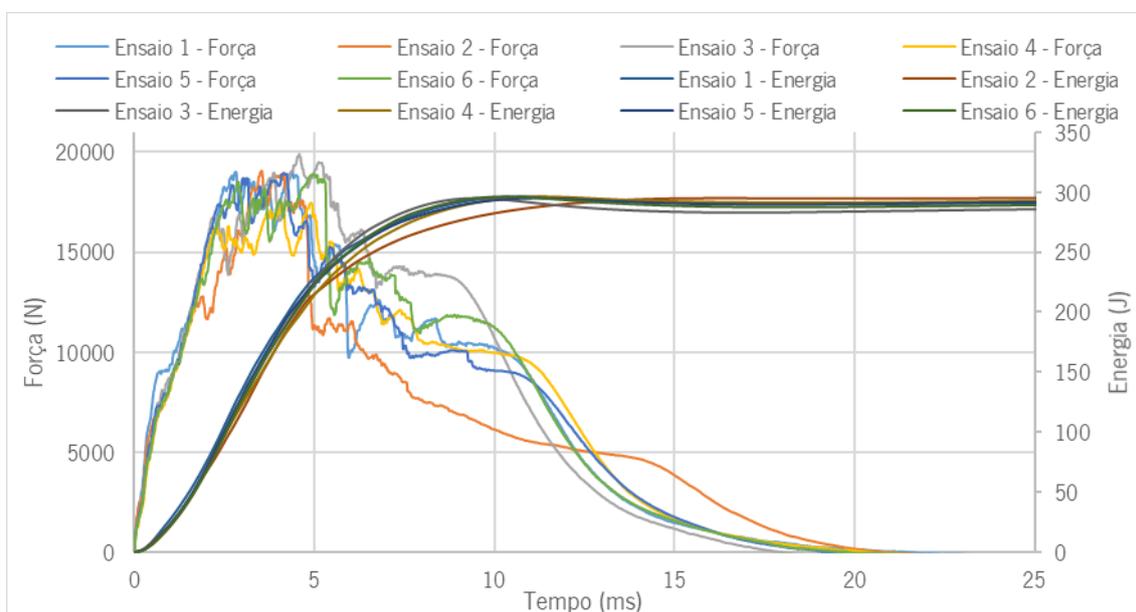


Figura 94 - Gráfico referente à placa SkateB_1, com dados de absorção de energia e força de reação da amostra em função do tempo.

Tendo em conta as curvas apresentadas na *Figura 94*, é possível verificar a grande reprodutibilidade que estas possuem entre si principalmente no que diz respeito à energia absorvida por parte de cada provete.

Quanto à força de reação que cada amostra confere no impactador, é notória uma igualdade de resultados numa fase inicial do ensaio, que vai desde o início do impacto até ao pico de força (cerca de 5 ms), no entanto a partir deste momento (pico de força), é possível reparar numa pequena discrepância nas curvas obtidas. A diferença nesta fase é normal e não muito significativa, podendo dever-se a vários fatores sendo o menos comum neste tipo de ensaios o sucessivo impacto do impactador na amostra após o primeiro grande impacto, que se deveu ao facto de a amostra não ter sido perfurada na totalidade como se pode verificar na *Figura 95*.

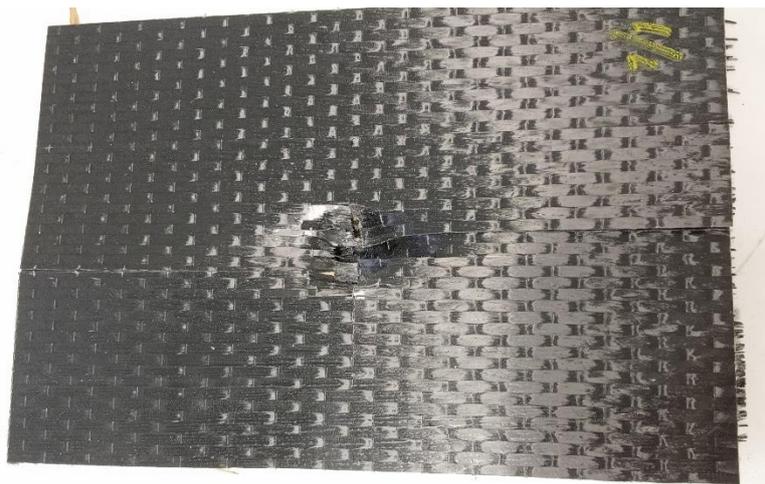


Figura 95 - Provete da placa SkateB_1 após ensaio de impacto.

Devido à não perfuração da amostra, foram obtidos valores de energia absorvida superiores à energia potencial existente no início do ensaio (cerca de 294,7 J), pelo que os dados da energia tiveram de ser corrigidos através da *Equação 11*:

$$E_{Final} = E_{Medida} - mgd \quad \text{Equação 11}$$

Na *Equação 11*, a E_{Medida} diz respeito aos valores de energia captados pelo software do equipamento utilizado nos ensaios, o m é a massa do impactador correspondente a cerca de 30 kg, g corresponde à força de aceleração gravítica, $9,81 \text{ m/s}^2$ e por fim o d corresponde ao deslocamento da amostra durante o impacto. De notar que a expressão foi utilizada para todos os pontos da curva original obtida e não para um ponto em específico. As curvas presentes no gráfico da *Figura 96* já têm em conta a correção efetuada aos dados.

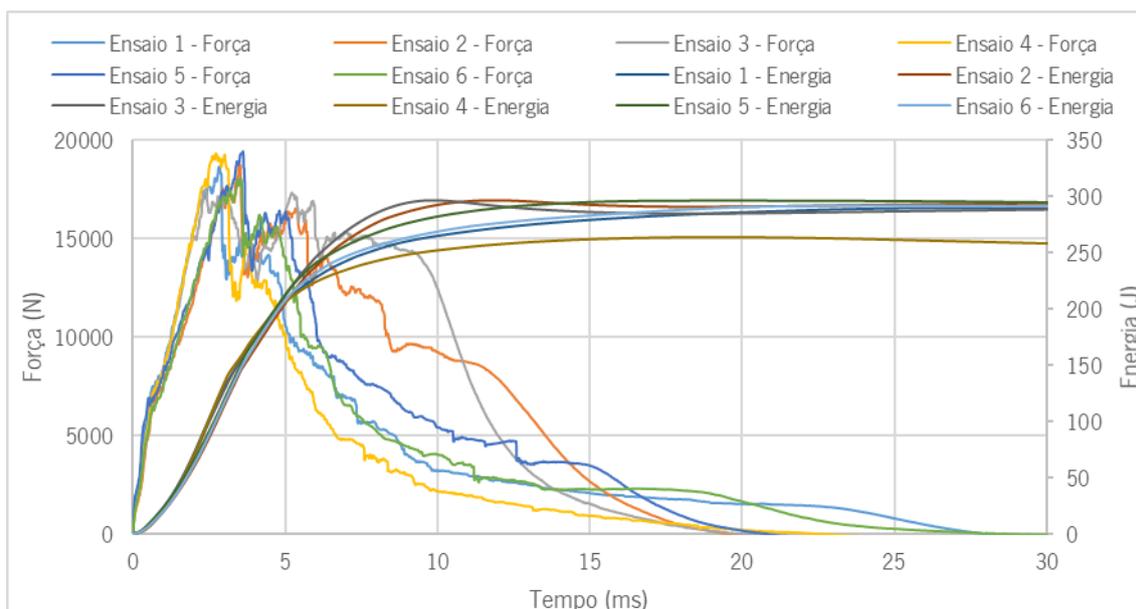


Figura 96 - Gráfico referente à placa *SkateB_2*, com dados de absorção de energia e força de reação da amostra em função do tempo.

O comportamento presente nas curvas do gráfico resultante dos ensaios de impacto à placa *SkateB_2*, estão de acordo com o que foi dito anteriormente para a placa *SkateB_1*, tendo, no entanto uma maior disparidade dos resultados a partir dos 5 ms no que diz respeito à força de reação da amostra, tendo como possível origem o mesmo facto enunciado na análise feita à *Figura 94*. De notar que uma vez mais foi necessário fazer uma correção aos dados referentes à absorção de energia seguindo a mesma *Equação 11*.

Como é possível aferir na *Figura 97*, os ensaios efetuados à placa *SkateB_3* perfuraram os provetes utilizados provocando a abertura total dos mesmos (foram realizados seis ensaios, no entanto o software não gravou os dados referentes ao provete número seis). Assim sendo não foi necessária a correção dos dados obtidos acerca da absorção energética por parte dos provetes.

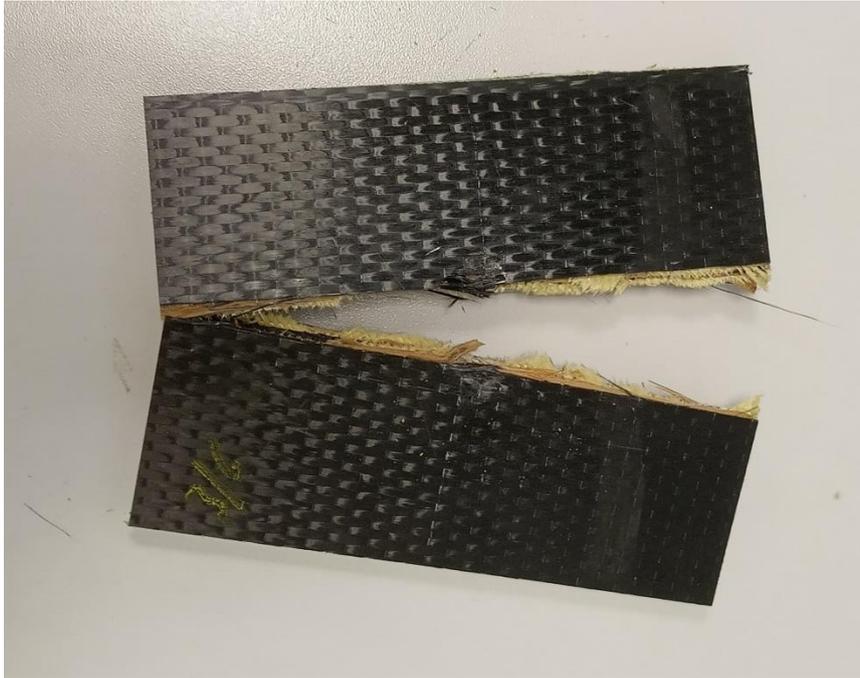


Figura 98 – Provete retirado da placa SkateB_3, que demonstra a abertura ocorrida nas amostras durante os ensaios de impacto por queda de dardo.

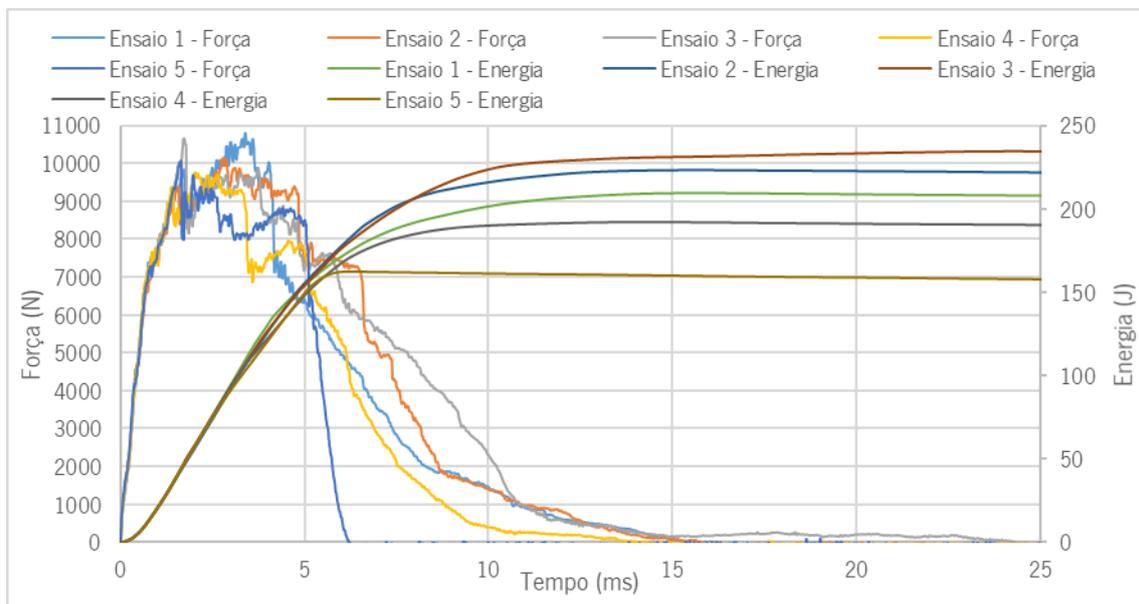


Figura 97 - Gráfico referente à placa SkateB_3, com dados de absorção de energia e força de reação da amostra em função do tempo.

Ao verificar as curvas presentes na Figura 98, é notória uma grande disparidade nas curvas de absorção de energia que têm variações entre os 150 J e os 240 J. Estas disparidades são explicadas com base nas curvas da força de reação imposta pela amostra (uma vez que a área abaixo do gráfico de força/tempo corresponde ao valor de energia absorvida), que demonstram baixa reprodutibilidade após

os 2 ms (a seguir ao pico inicial correspondente ao momento de primeiro contacto do impactador com cada amostra). As alterações verificadas podem ser explicadas pela natureza das amostras testadas visto que possuem na sua constituição produtos naturais como a madeira que podem possuir propriedades diferentes ao longo do seu volume. Existe ainda a possibilidade de as amostras estarem mal fixas entre o suporte e o anel de fecho que pode ter provocado o deslocamento da amostra do local original. Outro fator inerente à disparidade dos resultados, é o facto da separação em dois do provete visível na *Figura 97*. Esta divisão ocorreu em todos os ensaios a esta placa diminuindo a capacidade de absorver energia.

Os ensaios de impacto realizados à placa *SkateB_4*, seguiram o mesmo padrão dos da placa *SkateB_3*, pelo que foi evidente a perfuração total dos laminados, não sendo necessária a correção feita para as placas *SkateB_1* e *SkateB_2*.

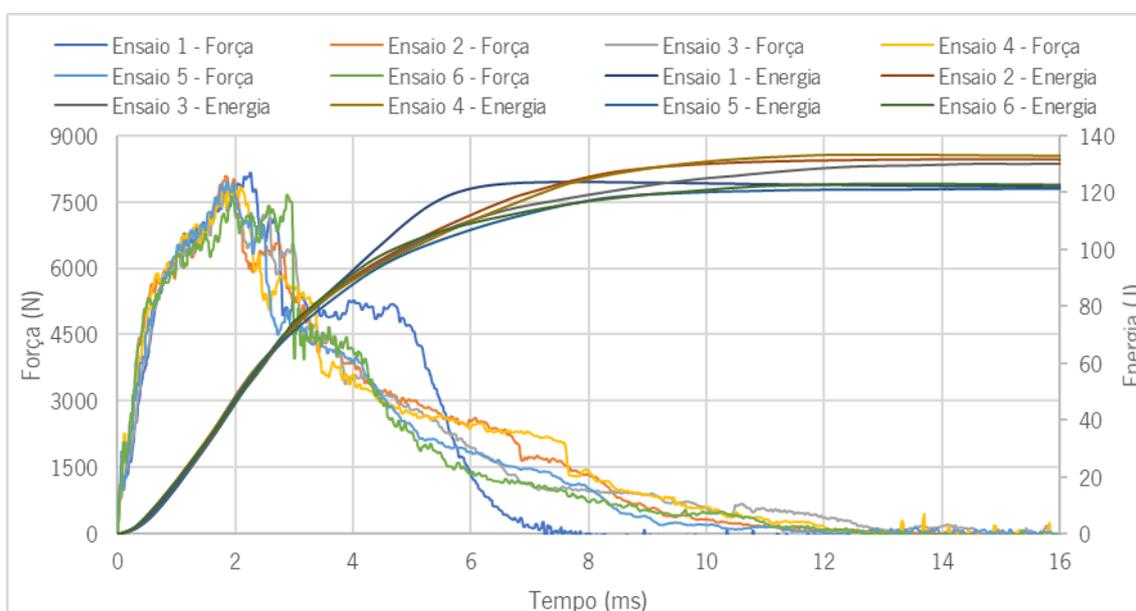


Figura 99 - Gráfico referente à placa *SkateB_4*, com dados de absorção de energia e força de reação da amostra em função do tempo.

Posto isto, as curvas presentes na *Figura 99*, possuem uma boa reprodutibilidade em todas as curvas existentes havendo uma alteração mais elevada na curva da força de reação correspondente ao provete número um, no entanto os valores finais deste provete estão de acordo com os restantes provetes. Apesar de haver uma grande igualdade nos resultados obtidos, foi notória nos ensaios a existência de problemas provenientes da fraca interação entre as fibras de carbono presentes no centro da placa e a madeira utilizada resultando no descolamento das camadas visível na *Figura 100*. A descolagem resultou do arrastamento das camadas centrais e inferiores relativamente às superiores que foram perfuradas

inicialmente, o que pode levar a prever que os resultados obtidos estão abaixo da realidade onde exista uma boa interação entre todas as fronteiras existentes no laminado.



Figura 100 - Provete completamente danificado pelo dardo durante os ensaios de impacto à placa SkateB_4.

Na Tabela 20, estão representados os valores médios obtidos nos ensaios para os quatro materiais ensaiados e mencionados nesta secção. De notar que esses resultados já entram em linha de conta com as correções efetuadas.

Tabela 20 - Valores médios calculados para cada propriedade, através dos dados obtidos nos ensaios ao impacto.

	Força Máxima	Energia Absorvida
SkateB_1	18879,1 N	289,5 J
SkateB_2	18603,9 N	285,6 J
SkateB_3	10279,8 N	214,7 J
SkateB_4	7918,9 N	126,8 J

6.4. Seleção do Material a Utilizar na Prototipagem

Para a produção do *skateboard* protótipo, é necessário avaliar os resultados obtidos, comparando-os entre si, tendo em conta todos os dados inerentes aos materiais. Esses dados têm em conta os ensaios realizados aos materiais e ainda características como peso, espessura e preço das placas compósitas produzidas por infusão e RTM (secção 6.3.3.).

Para ser mais fácil comparar os resultados dos ensaios entre as diversas amostras, estão disponíveis nas *Figuras 101 e 102* os gráficos das curvas médias de cada amostra relativo aos ensaios de flexão e impacto, respetivamente.

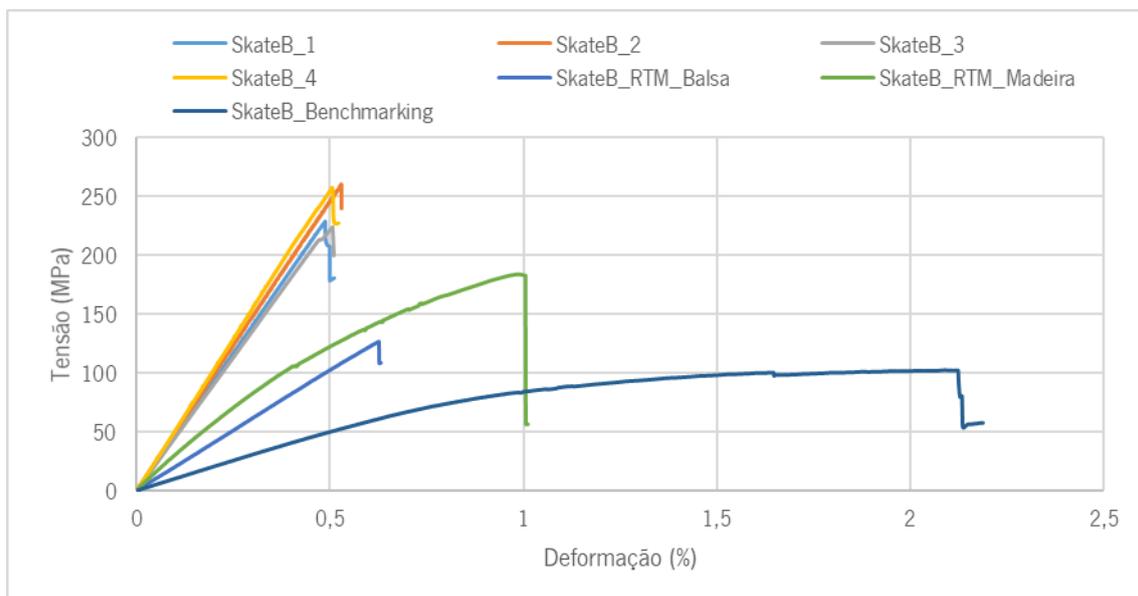


Figura 101 - Disposição comparativa das curvas médias relativas aos diferentes materiais testados à flexão no âmbito da produção de uma prancha de skateboard protótipo.

Como se pode verificar, existem 4 comportamentos distintos na extensão das curvas obtidas para os diferentes materiais testados à flexão. No gráfico da *Figura 101*, é possível afirmar que os materiais das placas produzidas na secção 6.3.3. por infusão de resina a vácuo possuem um comportamento bastante similar como já foi referido anteriormente nesta dissertação. A curva referente à placa *SkateB_RTM_Madeira*, é a que possui um comportamento mais aproximado das anteriores no que toca ao valor máximo de tensão atingida, no entanto com uma deformação superior. Avaliando a curva da placa *SkateB_RTM_Balsa*, é possível verificar que esta atinge uma tensão máxima aquando da rotura da madeira com valores próximos da metade daqueles que foram atingidos para as placas produzidas por infusão, com uma deformação bem próxima desses mesmos resultados. Por fim a curva referente ao material da análise *benchmarking* possui um comportamento muito mais plástico, isto é, a deformação da amostra dá-se sobretudo no regime plástico da deformação mecânica, o que difere de todas as outras placas ensaiadas.

Outro fator a ter em conta, para além das propriedades à flexão dos materiais, é o tipo de falha que ocorreu nos ensaios realizados. Para os ensaios efetuados às placas produzidas na secção 6.3., a falha que ocorreu não põe em causa a segurança do utilizador da prancha (supondo que o material selecionado é um destes quatro materiais), o que não acontece para os restantes três materiais cuja falha reside na

quebra total das camadas, delaminação das camadas de fibra, descolagem do núcleo e/ou quebra total do núcleo utilizado, como visto anteriormente neste trabalho.

No Anexo N estão disponíveis as curvas médias obtidas nos ensaios de flexão com os valores referentes à força exercida na placa durante o ensaio e ao deslocamento sofrido pela mesma placa (gráficos de força/deslocamento).

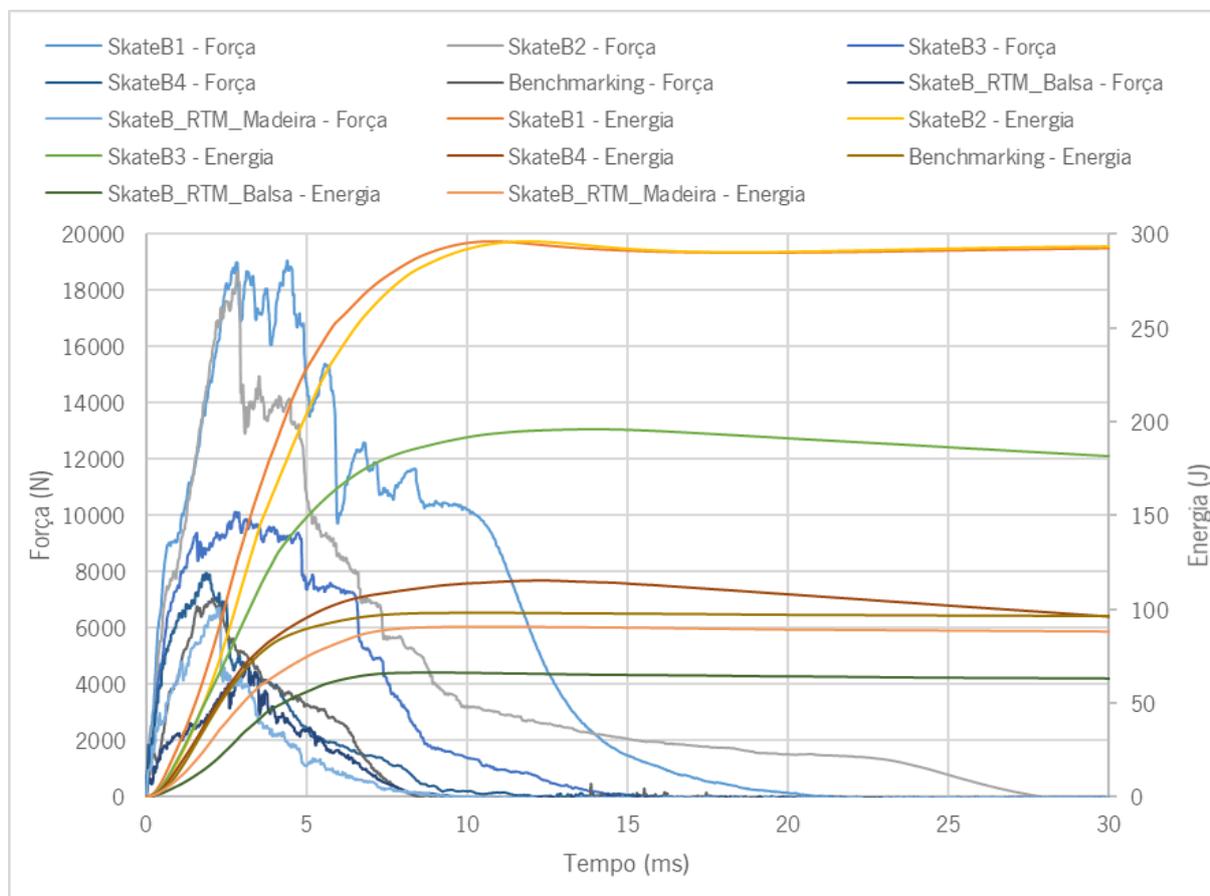


Figura 102 - Disposição comparativas das curvas médias relativas aos diferentes materiais testados ao impacto no âmbito da produção de uma prancha de skateboard protótipo.

Como se observa na *Figura 102*, é possível agrupar em três grupos distintos o comportamento dos valores médios dos materiais testados ao impacto, embora que num dos grupos exista grande dispersão quanto aos resultados obtidos. Assim sendo, o grupo de materiais cujas propriedades obtidas nos ensaios ao impacto obtiveram os piores resultados é constituído pelas placas fabricadas por RTM, pelo material utilizado para a análise de *benchmarking* e pela placa *SkateB_4*. É importante salientar que, excetuando o material ensaiado na secção 6.2.7.1.(que corresponde aos ensaios efetuados durante a análise *benchmarking*), as placas presentes neste grupo possuem defeitos na sua constituição, mencionados anteriormente, pelo que em condições de processamento mais adequadas são capazes de obter melhores propriedades neste tipo de ensaios. Um segundo tipo de comportamento pode ser observado

na curva referente à placa *SkateB_3* sendo que esta possui propriedades intermédias entre os três grupos de materiais para as propriedades avaliadas nos ensaios em questão. Por fim as placas *SkateB_1* e *SkateB_2*, possuem um comportamento ao impacto mais elevado que as restantes placas ensaiadas, não existindo rotura durante os ensaios efetuados.

Na *Tabela 21*, estão listadas as propriedades das diversas placas ensaiadas, com os valores referentes aos ensaios realizados anteriormente, deste modo, é possível realizar as tabelas de ponderação com base nesses mesmo valores, que irão ajudar a selecionar qual o material mais indicado, tendo em vista os requisitos estipulados.

Tabela 21 - Propriedades finais detidas pelos diversos materiais estudados neste capítulo (6.) da dissertação de mestrado, referente à metodologia de produção de uma prancha de skateboard.

Material	Modulo Flexão	Força Máxima (Flexão)	Tensão Máxima (Flexão)	Força Máxima (Impacto)	Energia Absorvida (Impacto)
<i>Benchmarking</i>	9712,4	416,6	101,4	6970,0	94,7
<i>SkateB_1</i>	44083,1	757,3	251,4	18879,1	289,5
<i>SkateB_2</i>	45775,4	741,1	273,9	18603,9	285,6
<i>SkateB_3</i>	43192,1	653,9	229,9	10279,8	214,7
<i>SkateB_4</i>	49138,2	653,8	254,1	7918,9	126,8
<i>SkateB_RTM_Balsa</i>	19741,5	644,5	222,2	4854,5	67,5
<i>SkateB_RTM_Madeira</i>	28143,5	221,1	150,9	6458,7	90,8

Aos valores presentes na *Tabela 21*, deve juntar-se os preços das placas, uma vez que também são um ponto importante na produção da prancha de *longboard*. Desta forma, deve ter-se em atenção que a madeira é o material utilizado mais barato, sendo que dos três tipos de madeira utilizados, a madeira de eucalipto é a mais barata, seguida da madeira de balsa e por fim a madeira de carvalho onde está incluso o preço da matéria prima e dos gastos realizados na maquinaria da espessura da mesma madeira. De seguida encontram-se as fibras de carbono que embora sejam um material mais caro que as madeiras não são o mais caro utilizado nos compósitos, uma vez que o primeiro lugar de material mais caro pertence às fibras de aramida. Posto isto, é possível ordenar as placas de acordo com o preço final de produção. Assim sendo, da mais barata para a mais cara vem: *Benchmarking*; *SkateB_RTM_Madeira*; *SkateB_RTM_Balsa*; *SkateB_4*; *SkateB_1*; *SkateB_2*; *SkateB_3*.

Relativamente ao peso das placas produzidas, e tendo em conta uma placa com o comprimento e largura de um provete de impacto (150mm x 100 mm) foram obtidos os pesos presentes na *Tabela 22*, onde também é possível verificar a espessura real das placas utilizadas neste trabalho.

Tabela 22 - Dados referentes ao peso e espessura dos materiais estudados nesta dissertação.

Material	Peso (g)	Espessura (mm)
Benchmarking	122,02	11,1
SkateB_1	170,01	10,1
SkateB_2	147,27	9,1
SkateB_3	144,62	9,7
SkateB_4	131,04	8,5
SkateB_RTM_Balsa	105,81	8,2
SkateB_RTM_Madeira	109,93	7,5

Com base na *Tabela 22*, é possível verificar quais as placas mais espessas e quais as mais pesadas, sendo possível ordená-las, possibilitando o desenvolvimento das tabelas de ponderação tendo em conta a espessura e peso das placas.

De acordo com todos os resultados obtidos e supra representados é então possível realizar as tabelas de ponderação que se encontram representadas nas *Figuras 103 e 104*.

X	Módulo de Flexão	Força Máxima (Flexão)	Tensão Máxima (Flexão)	Força Máxima (Impacto)	Energia Absorvida (Impacto)	Preço do Material	Peso do Material	Espessura do Material	TOTAL	Parcial
Módulo de Flexão		1	0	2	1	1	0	0	5	0,089
Força Máxima (Flexão)	1		0	1	0	0	0	0	2	0,036
Tensão Máxima (Flexão)	2	2		2	2	1	1	1	11	0,196
Força Máxima (Impacto)	0	1	0		0	1	0	0	2	0,036
Energia Absorvida (Impacto)	1	2	0	2		1	1	1	8	0,143
Preço do Material	1	2	1	1	1		1	1	8	0,143
Peso do Material	2	2	1	2	1	1		1	10	0,179
Espessura do Material	2	2	1	2	1	1	1		10	0,179
Total	9	12	3	12	6	6	4	4	56	1,000

Figura 103 - Tabela de ponderação de propriedades importantes para a seleção do melhor material a utilizar no produto final.

A *Figura 103* é construída com base na perspetiva do autor deste trabalho de investigação, na medida em que a comparação dos requisitos entre si é subjetiva, isto é, a importância dada a cada requisito pode ser diferente consoante as ideias de cada investigador. Nesta primeira tabela, após efetuada a comparação entre requisitos, é possível retirar um valor ponderal, o qual indica a importância individual

do requisito em questão. De notar que a tabela é a mesma que foi utilizada para a seleção de material do *longboard*, uma vez que é adequada aos requisitos definidos para a produção do *skateboard*.

X	Benchmarking	SkateB_1	SkateB_2	SkateB_3	SkateB_4	SkateB_RTM_Balsa	SkateB_RTM_Madeira
Módulo de Flexão	1	4	5	4	5	2	3
Força Máxima (Flexão)	3	5	5	4	4	4	1
Tensão Máxima (Flexão)	1	4	5	3	4	3	2
Força Máxima (Impacto)	2	5	5	3	2	1	2
Energia Absorvida (Impacto)	2	5	5	4	3	1	2
Preço do Material	5	1	1	1	3	3	3
Peso do Material	4	1	2	2	3	5	5
Espessura do Material	1	2	3	3	4	4	5
Total	2,36	2,89	3,54	2,80	3,55	3,13	3,27

Figura 104 - Tabela retirada do Excel da qual resulta a melhor placa de acordo com a importância dada a cada propriedade dos materiais

Na *Figura 104*, os valores introduzidos são concretos e correspondem à realidade dos materiais produzidos. Os valores obtidos, são numerados de 1 a 5, sendo 5 as melhores propriedades obtidas e 1 as piores. Em caso de valores muito aproximados pode ser dado o mesmo valor a várias placas. A soma destes valores é multiplicada pelo valor ponderal obtido anteriormente, sendo então retirada a melhor placa para a função desejada (prancha de *skateboard*). Assim sendo, recorrendo a essa tabela, chegou-se à conclusão de que o material mais indicado é o pertencente à placa *SkateB_4*, com a placa *SkateB_2*, a atingir uma pontuação inferior em apenas 0.01 valores.

6.5. Desenho 3D e Validação do Design da Prancha

Uma fase importante do desenvolvimento de produto, consiste no desenvolvimento do *design* do produto. Com vista a cumprir as especificações inerentes ao produto a desenvolver bem como o bom funcionamento do mesmo em cenário real de utilização foi realizada uma modelação 3D, com vista a conferir, não só, as dimensões essenciais ao produto final como comprimento e largura (fazendo com que as mesmas se cinjam ao cumprimento das especificações estipuladas em 6.1.), mas também os relevos presentes no *design* da prancha de *skateboard*.

Na *Figura 105*, está representada a prancha de *skate* em formato 3D. Os desenhos técnicos (a duas dimensões, 2D) podem ser consultados no Anexo O.

De modo a validar as curvas do modelo desenvolvido, recorreu-se à manufatura aditiva, mais concretamente à impressão 3D. Esta técnica permite criar um modelo fidedigno do desenho CAD a custos bastante acessíveis, uma vez que apenas tem o gasto de energia e matéria prima, não sendo necessária o fabrico de outras ferramentas produtivas como por exemplo, moldes. O modelo 3D foi



Figura 106 - Modelo 3D desenvolvido no âmbito desta dissertação de mestrado.

realizado na máquina de impressão existente nas instalações do PIEP, na escala de 1:4 ficando este com os valores finais de ≈ 20 cm comprimento por ≈ 5 cm de largura. O mesmo pode ser visível na *Figura 106*.



Figura 105 - Modelo do skateboard impresso em 3D.

A validação do modelo desenvolvido, é requerida pelo ponto mais crítico existente no seu *design*, sendo ele a zona de acoplação do eixo das rodas. Este local deve possuir um plano capaz de permitir a fácil colocação dos eixos das rodas, fazendo uma ligação colinear entre a prancha e a placa de aperto dos eixos, impossibilitando movimentos indesejados das rodas durante a prática desportiva.

6.6. Simulação Estrutural

Efetuada a seleção do tipo de material a utilizar bem como do modelo 3D da prancha de *skateboard*, foi possível a realização da simulação estrutural ao compósito de acordo com a solicitação mais crítica que

pode ocorrer na prancha, ou seja quando solicitada à flexão no centro da prancha (as rodas são os apoios sendo que o ponto de aplicação de carga é ao centro da prancha por parte da área ocupada por um pé de um praticante de *skateboard*). A simulação terá em conta o material utilizado e ensaiado à flexão, no entanto, tem ainda em consideração a geometria da prancha mostrando a influência que esta tem num carregamento à flexão.

Um ponto importante a reter, é que o modelo a utilizar na simulação foi testado numa fase preliminar estando presente no ponto 6.2.8., sendo que esse teste serviu essencialmente para comparação de resultados entre os ensaios práticos e as simulações realizadas em contexto computacional, validando o modelo de material a utilizar bem como o modelo criado.

A simulação estrutural à prancha de *skateboard* foi realizada no *software* comercial *Abaqus*[®], propriedade da *Dassault Systèmes S.A.* Este programa, permite modelar e analisar estruturas com um ou vários componentes sendo então possível visualizar os resultados no seu ambiente de trabalho obtidos através das equações diferenciais (conforme o tipo de solicitação) associadas ao método dos elementos finitos. O modelo utilizado no carregamento à flexão da prancha de *skateboard* está presente na *Figura 107*.

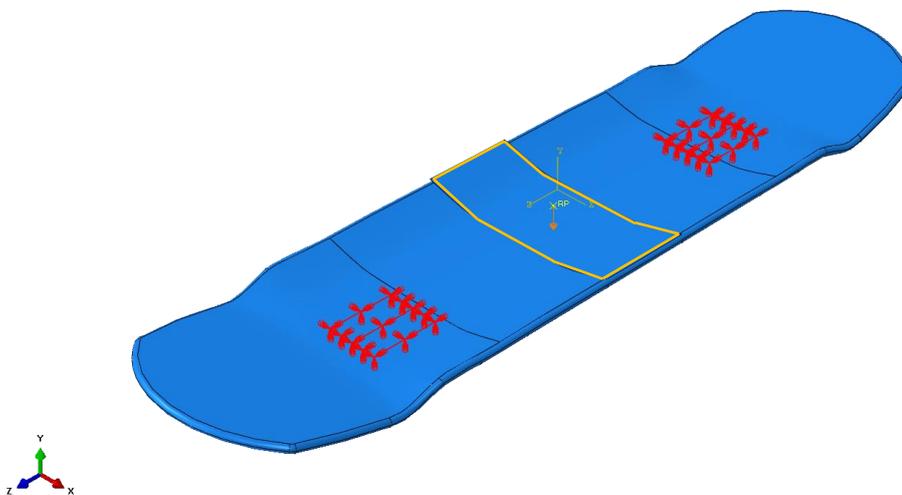


Figura 107 - Modelo utilizado na simulação estrutural. As zonas a vermelho correspondem aos apoios (locais de aperto dos eixos das rodas na face inferior da prancha) e a zona delineada a amarelo corresponde ao calçador da prancha que neste caso possui as dimensões da área ocupada por um pé de um praticante com calçado número 42.

Para iniciar o procedimento, foi importada a geometria da peça para o *software* como um modelo analítico rígido, isto é, um modelo utilizado para definir situações de deformação por contacto de superfícies rígidas, onde a superfície é formada por retas, arcos e/ou parábolas [38]. Após a importação da geometria foram criadas partições nos locais da prancha onde serão acoplados os eixos das rodas de modo a evitar deformações irreais nesses locais. Seguidamente colocaram-se os apoios, com as

dimensões padrão de 55mm de largura por 70mm de comprimento e um *span* de 330mm. Os apoios da prancha foram encastrados, uma vez que este é considerado o pior cenário possível (e irreal) uma vez que não confere nenhuma liberdade de movimentos.

De seguida, definiu-se a prancha como um material homogéneo, o que não está de acordo com a estrutura laminar do material escolhido (material da placa *SkateB_4*), sendo utilizadas as propriedades referentes ao material da estrutura laminar nomeadamente o módulo de elasticidade com o valor de 49138.2 MPa e um coeficiente de poisson característico de materiais compósitos de valor 0.3. A razão desta opção reside não só numa maior facilidade de cálculo por parte do *software* o que diminui a probabilidade de ocorrer a falha da simulação, mas também à dificuldade de obter todas as variáveis envolvidas no processo para todos os materiais presentes no compósito, uma vez que seria necessário obter valores de módulos e coeficientes para diversas direções das fibras bem como para as madeiras utilizadas.

Em relação ao calcador da amostra foi definida uma superfície de geometria igual à da prancha e de largura similar a um pé de tamanho 42, de modo a existir um esmagamento uniforme da área pretendida e corresponder às especificações definidas anteriormente (adulto padrão). Foi então criada uma área de contacto igual à superfície modelada anteriormente e definido um coeficiente de atrito entre o calcador (borracha das solas de sapatos) e a prancha (lixa de partículas de alumínio) com o valor de 1.3. Quanto à carga aplicada pelo calcador foi definido os 750 N requerido para as especificações no entanto foi constatado ser um valor muito abaixo do máximo a ser aplicado à prancha pelo que se definiu um deslocamento máximo ao invés de uma carga. Assim sendo colocou-se o valor de 10 mm como o deslocamento máximo permitido.

A malha utilizada na simulação foi criada de acordo com o modelo analítico rígido definido anteriormente resultando numa malha bem refinada nas faces exteriores da prancha e mais grosseira no interior da mesma, desta forma é possível obter resultados bem fiáveis sem comprometer o tempo de simulação uma vez que são diminuídos o número total de elementos presentes no modelo. Realizadas todas as seleções de parâmetros a adotar na simulação, esta é posta a correr, sendo que no final são compilados todos os resultados e analisados com maior detalhe aqueles que têm mais importância para este projeto.

Na *Figura 108*, pode ser visto o gráfico de tensão/deformação, obtido pela análise dos dados registados durante a simulação estrutural realizada. De notar que os dados foram retirados desde o momento de início dos ensaios até se atingir valores de carga perto dos 2750 N, mais concretamente 2742 N, que constitui um valor superior ao definido inicialmente em cerca de 2000 N.

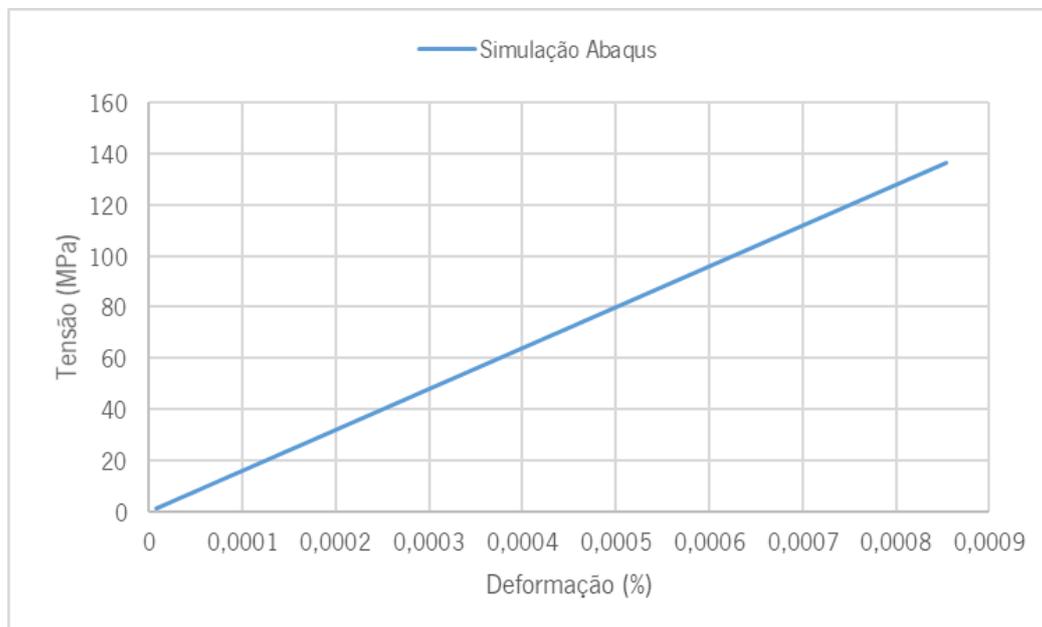


Figura 108 - Gráfico de Tensão/Deformação obtido através da simulação estrutural, realizada no software Abaqus®, ao modelo 3D da prancha para skateboard.

Como se pode verificar, a curva obtida segue um comportamento linear com uma deformação quase nula, sendo solicitada apenas no regime elástico. Os valores máximos atingidos para a tensão (aproximadamente 140 MPa) são bem inferiores aos obtidos nos ensaios reais de flexão aos provetes (próximo dos 250 MPa), tendo em conta uma carga superior à exercida nos ditos ensaios (pouco mais 650 N nos ensaios à placa *SkateB_4* face aos 2742 N da simulação), o que comprova a importância que a geometria da peça possui nas deformações criadas nos materiais quando sujeitos a qualquer tipo de solicitação mecânica.

Na *Tabela 23*, estão presentes os valores máximos compilados pelo *software* de simulação por elementos finitos *Abaqus*®.

Tabela 23 - Valores correspondentes ao máximo obtido em cada parâmetro na simulação estrutural.

	Força	Deslocamento	Tensão	Deformação
Máximo	2742,03	0,5	136,4	0,0009

Relativamente aos locais de onde foram obtidos os valores máximos presentes na tabela transata, é possível afirmar que o deslocamento máximo, e por conseguinte a deformação máxima, se encontram no local mais central do carregamento efetuado à prancha, como é comprovado pela *Figura 109*.

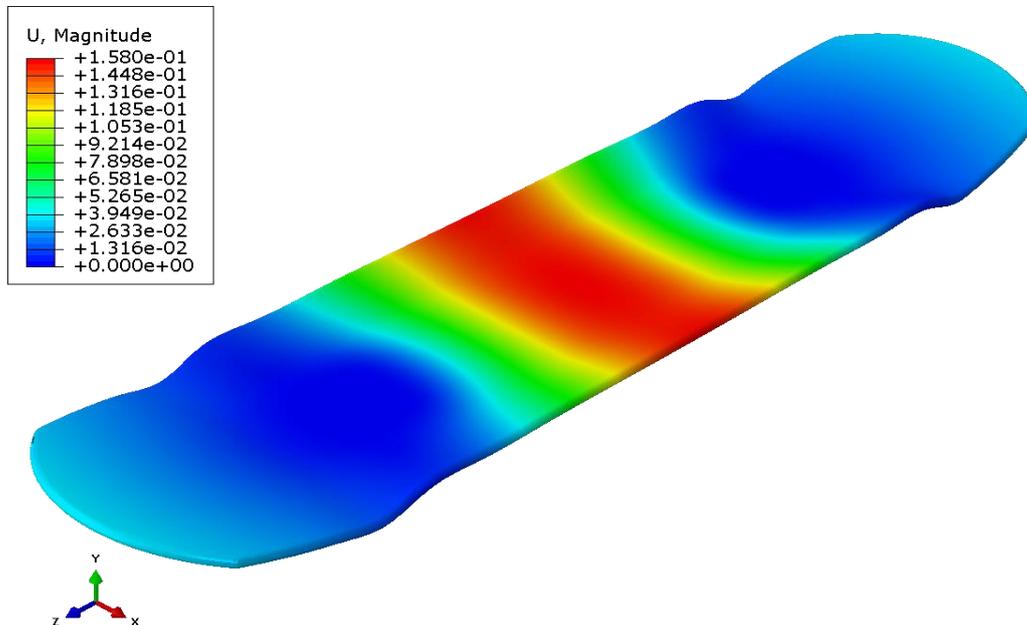


Figura 109 - Modelo 3D retirado da simulação estrutural, com gradiente de cores referente ao deslocamento provocado pelo carregamento efetuado de 2742 N. Os valores da legenda encontram-se em milímetros.

Muito importante resalvar que os valores presentes na legenda da *Figura 109*, estão acrescidos de 1 mm visto ser a distância percorrida pela superfície de carregamento desde a sua posição inicial até entrar em contacto com a prancha pela primeira vez. Esta distância de 1mm foi atribuída de modo a existir um ajustamento uniforme do calçador à prancha. Assim sendo, aos valores presentes na legenda devem ser retirados 1 mm para tornar reais os dados obtidos para o deslocamento da prancha, por exemplo, o máximo presente na legenda com o valor de 1.58 mm corresponde a 0.58 mm de deslocamento “real”.

Os locais da prancha onde existe uma maior concentração de tensões correspondem às fronteiras entre a prancha e o local dos apoios encastrados como é possível verificar na *Figura 110*.

Como é possível ver na imagem, a distribuição de tensões pelas superfícies da prancha não é uniforme, como esperado, sendo mais incidentes nas áreas de contacto da prancha com outras superfícies, nomeadamente os apoios encastrados e a superfície de carregamento. Na zona destacada na figura anterior, é possível visualizar o ponto de maior tensão, estes valores elevados estão localizados na proximidade dos encastramentos, e são elevados devido aos constrangimentos aplicados e, por isso,

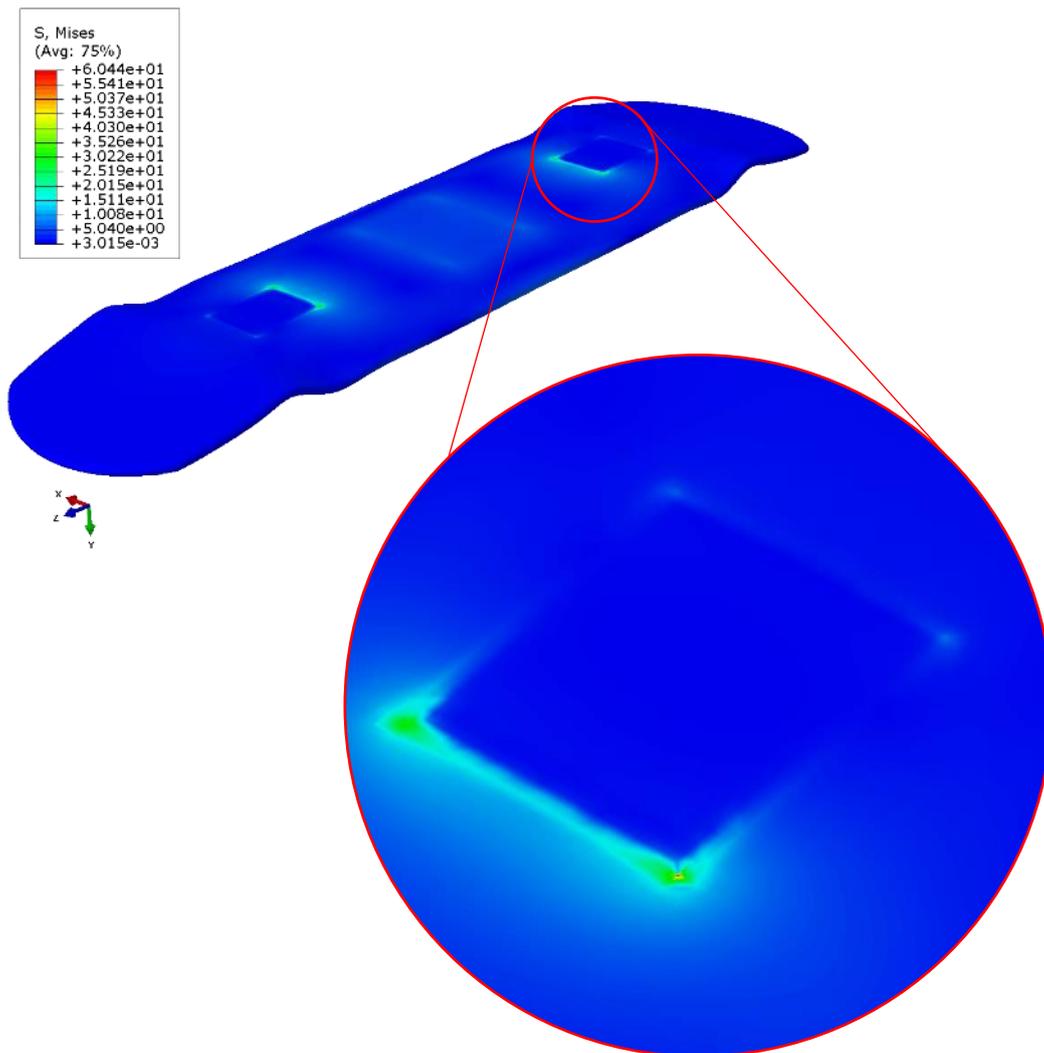


Figura 110 - Modelo 3D da prancha para skateboard com referência aos locais mais sujeitos a tensão devido ao carregamento utilizado na simulação.

podem ser ignorados. Assim sendo, o valor máximo da tensão verificada na superfície da prancha, correspondem aos locais a verde na imagem.

6.7. Molde para o Produto Final – Protótipo

Com vista à obtenção de um protótipo da prancha de *skateboard*, a produção de um molde para este produto, afigura-se como um ponto crítico para a continuação deste trabalho. Desta forma, e tendo em conta o método produtivo adotado (infusão de resina a vácuo), foi desenhado um novo molde no *software* de desenho assistido por computador (CAD 3D), *SolidWorks®*, versão de 2019, cuja propriedade intelectual pertence à empresa *Dassault Systèmes S.A.* O desenho do molde, encontra-se visível na *Figura 111*.

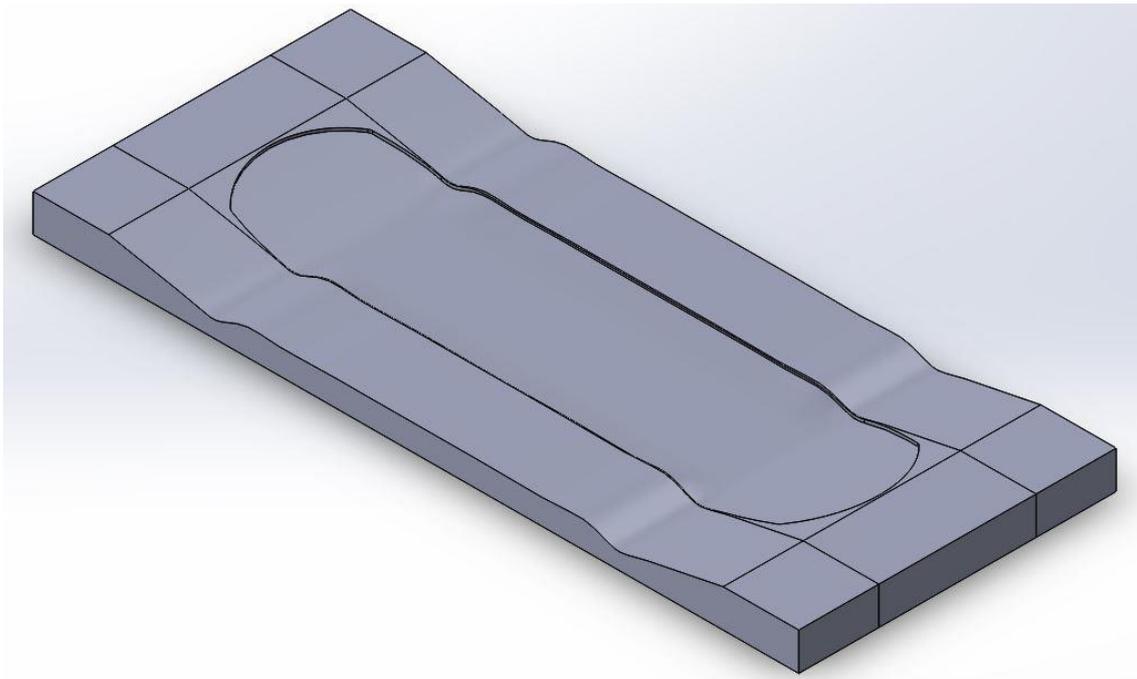


Figura 111 - Desenho 3D do molde para produção do skateboard protótipo.

O molde foi maquinado num bloco paralelepípedo de *SikaBlock® M700* (que corresponde a um poliuretano de elevada densidade, cuja ficha técnica pode ser consultada no Anexo F), com dimensões iniciais de 1012 mm x 420 mm x 52 mm, com auxílio de um robô de maquinação *CNC* (controlo numérico computadorizado) de 5 eixos, *Motoman MH50*, fabricado pela empresa japonesa *Yaskawa*, sendo que a ficha técnica deste equipamento se encontra presente no Anexo P. De modo a controlar o robô e maquinar eficazmente o bloco, foi programado no *software* comercial *PowerMill®*, fabricado pela *Autodesk Inc.*, os caminhos a percorrer pelas fresas do robô, de modo a possibilitar um desbaste adequado ao molde, bem como, numa fase posterior, um bom acabamento superficial. A *Figura 112* mostra o processo de fabrico do molde.

Após a maquinação do bloco de poliuretano, procedeu-se à retificação da superfície por via de lixas, seguindo-se a aplicação da tinta primária. Por fim, aplicou-se a tinta de base acrílica, com o intuito de lascar o molde, protegendo o mesmo da resina aquando do processamento. O molde finalizado pode ser observado na *Figura 113*.

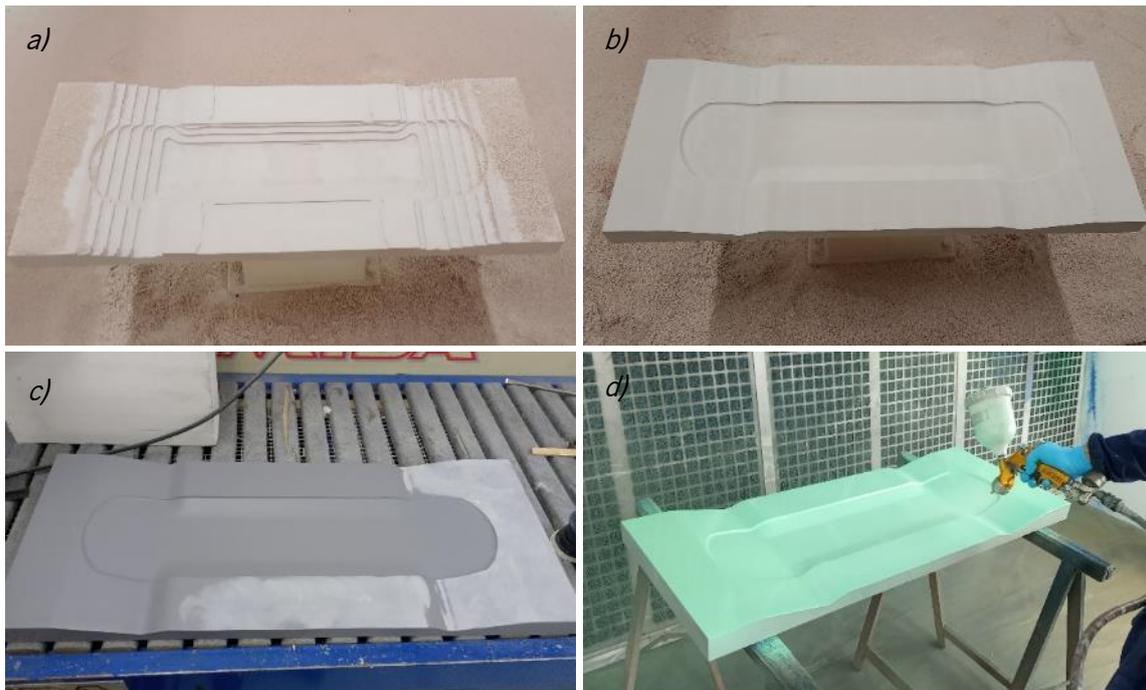


Figura 112 - Preparação do molde para infusão do protótipo da prancha de skateboard. a) Desbaste do bloco pelo robô; b) acabamento dado ao bloco maquinado; c) molde com primário aplicado e iniciado o processo de aperfeiçoamento da superfície; d) pintura do molde com tinta acrílica.



Figura 113 - Molde final para o processo de infusão a vácuo.

6.8. Produção do Protótipo

Para finalização do desenvolvimento do *skateboard*, foi necessário a produção de dois protótipos, um para a demonstrador no *PIEP*, e outro para ser testado num ensaio equivalente à simulação estrutural

efetuada, de modo a ser possível comparar os dados obtidos em cenário real de ensaio ao protótipo com aqueles que foram obtidos teoricamente na simulação estrutural em *Abaqus*[®].

Com a finalização do molde, foi possível proceder à infusão a vácuo e assim concluir a produção das pranchas para *skateboard*. O processo de infusão a vácuo e preparação das matérias-primas é descrito de seguida, ponto a ponto, pelo que poderá constituir um guia útil para a reprodução integral deste trabalho de investigação à semelhança do que aconteceu no ponto 5.8. Como o procedimento adotado é muito semelhante ao executado para a prancha de *longboard*, os pontos comuns, onde se explica a razão de serem realizados, não serão novamente explicados nesta secção. As placas de onde foram retirados os provetes para os ensaios de flexão e impacto, foram realizadas segundo este mesmo procedimento.

1. Preparação da matéria-prima (reforços):

- Corte dos reforços utilizados no laminado (tecidos de fibras de carbono tafetá e unidirecional);
- Corte das placas de madeira (com espessura de 1mm e 2mm) com o contorno do modelo 3D presente na *Figura 114*;
- Furação da madeira no *LASER*, com furos de 2 mm de diâmetro e espaçamento de 25 mm nas duas direções;
- Acoplamento do laminado em local exterior ao molde para fácil manuseamento e correto alinhamento das camadas de madeira presentes no laminado.



Figura 114 – Corte da lâmina de madeira no LASER para posterior colocação no laminado da prancha de skateboard.

É importante reter que os cortes às fibras de carbono foram efetuados com as mesmas dimensões, correspondendo a 900 mm por 250 mm. As dimensões utilizadas permitem construir o laminado, colando as sucessivas camadas com o auxílio de cola em *spray* adequada a infusões de resina a vácuo.

Após a junção das camadas, foram aparadas as fibras secas pelos contornos da madeira presente no interior do laminado

2. Preparação da infusão:

- Aplicação de cera ao molde (em pelo menos cinco etapas distintas, segundo diretrizes do fabricante). A utilização de cera permite obter um acabamento mais brilhante no produto final;
- Colocação do laminado no molde, segundo a estrutura presente na placa *SkateB_4*;
- Colocação do *peel ply*, cuja função é facilitar a desmoldagem da peça final, impedindo a colagem do saco de vácuo e *flow mesh* (rede de distribuição de resina) à peça final;
- Colocação da *flow mesh*. A rede foi colocada com uma aba ao longo do laminado, à semelhança do que aconteceu para a prancha de *longboard*;
- Aplicação dos tubos para entrada e saída de resina, colocados ao longo do comprimento da prancha, diminuindo o caminho percorrido pela resina no molde e, por sua vez diminuindo as quedas de pressão (que são tanto maiores quanto mais longo for o caminho a percorrer pela resina);
- Colocação do saco de vácuo;
- Aplicação de vácuo e testes de fuga de ar.

Na *Figura 115* é possível ver, de forma geral, o procedimento adotado.

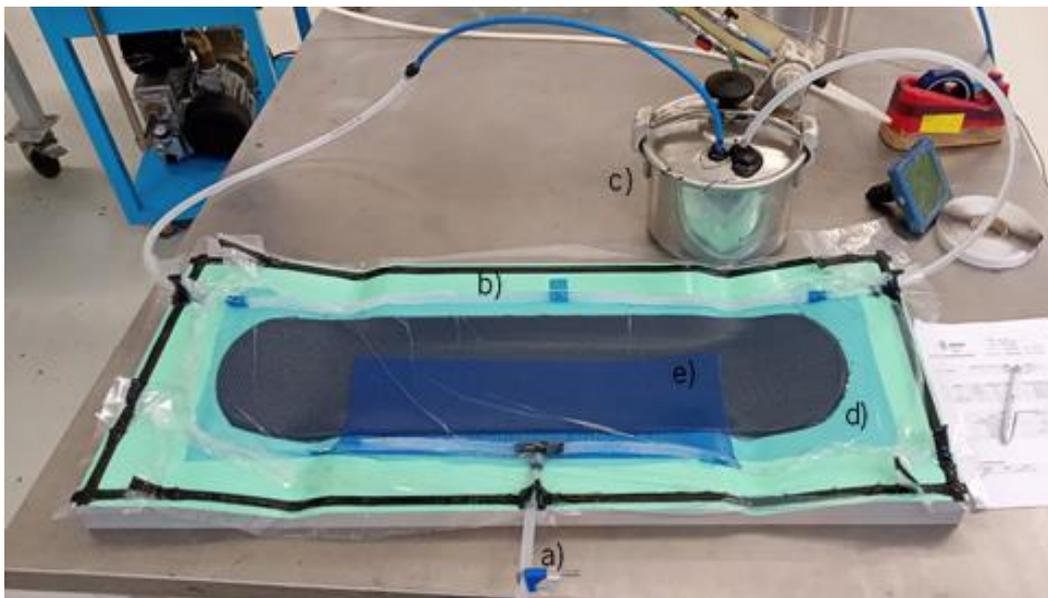


Figura 115 – Procedimento adotado. a) Entrada de resina; b) Espiral de vácuo, com saídas dos dois lados da espiral; c) Resin trap; d) Peel ply (zona a azul claro); e) Flow mesh (a azul escuro).

3. Preparação da resina e infusão a vácuo:

- Cálculo teórico da resina a utilizar na infusão. Este cálculo tem em consideração a resina perdida nos consumíveis (tubos, *flow mesh* e *peel ply*), e foi calculado para um balanço mássico de 50/50 entre a matriz polimérica e os reforços;
- Mistura da resina com o endurecedor segundo indicações do fabricante;
- Remoção de gases da mistura de resina epoxídica, recorrendo a uma estufa de vácuo. Fator muito importante, contribui para a diminuição da fração volúmica de vazios no interior do produto final;
- Colocação do *resin trap*;
- Introdução dos tubos no recipiente com a mistura de resina efetuada anteriormente;
- Início da infusão;
- Equilibrar as pressões quando a peça está totalmente impregnada.

4. Desmoldagem e acabamentos:

- Desmoldagem manual da prancha;
- Realização dos acabamentos finais à prancha, como o aperfeiçoamento das laterais da prancha (uma vez que possuíam inconformidades próprias do método produtivo adotado), a aplicação de verniz e ainda a colocação das rodas na prancha.

Com o procedimento adotado na produção do primeiro protótipo foram detetadas algumas dificuldades que posteriormente, aquando da produção da segunda prancha protótipo, se tentaram superar. Dessa forma, o laminado foi montado no próprio molde sendo mantida a aba nas fibras de carbono. Outro ponto modificado, foi a alteração das zonas de entrada e saída de resina, pelo que a nova infusão foi realizada no sentido do comprimento da prancha, como se pode verificar na *Figura 116*. A última modificação foi a incorporação da rede de distribuição de resina ao longo de toda a superfície do laminado (excetuando a parte mais próxima da espiral de vácuo) facilitando o escoamento (visível também na *Figura 116*). A alteração destes parâmetros no processamento, permitiu obter um produto final com melhor acabamento superficial, ao mesmo ponto que reduziu os poços de resina que se verificaram na zona de acoplamento das rodas.



Figura 116 - Novo modelo de processamento da prancha de skateboard protótipo.

Na *Figura 117* é visível o protótipo final da prancha para *skateboard*.



Figura 117 - Protótipo final da prancha de skateboard.

6.9. Testes ao Protótipo

Os ensaios realizados ao protótipo, têm a finalidade de compreender não só a qualidade do produto final, mas também a manutenção de propriedades físicas ao longo de todo o volume da prancha. Assim sendo a prancha foi pesada tendo-se obtido o valor de 1100 g como peso total, o que constitui um peso abaixo do tradicional no mundo do *skateboard*. A prancha foi ainda medida de forma a ser verificado o cumprimento das especificações tendo sido obtido o valor de 80,5 cm para o comprimento da prancha (próximo das 32") e aproximadamente 20 cm para a largura (próximo das 8.125"). Foram retiradas espessuras em vários pontos da prancha tendo-se obtido a espessura média de 8.54 e um desvio padrão de 0.13 mm. Estes valores estão dentro das especificações estipulados no início do desenvolvimento da prancha pelo que os requisitos físicos foram cumpridos.

Relativamente ao comportamento mecânico do protótipo, de modo a viabilizar a entrada no mercado deste novo produto, este teria de dar resposta a uma série de ensaios presentes na norma *BS EN 13613*. Esses ensaios são direcionados para a resistência de todos os componentes do *skateboard*, como a prancha, as rodas, os rolamentos e os eixos. Nos que são direcionados apenas à prancha, esta tem de ser capaz de resistir a uma serie de solicitações dinâmicas, uma vez que num contexto real de utilização a carga dinâmica imposta por um salto na superfície da prancha é claramente superior à carga estática provocada pela permanência do praticante no cimo da própria prancha. No entanto, neste ponto apenas se pretende comparar o comportamento da prancha em contexto real com o obtido na simulação estrutural, à semelhança do que foi feito durante todo o desenvolvimento do produto (recorreu-se à análise de um produto existente no mercado). Assim sendo, foi realizado um ensaio prático, com um aparato muito semelhante ao verificado na simulação estrutural (secção 6.6.) que pode ser visto na *Figura 118*.



Figura 118 - Aparato para realização do ensaio ao protótipo final. a) visualização geral (apoios, calcador com saco de areia e prancha); b) LVDT capaz de medir mais apropriadamente o deslocamento linear provocado na prancha.

O ensaio realizado tem por base a aplicação de uma força no centro da prancha, da qual resulta um deslocamento. De forma a distribuir uniformemente a carga pela superfície da prancha, foi colocado um saco de areia facilitando a conformação do calcador à prancha protótipo a ensaiar, como também é possível verificar na *Figura 118*. A velocidade do ensaio foi de cerca 20 N/s, até atingir um máximo de 1500 N (o dobro do que foi estipulado nos requisitos da secção 6.1.). A função do LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) colocado na parte inferior da prancha, é registar adequadamente o deslocamento linear sentido no centro da prancha (local de maior deslocamento), uma vez que o medido pelo equipamento que aplica a própria carga pode conter erros devido à colocação do saco de areia, uma vez que esta se reajusta (dentro do saco) como resposta ao aumento da carga imposta pelo atuador hidráulico. Na *Figura 119* é possível observar os resultados obtidos no ensaio ao protótipo, bem como aqueles que foram observados para a simulação estrutural realizada na secção 6.6. dando uma ideia real das diferenças observados entre o plano teórico e real num ensaio fletor semelhante.

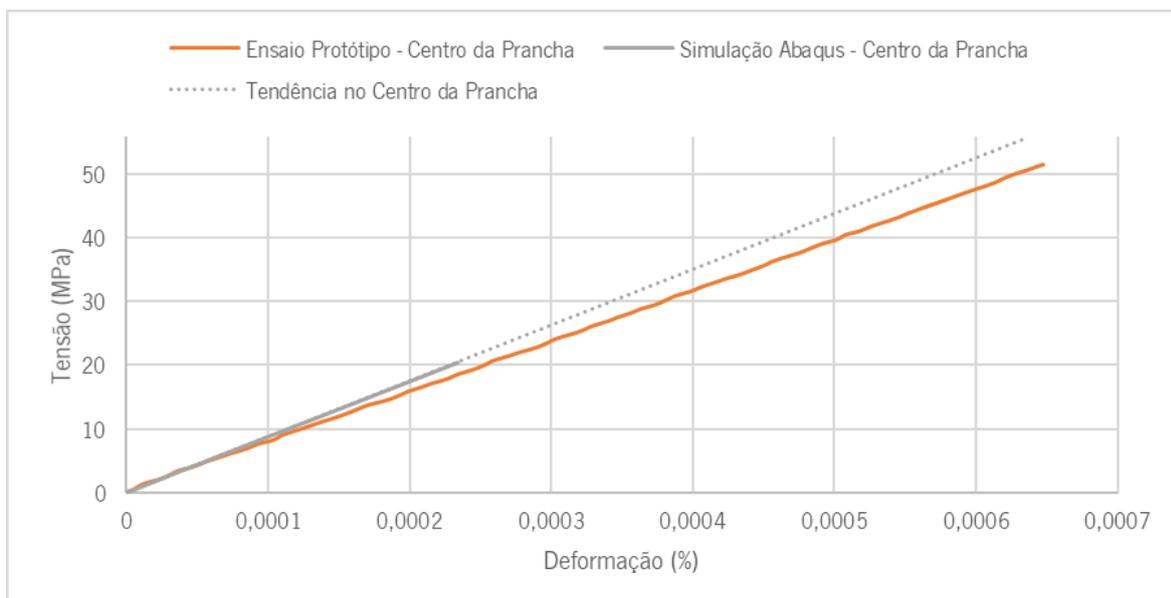


Figura 119 - Comparação entre os dados obtidos na simulação estrutural e os dados obtidos no ensaio explicitado nesta secção da dissertação.

Como se pode verificar no gráfico da *Figura 119*, as curvas referentes à tensão/deformação no centro da prancha (quer no ensaio ao protótipo quer na simulação) revelam uma grande semelhança no seu comportamento mecânico, apresentando curvas praticamente colineares. A principal propriedade que as diferencia consiste nos valores máximos registados para as duas curvas, sendo que a deformação máxima na simulação se ficou nos 0.00025% enquanto que no ensaio ao protótipo atingiu os 0.00065%. Esta diferença pode ser explicada nas propriedades físicas da prancha protótipo, quando comparadas

com o modelo utilizado na simulação computacional, ou seja, de acordo com o gráfico da *Figura 119*, é possível concluir que o modelo utilizado na simulação estrutural possui uma rigidez superior ao protótipo desenvolvido nesta dissertação, uma vez que para a mesma força aplicada possui uma menor deformação associada a uma tensão também ela inferior. Outro fator que pode ter contribuído para a diferença observada consiste na variação de espessuras ao longo do protótipo, o que não acontece com o modelo da simulação uma vez que ele possui uma espessura uniforme de 8.5mm ao longo de toda a prancha (o que tem impacto na rigidez dos produtos).

No Anexo Q está presente o gráfico de força/deslocamento que compara o ensaio ao protótipo com a simulação estrutural relativamente ao centro da prancha, bem como o gráfico de tensão/deformação, realizado ao protótipo, no qual foram atingidos os 500 kg de força aplicada no centro da prancha protótipo. Estará ainda presente um gráfico de tensão/deformação com as curvas registadas no centro da prancha (retirado dos ensaios ao protótipo e da simulação) e ainda com a curva registada no ponto de maior tensão registado na simulação estrutural.

6.10. Avaliação do Potencial de Valorização no Fim de Vida do Produto

Finalizada a produção dos protótipos para as pranchas de *skateboard* bem como realizados os devidos testes, é necessário avaliar o restante ciclo de vida que poderá vir a ser dado a este tipo de produtos. Posto isto, é possível considerar que o ciclo de vida de um produto possui três fases distintas a partir do momento em que é produzido. A primeira fase, que neste caso já se encontra concluída é a fase de produção, a segunda fase corresponde ao tempo de utilização do produto, por fim a última fase corresponde ao fim de vida do produto, pelo que existem diversas formas de o poder fazer.

O processo de desenvolvimento de um novo produto, tem como principal finalidade colmatar uma falha que exista em determinado ramo da sociedade com a introdução desse mesmo produto. Assim sendo, durante o desenrolar do projeto são desenvolvidas soluções que previnem a falha do produto em serviço e que possibilitem que este tenha o maior tempo de vida útil possível, aumentando claramente o tempo da fase número dois. Atualmente, para além de se tentar promover nos produtos propriedades que os façam diferenciar-se dos concorrentes, têm sido desenvolvidos estudos acerca de como proceder no fim de vida dos mesmos de modo a contribuir para um futuro mais sustentável. Para além das empresas envolvidas nesses estudos também a sociedade está mais aberta a contribuir para o melhor do ambiente

por mais pequeno que o seu contributo possa parecer, o que influencia cada vez mais as marcar a demarcar-se de caminhos pouco sustentáveis e assim sucessivamente.

Para esta dissertação, foram avaliados diversos caminhos distintos que podem ser aplicados à prancha de *skateboard* desenvolvida aquando do seu fim de vida pelo que uns possuem vantagens financeiras e outros são mais ambientalistas, no entanto, devido à natureza dos materiais presentes na prancha apenas se pode minimizar os riscos para o ambiente e não os suprimir completamente.

Na *Figura 120* pode-se observar um esquema que traduz as diversas finalidades a poder dar à prancha para o fecho do seu ciclo de vida.



Figura 120 - Possíveis destinos a aplicar à prancha de skateboard no fim do seu ciclo de vida;

Como se pode ver na *Figura 120*, foram agrupados cinco fins distintos que podem ser aplicados para descartar a prancha de *skateboard* no seu fim de vida. Normalmente, para o tipo de material utilizado na prancha (compósitos com matriz termoendurecível) o fim mais comum a dar ao produto é o despejo em aterros sanitários, no entanto, esse fim não será considerado como válido nesta dissertação. A massiva utilização do despejo em aterros sanitários, deve-se sobretudo aos baixos custos associados ao método, no entanto acarreta vários riscos para a saúde pública e para o meio ambiente.

Após uma breve análise ao esquema é possível notar que existem duas possibilidades que não acarretam problemas ambientais para além daqueles que a prancha já possui durante o seu tempo de vida útil. São eles a renovação da prancha e a reutilização dos materiais presentes no laminado. O primeiro está dependente do tipo de dano observado na prancha, caso os estragos não sejam significativos é sempre possível renovar a prancha podendo ser utilizada num contexto de menor carga aplicada (por uma criança por exemplo). Já a reutilização dos materiais envolve um pouco mais de trabalho na sua aplicação, isto é, podem ser separadas as fibras impregnadas com resina epóxi das placas de madeira podendo utilizar a madeira e as próprias fibras para outros fins como por exemplo decoração (se a estética dos materiais o permitir). Podem ainda ser recortados blocos pouco danificados das pranchas, que juntos com diversos blocos de pranchas podem ser colados entre si dando a origem a um material contraplacado. Esta última técnica de reutilização dos materiais já é muito utilizada nos Estados Unidos da América, e podem ser obtidos materiais como, novas pranchas de *skateboard*, mesas, canetas, materiais de decoração entre outros. Na *Figura 121*, podem ser vistos alguns produtos concebidos a partir deste método.

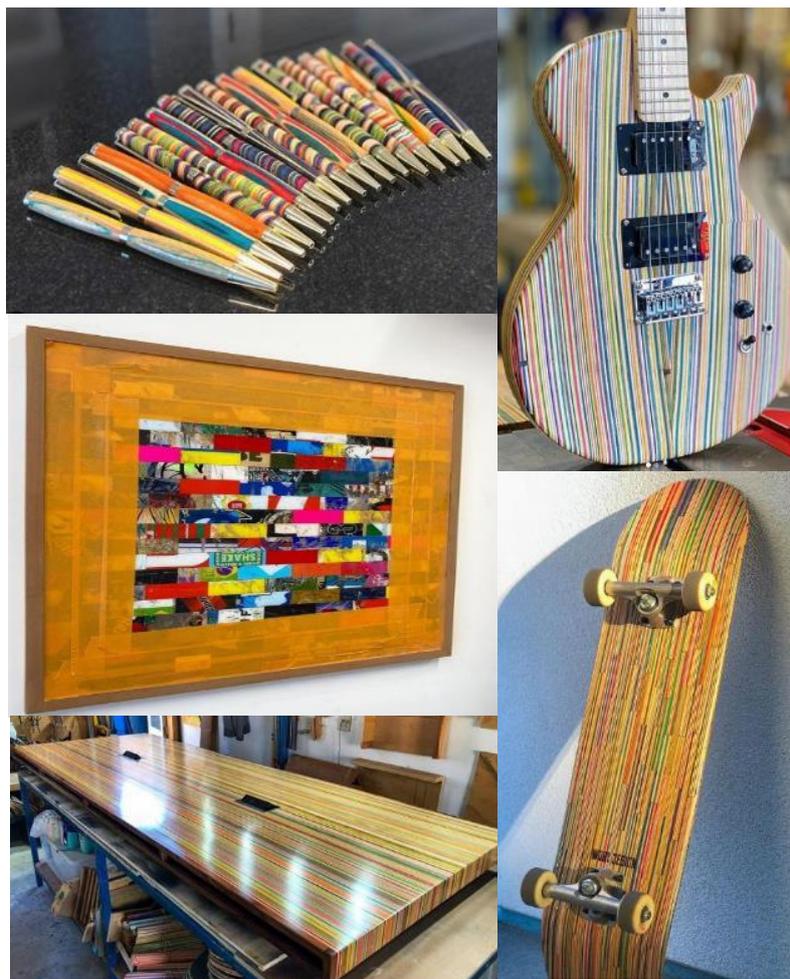


Figura 121 - Diversos produtos produzidos a partir de pranchas skateboard. Retirado de:

Passando para os métodos menos simpáticos para o ambiente, mas que podem ter alguma importância a nível financeiro, quando chegar a altura de decidir o rumo final para a prancha de *skateboard*, aparece em primeiro lugar o fim mais utilizado, a recuperação energética. Neste método, de modo a ser possível tirar proveito do material, este é incinerado podendo ser produzida energia elétrica. A calorimetria envolvida no processo de incineração e possível obtenção de lucros pode ser estudada dando informação acerca dos benefícios desta possibilidade. Em termos ambientais existe a desvantagem da libertação de gases nocivos para a atmosfera. Outro dos métodos muito utilizados consiste na granulação do produto e obtenção de um preparado que pode ser introduzido em materiais pouco solicitados mecanicamente funcionando como cargas. A percentagem ideal a utilizar pode também ser alvo de estudo. A nível ambiental não existem grandes riscos, no entanto a granulação das fibras de carbono bem como da resina epóxi presente nos laminados, libertam uns pós que podem ser cancerígenos.

A última forma de dar término ao ciclo de vida da prancha, presente na *Figura 120*, consiste na separação das fibras de carbono da matriz polimérica associada e posterior reutilização dos reforços recuperados. Este método tem sido alvo de estudo nos últimos anos por parte de várias entidades (como a *The Boeing Company* por exemplo), porém os resultados mais interessantes foram obtidos pelo laboratório de estruturas compósitas avançadas da *Automobili Lamborghini* na universidade de *Washington* em *Seattle*. Neste estudo, foi adicionado ácido sulfúrico a peças constituídas por epóxi reforçado com fibra de carbono e posteriormente colocadas num forno a 110 °C. O resultado obtido consiste num tecido muito entrelaçado e quase que isotrópico cujas propriedades finais foram avaliadas e comparadas com o mesmo tipo de tecido virgem. As conclusões do estudo revelam que é possível melhorar o processo e a qualidade do produto obtido, no entanto, com o procedimento atual as propriedades mecânicas das fibras recicladas são inferiores às de um tecido não reciclado. [39] Analisando este último método para o fim de vida da prancha de *skateboard*, é possível compreender que existem diversos riscos ambientais associados à desintegração por meio de ácido que ocorre durante o processo, no entanto é possível evitar o despejo destes materiais em aterros sanitários e recuperar algum capital investido na compra das matérias primas.

Como se pode verificar nesta secção existem diversas soluções a aplicar ao tipo de materiais compósitos presentes na prancha de *skateboard*, pelo a opção de cada utilizador deve recair sobre aquela que melhor traduz os seus valores, isto é permitir uma abordagem mais ambientalista e tentar recuperar ou reutilizar a prancha, ou permitir que alguém com valências profissionais no ramo da reciclagem de materiais

compósitos lhe dê o devido destino (aterro, incineração, granulação, recuperação de fibras ou outro não especificado nesta dissertação).

7. Conclusões

A proposta inicial deste trabalho, contemplava a produção de uma prancha de *longboard*, capaz de ser uma alternativa às pranchas produzidas atualmente pela empresa galega *VigTab*, bem como a criação de um compósito, capaz de ser uma alternativa válida às tecnologias existentes no mercado para produção de pranchas de *skateboard*. Para o desenvolvimento da prancha de *longboard*, foram desenvolvidas quatro placas à base de resina epoxidica reforçada por fibras de carbono e/ou fibras de aramida, com núcleos em espuma de PVC perfazendo assim a estrutura sanduiche. Foram ainda adicionadas às placas lâminas de madeira nas duas superfícies exteriores sendo estas cobertas por tecidos de fibras de vidro para proteção da madeira do meio externo. As placas foram ensaiadas ao impacto e à flexão e os dados compilados e avaliados. Para o desenvolvimento do protótipo de *skateboard*, utilizou-se uma metodologia semelhante à do *longboard*, com o acrescento da necessidade de elaboração de um modelo 3D para o produto final, de uma simulação estrutural e ainda de uma fase de avaliação do potencial de valorização no final de vida da prancha.

Relativamente ao desenvolvimento da prancha de *longboard*, foi possível desenvolver e seleccionar um material mais leve, comparativamente ao utilizado pela empresa *VigTab*, cujas propriedades à flexão e ao impacto são consideravelmente superiores ao mesmo tipo de material usado nas pranchas da empresa galega. Concretamente foi obtido um valor de 9479 MPa para o módulo de flexão do material seleccionado, o que constitui um aumento de 478,5 MPa face ao registado pelo material usado como referência. As maiores diferenças registadas nos ensaios de flexão dizem respeito à tensão de “rotura”, esta aumentou de 49,89 MPa (observados no material da empresa *VigTab*) para 94,1 MPa no material da placa *LongB_4* (material seleccionado), no entanto a falha ocorrida para a placa de referência foi catastrófica pelo que a ocorrida no material desenvolvido no âmbito da dissertação foi quase impercetível (o que constitui uma grande vantagem para o utilizador). Em relação aos ensaios de impacto, a força máxima de impacto que é conferida pelo material aumentou quase para o dobro (de 4252.1 para 7918.2 N), tal como aconteceu para a quantidade de energia absorvida que ampliou de 64.2 J para 118.9 J. Foi ainda observada uma boa distribuição de espessuras ao longo de todo o protótipo, o que revela que tanto

o método produtivo utilizado como as condições de processamento a ele associadas estão bem otimizadas.

Em relação ao desenvolvimento de um novo modelo de *skateboard*, as conclusões observadas revelam o cumprimento de todos os objetivos estipulados. Em relação aos ensaios realizados aos novos materiais desenvolvidos no âmbito desta dissertação, os resultados neles obtidos foram comparados com um material de referência presente no mercado atual pelo que se obtiveram as seguintes propriedades:

- Módulo de flexão – Aumento em cerca de 5 vezes (9712.4 MPa para 49138.2 MPa);
- Força máxima (flexão) – Aumento em cerca de 1.6 vezes (416.6 N para 653.8);
- Tensão máxima (flexão) – Aumento em cerca de 2.5 vezes (101.4 MPa para 254.1 MPa);
- Força máxima (impacto) – Aumento em cerca de 1.1 vezes (6970 N para 7918.9 N);
- Energia absorvida – Aumento em cerca de 1.3 vezes (94.7 J para 126.8 J);
- Boas semelhanças entre os resultados obtidos na simulação computacional, comparativamente aos obtidos no ensaio ao protótipo final, o que revela que o modelo utilizado na simulação quer para o material da prancha quer para o aparato dos ensaios, foi concordante com a realidade.

Foi ainda observado um peso final de 1100 g para a prancha final (o que está abaixo do limite imposto nos objetivos) bem como uma excelente distribuição de espessuras com uma diferença muito pequena nos diversos pontos da prancha de onde foram retiradas as espessuras.

Em suma, todos os objetivos definidos inicialmente foram cumpridos na sua totalidade. Apesar dos atrasos que se foram sentindo, como a espera por matérias primas e outros equipamentos ou até a pandemia mundial de Covid-19, a gestão do tempo foi fundamental para elaboração de todos os procedimentos propostos no prazo útil da entrega da dissertação, bem como o auxílio dos orientadores e do técnico responsável pelo laboratório de compósitos do PIEP.

A realização deste trabalho foi importante, pois para além de dotar o autor de conhecimento teórico importante na área dos compósitos, promoveu um contacto muito próximo daquilo que é efetuado na indústria, disponibilizando novas ferramentas de trabalho de natureza prática, contrastando com os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo de todo o curso. A realização da dissertação de mestrado em engenharia de polímeros permitiu desenvolver competências a nível de pesquisa e interpretação de

dados, conviver com pessoas mais experientes no desenvolvimento de produtos e acima de tudo aperfeiçoar o espírito crítico e de autoaprendizagem fundamentais para o futuro.

8. Sugestões para Trabalhos Futuros

O desenvolvimento de um produto, culminado na produção de um primeiro protótipo, consiste na elaboração de sucessivas etapas que convergem para o objetivo final. Durante o desenrolar dessas etapas, são tomadas decisões, quer ao nível dos materiais escolhidos quer ao nível dos métodos produtivos a adotar, que muitas vezes são feitas com base na intuição do responsável pelo projeto o que quer dizer que poderiam ser tomados outros caminhos com maiores ou menores vantagens para o produto final. Assim, finalizado este projeto, é possível perceber que há aspetos que podem ser melhorados e ainda outros caminhos que podem trazer algumas vantagens ao produto final.

Ao nível dos materiais utilizados, pode ser estudado a incorporação de outros materiais de alto desempenho, como os tecidos de Spectra®, de Innegra™, ou ainda outros que existam no mercado e que possam constituir mais valias para a prancha de *skateboard*. Podem ainda ser estudadas novas disposições dos materiais utilizados na estrutura laminar das pranchas. Ao nível das resinas um dos principais estudos que podem ser realizados, prende-se com a utilização de matrizes termoplásticas, o que deve aumentar significativamente as propriedades ao impacto do material, bem como possibilitar a separação dos materiais (matriz e reforços) no final de vida do produto.

Relativamente aos processos produtivos, a técnica de RTM deve ser levada em consideração pelo que a produção de um molde da prancha de *skateboard* bem robusto e capaz de realizar a correta impregnação das fibras de reforço (as entradas e saídas podem ser estudadas através do *software* comercial *PAM-RTM*) constitui a primeira etapa para a correta utilização deste processo. Deve ainda ser utilizado o equipamento de injeção de resina presente no PIEP, de modo a poder automatizar o processo de RTM.

O material utilizado deve ser otimizado nos locais de maior carregamento, sendo importante recorrer à simulação realizada nesta dissertação, bem como a outras simulações de diferentes solicitações mecânicas que possam ocorrer à prancha em cenário real de utilização. No Anexo R estão presentes os cálculos analíticos necessários para a obtenção de informações acerca da quebra ou não das diversas lâminas presentes no laminado. Como se pode verificar, não foram realizados todos os cálculos necessários uma vez que não existe informação acerca da tensão de rotura das lâminas nas diversas

direções. Assim sendo, é sugerida a realização dos ensaios mecânicos à flexão a todas as lâminas de epóxi reforçado com fibras de carbono utilizado no laminado *SkateB_4*, bem como às lâminas de madeira para que sejam obtidos os valores de tensão de rotura necessários para a continuação dos cálculos anteriormente mencionados.

Como o desenvolvimento de um novo produto abre diversas possibilidades de estudo ao produto final bem como aos processos utilizados, podem ser aprofundados estudos acerca da recuperação energética que a prancha produzida pode possuir, isto é, perceber qual a calorimetria envolvida no processo de incineração do *skate*. Ainda ao nível do estudo do potencial de valorização em fim de vida pode proceder-se ao estudo da viabilidade de incorporação do material granulado noutros produtos. Ao nível financeiro, podem ainda proceder-se a estudos sobre a viabilidade da prancha desenvolvida, onde se pode analisar quer o custo total de desenvolvimento do protótipo quer futuros desenvolvimentos em contexto industrial e ainda prever qual o melhor preço para a venda deste produto.

Ao nível dos acabamentos aos protótipos (*skateboard* e *longboard*) devem ser estudadas novas formas de realizar os bordos das pranchas, de modo a promover maior resistência ao impacto e à delaminação do compósito produzido (a utilização de materiais elastoméricos, com grande resiliência pode ser uma mais valia para o produto final). É necessária a realização de testes às pranchas em cenário real de utilização por alguém com vasto conhecimento na área, e não apenas ensaios mecânicos, uma vez que são os praticantes que corroboram a qualidade de todo o produto desenvolvido. Por fim, e caso se pretenda a introdução deste produto no mercado, devem ser cumpridos os ensaios presentes na norma *BS EN 13613*, de forma a garantir as condições mínimas de segurança para o utilizador final da prancha de *skateboard*.

9. Referências Bibliográficas

- [1] Anna M. Prentiss, Randall R. Skelton, Niles Eldredge, Colin Quinn “*Get Rad! The Evolution of the Skateboard Deck*”, *Evo Edu Outreach* (2011) 4:379–389, DOI 10.1007/s12052-011-0347-0.
- [2] Skate Deluxe,” *Everything About Skateboard Decks-Wiki*” (15 de outubro de 2019). Retirado de: <https://www.skatedeluxe.com>.
- [3] Haoyu Liu et al,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*”. 2018 128 012170.
- [4] Linke, George William, “*Innovative Design: Design of a Press System and Molds to Produce a Skateboard Deck*”, *Electronic Theses and Dissertations*. Paper 1399. (2011) – Retirado de: <http://dc.etsu.edu/etd/1399>.
- [5] F.L. Matthews, R.D. Rawlings, “*Composite Materials: Engineering and Science*”, 1ª Edição, Chapman & Hall, London, 1994.
- [6] Department of Defense (USA), “*Composite Materials Handbook – Volume 3 - Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, And Analysis*”, United States of America, 1997.
- [7] Krishnan K. Chawla, “*Composite Materials Science and Engineering*”, Springer, 2001.
- [8] Carlos A. X. Ramos, “*Materiais Compósitos Inteligentes*”, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016.
- [9] Gurit, “*Guide to Composites*” (29 de outubro 2019) Retirado de: <https://www.gurit.com>
- [10] Graeme W. Milton, “*The Theory of Composites*”, Cambridge University Press, United Kingdom, 2002. ISBN 0-521-78125-6.
- [11] Johnson, Todd. “*Thermoplastic vs. Thermoset Resins*” ThoughtCo, Oct. 1, 2018. Retirado de: thoughtco.com/thermoplastic-vs-thermoset-resins-820405.
- [12] D. P. Gama, “*Análise das Propriedades de Tensão e Flexão de Compósitos Sanduiche*”, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói - Brasil, 2017.
- [13] Kevin Potter, “*Resin Transfer Moulding*”, 1ª Edição, Chapman & Hall, London, 1997. ISBN-13: 978-94-010-6497-2.
- [14] Jornal Oservador, “*Cuidado: não é preciso estar este calor para um carro ser mortífero. A ciência explica porque*”, (2 de novembro 2019). Retirado de: <https://observador.pt>
- [15] Ana.R C. Nogueira, “*Referências Antropométricas Para A População Adulta E Idosa Portuguesa*”, Faculdade de Ciências da Nutrição e Alimentação, Universidade do Porto, Porto, 2016.
- [16] Jornal Expresso, “*Uma questão de tamanho*”, (13 novembro 2019). Retirado de: <https://expresso.pt>
- [17] K. Fang, “*Faster than Walking, More Flexible than Biking: Skateboarding as a Real Mobility Mode*”, *Transfers Magazine*, Arizona, USA, 2018
- [18] Guinness World Records, “*Fastest skateboarding speed downhill (standing)*”, (13 de novembro 2019). Retirado de: <http://www.guinnessworldrecords.com>
- [19] ArtleBedev, “*Women's and men's shoe size-frequency distribution*”, (13 de novembro de 2019). Retirado de: <https://www.artlebedev.com/>
- [20] J.P.Nunes, “*Classic Lamination Theory (CLT) (slides)*”, Departamento de Engenharia de Polimeros, Universidade do Minho, Guimarães, 2018.
- [21] Almost Skateboard, site oficial (outubro 2019) <https://almostskateboards.com/>
- [22] Polo de Inovação em Engenharia de Polimeros – PIEP, site oficial (fevereiro 2020) <http://www.piep.pt/>
- [23] EMillion Skateboards, Site Oficial (outubro 2019) <https://www.emillionfamily.com/>
- [24] Roboplan, site oficial – (outubro 2019) <https://www.roboplan.pt/pt>
- [25] J.P.Nunes, “*Composites, Raw Materials (slides)*”, Departamento de Engenharia de Polimeros, Universidade do Minho, Guimarães, 2018.

- [26] J.P.Nunes, “*Composites, Processing (slides)*”, Departamento de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho, Guimarães, 2018.
- [27] Mallick P.K., “*Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*”, 3ª Edição, CRC Press, Michigan, 2007
- [28] L. Tong, A.P. Mouritz & M.K. Bannister, “*3D Fibre Reinforced Polymer Composites*”, 1ª Edição, Elsevier, Oxford, 2002
- [29] C.D. Rudd, A.C. Long, K.N. Kendall & C.G.E. Mangin, “*Liquid Moulding Technologies*”, 1ª Edição, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, 1997
- [30] Mallick P.K., “*Processing of Polymer Matrix Composites*”, 1ª Edição, CRC Press, Michigan, 2018
- [31] J.P. Nunes, J.F. Silva, “*Sandwiched Composites in Aerospace Engineering*”, Elsevier, 2016. DOI 10.1016/B978-0-08-100037-3.00005-5
- [32] Gurit, “*Guide to Infusion Part. 1*” (11 de janeiro 2020) Retirado de: <https://www.gurit.com>
- [33] Hayward, J. S. e Harris, B., “*The effect of vacuum assistance in resin transfer moulding*”, Journal Composites Manufacturing, UK, 1990. DOI: 10.1016/0956-7143(90)90163-Q
- [34] Puaux, Grégory. “*Numerical simulation of flows at microscopic scale and mesoscopic scale in the RTM process*”, 2011
- [35] Battino R, Clever H.L. “*The Solubility of Gases in Liquids*”, Chemical Reviews 1966, DOI: 10.1021/cr60242a003
- [36] Polytek, “*Tek-Tip: Reduce Bubbles in Clear Casting Resin*”, (2 março 2020). Retirado de: <https://www.polytek.com>
- [37] Esi Group, “*Composites*”, (4 março 2020). Retirado de: <https://www.esi-group.com>
- [38] Abaqus, “*Choosing the Type of a New Part*”, (13 de novembro de 2019), Retirado de: <https://abaqus-docs.mit.edu>
- [39] Feraboli, Paolo et al. (2012). “*Recyclability and reutilization of carbon fiber fabric/epoxy composites*”, Journal of Composite Materials - J COMPOS MATER. DOI: 10.1177/0021998311420604.
- [40] Powel Peralta, Site Oficial (outubro 2019) <https://powell-peralta.com/>

ANEXOS

Anexo A – Gráficos de força/deslocamento (placas para *Longboard*):

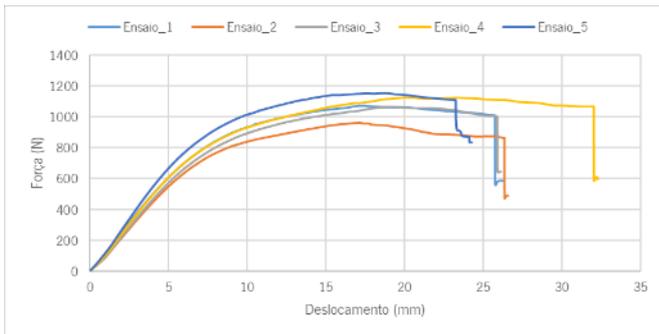


Figura 1* - Placa LongB_1.

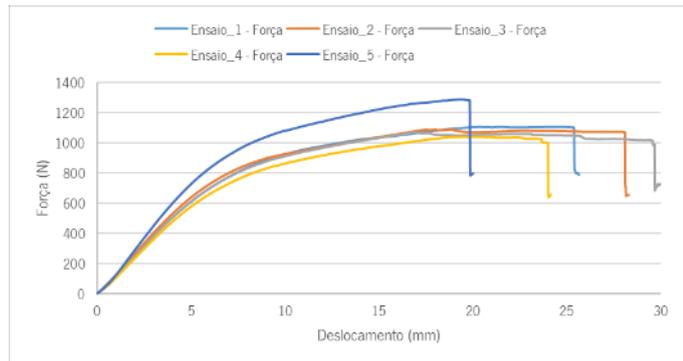


Figura 2* - Placa LongB_2.

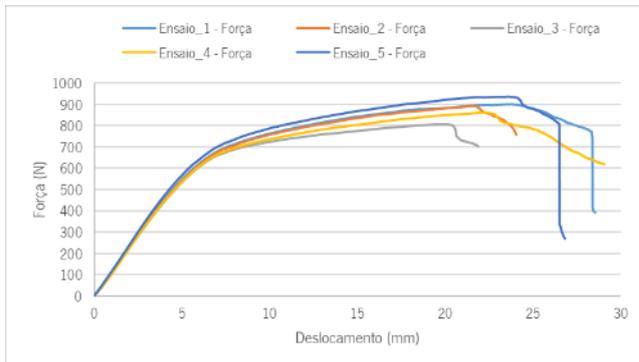


Figura 3* - Placa LongB_3.

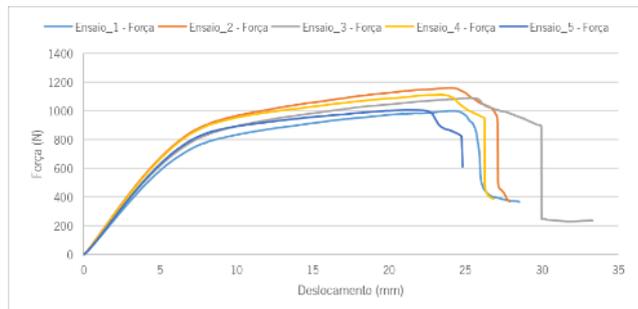


Figura 4* - Placa LongB_4.

Anexo B – Gráfico de força/deslocamento para comparação e seleção do material final:

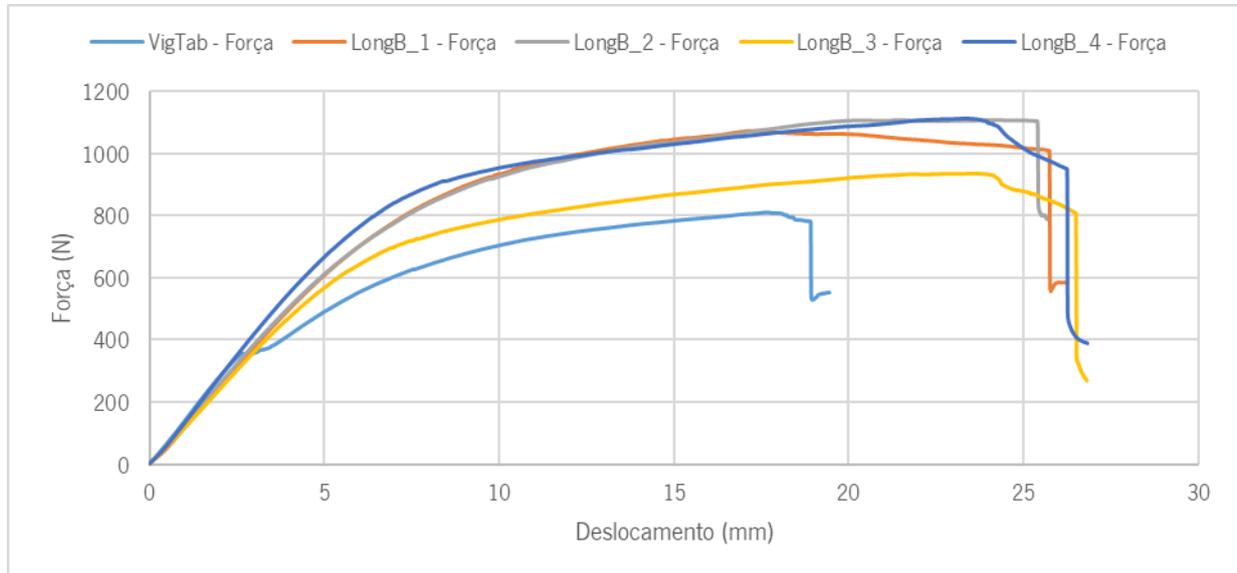


Figura 5* - Comparação das curvas médias obtidas em todos os ensaios aos materiais usados para a prancha de longboard.

Anexo C – Produção do molde para a prancha de *longboard*.

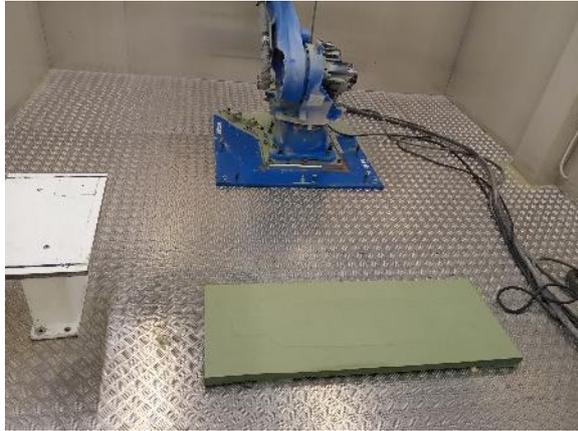


Figura 6* - Maquinação do bloco de MDF.



Figura 7* - Retificação da superfície para aplicação de primário.



Figura 8* - Aplicação de primário.

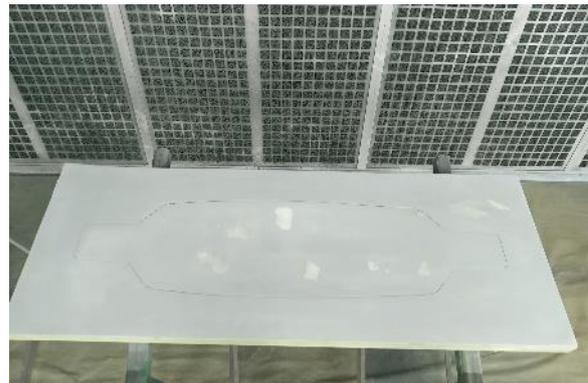


Figura 9* - Retificação da superfície com primário para aplicação da pintura final.



Figura 10* - Aplicação da pintura final.

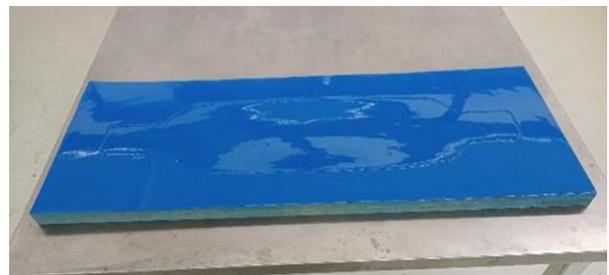


Figura 11* - Molde final.

Anexo D – Produção do protótipo da prancha de *longboard*.

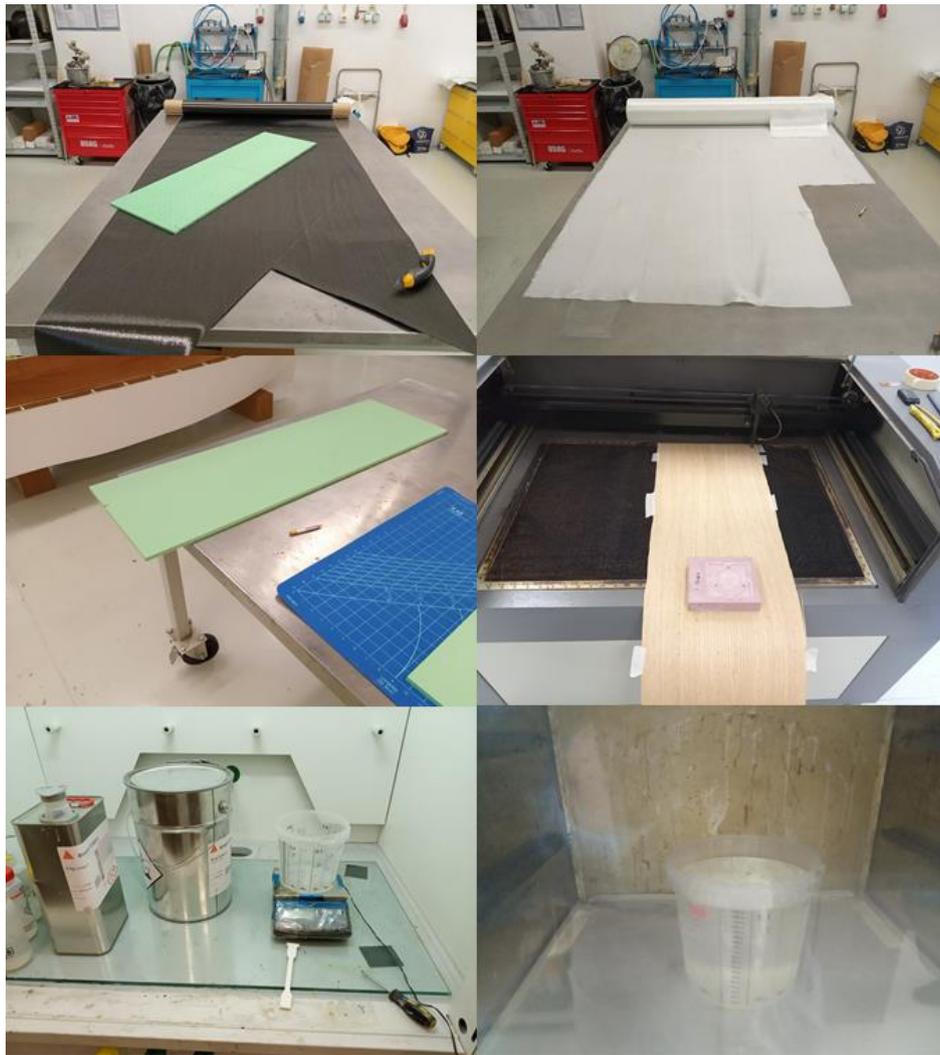


Figura 12* - Preparação e corte das matérias primas.

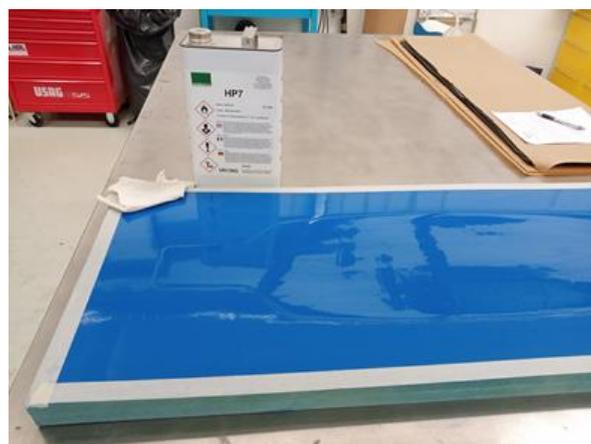


Figura 13* - Aplicação de desmoldante ao molde.

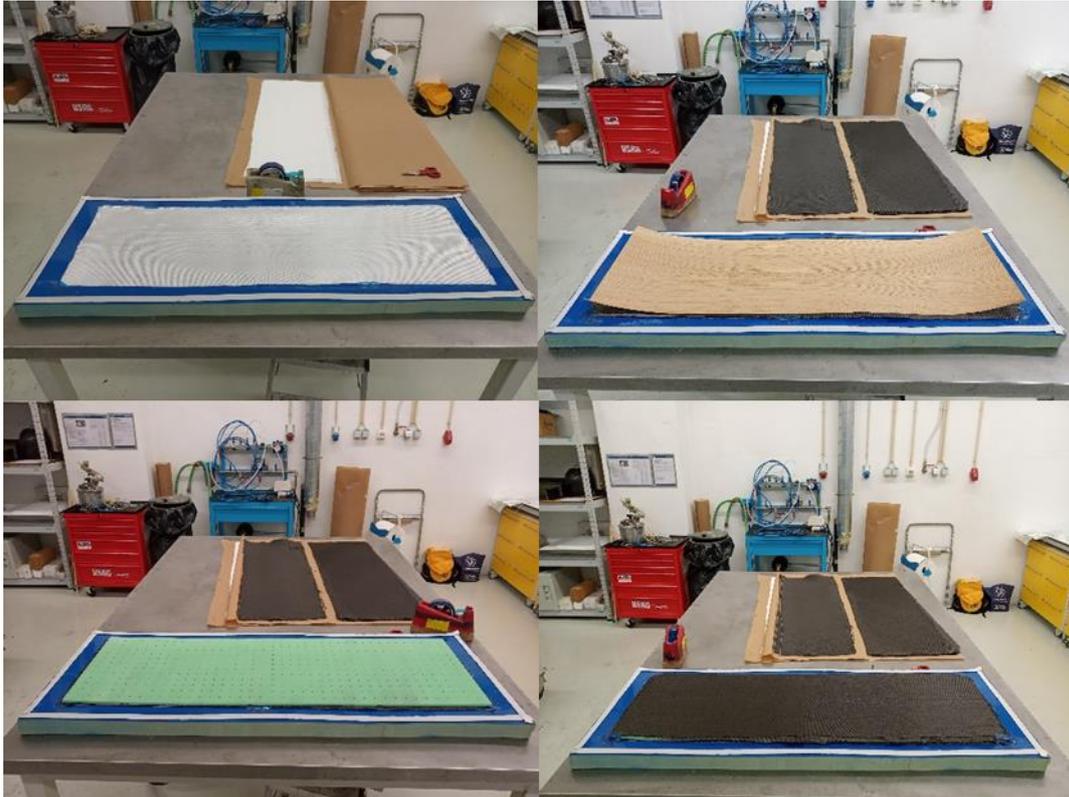


Figura 14* - Colocação do laminado selecionado na superfície do molde.

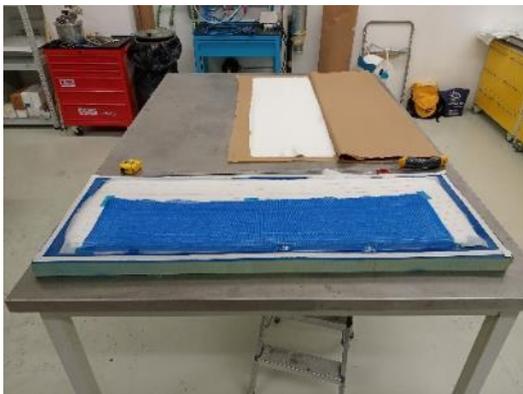


Figura 15* - Colocação do peel ply e da flow mesh.



Figura 16* - Colocação do saco de vácuo.

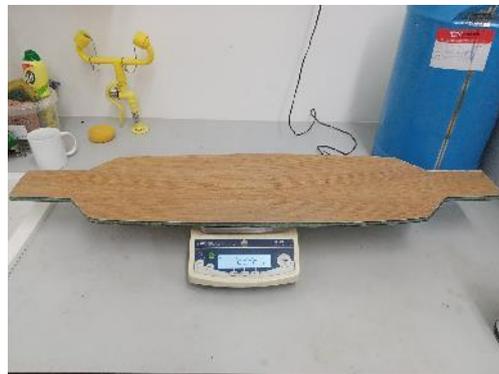


Figura 17* - Produto final desmoldado com indicação do peso total.

Anexo E – Modelos conceituais para utilizar na estrutura laminar da prancha:

Aramida 0°	Aramida 0°	Carbono 0°/90°	Carbono 45°	Carbono 0°
Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°	Carbono 45°	Carbono 30°	Carbono 0°/90°
Carbono 30°	Madeira	Carbono 30°	Madeira	Madeira
Madeira		Madeira	Carbono -30°	
Carbono -30°	Carbono 0°/90°	Carbono -30°	Carbono -45°	Carbono 0°/90°
Carbono 0°/90°	Fibra de Basalto 0°	Carbono -45°	Fibra de Vidro 0°	Fibra de Basalto 0°
Fibra de Vidro 0°		Fibra de Basalto 0°		

Aramida 0°	Carbono 0°	Carbono 0°	Cortiça	Cortiça
Carbono 0°/90°	Carbono 45°	Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°
Carbono 45°	Carbono 30°	Madeira	Carbono 45°	Carbono 45°
Madeira	Balsa		E-TPU	CMEVA
Carbono -45°	Carbono -30°	Carbono 0°/90°	Carbono -45°	Carbono -45°
Carbono 0°/90°	Carbono -45°	Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°
Fibra de Vidro 0°	Carbono 0°/90°	Aramida 0°	Fibra de Vidro 0°	Fibra de Vidro 0°

Carbono 0°	Carbono 0°	Carbono 0°	Carbono 0°	Cortiça
Carbono 30°	Carbono 0°/90°	Cortiça	Cortiça	Carbono 0°/90°
Carbono 45°	Cortiça	E-TPU	CMEVA	Carbono 30°
Madeira				E-TPU
Carbono -45°	Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°	Carbono -30°
Carbono -30°	Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°	Carbono 0°/90°
Carbono 0°/90°	SPECTRA® 0°	SPECTRA® 0°	SPECTRA® 0°	Fibra de Vidro 0°

Cortiça	Aramida 0°	Aramida 0°	Carbono 0°
Carbono 0°/90°	Carbono 30°	Carbono 45°	Carbono 0°
Carbono 30°	Carbono 45°	Carbono 30°	Carbono 30°
CMEVA	Madeira	Madeira	Carbono 45°
Carbono -30°	Carbono -45°	Carbono -30°	Madeira
Carbono 0°/90°	Carbono -30°	Carbono -45°	Carbono -45°
Fibra de Vidro 0°	Híbrido (Car/Ara)	Híbrido (Car/Ara)	Carbono -30°
			Carbono 0°
			Carbono 0°

Figura 18* - Possíveis laminados a fabricar no âmbito da dissertação.

Anexo F – Ficha técnica do Sikablock®:

SIKABLOCK M700

PLACA MAQUINÁVEL

DESCRIÇÃO

SIKABLOCK M 700 é uma placa de poliuretano maquinável com uma excelente estabilidade dimensional e acabamento de superfície. Apresenta elevada resistência a compressão e boa estabilidade de arestas, elevada resistência térmica e boa resistência a solventes.

As suas principais características são uma baixa densidade, uma estrutura interna fina e homogénea e uma baixa absorção da humidade. **SIKABLOCK M 700** foi inicialmente concebido como um produto alternativo à madeira para as oficinas de moldes e modelos, podendo ser trabalhado manualmente, com ferramentas de madeira apresentando uma grande facilidade de corte e acabamento. Pode ser maquinado facilmente utilizando fresas ou outras ferramentas a alta velocidade, com formação de aparas e praticamente sem pó, obtendo-se excelentes resultados.

As placas podem ser coladas entre si, utilizando adesivos de poliuretano, resinas epoxy ou cianocrilato. Depois de maquinados os modelos fabricados com **SIKABLOCK M 700** apresentam uma superfície lisa e compacta que pode ser envernizada, obtendo-se assim uma grande dureza superficial.

APLICAÇÕES

Modelos, protótipos, ferramentas de controlo dimensional, moldes para termoformagem, RIM e fabrico de componentes em materiais compósitos.

PROPRIEDADES

Cor:	Castanho	
Densidade:	0.70	(ISO 845)
Dureza Shore D:	66	(ISO 868)
Resistência a flexão:	26 MPa	(ISO 178)
Modulo de flexão:	1000Mpa	(ISO 604)
Resistência a compressão:	25 MPa	(ISO 178)
Resistência ao impacto:	7 KJ/m ²	(ISO 179 Ue)
Temperatura de deformação sob carga:	90 °C	(ISO 75 B)
Coefficiente de dilatação térmica linear:	55 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹	(DIN 53 752)

Figura 19* - Ficha técnica do SikaBlock.

Anexo G – Desenho 2D do molde para RTM:

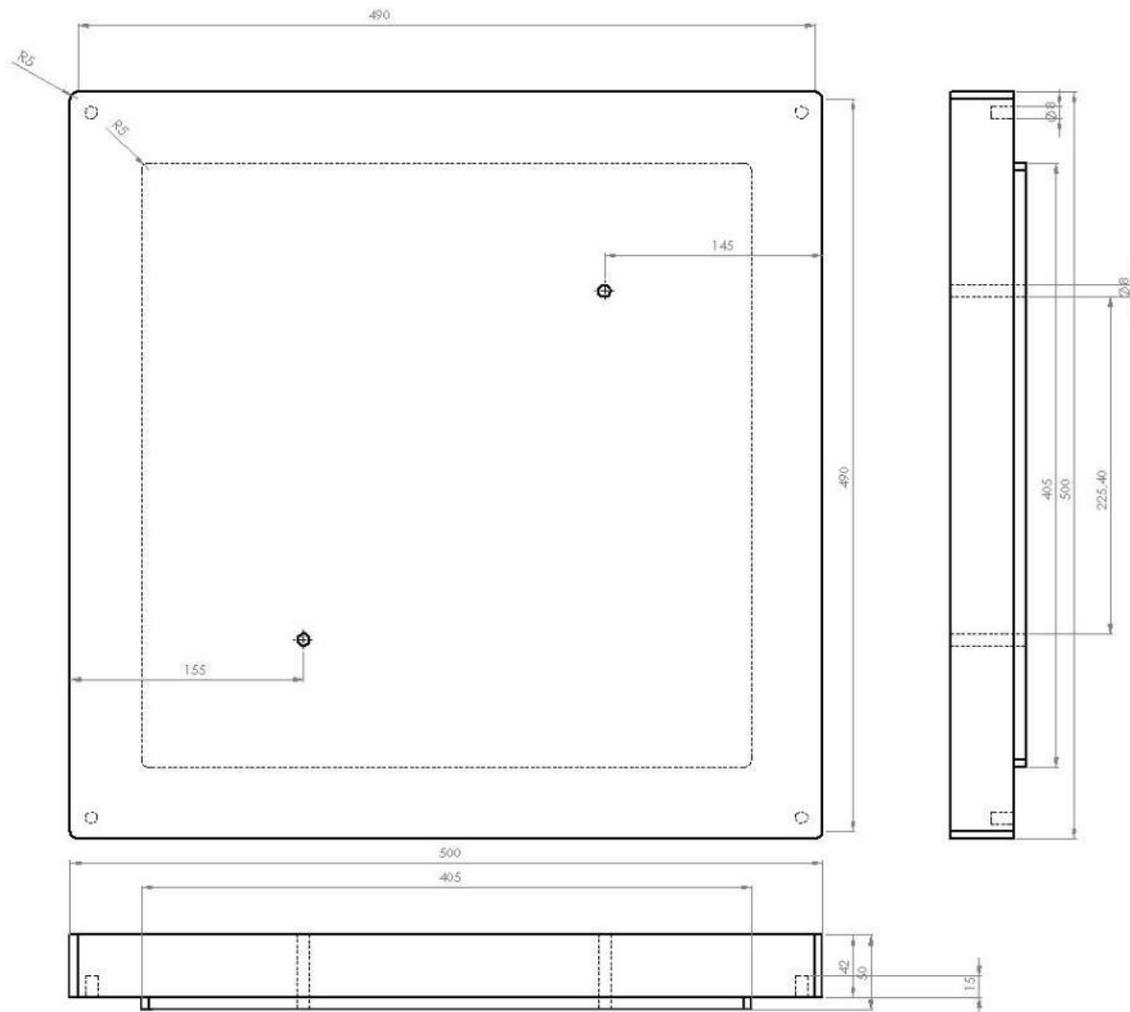


Figura 20 - Parte superior do molde (bucha).*

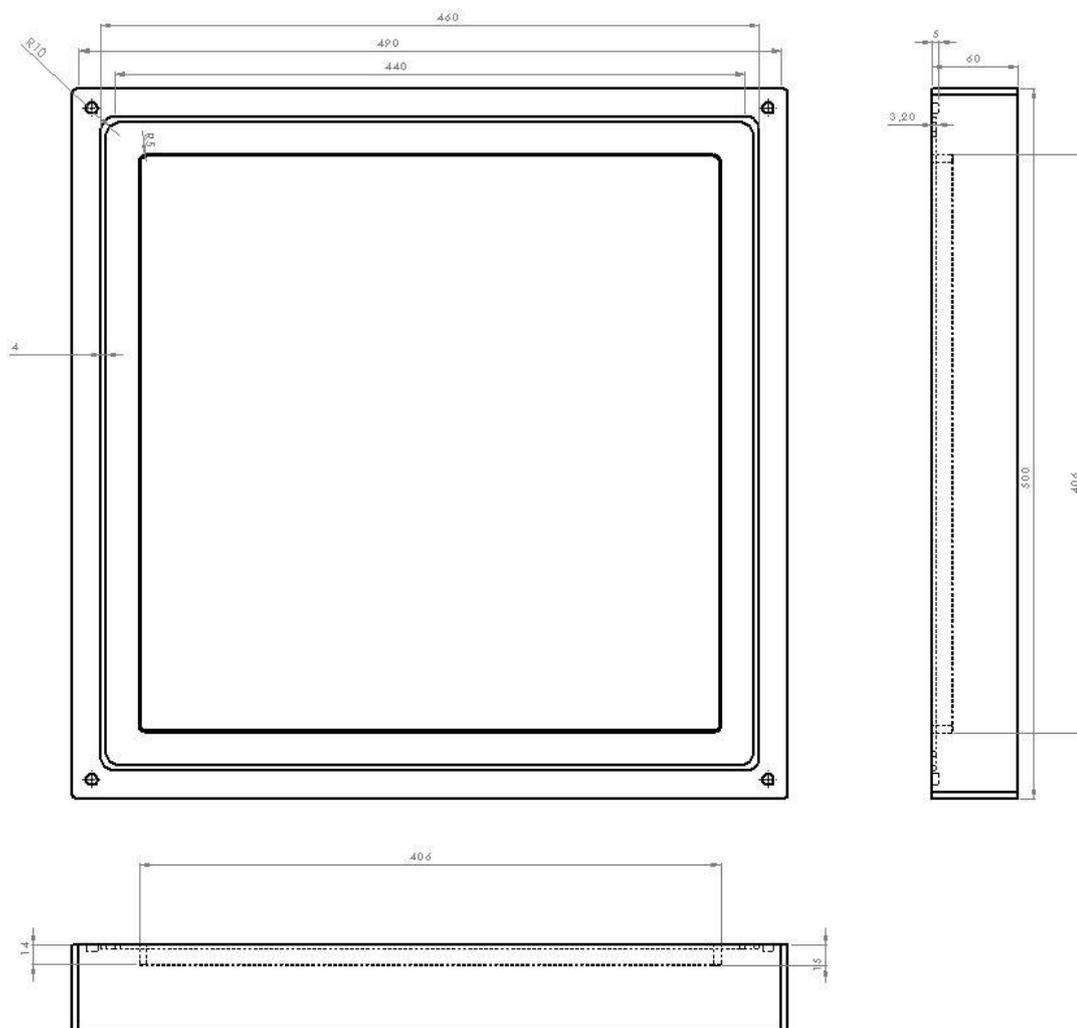


Figura 21* - Parte inferior do molde (cavidade).

Anexo H – Acabamentos ao molde de RTM:

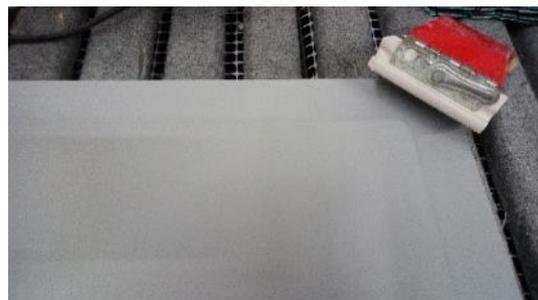
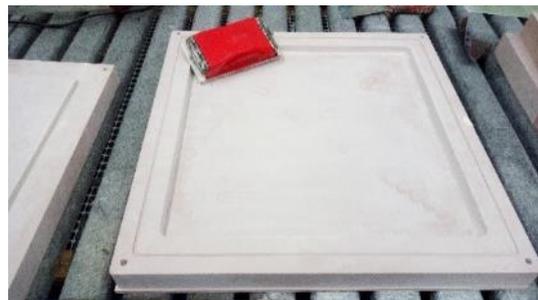
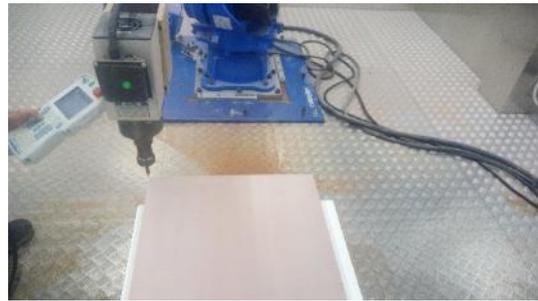


Figura 22* - Acabamentos ao molde de RTM, para produção das placas.

Anexo I – Ficha técnica da cola utilizada na produção dos núcleos em folheado de eucalipto:

Ficha Técnica

TIPO

Cola vinilica, base aquosa.

PRINCIPAIS PROPRIEDADES

Fácil aplicação e, depois de seca, total transparência, elevada resistência e excelente elasticidade.

UTILIZAÇÃO

Especialmente recomendada para todos os trabalhos de marcenaria e carpintaria, mesmo com madeiras resinosas, montagem de móveis e trabalhos caseiros.

PREPARAÇÃO

Necessita apenas de uma homogeneização simples antes de iniciar a aplicação.



Homogeneizar bem

PROCESSO DE APLICAÇÃO

Preparação suporte: As superfícies a colar devem ajustar-se perfeitamente e encontrar-se convenientemente limpas, isentas de poeiras e gorduras.

Aplicação: Com Trincha ou uma Espátula sem dentes, aplica-se uma camada fina e uniforme de cola apenas numa das superfícies a unir. De seguida, unem-se as superfícies e comprimem-se, durante cerca de 15 a 20 minutos (o tempo de abertura é função da quantidade de cola aplicada, do grau de absorção dos materiais, da temperatura e humidade do ar) até que se tenha obtido uma boa aderência.

Limpeza Material: utilizar Água limpa.



CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Aspecto:	Líquido viscoso.
Cor:	Branca.
pH:	6.0± 0.5.
TMMF:	+5 °C.
Massa específica, 20°C :	1.050 ± 0.020 Kg/ l
Teor em Sólidos:	45.0± 2.0 % (peso)
Secagem:	Tempo abertura: 15-20'; Seco : 3-4 dias.
Estabilidade:	12 Meses, em embalagens de origem, cheias e bem fechadas.

TMMF – Temperatura mínima de formação de filme.

Figura 23 - Ficha técnica da cola.*

Anexo J – Ficha técnica da resina utilizada na produção de todos os produtos desenvolvidos no âmbito desta dissertação:

Tooling & Composites

Product Data Sheet
Version 05 / 2017

Biresin® CR83 Composite resin system

Product Description

Biresin® CR83 is an epoxy resin system with extremely low viscosity designed specifically for the infusion process for the production of high performance fibre reinforced composites parts and moulds. The system has thermal properties up to 80°C. Biresin® CR83 epoxy resin has a low tendency to crystallise.

Application Areas

Biresin® CR83 is especially suited to the infusion and injection processes due to its low viscosity range. It can be used in the marine and general industrial composite areas. Due to its good wetting properties it is particularly suited for use with carbon fibre reinforcement.

Features / Advantages

- 3 hardeners (B) give a wide range of processing times
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Fast infusion and good wet-out of fabrics and non-wovens due to low viscosity and good wetting characteristics even at low temperatures
- All systems Germanischer Lloyd approved, Certificate No. WP 1420017 HH (attached)
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions
- Carbon fibres are wet out well by all of the resin systems
- Biresin® CR83 resin (A) has a low tendency to crystallise

Physical Data		Resin (A)		Hardener (B)	
Individual Components		Biresin® CR83	Biresin® CH83-2	Biresin® CH83-6	Biresin® CH83-10
Mixing ratio, parts by	weight	100		30	
Mixing ratio, parts by	volume	100		35	
Colour		translucent		colourless to yellowish	
Viscosity, 25°C	mPa.s	~610	<10	<10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1.14	0.95	0.94	0.95
Mixture					
Potlife, 100 g / RT, approx. values	min		60	180	300
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPa.s		155	170	155

Processing

- The material and processing temperatures should be in the range 18 - 35°C.
- The mixing ratio must be followed accurately to obtain best results. Deviating from the correct mix ratio will lead to lower performance.
- The final mechanical and thermal values are dependent on the applied postcuring cycles.
- It is recommended to clean brushes or tools immediately after use with Sika Reinigungsmittel 5.
- Additional information is available in "Processing Instructions for Composite Resins".







Figura 24* - Ficha técnica da resina de epoxi.

Anexo K – Resultados dos ensaios realizados aos núcleos produzidos na secção

5.2.2.5.1.:

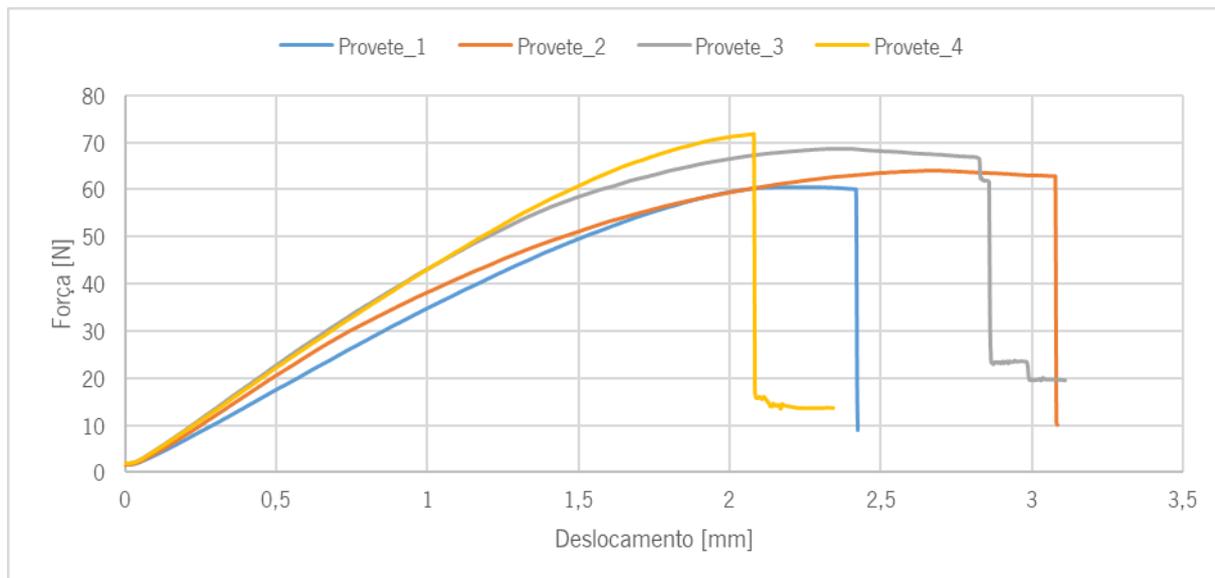


Figura 25* - Gráfico força/deslocamento obtido nos ensaios de flexão ao núcleo de madeira de balsa.

Como se verifica na Figura 25*, as curvas obtidas nos ensaios de flexão ao núcleo de madeira de balsa seguem um comportamento similar com alguma discrepância nos valores de deslocamento máximo obtido. Essa diferença foi observada devido às propriedades do material em questão, uma vez que estas variam ao longo do seu volume, o que é típico em todos os tipos de madeiras. O módulo de elasticidade médio obtido para estes ensaios teve o valor de 2924.5 MPa.

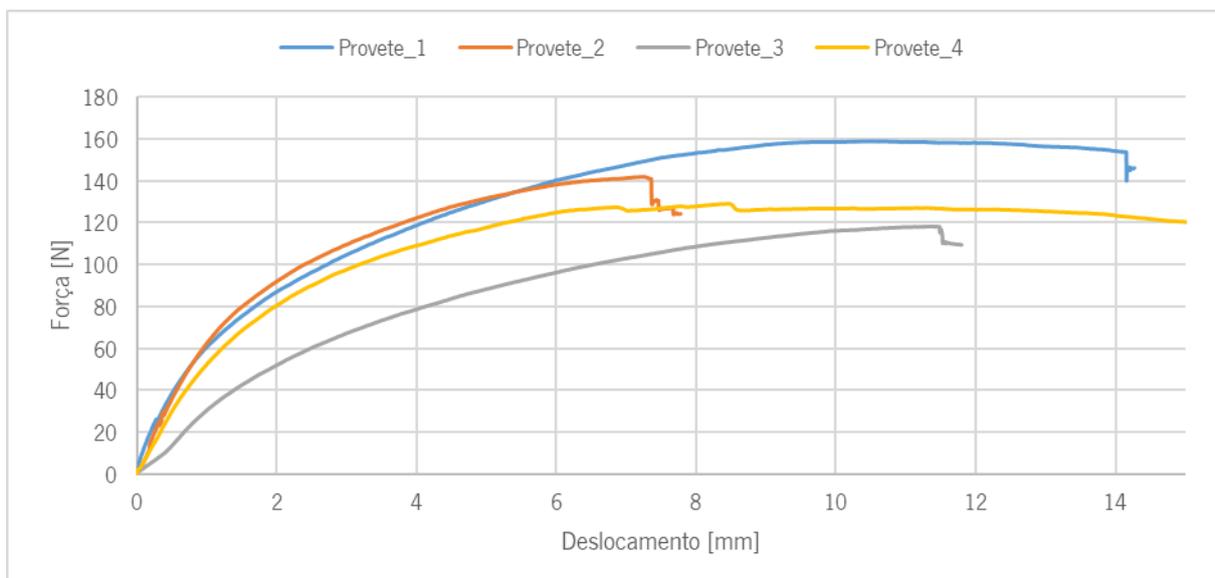


Figura 26* - Gráfico força/deslocamento obtido nos ensaios de flexão ao núcleo de folheado de madeira de eucalipto..

Já os gráficos obtidos para o núcleo formado por diversos folheados de madeira de eucalipto (Figura 26*), possui grandes disparidades nos resultados obtidos, no entanto a tendência das curvas é muito

semelhante. O dano causado foi a descolagem de alguns folheados devido ao amolecimento das camadas, devido ao tipo de cola utilizado. O módulo de elasticidade médio obtido para este material foi de 4604 MPa.

Anexo L – Gráficos com curvas comparativas entre os resultados obtidos na simulação e nos ensaios à flexão dos provetes:

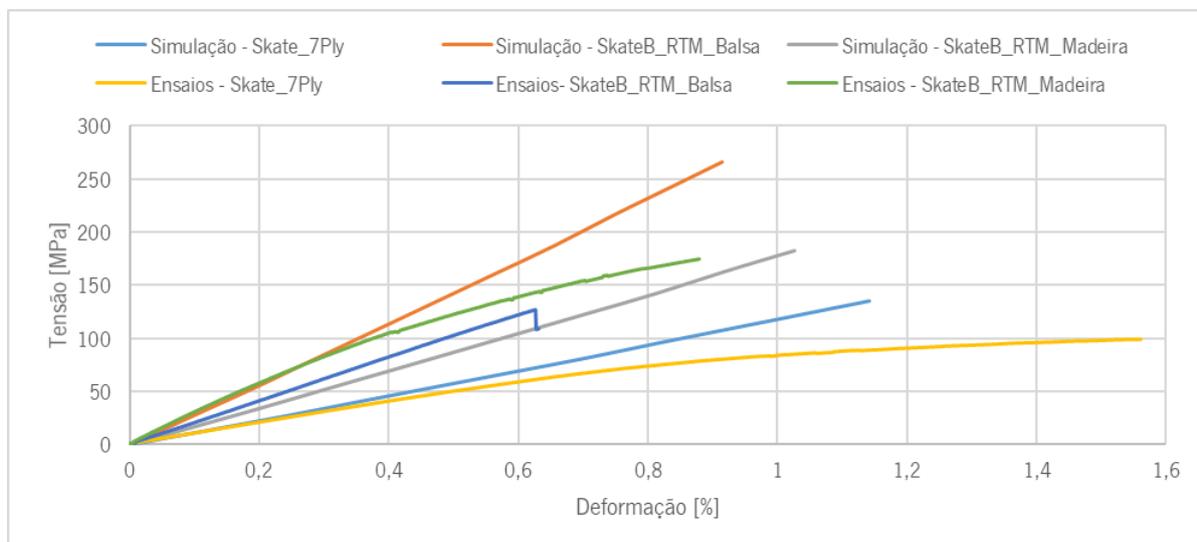


Figura 27* - Comparação dos ensaios práticos com os dados retirados da simulação computacional.

De notar que todas as curvas presentes foram calculadas para um deslocamento de 20 mm, com exceção a curva “Ensaio – *SkateB_RTM_Balsa*” uma vez que não atingiu esse deslocamento nos ensaios devido a uma falha anterior a esse valor.

A razão para que as curvas obtidas nas simulações possuam uma deformação apenas no regime elástico, deve-se à não inserção de critérios de cedência e rotura nos parâmetros da simulação computacional.

Anexo M – Gráficos de força/deslocamento (placas para *Skateboard*):

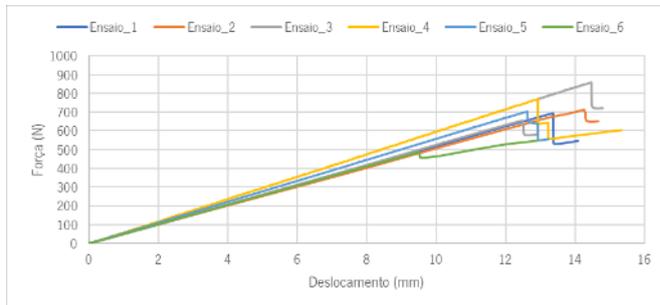


Figura 28* - Placa SkateB_1.

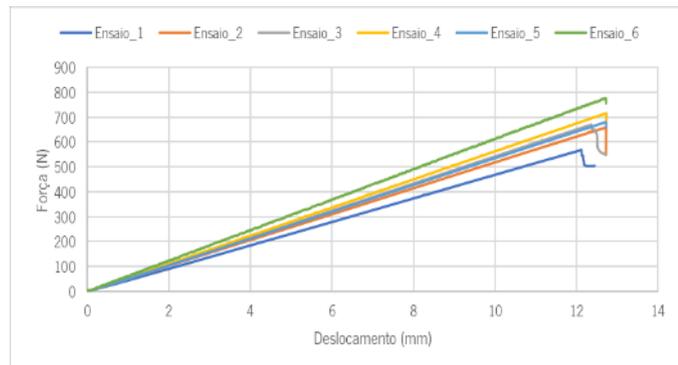


Figura 29* - Placa SkateB_2.

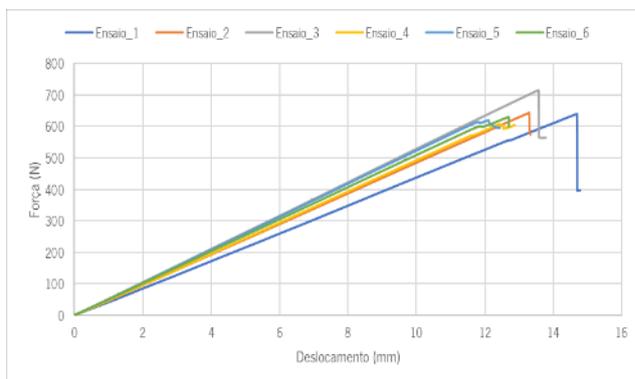


Figura 30* - Placa SkateB_3.

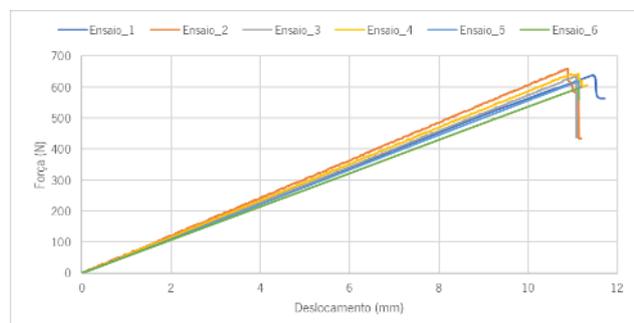


Figura 31* - Placa SkateB_4.

Anexo N – Gráficos de força/deslocamento para comparação e seleção do material a utilizar na prancha de *skateboard*:

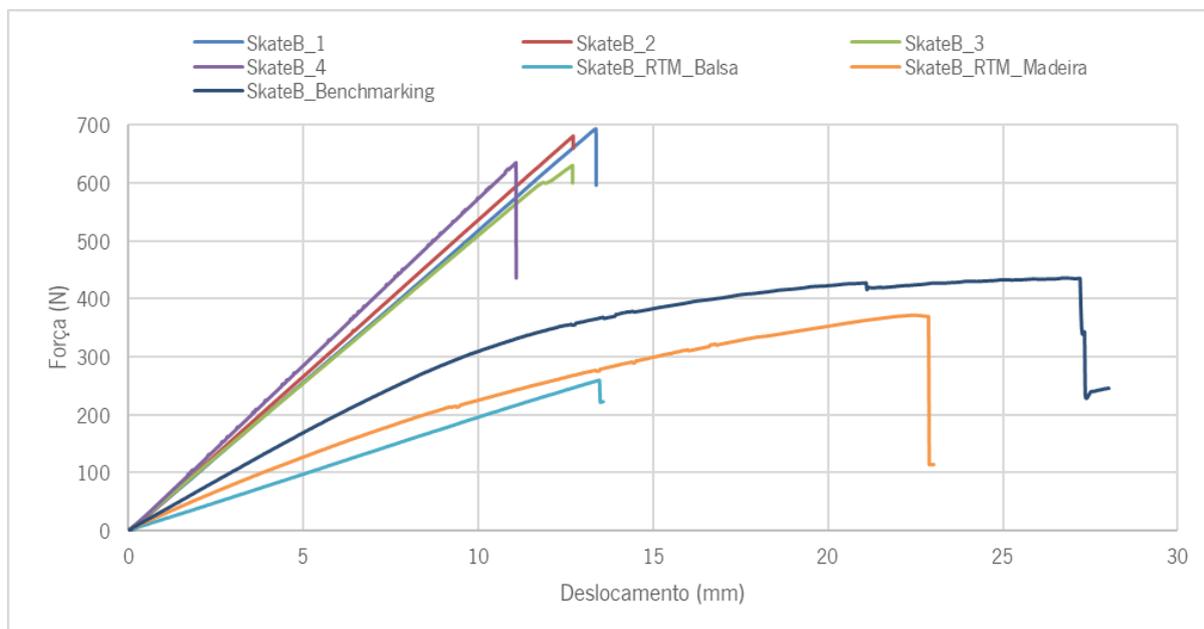


Figura 32* - Comparação dos materiais em termos de força/deslocamento.

Anexo O – Desenho 2D do modelo da prancha de *skateboard* desenvolvido no âmbito desta dissertação de mestrado:

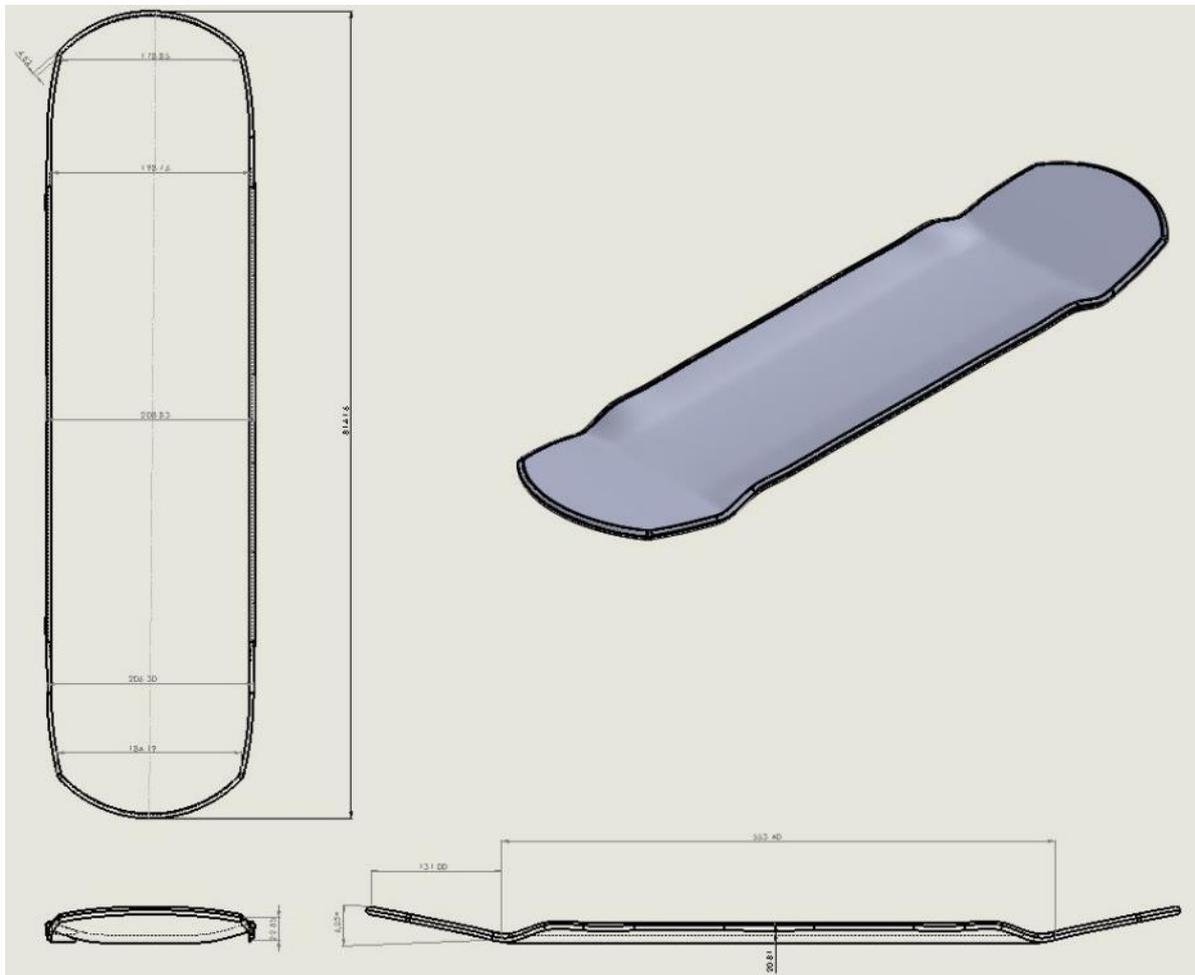


Figura 33* - Desenho 2D da prancha de *skateboard* desenvolvida no âmbito deste trabalho de investigação.

Anexo P – Ficha técnica do robô de maquinação Motoman MH50-35:



SOLUTIONS IN MOTION™



PENDANT LADDER EDITOR



LARGE PART PROCESSING



MOTOSIM EG-VRC (OPTION)



MH50 MH50-35

COATING • DISPENSING • MACHINE TENDING
MATERIAL CUTTING • MATERIAL HANDLING • PRESS TENDING

Payloads:
50 kg; Standard (MH50)
35 kg; Long Reach (MH50-35)

TOP REASONS TO BUY

- Variety of payloads/reaches/mounting options allow MH-series robot models to be used for a variety of applications
- Multiple robot control (up to eight robots/72 axes) simplifies programming
- Highest axis speeds in their class
- Improved wrist ratings provide higher handling capacity in many applications

Long/Extended Reach for Large Parts

- Powerful, high-speed robots with long/extended reaches offer superior performance in coating, dispensing, material cutting and handling applications.
- MH50: 50 kg (110.3 lb) payload; 2,061 mm (81.1") horizontal reach; 3,578 mm (140.9") vertical reach; ± 0.07 mm (± 0.003 ") repeatability.
- MH50-35: 35 kg (77.2 lb) payload; 2,538 mm (100") horizontal reach; 4,448 mm (175.1") vertical reach; ± 0.07 mm (± 0.003 ") repeatability.
- MH50 and MH50-35 models can be floor-, wall- or ceiling-mounted. Brakes on all axes.
- Wide work envelopes with small interference zones, allow robots to be placed close to workpieces/equipment which reduces required floorspace.

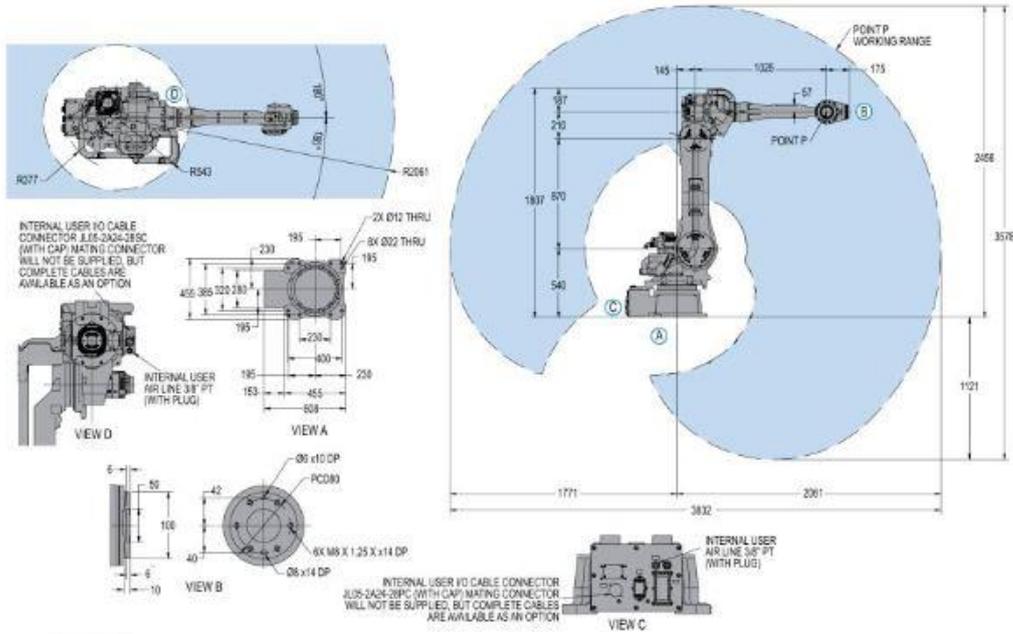
DX100 Controller

- Patented multiple robot control supports up to 8 robots/72 axes.
- Windows® CE programming pendant with color touch screen and USB interface.
- Faster processing speeds for smoother interpolation. Quicker I/O response. Accelerated Ethernet communication.
- Extensive I/O suite includes integral PLC and touch screen HMI, 2,048 I/O and graphical ladder editor.
- Supports all major fieldbus networks, including EtherNet/IP, DeviceNet, Profibus-DP and many others.
- Compliant to ANSI/RIA R15.06-1999 and other relevant ISO and CSA safety standards. Optional Category 3 functional safety unit.

Figura 34* - Ficha técnica robô de maquinação (parte 1).

MH50/MH50-35 ROBOTS

MH50 robot shown.
All dimensions are metric (mm) and for reference only. Please request detail drawings for all design/engineering requirements.



ROBOT SPECIFICATIONS		
	MH50	MH50-35
Structure	Articulated	Articulated
Controlled Axes	6	6
Payload	50 kg (110.3 lbs)	35 kg (77.2 lbs)
Vertical Reach	3,578 mm (140.9")	4,448 mm (175.1")
Horizontal Reach	2,061 mm (81.1")	2,538 mm (100")
Repeatability	±0.07 mm (±0.003")	±0.07 mm (±0.003")
Maximum Motion Range	S-Axis (Turning)	±180°
	L-Axis (Lower Arm)	+135°/-90°
	U-Axis (Upper Arm)	+251°/-170°
	R-Axis (Upper Arm Twist)	±360°
	B-Axis (Pitch/Yaw)	±125°
Maximum Speed	S-Axis	180°/s
	L-Axis	178°/s
	U-Axis	178°/s
	R-Axis	250°/s
	T-Axis	360°/s
Approximate Mass	550 kg (1,212.8 lbs)	570 kg (1,256.9 lbs)
Power Consumption	4 kVA	4 kVA
Allowable Moment	R-Axis	216 N·m
	B-Axis	216 N·m
	T-Axis	147 N·m
Allowable Moment of Inertia	R-Axis	28 kg·m ²
	B-Axis	28 kg·m ²
	T-Axis	11 kg·m ²
Internal User I/O Cable	23 conductors + ground	23 conductors + ground
Internal User Air Line	3/8" pipe tap connection	3/8" pipe tap connection

DX100 CONTROLLER SPECIFICATIONS**	
Dimensions (mm)	800 (w) x 1,000 (h) x 650 (d) (31.5" x 39.4" x 25.6")
Approximate Mass	250 kg max. (551.3 lbs)
Cooling System	Indirect cooling
Ambient Temperature	During operation: 0° to 45° C (32° to 113° F) During transit and storage: -10° to 60° C (14° to 140° F)
Relative Humidity	90% max. non-condensing
Primary Power Requirements	3-phase, 240/480/575 VAC at 50/60 Hz
Digital I/O	Standard I/O: 40 inputs/40 outputs consisting of 16 system inputs/16 system outputs, 24 user inputs/24 user outputs NPN-Standard PNP-Optional 32 Transistor Outputs; 8 Relay Outputs Max. I/O (optional): 2,048 inputs and 2,048 outputs
Position Feedback	By absolute encoder
Program Memory	JOB: 200,000 steps, 10,000 instructions CJO Ladder Standard: 15,000 steps Expanded: 20,000 steps
Pendant Dim. (mm)	169 (w) x 314.5 (h) x 50 (d) (6.7" x 12.4" x 2")
Pendant Weight	.996 kg (2.2 lbs)
Interface	One Compact Flash slot, One USB port (1.1)
Pendant Playback Buttons	Teach/Play/Remote Keyswitch selector Servo On, Start, Hold, and Emergency Stop Buttons
Programming Language	INFORM III, menu-driven programming
Maintenance Functions	Displays troubleshooting for alarms, predicts reducer wear
Number of Robots/Axes	Up to 8 robots, 72 axes
Multi Tasking	Up to 16 concurrent jobs, 4 system jobs
Fieldbus	DeviceNet Master/Slave, AB RIO, Profibus, Interbus-S, M-Net, CC Link, EtherNet/IP/Slave
Ethernet	10 Base T/100 Base TX
Safety	Dual-channel Emergency Stop Pushbuttons, 3-position Enable Switch, Manual Brake Release Meets ANSI/RIA R15.06-1998, ANSI/ISO 10218-1-2007 and CSA Z434-03

**See DX100 Controller data sheet (DS-39) for complete specifications.

www.motoman.com

MOTOMAN ROBOTICS
100 AUTOMATION WAY, MAMMISBURG, OHIO 45342
TEL: 937.847.6200 • FAX: 937.847.6277

YASKAWA
MOTOMAN ROBOTICS

TECHNICAL SPECIFICATIONS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE
DS-402-01 ©2017 MOTOMAN INC. JANUARY 2017

MOTOMAN IS A REGISTERED TRADEMARK
YASKAWA IS A REGISTERED TRADEMARK OF YASKAWA
ALL OTHER MARKS ARE THE TRADEMARKS AND REGISTERED TRADEMARKS OF YASKAWA AMERICA, INC.

Figura 35* - Ficha técnica do robô de maquinação (parte 2).

Anexo Q – Comparação dos ensaios ao protótipo com a simulação computacional:

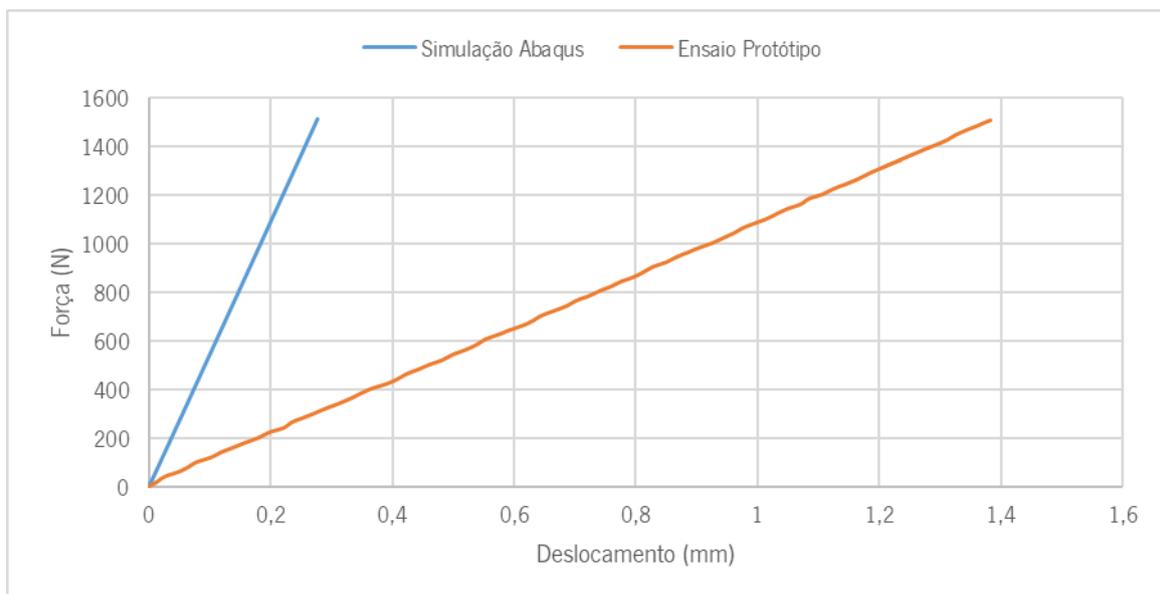


Figura 36* - Gráfico de força/deslocamento para comparação dos valores obtidos experimentalmente e através da simulação.

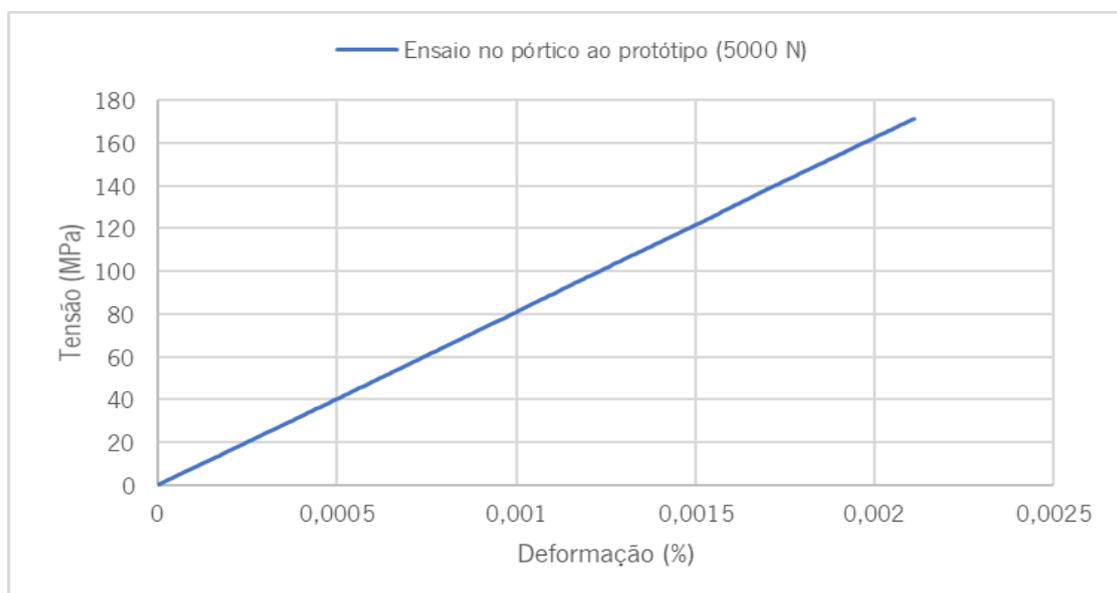


Figura 37* - Gráfico de tensão/deformação resultante da aplicação de 5000N no centro da prancha protótipo.

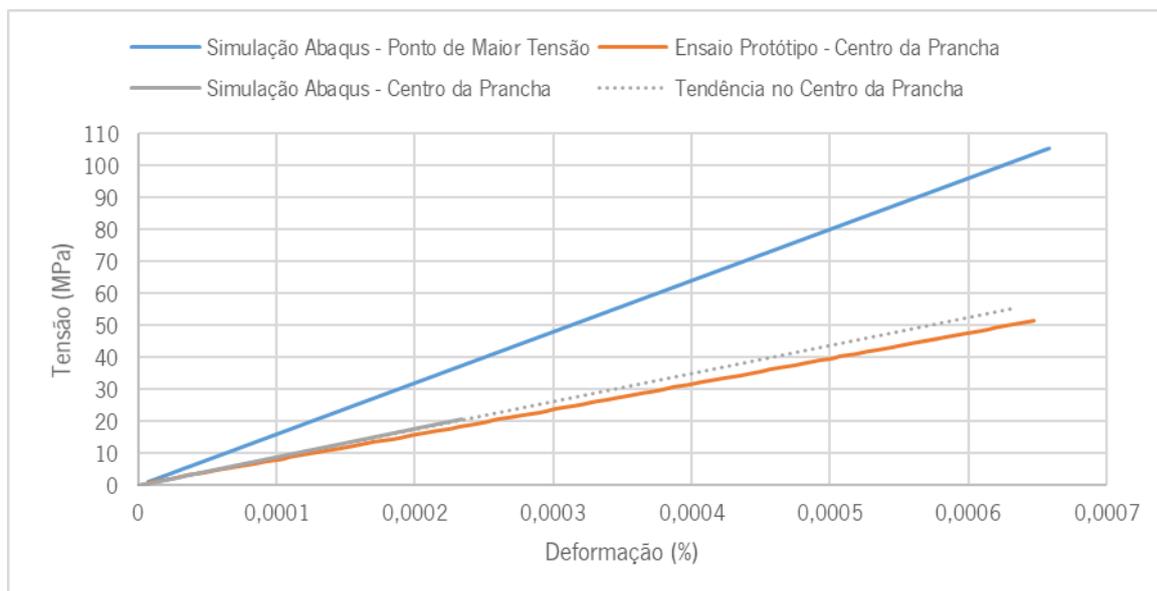


Figura 38* - Curvas de tensão/deformação retiradas em dois pontos distintos da prancha na simulação estrutural que podem ser comparados com o ponto de maior deslocamento imposto na prancha protótipo (centro da prancha.)

Anexo R – Cálculos analíticos para verificação dos danos causados no laminado:

O objetivo principal desta secção, é determinar, de forma analítica, se existe falha crítica na prancha com a aplicação de um peso na sua superfície. O peso a ter em conta é o proposto nos requisitos e tem o valor de 750 N. Os cálculos efetuados cobrem várias áreas da engenharia de compósitos nomeadamente a micromecânica da lâmina e a macro mecânica da lâmina recorrendo à teoria clássica dos laminados.

Devido à escassez de tempo para executar os ensaios mecânicos, essenciais para a obtenção dos valores da tensão de rotura, esta avaliação encontra-se incompleta (fica a faltar o cálculo pelo critério de *Tsai-Hill*) pelo que uma sugestão para trabalhos futuros será completar esta avaliação.

Para dar início ao processo analítico é necessário obter os dados relativos às matérias primas essenciais para todos os cálculos. Assim sendo na Tabela 1* estão presentes os valores comuns para os materiais utilizados (que podem ser encontrados em tabelas técnicas e/ou fichas técnicas dos materiais) bem como mencionados os resultados obtidos na fase inicial deste processo (presentes a cor azul na Tabela 1*).

Tabela 1* - Propriedades dos materiais presente no laminado selecionado.

Fibra	E (GPa)	v	G (Gpa)	Densidade	E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	G ₁₂ (GPa)	
Madeira (12% humidade)	8,77	0,4	3,13	0,074	X	X	X	
Fibra de Carbono	350	0,2	145,8	1,77	X	X	X	
Epoxi	3,85	0,3	3,37	1,2	X	X	X	
Epoxi + Fibra de Carbono	X	0,28	0,0125	X	1,54	211,5	9,47	8,14

Pela Equação 1*, é possível converter o volume considerado num teor mássico de fibras, w_f .

$$w_f = \frac{\rho_f \cdot v_f}{\rho_f \cdot v_f + \rho_p (1 - v_f)} \quad (\text{Equação 1*})$$

$$= \frac{1770 \times 0.6}{1770 \times 0.6 + 1200 \times 0.4} = 0.689 \Leftrightarrow 68.9\%$$

De seguida são apresentados os cálculos efetuados para o preenchimento total da Tabela 1*. Neste momento são apresentados os cálculos referentes aos módulos de corte dos materiais utilizados para de seguida poder realizar os cálculos para as lâminas de epóxi reforçado com fibra de carbono.

- Cálculo do módulo de corte para o tecido de reforço utilizado (Equação 2*):

$$\begin{aligned} G_f &= \frac{E_f}{2(1+\nu_f)} && \text{(Equação 2*)} \\ &= \frac{350}{2 \times (1 + 0.2)} = 145.8 \text{ GPa} \end{aligned}$$

- Cálculo do módulo de corte para a resina de epóxi utilizada (Equação 3*):

$$\begin{aligned} G_p &= \frac{E_p}{2(1+\nu_p)} && \text{(Equação 3*)} \\ &= \frac{3.85}{2 \times (1 + 0.3)} = 3.37 \text{ GPa} \end{aligned}$$

- Cálculo do módulo de corte para a madeira utilizada (Equação 4*):

$$\begin{aligned} G_{Mad} &= \frac{E_{Mad}}{2(1+\nu_{Mad})} && \text{(Equação 4*)} \\ &= \frac{8.77}{2 \times (1 + 0.4)} = 3.13 \text{ GPa} \end{aligned}$$

A obtenção dos valores referentes às lâminas compostas por epóxi e fibra de carbono, foram obtidos recorrendo às seguintes equações.

- Cálculo do módulo de elasticidade na direção 0° (Equação 5*):

$$\begin{aligned} E_1 &= E_f \cdot \nu_f + E_p (1 - \nu_f) && \text{(Equação 5*)} \\ &= 350 \times 0.6 + 3.85 \times 0.4 = 211.54 \text{ GPa} \end{aligned}$$

- Cálculo do módulo de elasticidade na direção 90° (Equação 6*):

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{E_f \cdot E_p}{E_f(1-\nu_f) + E_p \cdot \nu_f} && \text{(Equação 6*)} \\ &= \frac{350 \times 385}{350 \times 0.4 + 3.85 \times 0.6} = 9.47 \text{ GPa} \end{aligned}$$

- Cálculo do coeficiente de poisson na direção 1 2 (Equação 7*):

$$\nu_{12} = \nu_f \cdot \nu_f + \nu_p (1 - \nu_f) \quad (\text{Equação 7*})$$

$$= 0.2 \times 0.6 + 0.4 \times 0.4 = 0.28$$

- Cálculo do coeficiente de poisson na direção 2 1 (Equação 8*):

$$\nu_{21} = \nu_{12} \cdot \frac{E_2}{E_1} \quad (\text{Equação 8*})$$

$$= 0.28 \times \frac{9.47}{211.54} = 0.0125$$

- Cálculo do módulo de elasticidade ao corte na direção 1 2 (Equação 9*):

$$G_{12} = \frac{G_f \cdot G_p}{G_f(1 - \nu_f) + G_p \cdot \nu_f} \quad (\text{Equação 9*})$$

$$= \frac{145.8 \times 3.37}{145.8 \times 0.4 + 3.37 \times 0.6} = 8.14 \text{ GPa}$$

- Cálculo da densidade da mistura de epóxi reforçado com fibra de carbono (Equação 10):

$$d_{mistura} = d_f \cdot \nu_f + d_p (1 - \nu_f) \quad (\text{Equação 10*})$$

$$= 1.77 \times 0.6 + 1.2 \times 0.4 = 1.54 \text{ GPa}$$

Estes cálculos efetuados até ao momento dizem respeito à micromecânica da lâmina e são importantes na medida em que considera as propriedades dos materiais antes do processamento para a obtenção dos valores teóricos dos mesmos materiais após a sua mistura (mistura de reforços e matrizes).

Após o preenchimento da Tabela 1*, é possível calcular a matriz rigidez correspondente para cada lâmina envolvida no laminado presente na Figura 39*.

Carbono 0°
Carbono 0°
Madeira 2mm
Carbono -45°/45°
Carbono -45°/45°
Carbono 0°/90°
Madeira 1mm
Carbono 0°/90°
Carbono -45°/45°
Carbono -45°/45°
Madeira 2mm
Carbono 0°
Carbono 0°

Figura 39* - Laminado selecionado.

Relativamente às lâminas constituídas por madeira, deve ser notado que a matriz rigidez é a mesma independentemente da posição da lâmina bem como da sua espessura. Também não foi considerada a pequena absorção de resina promovida pela madeira durante o processamento. De notar ainda que se considerou a madeira como material isotrópico (apesar de não ser concordante com a realidade). Assim sendo vem que:

- Matriz rigidez das lâminas de madeira (Equação 11*):

$$[Q_{Mad}] = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{E \cdot \nu}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{E \cdot \nu}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} GPa \quad \text{(Equação 11*)}$$

$$= [Q_{Mad}] = \begin{bmatrix} \frac{8.77}{1-0.4^2} & \frac{8.77 \cdot 0.4}{1-0.4^2} & 0 \\ \frac{8.77 \cdot 0.4}{1-0.4^2} & \frac{8.77}{1-0.4^2} & 0 \\ 0 & 0 & 3.13 \end{bmatrix} = [Q_{Mad}] = \begin{bmatrix} 10.44 & 4.17 & 0 \\ 4.17 & 10.44 & 0 \\ 0 & 0 & 3.13 \end{bmatrix} GPa$$

De seguida foi calculada a matriz rigidez para as lâminas de epóxi reforçado com fibra de carbono unidirecional e de fibra de carbono em tecido tafetá.

- Matriz rigidez das lâminas de epóxi reforçado com fibra de carbono unidirecional (Equação 12*):

$$[Q_{FC}^0] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12} \cdot \nu_{21}} & \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1-\nu_{12} \cdot \nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1-\nu_{12} \cdot \nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12} \cdot \nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} GPa \dots \dots \dots \text{(Equação 12*)}$$

$$[Q_{FC}^0] = \begin{bmatrix} 211.54 & 0.28 \times 9.47 & 0 \\ \frac{1-0.28 \times 0.0125}{0.28 \times 9.47} & \frac{1-0.28 \times 0.0125}{9.47} & 0 \\ \frac{1-0.28 \times 0.0125}{0} & \frac{1-0.28 \times 0.0125}{0} & 8.14 \end{bmatrix} GPa$$

$$[Q_{FC}^0] = \begin{bmatrix} 212.3 & 2.7 & 0 \\ 2.7 & 9.5 & 0 \\ 0 & 0 & 8.14 \end{bmatrix} GPa$$

Para a obtenção da matriz rigidez das lâminas reforçadas com carbono equilibrado (tecido tafetá) foi necessário recalcular o módulo de elasticidade bem como o coeficiente de poisson, o módulo de corte permanece o mesmo que foi calculado pela Equação 9*.

- $E_1 = E_2 = E = 0.5 \cdot E_f \cdot v_f + E_p(1 - v_f) = 0.5 \times 350 \times 0.6 + 3.85 \times 0.4 = 106.54 \text{ GPa}$
- $v_{12} = v_{21} = v = 0.5 \cdot v_f \cdot v_f + v_p(1 - v_f) = 0.5 \times 0.2 \times 0.6 + 0.3 \times 0.4 = 0.18$

O 0.5 presente nas equações anteriores é usado uma vez que metade das fibras estão a “0°” e outra metade a “90°”, ou então a +45° e -45° (consoante a lâmina em questão).

Para as lâminas com o tecido a 0°/90° vem:

- Matriz rigidez das lâminas de epóxi reforçado com fibra de carbono a 0°/90° (resulta da Equação 12*):

$$[Q_{FC}^{0/90}] = \begin{bmatrix} \frac{106.54}{1 - 0.18 \times 0.18} & \frac{0.18 \times 106.54}{1 - 0.28 \times 0.0125} & 0 \\ 0.18 \times 106.54 & \frac{106.54}{1 - 0.18 \times 0.18} & 0 \\ 0 & 0 & 8.14 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$

$$= [Q_{FC}^{0/90}] = \begin{bmatrix} 110.1 & 19.82 & 0 \\ 19.82 & 110.1 & 0 \\ 0 & 0 & 8.14 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$

Para obter a matriz rigidez referente às lâminas com tecido tafetá a ±45°, é necessário utilizar a matriz obtida para os 0°/90°, e convertê-la girando o eixo xy em 45°. A modificação do eixo pode ser efetuada por equações analíticas ou então por cálculos matriciais. Nesta dissertação foi optado por se usar o cálculo matricial.

- Matriz rigidez das lâminas de epóxi reforçado com fibra de carbono a ±45° (Equação 13*):

$$[Q_{FC}^{\pm 45}] = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \quad (\text{Equação 13*})$$

Onde:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta^2 & \sin \theta^2 & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin \theta^2 & \cos \theta^2 & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ -\sin \theta \cdot \cos \theta & \sin \theta \cdot \cos \theta & \cos \theta^2 - \sin \theta^2 \end{bmatrix}$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta^2 & \sin \theta^2 & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin \theta^2 & \cos \theta^2 & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin \theta \cdot \cos \theta & -\sin \theta \cdot \cos \theta & \cos \theta^2 - \sin \theta^2 \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}; [R]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Pelo que para a matriz rigidez vem que:

$$[Q_{FC}^{\pm 45}] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin \theta \cdot \cos \theta & -\sin \theta \cdot \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 110.1 & 19.82 & 0 \\ 19.82 & 110.1 & 0 \\ 0 & 0 & 8.14 \end{bmatrix}$$

$$\cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ -\sin \theta \cdot \cos \theta & \sin \theta \cdot \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

$$\cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 73.1 & 56.8 & 0 \\ 56.8 & 73.1 & 0 \\ 0 & 0 & 45.14 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$

Encontradas as matrizes de rigidez correspondentes às lâminas do laminado selecionado, é possível avaliar se as condições de carregamento impostas à prancha promovem deformações tais que possam danificar o laminado. Para tal recorre-se à teoria clássica dos laminados (CLT) uma vez que promove uma avaliação macro mecânica de todo o laminado, isto é, prevê a relação entre os carregamentos impostos ao compósito e a sua própria resposta às mesmas solicitações. De notar que o CLT considera o laminado uma placa fina sujeita apenas a esforços no plano xy com forças e deformações apenas nesse plano, ou seja, considera válida a teoria de Kirchhoff para placas finas.

Assim sendo, para poder progredir no trabalho, devem ser calculadas as matrizes [A], [B] e [D], que correspondem à matriz de rigidez extensional do laminado, à matriz rigidez extensional à flexão do laminado e à matriz de rigidez à flexão do laminado, respetivamente. As expressões analíticas das três matrizes estão presentes nas Equações 14*, 15* e 16*.

$$[A]_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1})] \quad \text{(Equação 14*)}$$

$$[B]_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2)] \quad \text{(Equação 15*)}$$

$$[D]_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)] \quad \text{(Equação 16*)}$$

Como o laminado em questão é um laminado simétrico a matriz [B] toma o valor de zero uma vez que parte inicial do laminado anula a parte inferior. Na Figura 40* é possível observar o laminado marcado com as distâncias em z ao eixo central. Para ser possível obter os valores correspondentes de todos os z's as Equações 17* e 18* permitem o cálculo das espessuras das lâminas constituídas por matriz e reforço.

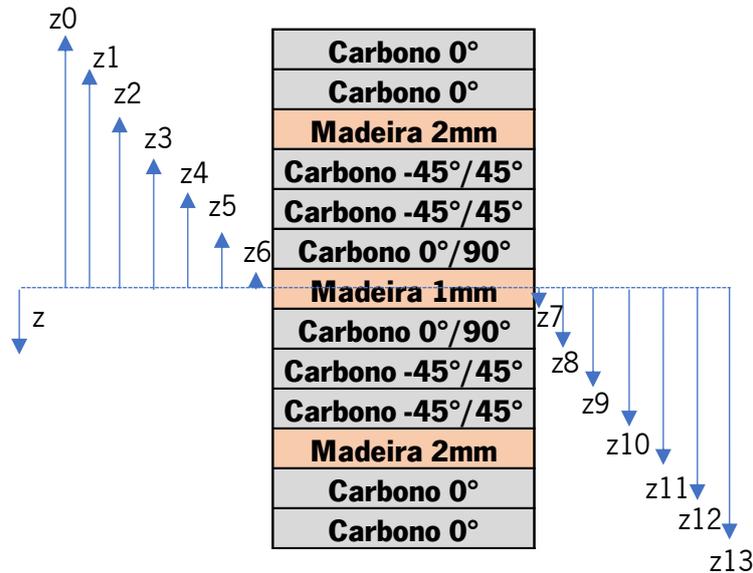


Figura 40* - Laminado e correspondentes z's (distância de cada lâmina ao centro do laminado).

- Cálculo da espessura da lâmina de epóxi reforçado com fibra de carbono em tecido tafetá (Equação 17*):

$$t_{FC\ Tafet\acute{a}} = G_f \left[\frac{1}{\rho_f} + \frac{1-w_f}{\rho_p \cdot w_f} \right] \quad (\text{Equação 17*})$$

$$= 195 \times \left[\frac{1}{1770} + \frac{1 - 0.689}{1200 \times 0.689} \right] = 0.18 \text{ mm}$$

- Cálculo da espessura da lâmina de epóxi reforçado com fibra de carbono unidirecional (Equação 18*):

$$t_{FC\ Unidirecional} = G_f \left[\frac{1}{\rho_f} + \frac{1-w_f}{\rho_p \cdot w_f} \right] \quad (\text{Equação 18*})$$

$$= 350 \times \left[\frac{1}{1770} + \frac{1 - 0.689}{1200 \times 0.689} \right] = 0.33 \text{ mm}$$

De seguida são apresentados os valores correspondentes aos z 's presentes na Figura 2*, bem como os valores necessários para o cálculo das matrizes [A] e [D] a substituir na equação das mesmas.

$$z_0 = -3.7 \text{ mm}$$

$$z_5 = -0.68 \text{ mm}$$

$$z_{10} = 1.04 \text{ mm}$$

$$z_1 = -3.37 \text{ mm}$$

$$z_6 = -0.5 \text{ mm}$$

$$z_{11} = 3.04 \text{ mm}$$

$$z_2 = -3.04 \text{ mm}$$

$$z_7 = 0.5 \text{ mm}$$

$$z_{12} = 3.37 \text{ mm}$$

$$z_3 = -1.04 \text{ mm}$$

$$z_8 = 0.68 \text{ mm}$$

$$z_{13} = 3.7 \text{ mm}$$

$$z_4 = -0.86 \text{ mm}$$

$$z_9 = 0.86 \text{ mm}$$

$$Z_1 - z_0 = 0.33 \text{ mm}$$

$$Z_6 - z_5 = 0.18 \text{ mm}$$

$$Z_{11} - z_{10} = 2 \text{ mm}$$

$$Z_2 - z_1 = 0.33 \text{ mm}$$

$$Z_7 - z_6 = 1 \text{ mm}$$

$$Z_{12} - z_{11} = 0.33 \text{ mm}$$

$$Z_3 - z_2 = 2 \text{ mm}$$

$$Z_8 - z_7 = 0.18 \text{ mm}$$

$$Z_{13} - z_{12} = 0.33 \text{ mm}$$

$$Z_4 - z_3 = 0.18 \text{ mm}$$

$$Z_9 - z_8 = 0.18 \text{ mm}$$

$$Z_5 - z_4 = 0.18 \text{ mm}$$

$$Z_{10} - z_9 = 0.18 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
Z_1^3 - Z_0^3 &= 12.4 \text{ mm}^3 & Z_6^3 - Z_5^3 &= 0.19 \text{ mm}^3 & Z_{10}^3 - Z_9^3 &= 0.49 \text{ mm}^3 \\
Z_2^3 - Z_1^3 &= 10.2 \text{ mm}^3 & Z_7^3 - Z_6^3 &= 0.25 \text{ mm}^3 & Z_{11}^3 - Z_{10}^3 &= 26.97 \text{ mm}^3 \\
Z_3^3 - Z_2^3 &= 26.97 \text{ mm}^3 & Z_8^3 - Z_7^3 &= 0.19 \text{ mm}^3 & Z_{12}^3 - Z_{11}^3 &= 10.2 \text{ mm}^3 \\
Z_4^3 - Z_3^3 &= 0.49 \text{ mm}^3 & Z_9^3 - Z_8^3 &= 0.32 \text{ mm}^3 & Z_{13}^3 - Z_{12}^3 &= 12.4 \text{ mm}^3 \\
Z_5^3 - Z_4^3 &= 0.32 \text{ mm}^3 & & & &
\end{aligned}$$

Para obter a matriz [A] vem que: $[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} N/m$

Pela Equação 14* resulta que:

- $A_{11} = (212.3 \times 0.33 + 212.3 \times 0.33 + 10.44 \times 2 + 73.1 \times 0.18 + 73.1 \times 0.18 + 110.1 \times 0.18) \times 2 + 10.44 = 424.7 N/m$
- $A_{12} = (2.7 \times 0.33 + 2.7 \times 0.33 + 4.17 \times 2 + 56.8 \times 0.18 + 56.8 \times 0.18 + 19.82 \times 0.18) \times 2 + 4.17 = 72.4 N/m$
- $A_{16} = (0 \times 0.33 + 0 \times 0.33 + 0 \times 2 + 0 \times 0.18 + 0 \times 0.18 + 0 \times 0.18) \times 2 + 0 = 0 N/m$
- $A_{22} = (9.5 \times 0.33 + 9.5 \times 0.33 + 10.44 \times 2 + 73.5 \times 0.18 + 73.5 \times 0.18 + 110.1 \times 0.18) \times 2 + 10.44 = 157.3 N/m$
- $A_{26} = (0 \times 0.33 + 0 \times 0.33 + 0 \times 2 + 0 \times 0.18 + 0 \times 0.18 + 0 \times 0.18) \times 2 + 0 = 0 N/m$
- $A_{66} = (8.14 \times 0.33 + 8.14 \times 0.33 + 3.13 \times 2 + 45.14 \times 0.18 + 45.14 \times 0.18 + 8.14 \times 0.18) \times 2 + 3.13 = 61.8 N/m$

Logo:

$$[A] = \begin{bmatrix} 424.7 & 72.4 & 0 \\ 72.4 & 157.3 & 0 \\ 0 & 0 & 61.8 \end{bmatrix} N/m$$

Já para a matriz [D] vem: $[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} N/m$

Onde pela Equação 16* resulta que:

- $D_{11} = \frac{1}{3} [(212.3 \times 12.4 + 212.3 \times 10.2 + 10.44 \times 26.97 + 73.1 \times 0.49 + 73.1 \times 0.32 + 110.1 \times 0.19) \times 2 + 10.44 \times 0.25] = 3440.65 N/m$

- $D_{12} = \frac{1}{3}[(2.7 \times 12.4 + 2.7 \times 10.2 + 4.17 \times 26.97 + 56.8 \times 0.49 + 56.8 \times 0.32 + 19.82 \times 0.19) \times 2 + 4.17 \times 0.25] = 149.19 N/m$
- $D_{16} = \frac{1}{3}[(0 \times 12.4 + 0 \times 10.2 + 0 \times 26.97 + 0 \times 0.49 + 0 \times 0.32 + 0 \times 0.19) \times 2 + 0 \times 0.25] = 0 N/m$
- $D_{22} = \frac{1}{3}[(9.5 \times 12.4 + 9.5 \times 10.2 + 10.44 \times 26.97 + 73.5 \times 0.49 + 73.5 \times 0.32 + 110.1 \times 0.19) \times 2 + 10.44 \times 0.25] = 385.35 N/m$
- $D_{26} = \frac{1}{3}[(0 \times 12.4 + 0 \times 10.2 + 0 \times 26.97 + 0 \times 0.49 + 0 \times 0.32 + 0 \times 0.19) \times 2 + 0 \times 0.25] = 0 N/m$
- $D_{66} = \frac{1}{3}[(8.14 \times 12.4 + 8.14 \times 10.2 + 3.13 \times 26.97 + 45.14 \times 0.49 + 45.14 \times 0.32 + 8.14 \times 0.19) \times 2 + 3.13 \times 0.25] = 204.59 N/m$

Logo:

$$[D] = \begin{bmatrix} 3440.65 & 149.19 & 0 \\ 149.19 & 385.35 & 0 \\ 0 & 0 & 204.59 \end{bmatrix} N/m$$

Neste momento é necessário ter em conta o esforço a aplicar à prancha para ser possível prever o comportamento do laminado à solicitação efetuada. Assim sendo a situação a avaliar corresponde à que está presente na Figura 41*.

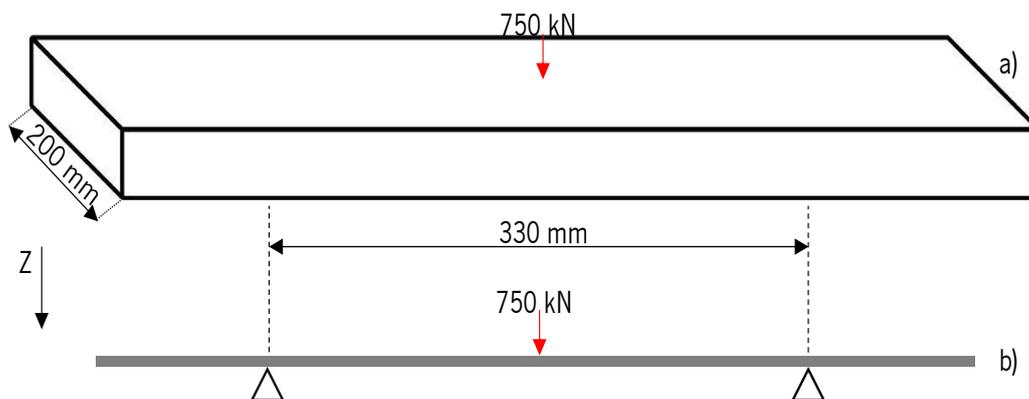


Figura 41* - Modelo de carregamento da prancha de skateboard.

Pela teoria das placas de Kirchhoff, é possível converter o modelo apresentado na Figura 41*, numa placa cujas forças aplicadas são fixadas num plano xy, isto é, não considera a espessura do material (teoria das placas finas). Na Figura 42*, está representado um esboço da placa bem como as forças genéricas aplicadas na mesma.

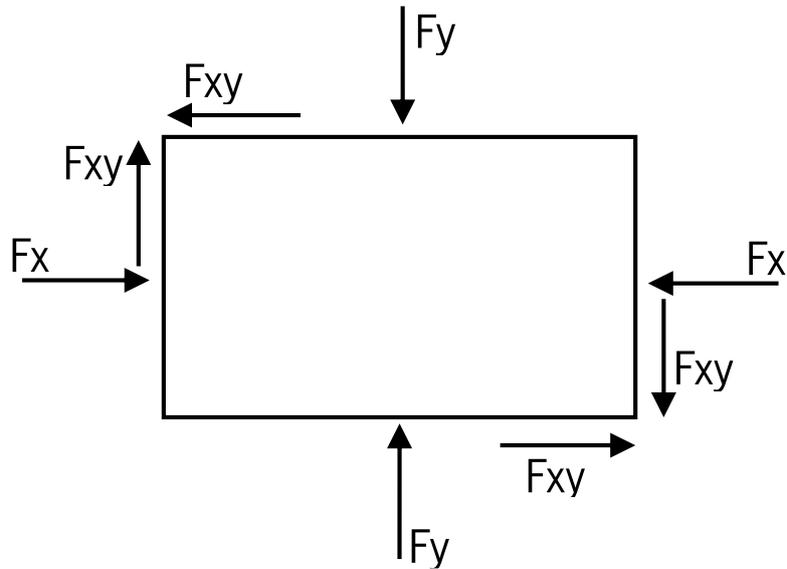


Figura 42*- Forças aplicadas na placa.

No que diz respeito aos esforços de corte (F_{xy}), é possível afirmar que eles são quase nulos, pelo que podem ser desconsiderados, tal como acontece para as forças em y . Assim sendo, as forças e os momentos distribuídos ao longo da placa ficam:

- $N_x = -\frac{750}{0.2} = -3750 \text{ N/m}$
- $N_y = 0 \text{ N/m}$
- $N_{xy} = 0 \text{ N/m}$
- $M_x = -\frac{750 \cdot 0.165}{0.2} = -618.8 \text{ N}$
- $M_y = 0 \text{ N}$
- $M_{xy} = 0 \text{ N}$

Tendo já calculado as matrizes [A], [B] e [D] e também as forças distribuídas e os momentos existentes na placa, é possível encontrar os valores das deformações (ε^0) e das curvaturas (k) presentes na superfície central do laminado, originadas pelo carregamento imposto (Equação 21*). A partir desses valores calculados é possível calcular as deformações sentidas pelo laminado em qualquer ponto da sua espessura (os pontos mais críticos são nas fronteiras entre as lâminas pelo que devem ser esses pontos os locais de maior interesse para obter essas informações). Através das deformações em cada ponto, é necessário obter as tensões nesses mesmos pontos (através da multiplicação do vetor de deformação pela matriz rigidez correspondente à lâmina em questão) e por último realizar o critério de Tsai-Hill para obter informação acerca do dano causado em cada ponto do laminado (que não será realizado nesta dissertação por esta não contemplar os ensaios para aquisição das tensões de rotura dos materiais utilizados no laminado).

Assim sendo tem-se que:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} A & B \\ B & D \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{bmatrix} \Leftrightarrow \quad \text{(Equação 19*)}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} A^{-1} & 0 \\ 0 & D^{-1} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad \text{(Equação 20*)}$$

$$\Leftrightarrow [\varepsilon^0] = [A]^{-1}[N] + 0 \wedge [k] = 0 + [D]^{-1}[M] \quad \text{(Equação 21*)}$$

De notar que uma vez encontradas as matrizes [A] e [D], é possível obter as suas inversas, $[A]^{-1}$ e $[D]^{-1}$, cujos valores são:

$$[A]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.00256 & -0.001176 & 0 \\ -0.001176 & 0.0069 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0162 \end{bmatrix}$$

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.000296 & -0.000114 & 0 \\ -0.000114 & 0.002639 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0049 \end{bmatrix}$$

Da Equação 21* resulta que:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00256 & -0.001176 & 0 \\ -0.001176 & 0.0069 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0162 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} \wedge$$

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000296 & -0.000114 & 0 \\ -0.000114 & 0.002639 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0049 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix}$$

Resultando nos valores gerais de deformação e curvatura para a superfície média do laminado:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x^0 = 0.00256 \cdot (-3750) = -9.6 \\ \varepsilon_y^0 = -0.001176 \cdot (-3750) = 4.41 \\ \gamma_{xy}^0 = 0 \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} k_x = 0.000296 \cdot (-618.8) = -0.18 \text{ 1/mm} \\ k_y = -0.000114 \cdot (-618.8) = 0.07 \text{ 1/mm} \\ k_{xy} = 0 \text{ 1/mm} \end{array} \right.$$

Neste momento é possível encontrar a deformação em qualquer ponto do laminado (ε^x , ε^y e γ^{xy}) tendo em atenção os z's calculados anteriormente uma vez que pela Equação 22* apenas é necessário substituir os valores de z para obter as deformações no ponto referente ao z utilizado.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{(Equação 22*)}$$

Após a obtenção das deformações locais podem ser calculadas as tensões nesses mesmos pontos através da Equação 23*.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \text{ MPa} \quad \text{(Equação 23*)}$$

Finalmente, para concluir a análise ao carregamento imposto no compósito deve ser realizado o critério de Tsai Hill (presente na Equação 24*). O critério é realizado lâmina a lâmina e o valor obtido deve ser inferior a 1 de modo a que não haja dano nas diversas lâminas, caso o valor obtido no cálculo exceda 1 existe quebra da lâmina referente a esse cálculo e falha estrutural no laminado. De notar que para as camadas a 0° e a $0^\circ/90^\circ$ o valor resultante da Equação 23* pode ser introduzido na Equação 24*, onde

σ_x corresponde a σ_1 , σ_y corresponde a σ_2 e τ_{xy} corresponde a τ_{12} . Para as restantes lâminas o valor obtido na Equação 23 deve ser multiplicado pela matriz transformação [T] e substituir o valor de θ pelo valor do ângulo existente em determinada lâmina, como mostra a Equação 25*.

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\delta^2} \quad (\text{Equação 24*})$$

Na Equação 24*, os valores de X, Y e δ correspondem às tensões de rotura das lâminas na direção de x, na direção de y e ao corte, respetivamente.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \text{ MPa} \quad (\text{Equação 25*})$$

A título de exemplo (embora inacabado) para a camada 13, constituída por epóxi reforçado com fibra de carbono unidirecional a 0° , cujo valor de z é igual a 3.7 mm vem:

- $\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9.6 \\ 4.41 \\ 0 \end{bmatrix} + 3.7 \begin{bmatrix} -0.18 \\ 0.07 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10.3 \\ 4.67 \\ 0 \end{bmatrix}$
- $\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 212.3 & 2.7 & 0 \\ 2.7 & 9.5 & 0 \\ 0 & 0 & 8.14 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -10.3 \\ 4.67 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2174.08 \\ 16.56 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ MPa}$

Neste momento introduzir-se-ia os valores correspondentes na Equação 24* e de acordo com o resultado obtido teríamos informação acerca do dano causado no laminado.