

Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta

Nuno Miguel Bastos Gomes de Almeida

Relatório de Dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. José Luís Soares Esteves



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2012

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer de uma forma sucinta a todas as pessoas ou instituições que participaram direta ou indiretamente na execução deste trabalho:

- Às pessoas que participaram direta e ativamente na elaboração deste trabalho: o meu orientador e Prof. José Luís Soares Esteves, que com a sua simpatia e descontração permitiu sempre um aberto diálogo e discussão dos assuntos e Tânia Estêvão que possibilitou que todo este trabalho prático e teórico desenvolvido decorressem da melhor forma possível.
- Às instituições: INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial) mais especificamente CEMACOM (Unidade de Materiais Compósitos), DEMec (Departamento de Engenharia Mecânica) mais concretamente o laboratório de metalografia, CEMUP (Centro de Materiais da Universidade do Porto) e DEQ (Departamento de Engenharia Química).
- À paciência do Paulo Nóvoa pela ajuda que deu nos ensaios mecânicos.
- Às pessoas do CEMACOM que me tentaram ajudar e deram ouvidos em momentos cruciais da tese, especialmente: Paulo Nóvoa, Joana Vieira e Gilmar Pereira.
- Ao Zé pelo companheirismo e momentos divertidos que propiciou no INEGI, especialmente nos dias mais longos de trabalho.
- Ao Rui e Ricardo pela hora de almoço e de lanche onde estive sempre presente muito convívio e descontração.

E em especial, com muito sentimento:

- À minha namorada, que em todos os momentos consegue depositar em mim toda a força e confiança.
- Aos meus irmãos por estarem sempre disponíveis para falar e ajudar, com toda a simpatia e divertimento que está sempre presente quando estamos juntos.
- Aos meus pais por todo o esforço que fizeram para me transmitirem os mais nobres valores e por serem a minha referência como pessoas e trabalhadores.

Obrigado.

RESUMO

Atualmente o mundo enfrenta uma grande mudança ambiental e económica. Para contrariar esta mudança que se apresenta com resultados adversos, têm de se tomar novos rumos, como por exemplo: adotar novos materiais que apresentem custos de aquisição e processos de fabrico mais baratos, que abranjam uma larga escala de aplicações e produtos e que sejam biodegradáveis e/ou recicláveis.

Neste trabalho foram estudadas estruturalmente as fibras de juta e de linho como reforço de matrizes poliméricas de epóxido e PLA, respetivamente. Foram feitos ensaios mecânicos de tração (BS EN ISO 527) e flexão em três pontos (ASTM D790-03) para estudo do comportamento destes, segundo diferentes tipos de tratamentos e/ou processos de moldação.

Foi feito o estudo da perda de humidade e/ou constituintes ao longo da temperatura para se tentar definir uma temperatura ótima para a secagem da fibra de juta. Para tal fizeram-se ensaios de tração a tiras de fibra com secagem e sem secagem e análises químicas: análise termogravimétrica (TGA) com DTA (Derivada da análise termogravimétrica) e uma DSC (Calorimetria diferencial de varrimento).

Para se complementar o estudo através de ensaios destrutivos (tração e flexão em três pontos) foi feito um estudo mais aprofundado da superfície de fratura de alguns provetes através de MEV (Microscopia Eletrónica por Varrimento).

Verificou-se a importância da secagem da fibra de juta. O compósito final apresentou melhores resultados quando moldado com fibra de juta seca (menor percentagem de humidade).

Desenvolveu-se uma máquina para produção de pré-impregnados. Esta foi desenhada tridimensionalmente e projetada mecanicamente.

Foi feito um estudo extenso e aprofundado das características da máquina para se tentarem eliminar as variáveis do sistema que pudessem por em causa o bom fabrico de pré-impregnados.

O projeto desta máquina teve em consideração um reaproveitamento de peças incentivado por uma contenção de custos. Foram reaproveitadas algumas peças de uma máquina anterior mal projetada, originando assim uma lista de peças completa com o estado das que se usarão na máquina nova (peça nova, peça reaproveitada e peça reaproveitada mas alterada).

PALAVRAS-CHAVE

Fibras de Juta, fibras de Linho, Epóxido, PLA, materiais compósitos, pré-impregnados, ensaios mecânicos, moldação manual, moldação por compressão a quente, TGA, DTA, DSC, MEV, máquina pré-impregnação.

ABSTRACT

Nowadays the world faces a huge economic and environmental change. To counteract this change that presents with adverse outcomes, new directions has to be taken, such as: adopting new materials that have less acquisition costs and cheaper manufacturing processes, covering a wide range of applications and products that are biodegradable and and/or recyclable.

In this work were studied the structural fibers of jute and flax as reinforcement of polymeric matrices of epoxy and PLA, respectively. Tensile (BS EN ISO 527) and three point bending (ASTM D790-03) tests were made to study the behavior of these according to different types of treatments and/or molding processes.

Study was conducted on the loss of moisture and/or constituents over the temperature for attempting to set an optimum temperature for drying the jute fiber. To this end there have been made tensile tests to fiber strips with drying and without drying, and chemical analysis: thermogravimetric analysis (TGA) with DTA (Derived from thermal gravimetric analysis) and DSC (differential scanning calorimetry).

To complement the study through destructive tests (tensile and three point bending) was made a deeper study of the fracture surface of some samples using SEM (Scanning Electron Microscope).

It was observed the importance of drying the jute fiber. The final composite had better results when molded with dry jute fiber (lower moisture content).

It was developed a machine for the production of preregs. This was drawn three-dimensionally and mechanically designed.

It was conducted a thorough and extensive study of the characteristics and needs of the machine to try to eliminate the variables of the system that could jeopardize the proper manufacture of preregs.

The design of this machine took into account the reuse of parts encouraged by a cost containment. Were reused some parts of a previous machine designed poorly, thus creating a complete parts list with the status of the parts used in the new machine (part new, part recycled and reused number but changed).

KEYWORDS

Jute fibers, Flax fibers, Epoxy, PLA, composites, prepregs, mechanical tests, manual molding, hot compression molding, TGA, DTA, DSC, SEM, prepreg machine.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. MOTIVAÇÃO	3
3. OBJETIVOS	5
4. ESTADO DA ARTE.....	7
4.1. REFORÇOS	8
4.1.1. Fibras Sintéticas	10
4.1.1.1. Fibra de Vidro	10
4.1.1.2. Fibra de Carbono	13
4.1.1.3. Fibra Aramídica	14
4.1.2. Fibras Naturais	15
4.1.2.1. Introdução	15
4.1.2.2. Desvantagens das fibras naturais e processos para as combaterem.....	16
4.1.2.3. Organização biológica e estrutural das fibras naturais	19
4.1.2.4. Comparação das fibras naturais com o seu principal concorrente: fibra de vidro	23
4.1.2.5. Juta	25
4.1.2.6. Linho	32
4.2. INTERFACE	35
4.3. MATRIZES	37
4.3.1. Introdução	37
4.3.2. Comparação matrizes termoplásticas com matrizes termoendurecíveis.....	38
4.3.3. Biocompósitos e o PLA	40
4.3.4. Reciclagem.....	41
4.3.5. Resinas de epóxico.....	41
4.4. APLICAÇÕES E EVOLUÇÃO DOS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS	43
4.5. PROCESSOS DE FABRICO	46
4.5.1. Moldação Manual	46
4.5.2. Moldação por compressão a quente	47
4.5.3. Moldação em autoclave	48
4.6. PRÉ-IMPREGNADOS	50
4.6.1. Introdução	50
4.6.2. Processo de pré-impregnação.....	51

5. DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO AUTOMATIZADO DE PRÉ-IMPREGNAÇÃO DE FIBRAS NATURAIS	53
5.1. ABORDAGEM AO PROBLEMA	53
5.1.1. Estudo e apresentação do funcionamento atual da máquina	54
5.1.2. Detecção dos problemas	55
5.1.3. Apresentação de possíveis soluções, estudo e escolha da solução a adotar	56
5.2. DESCRIÇÃO DA CONCLUSÃO DO PROCESSO DE IMPREGNAÇÃO	58
5.3. AVALIAÇÃO E PROJETO DA MÁQUINA DE PREPREG	59
5.3.1. Avaliação da máquina: pormenores, principais alterações e reaproveitamento de equipamento	59
5.3.2. Projeto da máquina	60
5.3.2.1. Definição das características	60
5.3.2.2. Limpeza e cuidados da máquina	69
5.3.2.3. Avaliação do tempo de trabalho da resina epóxi SR121 + KTA21	70
5.4. EFEITO DA HUMIDADE NA PRODUÇÃO DE PRÉ-IMPREGNADOS	74
5.5. PROJETO FINAL DA MÁQUINA DE PREPREG	77
6. ESTUDO ESTRUTURAL	79
6.1. DADOS DAS RESINAS E FIBRAS NATURAIS	79
6.1.1. Resinas	79
6.1.2. Fibras	80
6.2. DADOS DOS COMPÓSITOS EM ANÁLISE	82
6.3. ETAPAS E PROCESSOS UTILIZADOS	84
6.3.1. Produção Pré-impregnados	84
6.3.2. Moldação Manual	85
6.3.3. Moldação Prensa Pratos Quentes	88
6.4. ENSAIOS MECÂNICOS	90
6.4.1. Tração	90
6.4.1.1. Norma, máquina e montagem	90
6.4.1.2. Apresentação resultados	91
6.4.1.3. Discussão dos resultados	102
6.4.2. Flexão	107
6.4.2.1. Norma, máquina e montagem	107
6.4.2.2. Apresentação dos resultados	108
6.4.2.3. Discussão dos resultados	119
6.5. ESTUDO QUÍMICO DA FIBRA ATRAVÉS DE TGA, DTA E DSC	120

6.5.1.	Introdução TGA (Análise Termogravimétrica), DTA (Derivada Análise Termogravimétrica) e DSC (Calorimetria Diferencial de Varrimento).....	120
6.5.2.	Análise dos dados obtidos por TGA, DTA e DSC	121
6.5.2.1.	TGA	122
6.5.2.2.	DTA	123
6.5.2.3.	DSC.....	123
6.5.3.	Apoio aos resultados das análises com testes de secagem diferentes	124
6.6.	ESTUDO SUPERFICIAL DO COMPÓSITO	128
6.6.1.	Introdução MEV (Microscopia Eletrônica por Varrimento).....	128
6.6.2.	Preparação da amostra	129
6.6.3.	Análise imagens obtidas por MEV	132
6.6.3.1.	Provete PLPR2.....	132
6.6.3.2.	Provete PL0S	134
6.6.3.3.	Provete PLA6.....	137
7.	Conclusões	139
8.	Trabalhos futuros	141
9.	Bibliografia	143
10.	Anexos	147
	ANEXO A: Nota de cálculo do sistema de transmissão de potência.....	147
	Corrente.....	147
	Rodas-dentadas e moto-redutor	150
	Esticador.....	154
	Chavetas	154
	ANEXO B: Nota de cálculo do sistema pneumático	157
	ANEXO C: Nota de cálculo dos rolos de matéria-prima.....	161
	ANEXO D: Ciclo de <i>set-up</i> e funcionamento.....	165
	ANEXO E: Complemento ao capítulo 5.3.2.2. – “Limpeza e cuidados da máquina”	167
	ANEXO F: Lista de peças e balanço do reaproveitamento conseguido	169
	ANEXO G: Vistas 3D do modelo desenhado em <i>SolidWorks</i>	175
	ANEXO H: Fichas técnicas das resinas utilizadas.....	179
	ANEXO I: Documento técnico das análises TGA, DTA e DSC	181

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 4.1 - Exemplo muito simplificado de um compósito. Do lado esquerdo, compósito reforçado unidireccionalmente e do lado direito, compósito reforçado bidireccionalmente. [6]	7
Fig. 4.2 - Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço (apoio ao fluxograma 1) [8].	9
Fig. 4.3 - Aspeto dos corpos de prova rompidos por impacto Charpy [13].	18
Fig. 4.4 - Hierarquia estrutural de uma fibra natural (Linho) [16].	21
Fig. 4.5 - Planta de juta em pormenor à esquerda, plantação de juta no meio e fibra de juta vista em microscopia eletrónica a 600x [17;29].	25
Fig. 4.6 - Diagrama da anatomia do caule da juta [2].	26
Fig. 4.7 - Semeio da juta do lado esquerdo, tratamento da juta no meio (arrancar ervas daninhas, etc.) e plantação de Juta numa fase avançada do crescimento no lado direito.	29
Fig. 4.8 - Maceração das fibras de juta em ambas as imagens.	29
Fig. 4.9 - Extração das fibras de juta em ambas as imagens.	29
Fig. 4.10 - Lavagem e secagem das fibras de juta em ambas as imagens.	30
Fig. 4.11 - Secção de corte do caule do linho [2].	32
Fig. 4.12 - Caule do linho do lado esquerdo e conjunto de fibras extraídas do floema do caule do lado direito [30].	32
Fig. 4.13 - Plantação de linho.	33
Fig. 4.14 - Esquema da moldação manual [35].	46
Fig. 4.15 - Esquema do processo de fabrico por compressão a quente.	47
Fig. 4.16 - Prensa de pratos quentes.	47
Fig. 4.17 - Representação esquemática da obtenção de um laminado através do processo de moldação em autoclave [4].	49
Fig. 4.18 - Autoclave.	49
Fig. 4.19 - Sistema de rolos usado para pré-impregnação de fibras naturais [31].	51
Fig. 5.1 - Imagem da máquina atualmente existente no INEGI.	53
Fig. 5.2 - Esquema da máquina atualmente existente no INEGI.	54
Fig. 5.3 - Fluxo do processo de fabrico da máquina existente no INEGI.	54
Fig. 5.4 - Transmissão feita a dois rolos com um moto-redutor e ausência de esticador para uma das transmissões.	55
Fig. 5.5 - Esquema da primeira hipótese de construção da máquina.	56
Fig. 5.6 - Esquema da segunda hipótese de construção da máquina.	56
Fig. 5.7 - Esquema da terceira hipótese de construção da máquina.	56
Fig. 5.8 - Esquema da quarta hipótese de construção da máquina.	57
Fig. 5.9 - Fluxo do processo de fabrico a adaptar na máquina existente no INEGI.	57
Fig. 5.10 - Representação das relações existentes na equação.	64
Fig. 5.11 - Imagem da amostra criada.	71
Fig. 5.12 - Esquema de configuração da máquina com secagem da fibra e pormenor construtivo do interior do forno.	75
Fig. 5.13 - Máquina de Prepreg final.	77
Fig. 5.14 - Máquina de Prepreg final.	77
Fig. 6.1 - Tecido de fibra de juta bidireccional testado neste trabalho.	80

Fig. 6.2 - Configuração do tecido produzido pela <i>Composites Evolution</i> e testado neste trabalho [34].	81
Fig. 6.3 - Preparação da fibra para impregnação.	84
Fig. 6.4 - Impregnação da fibra.	85
Fig. 6.5 - Pré-impregnado finalizado.	85
Fig. 6.6 - Marcação da fibra para o corte das várias camadas (dimensões 300 × 300 à direita).	86
Fig. 6.7 - Molde fechado para cura do compósito sob pressão.	86
Fig. 6.8 - Desmoldação do compósito após um dia de cura.	87
Fig. 6.9 - Colocação das fibras dentro do forno para secagem na imagem do lado direito. Preparação dos moldes para iniciar o processo. Note-se que as fibras estão dentro dos sacos herméticos.	87
Fig. 6.10 - Marcação do pré-impregnado para o corte das várias camadas (dimensões 300×300 à direita).	88
Fig. 6.11 - Empilhamento das várias camadas de pré-impregnado e aplicação de um filme protetor para não haver contato direto com a PPQ ou placa usada para melhorar acabamento de superfície.	88
Fig. 6.12 – Placa de metal posta na face superior e inferior do compósito para se conseguir um melhor acabamento superficial na imagem do lado esquerdo. Moldação na PPQ na imagem do lado direito.	89
Fig. 6.13 - Resultados obtidos após moldação na PPQ.	89
Fig. 6.14 - Esquema do formato dos provetes de tração da norma ISO 527 – 1: 1996 e dimensão da largura.	90
Fig. 6.15 - Na imagem do lado esquerdo apresenta-se o equipamento utilizado para os ensaios de tração. Na imagem do lado direito o aparato com extensômetro montado para ensaio de tração.	90
Fig. 6.16 - Máquina de corte com disco diamantado e refrigerada a água.	104
Fig. 6.17 - Comportamento de um compósito de 6 camadas à tração com um empilhamento mal feito.	104
Fig. 6.18 - Na imagem do lado esquerdo ocorreu delaminação durante o corte. Na imagem do lado direito ocorreu desfibramento durante o corte.	106
Fig. 6.19 - Esquema do formato dos provetes de flexão da norma ASTM D 790 – 03 e dimensão da largura e comprimento.	107
Fig. 6.20 - Na imagem do lado esquerdo apresenta-se o equipamento utilizado para os ensaios de flexão. Na imagem do lado direito o aparato para o ensaio de flexão.	107
Fig. 6.21 - Ensaio de tração à fibra (sem tensão à esquerda, durante a tração à direita).	124
Fig. 6.22 - Provetes de tração da fibra de juta não seca (do lado esquerdo) e da fibra de juta seca a 160 [°C] (do lado direito).	125
Fig. 6.23 - Comparação da coloração da fibra de juta não seca (fibra de baixo) e da fibra de juta seca a 160 [°C] (fibra de cima).	126
Fig. 6.24 - Espectro do Silicone obtido através de uma análise FTIR.	127
Fig. 6.25 - Disposição das 6 amostras analisadas por MEV.	130
Fig. 6.26 - Vista lateral de uma fibra na imagem do lado esquerdo (100 [μm]) e vista de topo de uma fibra na imagem do lado direito (40 [μm]).	132

Fig. 6.27 - Resina com defeitos do lado esquerdo (10 [μm]) e desfibramento na imagem do lado direito (600 [μm]).....	133
Fig. 6.28 - Percepção das fibras bidirecionais na imagem do lado esquerdo (200 [μm]) e arrancamento de algumas fibras de um conjunto destas na imagem do lado direito (100 [μm]).....	133
Fig. 6.29 - Visualização de toda a superfície de fratura do provete em análise (3 [mm])....	134
Fig. 6.30 - Superfície do provete em análise (3 [mm]).	134
Fig. 6.31 - Imagem de conjunto de fibras e resina do lado esquerdo (100 [μm]) e imagem de um conjunto de fibras do lado direito (60 [μm]).	135
Fig. 6.32 - Vista lateral de um conjunto de fibras na imagem do lado esquerdo (60 [μm]) e vista de topo de um conjunto de fibras na imagem do lado direito (40 [μm]).....	136
Fig. 6.33 - Imagem do lado esquerdo apresenta uma delaminação (3 [mm]) e a imagem do lado direito um conjunto de fibras de linho (60 [μm]).	137
Fig. 10.1 - Ábaco para verificar se o passo da corrente para as especificações dinâmicas está correto. [21].....	149
Fig. 10.2 - Recorte do ábaco anterior. [21]	150
Fig. 10.3 - Ilustração da ligação veio-roda dentada através de chaveta/escatel.....	155
Fig. 10.4 - Esquema de forças para o acionamento do cilindro pneumático.	157
Fig. 10.5 - Esquema de forças para a recolha do cilindro pneumático.	158
Fig. 10.6 - Geometria em estudo.....	161
Fig. 10.7 - Malha gerada.	161
Fig. 10.8 - Condições de fronteira do rolo.	162
Fig. 10.9 - Condições de carregamento do rolo.	162
Fig. 10.10 - Deformação total segundo as condições definidas anteriormente.....	162
Fig. 10.11 - Tensão equivalente de von-Mises segundo as condições definidas anteriormente.	163
Fig. 10.12 - Localização da tensão máxima e mínima segundo as condições definidas anteriormente.	163
Fig. 10.13 - Vista lateral da máquina com corte longitudinal.....	165
Fig. 9.14 - Na imagem do lado esquerdo é possível notar a aba soldada ao tubo para impedir a propagação da resina até a chumaceira. Na imagem do lado direito verifica-se que as abas estão soldadas numa posição que permita que a resina volte a cair dentro da tina para reaproveitamento.....	167
Fig. 9.15 - Na imagem do lado esquerdo encontra-se a geometria antiga da qual a aba para o impedimento do escorrimento também não faz parte. Na imagem do lado direito encontra-se a geometria atual com as melhorias implementadas.....	167
Fig. 10.16 - De notar o prolongamento da tina em baixo, que ultrapassa a zona da compressão primária.	168
Fig. 10.17 - Na imagem superior esquerda verifica-se o apoio da tina com restrição de movimentos lineares. Na imagem superior direita nota-se o apoio livre do outro lado da tina, permitindo todo o tipo de movimentos. Na imagem inferior tem-se uma visualização generalizada da tina.....	168
Fig. 10.18 - Vista lateral com conjuntos identificados.	176
Fig. 10.19 – Vista em perspetiva dimétrica da máquina PrePreg.	177

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Intervalo para a composição de óxidos usados no comércio específico de fibras de vidro (parte I) [10].	11
Tabela 4.2 - Intervalo para a composição de óxidos usados no comércio específico de fibras de vidro (parte II) [10].	11
Tabela 4.3 - Propriedades de alguns tipos de fibra de vidro [4].	12
Tabela 4.4 - Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono. [4].	14
Tabela 4.5 - Propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas. [4].	15
Tabela 4.6 - Elementos presentes na fibra de juta [12].	17
Tabela 4.7 - Proporção centesimal das substâncias orgânicas da juta [12].	17
Tabela 4.8 - Algumas propriedades de fibras naturais versus fibra de vidro [3;8].	23
Tabela 4.9 - Algumas propriedades de fibras naturais versus fibra de vidro [3;8]. (Continuação).	23
Tabela 4.10 - Comparação entre as fibras naturais e a fibra de vidro [5].	24
Tabela 4.11 - Produção mundial de fibra de juta entre 2004 e 2010 em milhares de toneladas [17].	26
Tabela 4.12 - Classificação das fibras de juta Branca e Tossa na Índia [2;17].	28
Tabela 4.13 - Tipos de fibras de linho e o seu custo por tonelada [30].	34
Tabela 4.14 - Produção, área de plantação e colheita de fibras de linho por região e País em 2009 [30].	34
Tabela 4.15 - Absorção de água [%] pela juta (24h à temperatura da sala).	36
Tabela 4.16 - Absorção da água [%] pelos compósitos (24h à temperatura da sala).	36
Tabela 4.17 - Vantagens e desvantagens de três resinas largamente utilizadas [6].	42
Tabela 4.18 - Propriedades físicas de PLA, PGA, PCL e PHB [1].	42
Tabela 4.19 - Algumas áreas de influência dos compósitos reforçados com fibras de juta e suas vantagens [33].	45
Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de tração à fibra de juta.	62
Tabela 5.2 - Resumo dos dados necessários ao dimensionamento do sistema de transmissão de potência.	63
Tabela 5.3 - Resumo dos diâmetros dos rolos de matéria-prima.	65
Tabela 5.4 - Resumo dos pesos aplicados nos rolos de desenrolamento e enrolamento.	67
Tabela 5.5 - Resina e a composição usada para este estudo.	70
Tabela 5.6 - Dados recolhidos da experiência do tempo de trabalho da resina epóxi à temperatura ambiente da área de trabalho.	71
Tabela 6.1 - Quantidade de resina utilizada na impregnação manual.	79
Tabela 6.2 - Pesos da fibra de juta sem secagem e com secagem.	80
Tabela 6.3 - Condições de secagem da fibra de juta.	80
Tabela 6.4 - Propriedades típicas do linho/PLA publicadas pela empresa <i>Composites Evolution</i> [34].	81
Tabela 6.5 - Placas de compósitos (resina epóxi com fibra de juta) moldados manualmente.	82
Tabela 6.6 - Placas de compósitos (resina epóxi com fibra de juta seca) moldados manualmente.	82
Tabela 6.7 - Placas de compósitos (resina epóxi com fibra de juta) moldados na prensa de pratos quentes.	82

Tabela 6.8 - placas de compósitos (resina PLA com fibra de linho) moldados na prensa de pratos quentes.	83
Tabela 6.9 - Resumo dos compósitos criados e dados complementares para a análise.	83
Tabela 6.10 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLM1.	91
Tabela 6.11 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLM2.	91
Tabela 6.12 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLMS1.	92
Tabela 6.13 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLMS2.	93
Tabela 6.14 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR1.	93
Tabela 6.15 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR2.	94
Tabela 6.16 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR3.	95
Tabela 6.17 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR4.	95
Tabela 6.18 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR5.	96
Tabela 6.19 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR6.	97
Tabela 6.20 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR7.	97
Tabela 6.21 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR8.	98
Tabela 6.22 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLA1.	99
Tabela 6.23 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLA2.	99
Tabela 6.24 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLA6.	100
Tabela 6.25 - Valores médios e desvios padrões das propriedades mecânicas dos compósitos à tração.	101
Tabela 6.26 - Valores médios e desvios padrões das propriedades mecânicas dos PLM e PLMS à tração.	102
Tabela 6.27 - Valores médios e desvios padrões das propriedades mecânicas dos PLPR à tração.	103
Tabela 6.28 - Valores médios e desvios padrões das propriedades mecânicas dos PLA à tração.	105
Tabela 6.29 - Dias de armazenamento das placas PLA	106
Tabela 6.30 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLM1.	108

Tabela 6.31 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLM2.....	108
Tabela 6.32 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLMS1.....	109
Tabela 6.33 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLMS2.....	110
Tabela 6.34 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR1.....	110
Tabela 6.35 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR2.....	111
Tabela 6.36 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR3.....	112
Tabela 6.37 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR4.....	112
Tabela 6.38 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR5.....	113
Tabela 6.39 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR6.....	114
Tabela 6.40 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR7.....	114
Tabela 6.41 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR8.....	115
Tabela 6.42 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLA1.....	116
Tabela 6.43 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLA2.....	116
Tabela 6.44 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLA6.....	117
Tabela 6.45 - Valores médios e desvios padrões das propriedades mecânicas dos compósitos à flexão.....	118
Tabela 6.46 - Resultados dos ensaios de tração para fibra de juta sem secagem.....	124
Tabela 6.47 - Resultados dos ensaios de tração para fibra de juta com secagem (120°Ce 3 horas).....	124
Tabela 6.48 - Resultados dos ensaios de tração para fibra de juta com secagem (160°Ce 2 dias).....	125
Tabela 6.49 - Dados dos compósitos analisados em MEV.....	130
Tabela 6.50 - Dados dos compósitos analisados em MEV. (Continuação).....	130
Tabela 6.51 - Características do compósito PL0S criado em trabalhos anteriores.....	136
Tabela 10.1 - Coeficiente de segurança das correntes. [19].....	147
Tabela 10.2 - Corrente selecionada. [19].....	148
Tabela 10.3 - 1º Coeficiente para cargas dinâmicas tendo em conta qualquer tipo de sobrecarga no uso da corrente. [21].....	148
Tabela 10.4 - 2º Coeficiente para cargas dinâmicas tendo em conta o número de dentes da roda dentada. [21].....	148

Tabela 10.5 - Linha de cálculo da tabela para determinação da roda-dentada e do motorreductor.....	153
Tabela 10.6 - Linha de cálculo da tabela para determinação da roda-dentada e do motorreductor. (Continuação).....	153
Tabela 10.7 - Dimensões da chaveta e escatel para diâmetros de veios entre 17 e 22 [mm].	154
Tabela 10.8 - Lista de peças da máquina desenvolvida.....	173

ÍNDICE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Curva tensão-deformação de uma única fibra da polpa da madeira com diferentes ângulos de microfibrilas [1].	22
Gráfico 4.2 - Quantidade de importação de juta em toneladas entre 2004 e 2008 [17].	27
Gráfico 4.3 - Quantidade de importação de juta em milhares de dólares entre 2004 e 2008 [17].	27
Gráfico 4.4 - Curva característica do módulo de elasticidade em função da temperatura para os polímeros [1].	39
Gráfico 6.1 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLM1.	91
Gráfico 6.2 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLM2.	92
Gráfico 6.3 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLMS1.	92
Gráfico 6.4 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLMS2.	93
Gráfico 6.5 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR1.	94
Gráfico 6.6 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR2.	94
Gráfico 6.7 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR3.	95
Gráfico 6.8 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR4.	96
Gráfico 6.9 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR5.	96
Gráfico 6.10 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR6.	97
Gráfico 6.11 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR7.	98
Gráfico 6.12 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR8.	98
Gráfico 6.13 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA1.	99
Gráfico 6.14 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA2.	100
Gráfico 6.15 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA6.	100
Gráfico 6.16 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLM1.	108
Gráfico 6.17 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLM2.	109
Gráfico 6.18 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLMS1.	109
Gráfico 6.19 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLMS2.	110
Gráfico 6.20 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLR1.	111
Gráfico 6.21 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR2.	111
Gráfico 6.22 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR3.	112
Gráfico 6.23 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR4.	113
Gráfico 6.24 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR5.	113
Gráfico 6.25 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR6.	114
Gráfico 6.26 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR7.	115
Gráfico 6.27 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR8.	115
Gráfico 6.28 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA1.	116
Gráfico 6.29 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA2.	117
Gráfico 6.30 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA6.	117
Gráfico 6.31 - Curva da TGA.	122
Gráfico 6.32 - Derivada da TGA.	123
Gráfico 6.33 - Curva da DSC.	123
Gráfico 10.1 - Fator de serviço necessário para redutores do tipo: R, F, K, W, S.	151
Gráfico 10.2 - Fatores de serviço adicionais para redutores de engrenagens helicoidais.	152

SÍMBOLOGIA

M_t	Momento torsor
T_g	Temperatura de transição vítrea
T_m	Temperatura de fusão
Z_1	Número de dentes da roda dentada
f_1	Coefficiente para cargas dinâmicas
f_2	Constante de valor igual a 19
f_B	Fator de serviço
f_{B1}	Fator de serviço da temperatura ambiente
f_{B2}	Fator de serviço para duração cíclica
t_B	Período de carga
$\varepsilon_{Máx}$	Deformação Máxima
$\sigma_{Máx}$	Tensão Máxima
$\sigma_{chaveta}$	Tensão do material da chaveta utilizada
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEMACOM	Unidade de Materiais Compósitos
CEMUP	Centro de Materiais da Universidade do Porto
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica
DEQ	Departamento de Engenharia Química
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DTA	Differential Thermal Analysis
ELV	End-of-Life Vehicle
EN	European Standard
EUA	Estados Unidos da América
FCT	Fundação para Ciência e Tecnologia
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
h	Altura da chaveta
IJIRA	Indian Jute Industrie's Research Association
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
ISO	International Organization for Standardization
LVSEM	Light Vacuum Scanning Electron Microscopy
MEV	Microscopia Eletrónica de Varrimento
PLA	Ácido polilático
PPQ	Prensa de Pratos Quentes
RTM	Reaction Transfer Moulding
SC	Sicomin
SEM	Scanning Electron Microscopy
TGA	Thermogravimetric Analysis
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment Directive

WPC	Wood Plastic Composites
A	Área
C	Comprimento
D	Diâmetro
E	Módulo de Young
ED	Fator de duração do ciclo
F	Força
L	Largura
N	Força Normal
P	Peso
$Pot.$	Potência
T	Temperatura
a	Altura do escatel do veio
d	Diâmetro do veio
e	Espessura
$f()$	Função
m	Massa
n	Número de voltas ou rotações
p	Pressão
q	Caudal
t	Tempo
v	Velocidade
η	Rendimento
μ	Coefficiente de atrito

1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação surge no âmbito de um projeto financiado pela FCT – PTDC/EME-PME/111698/2009 – “Caraterização Experimental e Numérica de Materiais Compósitos de Fibras Naturais Longas”.

No capítulo 2 – “motivação” é feito um enquadramento da tese apresentando o aparecimento e evolução dos materiais compósitos reforçados com fibras naturais. Mostrando no fim que o interesse pelas fibras naturais está a crescer outra vez e enunciando alguns aspetos vantajosos deste interesse e também desvantagens que representam barreiras à evolução. Foco atual na investigação desta área.

No capítulo 3 – “Objetivos” são enunciados sinteticamente os objetivos desta tese.

No capítulo 4 – “Estado da arte” é feito um estudo aprofundado das áreas mais importantes a esta tese, que de um modo generalizado são:

- Capítulo 4.1. – “Reforços”;
 - Capítulo 4.1.1. – “Fibras sintéticas”;
 - Capítulo 4.1.2. – “Fibras naturais”;
- Capítulo 4.2. – “Interface”;
- Capítulo 4.3. – “Matrizes” (Poliméricas);
- Capítulo 4.4. – “Aplicações”;
- Capítulo 4.5. – “Processos de fabrico”;
- Capítulo 4.6. – “Pré-impregnados” (Semi-produtos);

Destes tópicos que fazem parte de qualquer estudo relacionado com compósitos, foram focados aspetos relacionados com as fibras naturais, assunto que integra o tema desta tese e/ou assuntos relacionados com o projeto em que esta tese se insere e que irão ser abordados numa próxima fase.

Por exemplo, no capítulo 4.1.2. – “Fibras Naturais” começou-se por uma abordagem geral apresentando assuntos de grande relevo como: desvantagens das fibras e processo ou métodos para as combaterem, organização biológica e estrutural das fibras naturais e comparação das fibras naturais com o principal concorrente, a fibra de vidro. A fibra de juta e de linho são as que mais estudos apresentam porque foram as analisadas nesta tese.

No capítulo 4.2 – “Interface” é feita uma introdução a este tema justificando a sua importância. Também são apresentados resultados de tratamentos e estudos sobre a interface com auxílio a artigos científicos.

No capítulo 4.3. – “Matrizes” apresentam-se matrizes do tipo poliméricas, pois são as únicas que se usam para compósitos reforçados com fibras naturais. Destas faz-se a distinção entre termoendurecíveis e termoplásticas e descrevem-se duas resinas: Epóxido e PLA, que são estudadas nesta tese. Apresentam-se temas de grande interesse: biocompósitos e reciclagem.

No capítulo 4.4 – “Aplicações e evolução dos compósitos reforçados com fibras naturais” são apresentadas aplicações importantes na indústria automóvel e enunciados casos reais de melhoramento após estas aplicações.

No capítulo 4.5. – “Processo de fabrico” são apresentados 3 processos de fabrico. Moldação manual e moldação por compressão a quente porque são os abordados nesta tese para a moldação das placas para estudo e moldação em autoclave que é um dos processos de fabrico descritos no âmbito do projeto e que será alvo de estudo numa próxima fase.

No capítulo 4.6. – “Pré-impregnados” é feita uma introdução e explicado o processo de pré-impregnação com recurso à literatura.

No capítulo 5. – “Desenvolvimento de um processo automatizado de pré-impregnados” é estudada, projetada e desenhada uma máquina para a produção de pré-impregnados, um dos objetivos primordiais da tese. Este capítulo é dividido em:

- Capítulo 5.1. – “Abordagem ao problema”;
- Capítulo 5.2. – “Descrição da conclusão do processo de impregnação”;
- Capítulo 5.3. – “Avaliação e projeto da máquina de Prepreg”;
- Capítulo 5.4. – “Efeito da humidade na produção de pré-impregnados”;
- Capítulo 5.5. – “Projeto final da máquina de Prepreg”;

No capítulo 6 – “Estudo estrutural” é outro dos objetivos primordiais da tese e é subdividido da seguinte forma:

- Capítulo 6.1. – “Dados das resinas e fibras naturais”;
- Capítulo 6.2. – “Dados dos compósitos em análise”;
- Capítulo 6.3. – “Etapas e processo utilizados”;
- Capítulo 6.4. – “Ensaio mecânicos”;
- Capítulo 6.5. – “Estudo químico da fibra através de TGA, DTA e DSC”;
- Capítulo 6.6. – “Estudo superficial do compósito”;

No capítulo 7 – “Conclusões” apresentam-se as conclusões mais relevantes obtidas no decorrer desta tese.

No capítulo 8 – “Trabalhos futuros” enunciam-se sugestões para a continuidade do trabalho.

No capítulo 9 – “Anexos” fazem-se todos os cálculos inerentes ao projeto da máquina, descreve-se o ciclo de funcionamento da máquina, apresentam-se os desenhos tridimensionais com referência aos vários módulos constituintes desta e expõe-se a lista de peças com o balanço do reaproveitamento conseguido.

No capítulo 10 – “Bibliografia” enunciam-se todos os livros e artigos científicos utilizados para a revisão bibliográfica bem como catálogos utilizados no projeto da máquina e normas de ensaios necessários ao estudo estrutural dos compósitos.

2. MOTIVAÇÃO

Um compósito resulta da associação de dois materiais de natureza diferente (fibras e resina), cujas qualidades se completam, originando um material homogêneo onde as características globais são superiores às dos constituintes.

O uso de materiais compósitos data de séculos atrás, e tudo começou com fibras naturais. No antigo Egito, cerca de três mil anos atrás, os tijolos de argila (matriz) eram reforçados com palha (fibra) para construir paredes. Mais tarde, os materiais naturais devido às suas propriedades mecânicas inferiores às ligas metálicas e aços que vieram a surgir, foram substituídas nos países desenvolvidos. Durante os anos sessenta, o aumento de materiais compósitos começou quando as fibras de vidro surgiram, nomeadamente na indústria automóvel, como uma alternativa viável na medida em que conciliavam resistência mecânica interessante com uma aplicação em grande escala devido ao seu menor custo (comparativamente à fibra de aramida e carbono).

Posteriormente surgiram outras fibras com aplicações em áreas mais específicas e exigentes como é o caso da indústria da aeronáutica e aeroespacial com o uso de compósitos reforçados com fibras de carbono e da área da proteção de forças militares como os capacetes e coletes à prova de bala feitos de compósitos reforçados com fibras de aramida (kevlar por exemplo).

Hoje em dia, existem muitas aplicações de materiais compósitos que vão desde o vulgar betão armado, em que neste caso o betão será a matriz, e a armadura que consiste na aplicação de barras de aço na matriz, constitui o reforço. Até aos compósitos de elevado desempenho à base de resinas de epóxido com fibras contínuas de carbono.

As fibras naturais têm suscitado grande interesse na última década como um possível substituto das fibras sintéticas, como por exemplo a fibra de vidro, que entre essas é uma das que mais uso tem. Apesar de as fibras naturais ainda estarem longe de terem as mesmas características mecânicas que as fibras artificiais, os tratamentos das fibras recentemente desenvolvidos têm melhorado estas propriedades consideravelmente.

Este interesse renovado é motivado pelas seguintes vantagens [3]:

- Recurso renovável, a produção requer pouca energia;
- Reciclagem térmica é possível, onde o vidro provoca problemas em fornos de combustão;
- Redução do peso específico, o que resulta numa maior resistência e rigidez específica do que o vidro;
- Preço da matéria-prima é baixo;
- Boas propriedades isolantes, térmicas e acústicas;
- Resistência e propriedades mecânicas interessantes;

A persistência da investigação neste campo é devida, também, às seguintes desvantagens [3]:

- Características mecânicas inferiores, particularmente na resistência ao impacto;
- Qualidade variável, nomeadamente devido à influência das condições atmosféricas aquando da produção do compósito;
- Higroscopia;
- Temperatura de processamento limitada;
- Baixa durabilidade apesar de já existirem tratamentos de fibra que a melhorem significativamente;
- Fraca resistência ao fogo;
- Biodegradabilidade, pode ser uma desvantagem na medida em que reduz as características mecânicas do compósito ao longo do tempo;
- Preço pode variar com os resultados da colheita (quantidade e qualidade);

Surge assim o conceito de “Compósitos Verdes” [1] com base na preocupação do ser humano em reduzir a sua pegada ambiental criando alternativas aos compósitos atualmente mais usados, recorrendo a processos de fabrico menos poluentes mas obtendo compósitos baseados em fibras e resinas naturais com propriedades mecânicas boas para determinadas aplicações.

3. OBJETIVOS

A presente tese de mestrado teve como objetivos:

- Otimizar e desenvolver um processo de fabrico de baixa série para a produção de compósitos reforçados com fibras naturais;
- Otimizar compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras naturais de juta, e compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras naturais de linho com base na mecânica experimental;

4. ESTADO DA ARTE

Os materiais compósitos podem ser definidos como misturas (ao nível macroscópico) não solúveis de dois ou mais constituintes com distintas composições e estruturas que estabelecem entre si uma interface reconhecida e cujas propriedades se combinam e não podem ser obtidas simplesmente pela soma dos diferentes materiais individualmente, em que um dos materiais garante a ligação – matriz – e o outro a resistência – reforço.

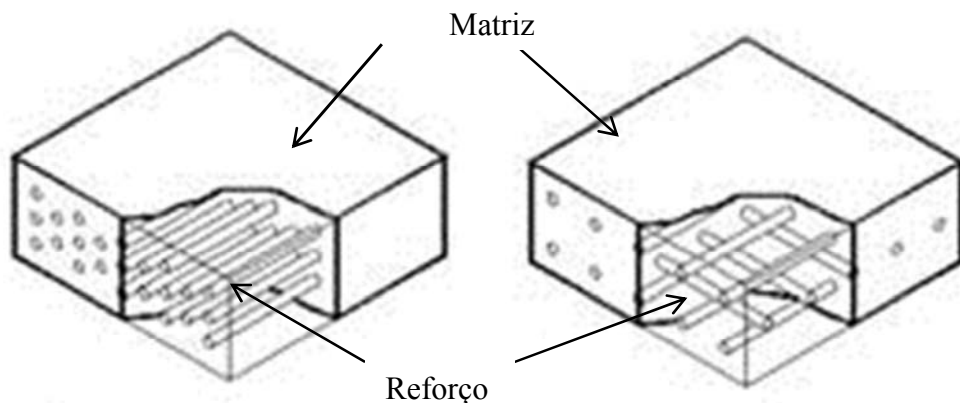


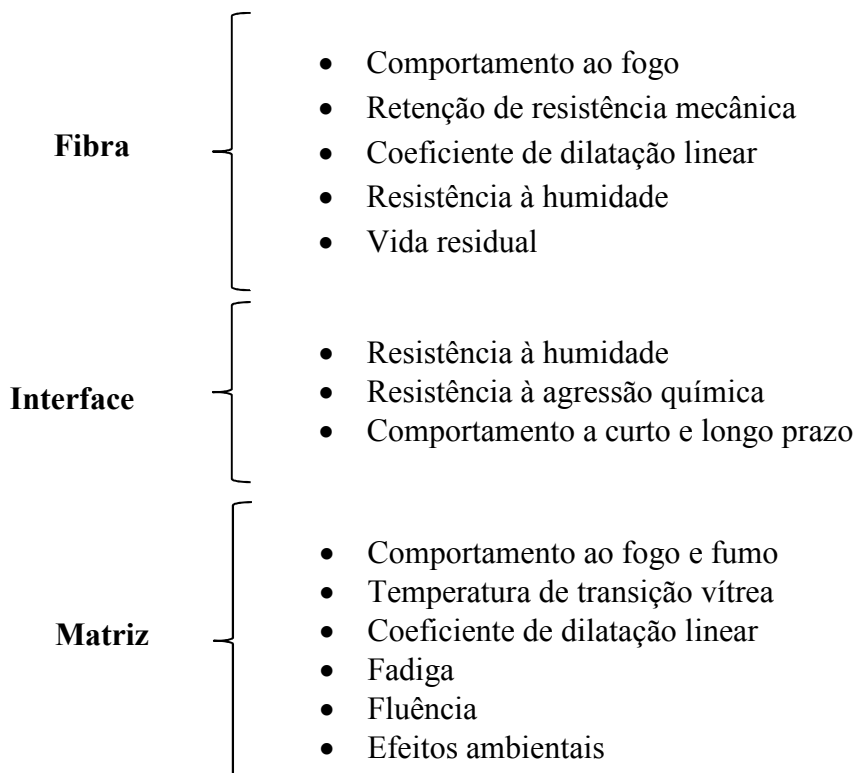
Fig. 4.1 - Exemplo muito simplificado de um compósito. Do lado esquerdo, compósito reforçado unidireccionalmente e do lado direito, compósito reforçado bidireccionalmente. [6]

Griffith demonstrou que as fibras de vidro com 20 [μm] de diâmetro apresentavam tensões de rotura de 3500 [MPa] ao passo que o vidro na sua forma maciça apresentava tensões de rotura de 160 [MPa]. Esta é uma das razões (reforço fibroso) pelo qual os compósitos possuem excelentes propriedades mecânicas. Apesar de as fibras não serem diretamente aplicáveis em engenharia, quando embebidas numa matriz, dão origem a compósitos fibrosos de elevada resistência mecânica e leveza que permitem conceber estruturas sujeitas a estados de solicitação extremos.

Ironicamente, os primeiros compósitos a aparecer eram reforçados com fibras naturais de origem vegetal. Estes eram usados por exemplo para a construção de habitações, como se verificou no antigo Egipto, em que usavam tijolos de argila como matriz e reforçavam-na com palha. No século XIX já se utilizavam barras de ferro para reforçar alvenarias, abrindo-se assim caminho para o desenvolvimento do betão armado; nos anos 40 do século XX generalizou-se a utilização de plásticos reforçados em componentes elétricos e a partir de 1960 desenvolveram-se as fibras de carbono que foram a partir de 1968 aplicadas na indústria militar e aeroespacial para melhorar o desempenho de equipamentos como os aviões.

4.1. REFORÇOS

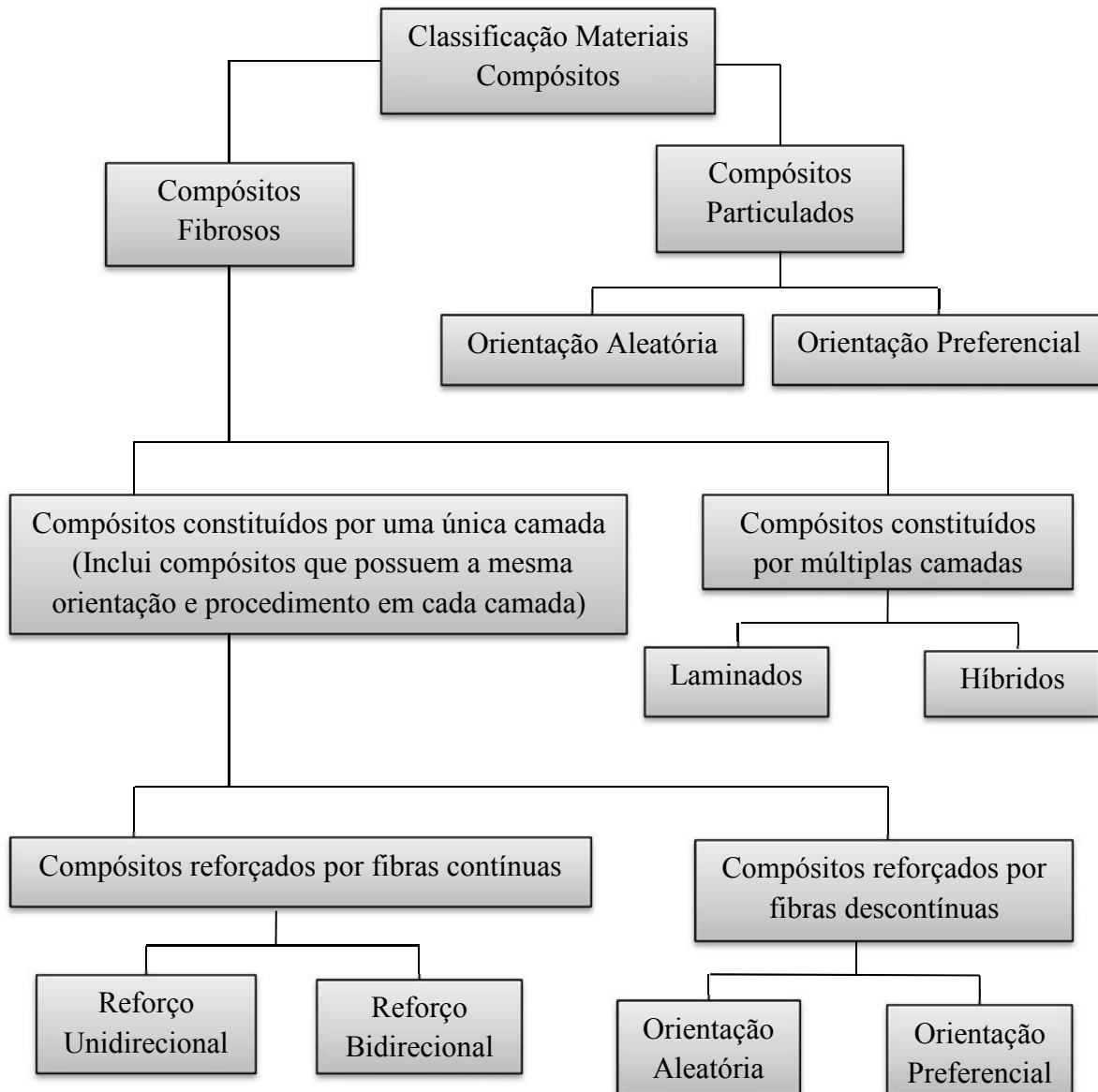
As fibras constituem o elemento fundamentalmente estrutural no compósito, que estabelece a resistência mecânica deste. Como tal, este deverá ser escolhido consoante a aplicação a usar e deverão ser tidas em conta características de serviço como as que se apresentam de seguida:



As fibras que constituem o reforço do compósito são chamadas de fase dispersa (no caso de compósitos constituídos por uma única camada) e podem ser de vários tipos, como se pode constatar nas imagens da figura 4.2.

O fluxograma 1 descreve sucintamente a classificação dos vários tipos de compósitos que se podem obter, função do tipo de reforço, do número de camadas e da orientação.

As fibras constituem uma classe importante de reforço uma vez que proporcionam o aumento da resistência da matriz, e consequentemente influenciam e destacam as propriedades pretendidas das duas fases. Contudo, estas podem apresentar um desempenho reduzido devido a vários fatores. A performance do compósito reforçado com fibras é avaliada pelo comprimento, forma, orientação, e composição das fibras bem como pelas propriedades mecânicas da matriz. O arranjo das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e a sua distribuição influenciam significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras.



Fluxograma 1 - Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço [8].

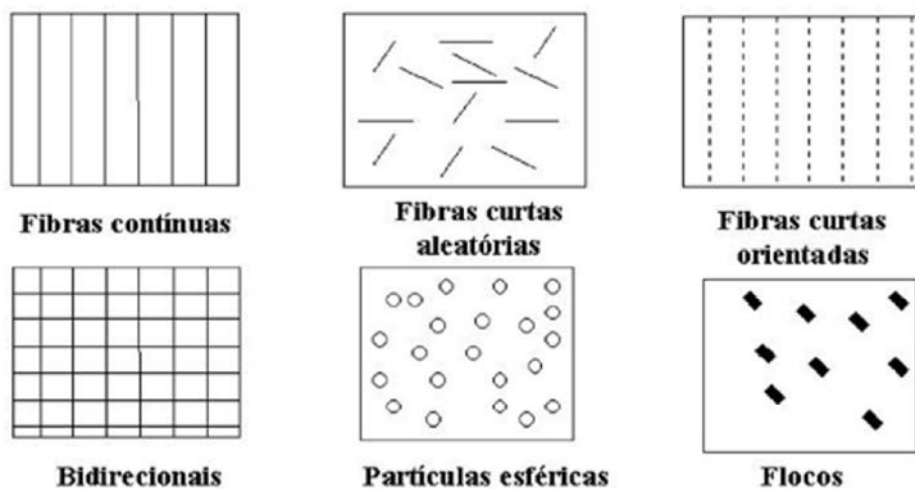


Fig. 4.2 - Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço (apoio ao fluxograma 1) [8].

São apresentadas de seguida as fibras sintéticas que, apesar de não fazerem parte integrante do estudo em que este trabalho se foca, são estas as mais utilizadas atualmente e são, essencialmente a fibra de vidro, um alvo da investigação no campo das fibras naturais visto que um dos principais objetivos é a tentativa de substituição das fibras de vidro por fibras naturais como por exemplo a juta.

As fibras naturais são apresentadas posteriormente de forma mais aprofundada dada a importância destas na tese, tendo o cuidado de fazer a sua comparação com as fibras sintéticas.

4.1.1. Fibras Sintéticas

Apesar de não o terem feito no sentido científico e tecnológico que hoje é conhecido o compósito, este foi primeiramente usado recorrendo a matrizes e fibras naturais. Contudo, o seu uso foi intencional e com o objetivo de se atingirem performances superiores quando se começaram por usar as fibras de vidro, que são as fibras mais antigas, mais usadas e mais baratas, neste sentido descrito [8].

Outras duas fibras muito usadas para reforços de compósitos são as fibras de carbono e de aramida. Ambas são usadas para casos mais especiais como aeronáutica, aeroespacial e competição automobilística, por exemplo. Isto devido à sua excelente resistência mecânica, baixa densidade e elevada rigidez o que incrementa o seu preço.

4.1.1.1. Fibra de Vidro

A fibra de vidro foi inicialmente desenvolvida para otimizar o peso específico das fibras para um mercado mais particular. Por exemplo, placas de circuitos impressas que requerem uma baixa condutividade elétrica, e baixo conteúdo de borossilicato de alumínio de cálcio, com um máximo de 2% de conteúdo alcalino. Assim surgiu a designação “*E-Glass*” que é o significado para grau elétrico. De notar que atualmente a fibra de vidro do tipo *E* contém menos de 0,2% alcalino. Desta forma surgiu a tradição de associar uma letra específica ao tipo de fibra de vidro que varia com o tipo de composição química e um conjunto de propriedades únicas. Foi sendo desde então seguido este caminho para outros tipos de fibras de vidro, o que levou a sua normalização, por exemplo no, “*MilSpec R-60 346*” e “*ASTM C162*” [10].

Tabela 4.1 - Intervalo para a composição de óxidos usados no comércio específico de fibras de vidro (parte I) [10].

Óxido	<i>A</i> – <i>Glass</i> (%)	<i>C</i> – <i>Glass</i> (%)	<i>D</i> – <i>Glass</i> (%)	<i>E</i> – <i>Glass</i> (%)	<i>ECR</i> – <i>Glass</i> (%)
<i>SiO</i> ₂	63 – 72	64 – 68	72 – 75	52 – 56	54 – 62
<i>Al</i> ₂ <i>O</i> ₃	0 – 6	3 – 5	0 – 1	12 – 16	12 – 16
<i>B</i> ₂ <i>O</i> ₃	0 – 6	4 – 6	21 – 24	5 – 10	5 – 10
<i>CaO</i>	6 – 10	11 – 15	0 – 1	16 – 25	16 – 25
<i>MgO</i>	0 – 4	2 – 4	–	0 – 5	0 – 5
<i>ZnO</i>	–	–	–	–	–
<i>BaO</i>	–	0 – 1	–	–	–
<i>Li</i> ₂ <i>O</i>	–	–	–	–	–
<i>Na</i> ₂ <i>O</i> + <i>K</i> ₂ <i>O</i>	14 – 16	7 – 10	0 – 4	0 – 2	0 – 2
<i>TiO</i> ₂	0 – 0,6	–	–	0 – 1,5	0 – 1,5
<i>ZrO</i> ₂	–	–	–	–	–
<i>Fe</i> ₂ <i>O</i> ₃	0 – 0,5	0 – 0,8	0 – 0,3	0 – 0,8	0 – 0,8
<i>F</i> ₂	0 – 0,4	–	–	0 – 1	0 – 1

Tabela 4.2 - Intervalo para a composição de óxidos usados no comércio específico de fibras de vidro (parte II) [10].

Óxido	<i>AR</i> – <i>Glass</i> (%)	<i>R</i> – <i>Glass</i> (%)	<i>S – 2</i> – <i>Glass</i> (%)	<i>Sem boro E</i> – <i>Glass</i> (%)
<i>SiO</i> ₂	55 – 75	55 – 65	64 – 66	52 – 62
<i>Al</i> ₂ <i>O</i> ₃	0 – 5	15 – 30	24 – 25	12 – 16
<i>B</i> ₂ <i>O</i> ₃	0 – 8	–	–	–
<i>CaO</i>	1 – 10	9 – 25	0 – 0,1	16 – 25
<i>MgO</i>	–	3 – 8	9,5 – 10	0 – 5
<i>ZnO</i>	–	–	–	–
<i>BaO</i>	–	–	–	–
<i>Li</i> ₂ <i>O</i>	0 – 1,5	–	–	–
<i>Na</i> ₂ <i>O</i> + <i>K</i> ₂ <i>O</i>	11 – 21	0 – 1	0 – 0,2	0 – 2
<i>TiO</i> ₂	0 – 12	–	–	0 – 1,5
<i>ZrO</i> ₂	1 – 18	–	–	–
<i>Fe</i> ₂ <i>O</i> ₃	0 – 5	–	0 – 0,1	0 – 0,8
<i>F</i> ₂	0 – 5	0 – 0,3	–	0 – 1

Outros exemplos de fibras de vidro são: “*A-Glass*” é um vidro de silicato de cal de sódio e é menos dispendioso de fabricar que o “*E-Glass*” devido à menor temperatura de processamento e inexistência de boro. No entanto tem propriedades elétricas mais fracas que o “*E-Glass*”. “*D-Glass*” é um vidro de composição feita de silicato de boro desenvolvido para isolamentos quando usado em aplicações elétricas de alta performance.

E como estes tipos, existem muitos mais, como é o exemplo: “*C-Glass*”, “*ECR-Glass*”, “*AR-Glass*”, “*R-Glass*”, “*S-2-Glass*” e “*No boron E-Glass*”.

Tabela 4.3 - Propriedades de alguns tipos de fibra de vidro [4].

Propriedade	Vidro E¹	Vidro S²	Vidro R³
Densidade [g/cm³]	2,6	2,49	2,55
Módulo de Young [GPa]	73,0	85,5	86,0
Tensão de rotura [MPa]	3400	4580	4400
Deformação na rotura	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de expansão térmica [10⁻⁶/°C]	5,0	2,9	4,0

As características maioritárias das fibras de vidro são [9]:

- **Corrosão:** geralmente boa, resultando no uso extensivo em aplicações como a marinha, *offshore*, caixas de pontes, válvulas de pressão químicas, e transporte de líquidos (tubagens);
- **Baixo peso:** pesa apenas um quarto do peso do aço, resultando em boas propriedades específicas, tal como componentes de automóveis. Também é útil quando se tem de o transportar para um local de trabalho, tal como a construção de uma ponte;
- **Resistência:** geralmente boa, como nos barcos incluindo botes salva-vidas, uma construção especial pode proporcionar valores altos de energia específica para uso em aplicações de absorção de energia, como é exemplo os “*crash testes*” efetuados pelas marcas da indústria automóvel e não só;
- **Elétrica:** Muito boas propriedades isoladoras, quando feito em vácuo, resultam num abrangente número de aplicações para placas de circuitos elétricos e que conjuguem elevado peso com isolamento elétrico;
- **Força:** elevados valores de força absoluta e específica, particularmente para fibras alinhadas e contínuas;
- **Liberdade de processo:** vasta escolha de processos para obtenção de fibras diferentes que vão de encontro a diferentes necessidades sobre o volume de produção, tamanho do produto, performance, e requisitos de qualidade;
- **Liberdade de forma:** possibilidade de produção de uma vasta gama de formas, incluindo curvatura dupla, proporciona flexibilidade no *design* e consolidação do produto.

¹ Designação “E” significa “*Electrical*”.

² Designação “S” significa “*Stiffness*”.

³ Designação “R” significa “*Resistance*” – Este tipo de fibra de vidro é conhecido pela sua alta rigidez. Apresenta um módulo não tão elevado quanto a fibra de vidro do tipo “S” mas mais elevado que a fibra de vidro do tipo “E”.

As fibras de vidro são portanto, fibras com uso numa grande escala de aplicações, e que possuem uma razão qualidade/preço muito competitiva. No entanto, sendo uma fibra que abrange muito mercado, esta poderá ser tomada em algumas aplicações de menor solicitação estrutural e menor contacto com elementos aquosos ou corrosivos pelas fibras naturais (de notar que mesmo os compósitos reforçados com fibras de vidro necessitam de revestimentos, como por exemplo resinas de *gelcoat* ou véus de superfície para impedir a absorção de humidade ou do liquido em contacto por parte das fibras) que fariam o mesmo trabalho exemplarmente e com um custo ainda mais reduzido.

A técnica mais comum para produzir fibras de vidro é o estiramento de vidro fundido através de uma fieira em liga de platina-ródio com orifícios de dimensões muito precisas. A temperatura de fusão depende da composição do vidro, mas ronda normalmente os 1260°C. As fibras de vidro são sujeitas a tratamentos superficiais à saída da fieira, que variam consoante o fim a que se destinam [4]:

- Revestimento têxtil: para o fabrico de tecidos sem risco de danificação da fibra;
- Revestimento plástico: para permitir a compatibilização da fibra com as diferentes matrizes orgânicas existentes.

4.1.1.2. Fibra de Carbono

A fibra de carbono é aquela que mais é usada para aplicações de elevada solicitação estrutural, como é exemplo: indústria aeronáutica e aeroespacial, indústria automóvel de competição e também, mais recentemente, utilizada na indústria automóvel comercial mas em casos especiais de carros com elevadas performances.

Inicialmente, a fibra de carbono pode ser distribuída em dois tipos:

- Fibra de carbono: com percentagens de carbono entre os 80% e os 95%;
- Fibra de grafite: com percentagens de carbono a chegarem aos 99%.

A tecnologia mais recente para a produção de fibras de carbono centra-se na decomposição térmica de vários precursores orgânicos, os diferentes precursores conduzem a fibras de carbono com características mecânicas distintas.

Os precursores orgânicos são essencialmente três [4]:

- Celulose, chamadas “rayon fibers”;
- Poliacrilonitrilo (PAN);
- Alcatrão “pitch”.

O primeiro, a celulose, foi dos primeiros a ser utilizados e também a entrar em desuso uma vez que produzia fibras com baixas propriedades mecânicas [4]. No entanto, os outros dois são atualmente utilizados, sendo no entanto o poliacrilonitrilo (PAN) a rota mais utilizada para produzir fibras de carbono comercialmente [9].

Tabela 4.4 - Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono. [4]

Propriedades	PAN	Alcatrão "Pitch"	"Rayon fibers"
Densidade [g/cm³]	1,8	2,0	1,7
Módulo de Young	200 – 400	300 – 700	415 – 680
Tensão de rotura [MPa]	2480 – 5600	1900 – 2200	2070 – 2760
Deformação na rotura	0,6 – 1,2	1 – 1,5	0,5 – 0,6
Coefficiente de expansão térmica [10⁻⁶/°C]	-0,7 a - 0,5	-1,6 a - 0,9	–

As fibras de carbono são classificadas com base na sua resistência mecânica e comercializadas segundo as seguintes designações [4]:

- UHM (ultra high modulus): para fibras com módulos superiores a 500 [GPa];
- HM (high modulus): para fibras com módulos superiores a 300 [GPa] e rácio resistência mecânica/módulo em tração inferior a 1%;
- IM (intermediate modulus): para fibras com módulos até 300 [GPa] e rácio resistência mecânica/módulo de cerca de 1%;
- Fibras de baixo módulo, com valores inferiores a 100 [GPa];
- HS (high strength): para fibras de resistência à tração superiores a 3 [GPa] e rácio resistência/rigidez entre 0,015 e 0,02.

4.1.1.3. Fibra Aramídica

As fibras aramídicas foram comercializadas pela primeira vez pela *DuPont*. Estas foram introduzidas no mercado como fibras de alta resistência e alto módulo baseadas numa ligação de poliamidas aromáticas [9]. Quando introduzidas no mercado tinham como distinção de outras fibras de reforço o facto de terem elevada resistência na relação rigidez/peso e, apresentando excelente resistência química, mecânica, boa resistência ao impacto e à fadiga, boa capacidade de amortecimento de vibrações, boas características dielétricas, elevada resistência a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes tornou-se um forte candidato para o uso como reforço de compósitos em aplicações de alta performance [4].

Estas fibras têm grande aplicabilidade na indústria balística, mais especificamente em coletes à prova de bala e blindagens. Isto porque têm uma elevada capacidade de absorção de energia. As resinas mais usadas nestas aplicações são a poliéster, viniléster e fenólica sendo que a sua percentagem no compósito é inferior a 30%. No entanto, para melhores propriedades mecânicas esta percentagem deverá variar entre os 30% e 50% [9].

Como desvantagens temos a baixa resistência à compressão e à flexão, bem como elevada sensibilidade ao corte interlaminar [4].

Tabela 4.5 - Propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas. [4]

<i>Propriedade</i>	<i>Kevlar®29</i>	<i>Kevlar®49</i>	<i>Twaron®</i>
<i>Densidade [g/cm³]</i>	1,44	1,45	1,44
<i>Módulo de Young</i>	60	129	60
<i>Tensão de rotura [MPa]</i>	3000	3000	2600
<i>Deformação na rotura</i>	3,6	1,9	3
<i>Coefficiente de expansão térmica [10⁻⁶/°C]</i>	-2,0	-2,0	—

Existem dois tipos de fibras de kevlar [4]:

- Fibras *standard*: *Kevlar®29*, *Twaron®*, com aplicações correntes em cabos, materiais diversos de baixo coeficiente de atrito e objetos de proteção pessoal;
- Fibras de elevado módulo: *Kevlar®49* da DuPont ou *Twaron HM®* da Enke, com inúmeras aplicações em cascos de barcos, estruturas de aviões, capacetes, coletes de proteção balística e automóveis de competição.

4.1.2. Fibras Naturais

4.1.2.1. Introdução

As fibras naturais surgem no seguimento de uma linha renovada da filosofia atualmente imposta pelas sociedades mais evoluídas em que a preocupação pela reciclagem é crescente na medida em que esta permite uma sustentabilidade assegurada e uma redução de custos assinalável, comparativamente aos compósitos reforçados com fibras sintéticas, tal como as fibras referidas anteriormente: fibras de vidro, fibras de carbono e fibras de aramída.

Esta filosofia está a ser liderada geograficamente pela Europa [11].

Algumas vantagens⁴ para o uso de fibras naturais são [11]:

- Natureza não abrasiva;
- Biodegradabilidade (desvantagem quanto às propriedades mecânicas);
- Baixo consumo de energia (na produção e uso devido ao baixo peso);
- Baixo custo;

Adicionalmente a estas características, estão associadas às fibras naturais uma baixa densidade e elevadas propriedades específicas. As propriedades mecânicas específicas das fibras naturais são comparáveis às das fibras sintéticas, portanto, as propriedades das fibras naturais podem satisfazer o mercado global, especialmente em aplicações que exigem uma redução de peso [11].

⁴ Nota que no capítulo da motivação existem mais vantagens que as enunciadas aqui e também são apresentadas as desvantagens.

4.1.2.2. Desvantagens das fibras naturais e processos para as combaterem

Existem algumas desvantagens que atualmente impedem as fibras naturais de tomarem o lugar das fibras de vidro, mas uma das mais importantes e que é alvo constante de investigação por parte das instituições é a higroscopia destas.

Esta é uma propriedade das fibras naturais que denota a notável capacidade de absorção de humidade. A fraca resistência à humidade das fibras naturais (hidrofílicas) é incompatível com a boa resistência à humidade (hidrofobia) por parte dos polímeros (matrizes poliméricas). Esta incompatibilidade traduz-se numa fraca ligação entre a fibra e a matriz, ou seja, interface.

Para tentar contrariar este facto, são aplicados diversos tipos de tratamentos, químicos ou físicos, para conceder ligação, afinidade adesiva às matrizes poliméricas e estabilidade dimensional, como por exemplo [11]:

- Compatibilizadores;
- Tratamentos alcalinos;
- Acetilação;
- Enxerto copolimerização;
- Maleico-anidrido de polipropileno-co-polímero (MAH-PP).

Estes tratamentos têm sido utilizados para se ultrapassar a incompatibilidade das polaridades superficiais entre a fibra natural (polar) e a matriz polimérica (não-polar).

É de grande importância salientar a fibra de Rami porque esta se comporta muito contrariamente à maioria das restantes fibras naturais no que diz respeito à evolução das propriedades mecânicas. A fibra de Rami é muito durável. A tenacidade desta fibra aumenta em 25% quando molhada. É a menos afetada pela humidade. Depois da extração e da primeira fase do processo é forte e durável, sendo a melhor neste aspeto entre todas as fibras naturais. Também tem a particular vantagem de resistir ao apodrecimento quando exposta diretamente a certas condições atmosféricas ou imersa em água [2].

Um estudo foi feito num compósito de matriz termoendurecível (resina poliéster) reforçado com fibras naturais de juta para determinar as propriedades mecânicas (tração e flexão) após um tratamento alcalino com hidróxido de sódio para diferentes concentrações (2% e 5%) e verificou-se que para uma concentração de 5% de hidróxido de sódio foi possível melhorar a interação fibra/matriz uma vez que a resistência à flexão e tração aumentaram significativamente [12].

Neste estudo, os constituintes da fibra de juta utilizada são apresentados nas duas tabelas seguintes.

Tabela 4.6 - Elementos presentes na fibra de juta [12].

<i>Elementos</i>	[%]
<i>Cinza</i>	0,7
<i>Água</i>	9,72
<i>Gorduras cerosas</i>	0,36
<i>Extrato aquoso</i>	1,06
<i>Celulose</i>	64,10
<i>Substâncias incrustantes</i>	24,06

Tabela 4.7 - Proporção centesimal das substâncias orgânicas da juta [12].

<i>Elementos</i>	[%]
<i>Carbono</i>	46,30
<i>Oxigénio</i>	47,60
<i>Hidrogénio</i>	6,10

Um estudo foi feito num compósito de matriz polimérica termoplástica (altamente reciclável, contrariamente às matrizes termoendurecíveis) de polietileno reforçado com fibras de juta, que teve como fundamental objetivo testar a resistência ao impacto (tenacidade), que é a propriedade mecânica mais fraca nas fibras naturais, e verificar se o uso de matrizes termoplásticas recicláveis influenciaria negativamente as propriedades mecânicas do compósito [13].

Verificou-se então que estes apresentaram um aumento na tenacidade ao entalhe, medida pela energia de impacto Charpy. Houve um aumento brusco na energia de impacto quando a percentagem de tecido passou de 20 % para 40 %. Este facto foi atribuído à baixa energia interfacial entre o tecido e a matriz. Todos os corpos de prova com tecido de juta sofreram uma delaminação e não se romperam totalmente, pois, o tecido segura a matriz impedindo a rotura total no impacto [13].

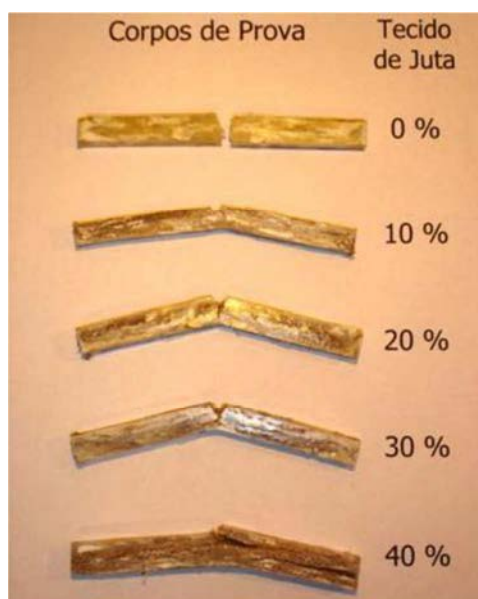


Fig. 4.3 - Aspecto dos corpos de prova rompidos por impacto Charpy [13].

A resistência ao impacto das fibras naturais é muito inferior ao seu direto concorrente, a fibra de vidro.

A resposta ao impacto dos compósitos é muito influenciada pela força de ligação entre a fibra e a matriz. A energia do impacto é dissipada pela delaminação, fratura da fibra e/ou matriz e arrancamento de fibra. A fratura da fibra dissipa menos energia comparando com o arrancamento da fibra. O primeiro caso (fratura da fibra) é comum em compósitos com uma elevada ligação fibra/matriz enquanto o segundo caso (arrancamento da fibra) é um sinal de uma fraca ligação na interface.

Foi verificado experimentalmente que o aumento de energia absorvida está relacionado com o aumento de percentagem de fibra no compósito. Este aumento foi significativo para um aumento da percentagem de 40% para 50% de fibra. Constatou-se também que para uma percentagem de fibra de 50% o tipo de fratura foi serrilhada e maior do que para uma percentagem de fibra de 30% onde a fratura foi mais ou menos plana. Com isto conclui-se que uma fratura serrada absorve mais energia do que uma fratura plana. Uma boa ligação devida, por exemplo, a tratamentos químicos foi identificada como sendo uma possível causa para a redução da resistência ao impacto [5].

4.1.2.3. Organização biológica e estrutural das fibras naturais

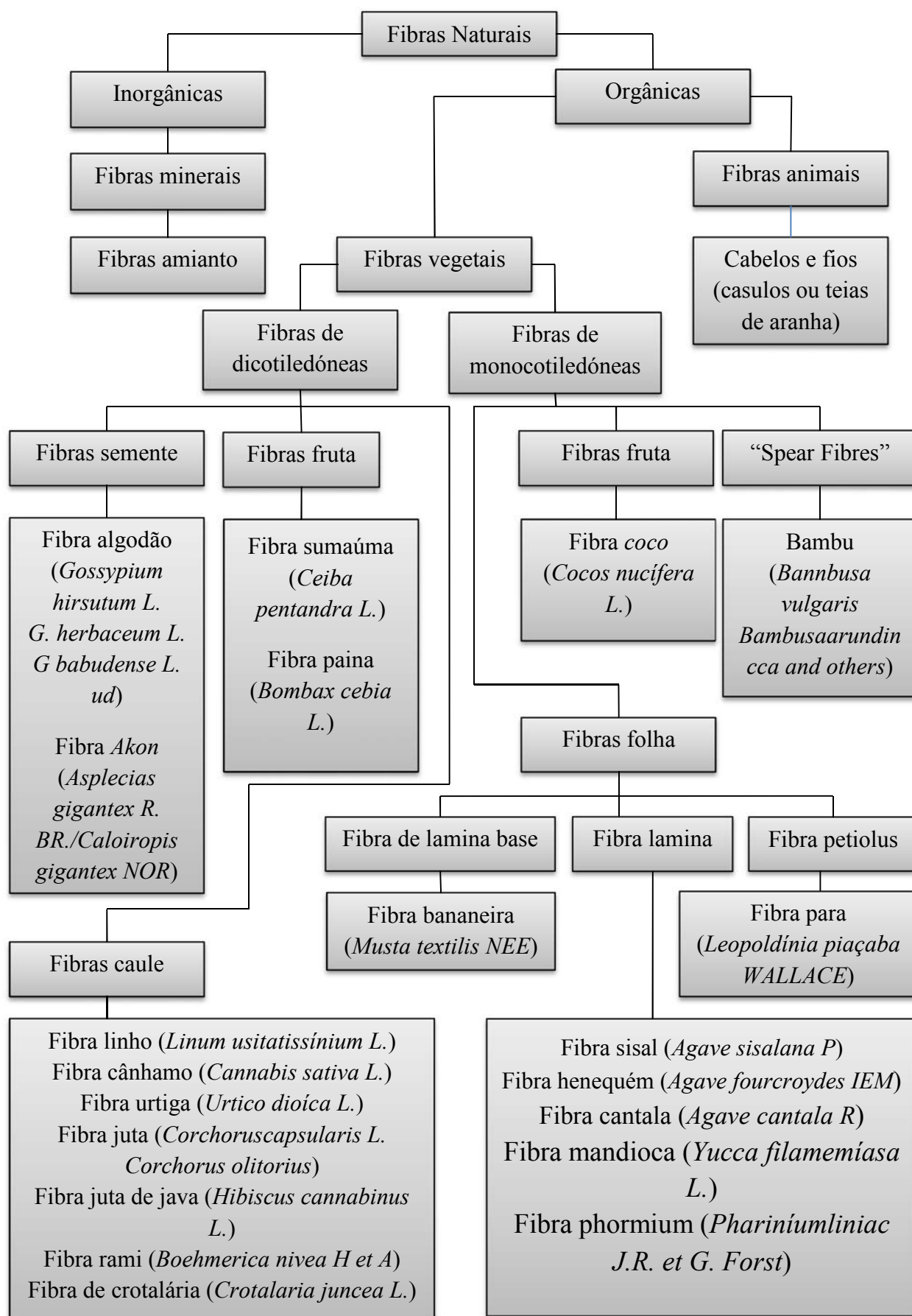
As fibras naturais podem ser orgânicas ou inorgânicas, ou seja, provenientes de fibras de plantas ou animais e provenientes de fibras minerais, respetivamente. Por exemplo:

- Fibras orgânicas de origem vegetal: Abacá, Coco, Algodão, Linho, Cânhamo, Juta, Rami e Sisal;
- Fibras orgânicas de origem animal: lã de Alpaca, lã de Angora, pelos de Camelo, pelo de cabra Caxemira, pelo de cabra Angora, fibra dos casulos de larvas Silk, lã de Ovelha;
- Fibras não orgânicas de origem mineral: Crisotila, Crocidolita, fibra de Basalto e Amianto.

As fibras naturais são provenientes dos vários elementos ou camadas existentes numa planta. Por exemplo:

- Fibras da entrecasca (provenientes do caule): linho, cânhamo, juta, kenaf, rami;
- Fibras da folha: sisal, abacá, palmeira;
- Fibras de semente: Algodão, coco, sumaúma.

De seguida é apresentado um fluxograma generalizado com uma apresentação possível das fibras naturais.



Fluxograma 2 - Visão global das fibras naturais [2].

As fibras naturais provenientes do caule crescem em feixes e organizam-se segundo vários constituintes ou graus existentes numa planta.

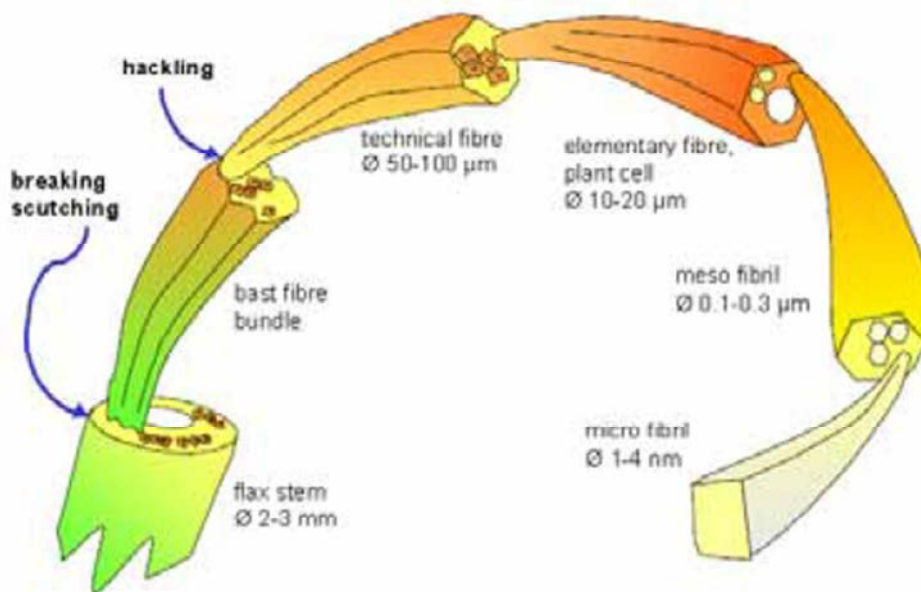


Fig. 4.4 - Hierarquia estrutural de uma fibra natural (Linho) [16].

As propriedades mecânicas das fibras naturais dependem do tipo de celulose e geometria da célula elementar. As cadeias celulósicas são arranjadas paralelamente umas as outras, formando feixes cada uma, contendo 40 ou mais macromoléculas celulósicas ligadas por ligações de hidrogénio e através de ligações com hemicelulose e lignina que conferem rigidez a fibra chamada microfibrila. Mais microfibrilas entrelaçadas formam uma estrutura do tipo corda [16].

Entre as fibras naturais as fibras provenientes do caule são as mais amplamente aceites como as melhores candidatas para se utilizarem como reforços de compósitos devido as suas boas propriedades mecânicas. Como muitos autores concordam, os dois parâmetros básicos que permitem caracterizar o comportamento mecânico das fibras naturais são o conteúdo de celulose e o ângulo da espiral (microfibrilas). No geral, a resistência à tração das fibras aumenta com o aumento do conteúdo celulósico e com a diminuição do ângulo das microfibrilas relativamente ao eixo das fibras [16].

De referir que a rigidez do compósito também depende do comprimento da fibra e do diâmetro da fibra, dado que para menores diâmetros da fibra o contato específico existente entre esta e a matriz será maior, aumentando portanto a rigidez [16].

A tensão de rotura de qualquer compósito depende de vários factores, mas os mais importantes são: as propriedades das fibras, da matriz utilizada e da percentagem de fibra existente no compósito. As propriedades mecânicas das fibras, como o módulo de Young e a tensão de tração máxima estão relacionados não só com a composição química da fibra mas também com a sua estrutura interna. Por exemplo, a baixa resistência à tração do coco comparada com outras fibras naturais deve-se ao seu baixo conteúdo de celulose e razoavelmente elevado ângulo microfibrilar (ângulo entre o eixo da fibra e da fibrila da fibra) [5].

O seguinte gráfico demonstra o efeito das variações do ângulo das microfibrilas de uma fibra retirada da polpa da madeira.

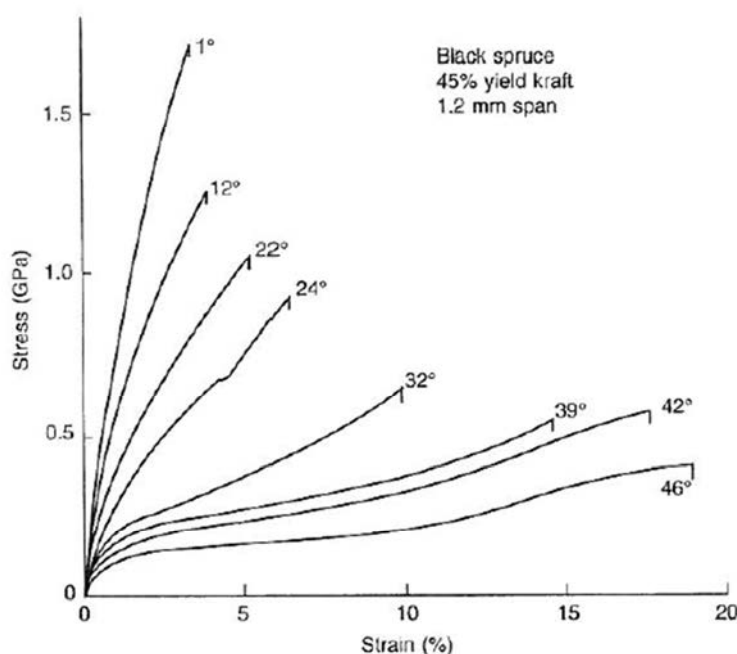


Gráfico 4.1 - Curva tensão-deformação de uma única fibra da polpa da madeira com diferentes ângulos de microfibrilas [1].

A percentagem em peso de fibra (mássica) no compósito altera a sua tensão de rotura positivamente ou negativamente. Como seria de esperar, um aumento da percentagem em peso de fibra produz um aumento correspondente na resistência à tração [5].

4.1.2.4. Comparação das fibras naturais com o seu principal concorrente: fibra de vidro

A seguinte tabela compara vários tipos de fibras orgânicas de origem vegetal.

Tabela 4.8 - Algumas propriedades de fibras naturais versus fibra de vidro [3;8]⁵.

Propriedades	Fibra			
	Fibra de vidro (E)	Linho	Cânhamo	Juta
Densidade [g/cm³]	2,55	1,4	1,48	1,46
Resistência à tração⁶ [× 10⁶ N/m²]	2400	800 – 1500	550 – 900	400 – 800
Módulo de Young (E) [GPa]	73	60 – 80	70	10 – 30
Módulo de Young específico [E/densidade]	29	26 – 46	47	7 – 21
Alongamento até rotura [%]	3	1,2 – 1,6	1,6	1,8
Absorção de humidade [%]		7	8	12
Preço/Kg (\$), bruto	1,3 (1,7/3,8)	1,5 (2/4)	0,6 – 1,8 (2/4)	0,35 – 2

Tabela 4.9 - Algumas propriedades de fibras naturais versus fibra de vidro [3;8]. (Continuação)

Propriedades	Fibra				
	Rami	Coco	Sisal	Abacá	Algodão
Densidade [g/cm³]	1,5	1,25	1,33	1,5	1,51
Resistência à tração⁷ [× 10⁶ N/m²]	500	220	600 – 700	980	400
Módulo de Young (E) [GPa]	44	6	38		12
Módulo de Young específico [E/densidade]	29	5	29		8
Alongamento até rotura [%]	2	15 – 25	2 – 3		3 – 10
Absorção de humidade [%]	12 – 17	10	11		8 – 25
Preço/Kg (\$), bruto	1,5 – 2,5	0,25 – 0,5	0,6 – 0,7	1,5 – 2,5	1,5 – 2,2

⁵Por vezes são dados intervalos de valores nesta tabela. No que diz respeito às fibras naturais, muitos dos fatores que podem dar origem a estes intervalos podem ser atribuídos a: variação dos preços de fornecimento, métodos de processo, condições de teste, influência da temperatura e humidade da fibra.

⁶ Resistência à tração depende fortemente do tipo de fibra. Se é um feixe de fibras ou um filamento.

⁷ Resistência à tração depende fortemente do tipo de fibra. Se é um feixe de fibras ou um filamento.

Da tabela anterior pode-se concluir que:

- A densidade da fibra de vidro é muito superior à do Linho e Juta, sendo a densidade das duas últimas muito semelhante;
- A resistência à tração da fibra de vidro é muito superior à do Linho e Juta;
- O módulo de Young do Linho é superior ao da Juta e pode ser também superior ao da fibra de vidro;
- Em termos específicos, o módulo de Young do Linho facilmente supera a fibra de vidro e a Juta aproxima-se bastante na melhor das hipóteses;
- O alongamento até rotura da fibra de vidro é superior ao do Linho e Juta, sendo entre os dois últimos, o da Juta superior;
- A absorção de humidade como seria de esperar é elevada nas fibras naturais. Sendo de destacar o algodão;
- No preço por Kg a Juta tem uma boa relação.

Tabela 4.10 - Comparação entre as fibras naturais e a fibra de vidro [5].

	<i>Fibras Naturais</i>	<i>Fibra de vidro</i>
Densidade	Baixa	Duas vezes o das fibras naturais
Custo	Baixo	Baixo, mas mais alto que as fibras naturais
Renovabilidade	Sim	Não
Reciclabilidade	Sim	Não
Consumo de energia	Baixa	Alto
Distribuição	Ampla	Ampla
Ausência CO₂	Sim	Não
Abrasivo para as máquinas	Não	Sim
Risco para a saúde quando inalado	Não	Sim
Degradação	Biodegradável	Não é Biodegradável

Na tabela anterior constata-se facilmente as vantagens pelas quais os compósitos reforçados com fibras naturais são alvo de investigação e podem ser um substituto das fibras de vidro.

Um aspeto muito importante a referir nos compósitos reforçados com fibras naturais é a maior variabilidade das suas propriedades (relativamente aos compósitos reforçados com fibras sintéticas), que são influenciados pelo seu reforço, ainda que se use o mesmo tipo de fibra.

Estas variações são esperadas devido a fatores como:

- Condições de crescimento;
 - Época de plantação;
 - Período de crescimento;
 - Época de colheita;
- Condições meteorológicas que ultrapassaram;
- Tipos de tratamentos que receberam durante ou após a colheita podem variar de produtor para produtor e ainda mais de país para país;
- Ainda que fora das propriedades, não deixa de ser uma característica a apontar: variação do preço de produtor para produtor.

4.1.2.5. Juta

4.1.2.5.1. Introdução

Juta é o nome comum dado as fibras extraídas do caule das plantas pertencentes ao género botânico *Corchorus*. Embora sejam conhecidas mais de 40 espécies selvagens, apenas duas são cultivadas comercialmente: *C. capsularis* L. conhecida por “juta branca” e *C. olitorius* conhecida por “juta Tossa” [2].



Fig. 4.5 - Planta de juta em pormenor à esquerda, plantação de juta no meio e fibra de juta vista em microscopia eletrónica a 600x [17;29].

A juta cresce em terrenos de baixa altitude e com elevada humidade, apesar de poder ser cultivada em variadas condições, a ideal é entre 60 e 90 [%] de humidade e 17 e 41°C de temperatura com precipitação anual de 1500 a 2000 [mm]. Um hectare de plantas de juta consome cerca de 15 toneladas de dióxido de carbono e produz cerca de 11 toneladas de oxigénio. Um hectare permite a produção de cerca de 2 toneladas de fibra de juta seca [2;29].

A planta de juta é longa, macia e brilhante, com um comprimento de 1 a 4 [m]. É uma das fibras naturais vegetais mais resistentes e é a 2ª mais produzida mundialmente, a seguir ao algodão. Tem boas propriedades de isolamento térmico e moderada absorção de humidade [17;29].

A parede celular da fibra varia em espessura. As fibras finais são grosseiras, geralmente com diâmetros de 20 a 25 [μm]. O comprimento das fibras finais (fibras que se obtêm depois do ciclo de tratamento) é de cerca de 1 a 5 [mm]. As fibras são compostas por 10 ou mais fibras finais sobrepostas e unidas por material não-celuloso, normalmente a lenhina [2;17].

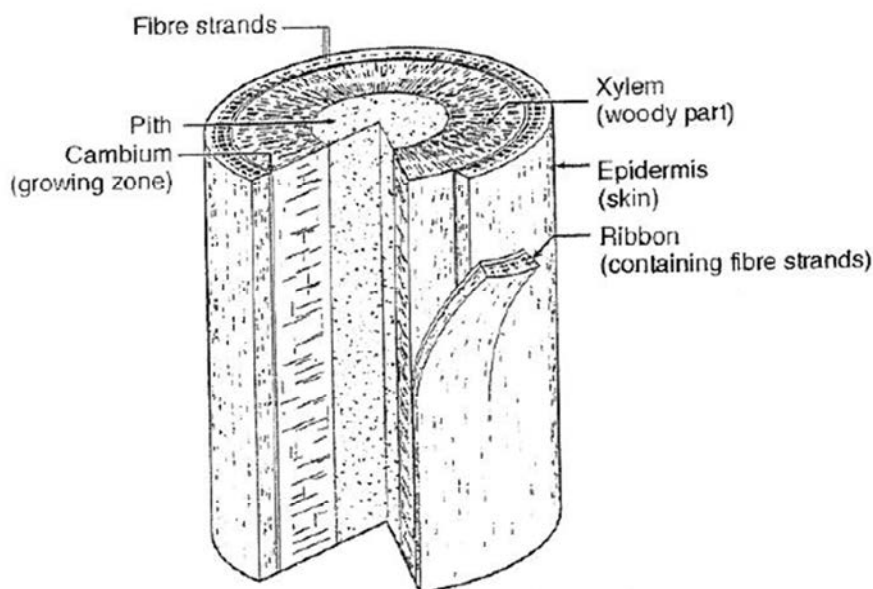


Fig. 4.6 - Diagrama da anatomia do caule da juta [2].

4.1.2.5.2. Processo de produção e comercialização

A juta é produzida artesanalmente, segundo processos manuais e em países onde a mão-de-obra é barata, fator que contribui também para o baixo preço desta fibra. Como exemplo são os seguintes principais produtores de fibra de juta: Bangladesh, Índia, Myanmar e Nepal.

Tabela 4.11 - Produção mundial de fibra de juta entre 2004 e 2010 em milhares de toneladas [17].

Fibra de juta	2004 /2005	2005 /2006	2006 /2007	2007 /2008	2008 /2009	2009 /2010
Extremo Oriente	2054,12	2396,55	2706,7	2668,2	2316,9	2593,8
Bangladesh	810	965	990	990	931	1080
Índia	1193,6	1377	1656	1642,3	1356	1488,8
Myanmar	33,63	36,89	43,6	19,1	12,9	8
Nepal	16,89	17,66	17,1	16,8	17	17
Mundo	2054,12	2396,55	2706,7	2668,2	2316,9	2593,8
Países produtores	2054,12	2396,55	2706,7	2668,2	2316,9	2593,8

Relativamente a Portugal, não existe exportação de fibras de juta e segundo o Grupo de Estudo Internacional de Juta [17] o nível de importação é o seguinte:

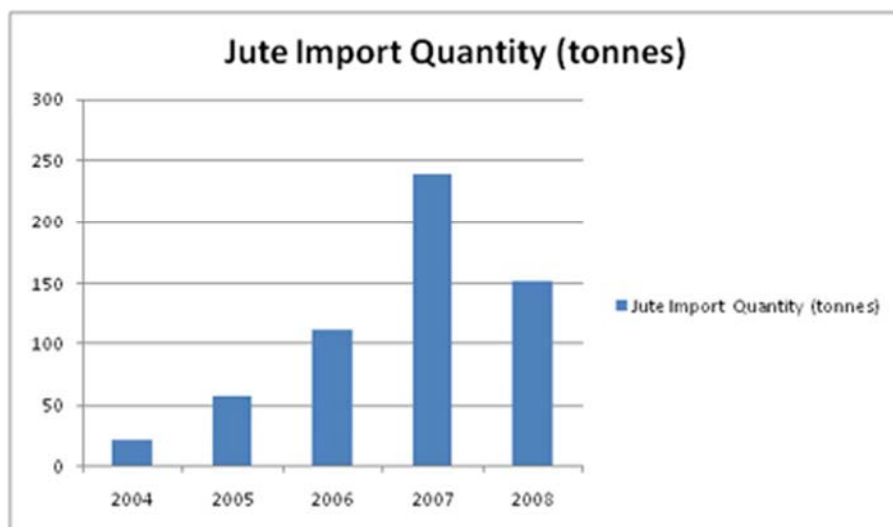


Gráfico 4.2 - Quantidade de importação de juta em toneladas entre 2004 e 2008 [17].

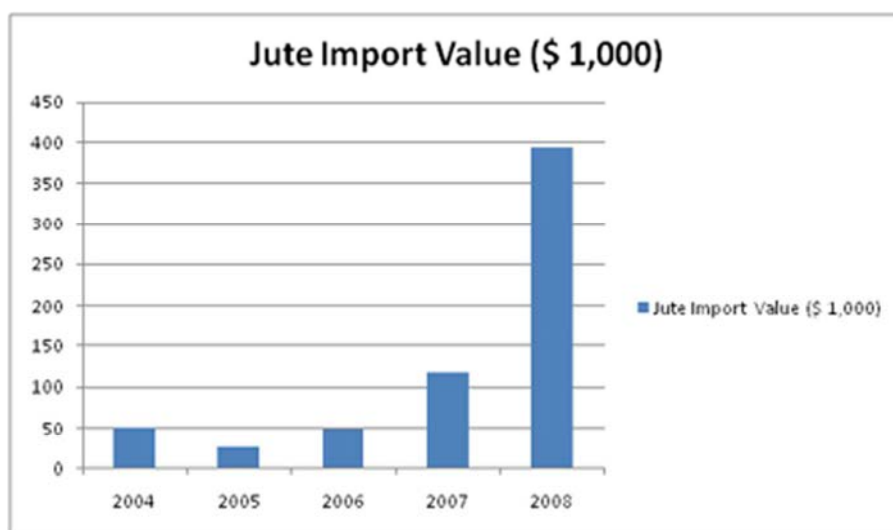


Gráfico 4.3 - Quantidade de importação de juta em milhares de dólares entre 2004 e 2008 [17].

Destes dois gráficos anteriormente expostos verifica-se que apesar do aumento constante da importação de Juta até 2007, houve uma grande redução de 2007 para 2008. No entanto o preço da juta importada aumentou em mais do triplo de 2007 para 2008, o que realmente não reflete a redução de juta importada nesse ano. Como indício desta redução na importação de juta pode ter sido portanto, o aumento do preço significativo para a importação desta.

O preço varia de país para país e de produtor para produtor. No entanto, cada país tem o nível de qualidade da juta bem definido, sendo que esta é diferente da fibra de Juta Branca (W-White) para a fibra de Juta Tossa (T-Tossa). De seguida são apresentadas as características para cada um destes graus de fibras de Juta para a Índia uma vez que a juta usada para a produção dos compósitos testados neste trabalho é proveniente deste país. Estes graus diferem particularmente nas propriedades da cor, espessura, resistência, densidade e proporção de raiz. De notar que na Índia a classificação referente à qualidade de cada tipo de juta é a mesma para a fibra de Juta Branca e para a fibra de Juta Tossa. A próxima tabela estabelece e define bem os parâmetros aqui identificados.

Tabela 4.12 - Classificação das fibras de juta Branca e Tossa na Índia [2;17].

<i>Classificação</i>	<i>Caraterísticas</i>
W1/TD1	Muito boa resistência e cor, corpo da fibra muito fino e pesado, livre de defeitos maiores e menores. Conteúdo máximo de raiz: <i>W1</i> – 10 [%], <i>TD1</i> – 5 [%]
W2/TD2	Boa resistência e cor, corpo da fibra fino e pesado, livre de defeitos maiores e menores. Conteúdo máximo de raiz: <i>W2</i> – 15 [%], <i>TD2</i> – 10 [%]
W3/TD3	Razoavelmente boa resistência e cor, corpo da fibra razoavelmente bem separado, livre de defeitos maiores e menores exceto em alguns pontos. Conteúdo máximo de raiz: <i>W3</i> – 20 [%], <i>TD3</i> – 15 [%]
W4/TD4	Razoável resistência e cor, corpo da fibra razoavelmente bem separado, livre de defeitos maiores e substancialmente livre de manchas e varas soltas. Conteúdo máximo de raiz: <i>W4</i> – 26 [%], <i>TD4</i> – 20 [%]
W5/TD5	Razoável resistência e cor, livre de defeitos maiores. Conteúdo máximo de raiz: <i>W5</i> – 36 [%], <i>TD5</i> – 26 [%]
W6/TD6	Razoável resistência, livre da raiz central, de uma maceração exagerada e razoavelmente livre de emaranhados de varas. Conteúdo máximo de raiz: <i>W6</i> – 46 [%], <i>TD6</i> – 35 [%]
W7/TD7	Fraca mistura da fibra. Conteúdo máximo de raiz: <i>W7</i> – 57 [%], <i>TD7</i> – 35 [%]
W6/TD8	Juta emaranhada e não se enquadra em qualquer uma das classificações acima, no entanto é de valor comercial

O conteúdo puro de fibra nas plantas ainda não maceradas situa-se entre os 4,5 e 7,5 [%]. Aproximadamente 90 a 120 dias depois da sementeira as hastes têm de ser colhidas e maceradas em água. Se estas forem colhidas antes deste período a fibra será fraca, se forem colhidas depois ficam grosseiras e sem brilho o que afetará posteriormente as propriedades mecânicas. No processo as hastes são cuidadosamente organizadas de acordo com a espessura e a zona mais baixa e portanto, mais grosseira, é cortada. Depois da maceração as hastes são decorticadas e os feixes de fibras são lavados e secos [2;17].

O ciclo de produção e tratamento da juta segue a seguinte ordem [17]:

1. Semeio e tratamento da juta



Fig. 4.7 - Semeio da juta do lado esquerdo, tratamento da juta no meio (arrancar ervas daninhas, etc.) e plantação de Juta numa fase avançada do crescimento no lado direito.

2. Maceração da juta



Fig. 4.8 - Maceração das fibras de juta em ambas as imagens.

3. Extração das fibras da juta



Fig. 4.9 - Extração das fibras de juta em ambas as imagens.

4. Lavagem e secagem das fibras de juta



Fig. 4.10 - Lavagem e secagem das fibras de juta em ambas as imagens.

Por fim resta empilhar as fibras de juta e transportá-las para o mercado onde serão vendidas para consumo interno ou para exportação.

Breve explicação do processo de maceração [2;17]

Em geral, a prática de maceração da fibra de juta nos próprios locais de crescimento é mergulhar conjuntos de juta em água límpida e com circulação lenta, como por exemplo: canais, riachos, tanques, lagoas ou valas. A proporção mínima de fibra de juta na água deverá ser de 1: 20. As condições necessárias para uma boa maceração são:

- A água deve ser doce e límpida;
- O volume de água deve ser o suficiente por forma a permitir que os conjuntos de fibras de juta flutuem;
- Conjuntos de fibras quando mergulhadas não devem de tocar o fundo;
- O mesmo tanque ou vala não deve ser usado quando esta se tornar suja.

A maceração é usada há muito tempo e é feita antes da extração das fibras da juta ou de fibras associadas a outros tipos de fibras vegetais provenientes do caule da planta, uma vez que as fibras estão contidas no interior da casca ou da pele exterior do caule. Outros casos de plantas que sofrem este tipo de tratamento são:

- Linho;
- Cânhamo;
- Kenaf;
- Rami.

A maceração é uma etapa importante para a produção de fibras de qualidade. Tem como objetivo eliminar as substâncias de goma que cimentam a fibra ao resto dos tecidos no caule. No caso da juta e fibras aliadas isto envolve a maceração dos caules na água, onde as enzimas produzidas pela ação bacteriana removem a pectina e os materiais de goma, podendo depois as fibras serem extraídas do núcleo de madeira. A prática existente na Índia será a única a ser enunciada devido à fibra de juta que é usada neste trabalho ser proveniente desse país.

Na Índia a planta é colhida a estágios de maturidade diferentes que dependem de várias circunstâncias. O estágio mais comum de colheita é quando 50 [%] das plantas tenham produzido vagens. Conjuntos formados de fibras são organizados em 2 ou 3 camadas e colocadas debaixo de água. A maceração de todas as plantas é completada passados 15 a 20 dias.

Breve explicação da extração e lavagem das fibras de Juta [2;17]

Depois de completa a maceração das plantas ou mais especificamente, das hastes, a extração das fibras das plantas maceradas, a sua lavagem e secagem começa. Se a extração das fibras for atrasada, a biodegradação das fibras toma lugar e a qualidade da fibra é afetada.

Basicamente, a extração das fibras consiste na remoção das várias camadas do caule da planta para que finalmente se consigam chegar às fibras, que no caso da juta, encontram-se na superfície exterior do caule.

A extração e lavagem podem ser feitas em simultâneo seguindo outro método. A extração das fibras é feita entre 0,5 a 0,7 [m] debaixo de água, pegam-se em 8 a 10 caules de cada vez, são esmagadas as pontas até que a fibra seja solta, separam-se as fibras, amarram-se as fibras aos dedos, e é mergulhada a porção restante na superfície da água e horizontalmente. Este processo é repetido mas enrolando-se na palma da mão até que a fibra seja completamente libertada. Depois disto, a fibra é agitada 2 a 3 vezes à superfície da água para que se complete a lavagem.

4.1.2.6. Linho

O linho é um dos mais antigos têxteis usados pela humanidade. O linho (*Linum Usitatissimum*) é uma dicotiledónea da família Linácea. As fibras de linho variam entre 80 e 120 [cm] de comprimento com um diâmetro de 3 [mm].

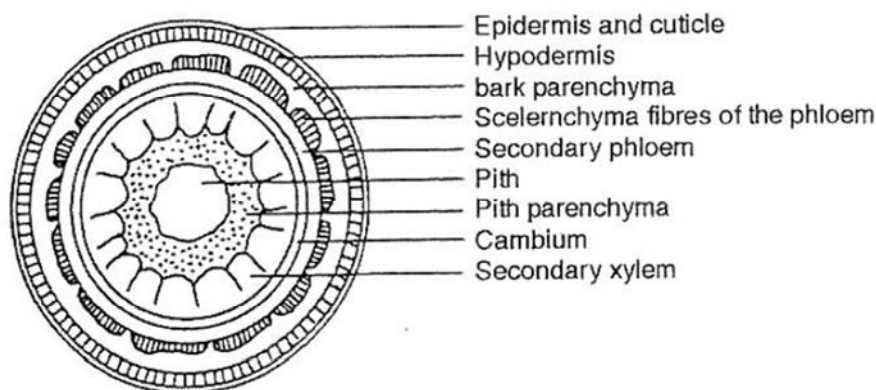


Fig. 4.11 - Secção de corte do caule do linho [2].

As fibras que na figura anterior se localizam no floema do caule são apresentadas de seguida.

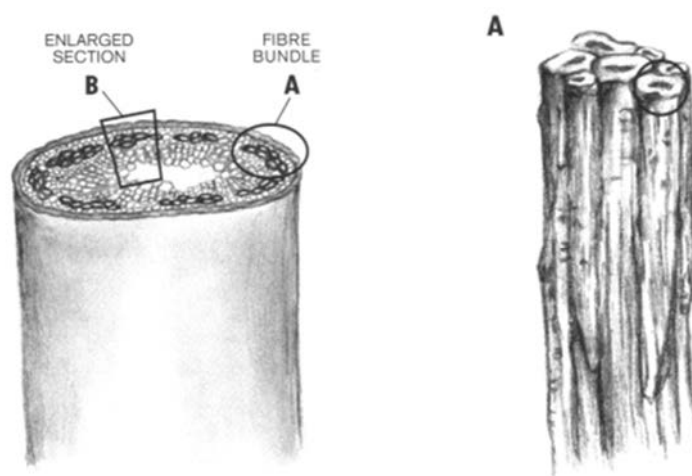


Fig. 4.12 - Caule do linho do lado esquerdo e conjunto de fibras extraídas do floema do caule do lado direito [30].

O principal constituinte das fibras de linho é a celulose, com pequenas quantidades de hemicelulose, lenhina, pectina, óleos e ceras. A celulose, hemicelulose e pectina são encontradas nas paredes celulares.

As principais características físicas do linho são [2]:

- Rápida absorção e perda de humidade;
- Alta cristalinidade do componente celulósico da fibra, resultando em:
 - Baixo comprimento dos fios de linho;
 - Alta tenacidade das fibras e fios;
 - Relativamente baixa resistência à abrasão dos tecidos de linho;
 - Alto brilho dos tecidos de linho, especialmente os produzidos a partir de fios molhados;
 - Tecidos de linho esteticamente atraentes.

Muitas das outras fibras provenientes do caule da planta, como é o caso da juta, também partilham de algumas destas características físicas e químicas do linho.



Fig. 4.13 - Plantação de linho.

O linho depois de cultivado e de apanhado passa por processo de ripagem que tem como objetivo separar a baganha (película que envolve algumas sementes). Seguidamente é posta a secar ao Sol para depois serem extraídas as sementes através de pancadas verticais no topo do linho (onde se encontram as sementes). Desta fase inicial obtêm-se as sementes de linhaça. Seguidamente é sujeito a um processo de maceração e secagem que é em tudo idêntico ao da juta. Por fim é feita a preparação das fibras obtidas através da separação das fibras lenhosas das fibras têxteis. Desta separação que pode ser feita manualmente em algumas etapas ou por um processo mecânico de uma só vez resultam fibras de menores ou maiores comprimentos, e de diâmetros maiores ou menores. As fibras longas e mais finas apresentam maior resistência [2;30].

Aquando dos processos de tratamento da fibra de linho colhida, das várias dimensões obtidas dos processos, existem diferentes tipos de mercados alvos. Na tabela seguinte apresenta-se o tipo de fibra e o custo por tonelada associado [30]:

Tabela 4.13 - Tipos de fibras de linho e o seu custo por tonelada [30].

<i>Tipo de fibra de linho</i>	<i>EUA \$ /tonelada</i>
<i>Fibra grossa (produção de papel)</i>	300 – 600
<i>Fibra média (isolamento e compósitos)</i>	500 – 1200
<i>Fibra fina (têxteis, para misturar com algodão, compósitos)</i>	800 – 1500
<i>Fibra longa (têxteis de maior qualidade, compósitos)</i>	1800 – 3500
<i>Fibra com algodão⁸ (têxteis, compósitos)</i>	1400 – 4000

São apresentados na seguinte tabela dados relativamente à produção, área de plantação e colheita em vários países do mundo no ano de 2009 [30]:

Tabela 4.14 - Produção, área de plantação e colheita de fibras de linho por região e País em 2009 [30].

	<i>Colheita em toneladas</i>	<i>Área em hectares</i>	<i>Produção em toneladas/hectare</i>
Mundo	458,002	415,179	1,10
Europa Ocidental	98,098	83,973	1,17
Áustria	3,88	3	1,29
Bélgica	12,500	11,277	1,11
França	67,000	56,602	1,18
Itália	477	3,043	0,16
Holanda	3,374	2,850	1,18
U.K.	14,743	10,198	1,45
Europa Oriental	102,079	132,551	0,77
Bielorrússia	46,983	64,785	0,72
Bulgária	110	46	2,39
Republica Checa	461	153	3,01
Estónia	112	85	1,32
Letónia	100	50	2,00
Lituânia	31	100	0,31
Polónia	422	1,897	0,22
Romênia	100	35	2,86
Rússia	52,560	53,500	0,83
Ucrânia	1,200	1,800	0,67
América do Sul	4,145	4,625	0,90
Argentina	1,614	2,443	0,60
Chile	2,531	2,182	1,16
Médio Oriente	8,274	10,014	0,83
Egito	8,274	10,014	0,83
Ásia	245,406	91,016	2,70
China	245,406	91,016	2,70
América do Norte	—	93,000	0,25
Canada	—	81,000	0,25
U.S.A.	—	12,000	0,25

⁸ Consiste em misturar fibra de linho com algodão e tritura-las até que se obtenha uma mistura homogenia.

4.2. INTERFACE

A contribuição das fibras para as propriedades finais do compósito depende de [16]:

- Propriedades mecânicas das fibras;
- Tipo (contínuo/descontínuo) e orientação das fibras no compósito (anisotropia);
- Fração volúmica de fibras;
- Interface fibra/matriz;
- Técnica de processamento usada para a fabricação do compósito.

A interface é um dos fatores mais importantes para se obterem compósitos com boas propriedades mecânicas e representa um dos maiores problemas nos compósitos de fibras naturais, no sentido de que esta é muito difícil de se estabelecer com uma elevada força de ligação da fibra com a matriz.

Esta dificuldade deve-se essencialmente à elevada capacidade de absorção de humidade das fibras naturais (hidrofilicas), característica que é incompatível com a baixa capacidade de absorção de humidade das matrizes poliméricas (hidrofóbicas).

A função principal da matriz é a de transferir carga para as fibras através das tensões de corte na interface. Portanto, encaminhar as solicitações exteriores aplicadas ao compósito para o constituinte responsável pela resistência, que é a fibra. Este processo requer uma boa ligação entre a matriz polimérica e as fibras. Uma fraca adesão na interface resulta num compósito com fracas propriedades mecânicas e com maiores probabilidades de enfraquecimento por ataques químicos ou físicos gerados pelo meio em que foi integrado, resultando numa redução significativa do tempo de vida.

Esta propriedade deverá ser melhorada através de [5]:

- Tratamentos físicos: tratamento de plasma a frio e tratamento de coroa;
- Tratamentos químicos: anidrido maleico, organossilanos, isocianatos, hidróxido de sódio, permanganato e peróxido sódio.

Um estudo foi feito para verificar se o tratamento das fibras de juta com silano melhorava as propriedades mecânicas do compósito. Houve um melhoramento da tensão, resistência à flexão e rigidez de compósitos feitos de Juta-Epóxico [5].

Verificou-se que, a deslignificação através de branqueamento ou limpeza cria uma melhor ligação na interface entre a juta e a matriz de poliéster, obtendo-se assim melhores propriedades mecânicas dos compósitos [5].

Foram identificados alguns agentes de acoplamento como o anidrido maleico para incorporar os grupos hidroxilo na matriz através de hidrofilição e consequentemente houve o melhoramento do efeito da molha da resina nas fibras. Os grupos hidroxilo interagem com as moléculas OH^- sobre as fibras lignocelulósicas via ligação de hidrogénio produzindo assim uma ligação forte [5].

Foi feito um estudo das propriedades mecânicas de compósitos de fibras de juta com matriz polimérica de poliéster. Neste artigo [14] estudou-se também a absorção da água pelas fibras que foram preparadas com tratamentos diferentes.

Tabela 4.15 - Absorção de água [%] pela juta (24h à temperatura da sala).

<i>Juta</i>	<i>Água absorvida [%]</i>
<i>Como foi recebida</i>	112,20 ± 8,48
<i>Lavagem com detergente</i>	89,84 ± 1,22
<i>Lavagem com acetona</i>	83,95 ± 7,53

Ora, se é conseguida uma redução da absorção da água pela fibra com tratamentos químicos, será de esperar uma melhor adesão das fibras com a matriz polimérica e portanto as propriedades mecânicas deverão melhorar. No entanto, é de referir que segundo este artigo [14], compósitos muito frágeis ou com uma ligação fibra/matriz muito forte têm uma baixa absorção de energia ao impacto. A energia absorvida por compósitos molhados foi mais baixa que a absorvida por compósitos secos.

A secagem das fibras antes de se fabricarem os compósitos é muito importante caso contrário a água age como um agente separador da interface fibra/matriz. Adicionalmente, devido à evaporação da água aquando da cura que é feita a elevadas temperaturas, vão ser criados vazios na matriz.

Também foi verificada a absorção da água pelos compósitos que foram fabricados usando os três tipos de fibras apresentadas na tabela anterior segundo aqueles diferentes tratamentos. Os resultados foram [14]:

Tabela 4.16 - Absorção da água [%] pelos compósitos (24h à temperatura da sala).

<i>Orientação [°]</i>	<i>Como foi recebida</i>	<i>Lavagem com detergente</i>	<i>Lavagem com acetona</i>
0	10,1 ± 1,3	8,9 ± 0,3	10,0 ± 0,7
30	9,1 ± 0,4	8,6 ± 0,4	10,5 ± 1
45	9,2 ± 1,1	8,7 ± 0,4	9,2 ± 0,6

4.3. MATRIZES

4.3.1. Introdução

A matriz é a fase contínua de um compósito e é um constituinte fundamental que tem como objetivo:

- Manter a coesão das fibras;
- Proteger as fibras do meio envolvente;
- Proteger as fibras do dano durante o manuseamento;
- Distribuir o carregamento pelas fibras;
- Redistribuir o carregamento pelas fibras resistentes em caso de rotura;

Esta fase pode ser um metal, polímero, cerâmico ou cimento. Serão tratados os polímeros dado que atualmente são os utilizados nas matrizes reforçadas com fibras vegetais, devido ao seu fácil processamento, baixa densidade e visto que se recorrerá a estes para todas as experiências e ensaios a serem feitos.

A matriz polimérica divide-se em dois grandes grupos que são os termoplásticos e os termoendurecíveis.

Dos termoplásticos podem ser enunciados:

- **Ácido polilático (PLA);**
- Polipropileno (PP);
- Poliamida (PA);
- Policarbonato (PC);
- Poli-éter-éter-cetone (PEEK);
- Poliimidas termoplásticas;
- Polisulfureto de fenileno (PPS).

Dos termoendurecíveis podem ser enunciados:

- Poliésteres insaturados;
- Resinas de viniléster;
- Resinas fenólicas;
- **Resinas de epóxido;**
- Bismaleimidas;
- Poliimidas termoendurecíveis.

Dos dois grandes grupos de resinas poliméricas vão ser estudados compósitos de matrizes termoplásticas de ácido polilático, sendo que estes serão reforçados com fibras longas e bidirecionais de linho e compósitos de matrizes termoendurecíveis de epóxido reforçados com fibras longas e bidirecionais de juta.

No primeiro caso apresentado, o compósito já é comprado híbrido, com 40 [%] de fibra de linho e 60 [%] de PLA.

4.3.2. Comparação matrizes termoplásticas com matrizes termoendurecíveis

Os termoplásticos são formados a partir de macromoléculas individuais lineares sem qualquer reticulação entre si. Estas moléculas de grandes dimensões são mantidas nas suas posições à custa de ligações secundárias (forças intermoleculares), tais como forças van der Waals e ligações de hidrogénio. Quando se aquecem os polímeros termoplásticos, estas ligações são temporariamente quebradas e passa a existir mobilidade molecular que permite a reconformação. Com o arrefecimento posterior, as moléculas fixam-se nas posições entretanto alcançadas, restabelecendo-se as ligações químicas acima referidas. Em geral, os termoplásticos salientam-se por apresentarem maior resistência ao impacto, maior tenacidade e bastante menor nível de higroscopia quando comparados com os polímeros termoendurecíveis. Estes podem ser reciclados, o que constitui um ponto importante nos dias de hoje [4].

Os polímeros termoplásticos não possuem estruturas químicas com ligações cruzadas e detêm as seguintes propriedades termomecânicas [1]:

- Comportamento frágil abaixo da temperatura de transição vítrea, T_g ;
- Comportamento viscoelástico imediatamente acima da T_g seguido de elasticidade e de comportamento de fluído a altas temperaturas;
- Geralmente com estrutura semi-cristalina ou completamente cristalina com esferolite;
- Capacidade para se deformar viscoelasticamente ou plasticamente;
- Pode ser derretido e reformado até um número limite de ciclos antes de se degradar significativamente;
- Pode ser injetado por moldação por muitos ciclos, especialmente o polipropileno;
- Pode ser resistente ao impacto se a temperatura do local de teste estiver acima da T_g ;
- A temperatura máxima de trabalho é geralmente mais baixa que a dos termoendurecíveis.

As matrizes termoendurecíveis são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas. Os termoendurecíveis, ao contrário dos termoplásticos, não podem ser reprocessados. Uma vez aquecidos assumem uma forma permanente. Quando os componentes (resina e acelerador e/ou catalisador) são misturados na proporção adequada, dá-se a polimerização e a constituição da estrutura tridimensional, num processo que se designa habitualmente por “cura”. Uma das principais vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação do reforço, dado que, antes da cura, apresentam viscosidades bastante inferiores às dos termoplásticos [4].

Os polímeros termoendurecíveis possuem estruturas químicas com ligações cruzadas e depois de estabelecidas as ligações possuem as seguintes propriedades termomecânicas [1]:

- Comportamento essencialmente frágil ao longo de um intervalo amplo de temperaturas;
- Incapacidade de se deformar viscoelasticamente;
- Com comportamento elástico;
- Estrutura não-cristalina sob a forma de uma rede de ligação cruzada;
- Polímero irá degradar ou queimar em vez de derreter;
- Pode-se fazer moldação por transferência de resina em apenas um ciclo;
- Não pode ser reciclado por fusão ou reformação.

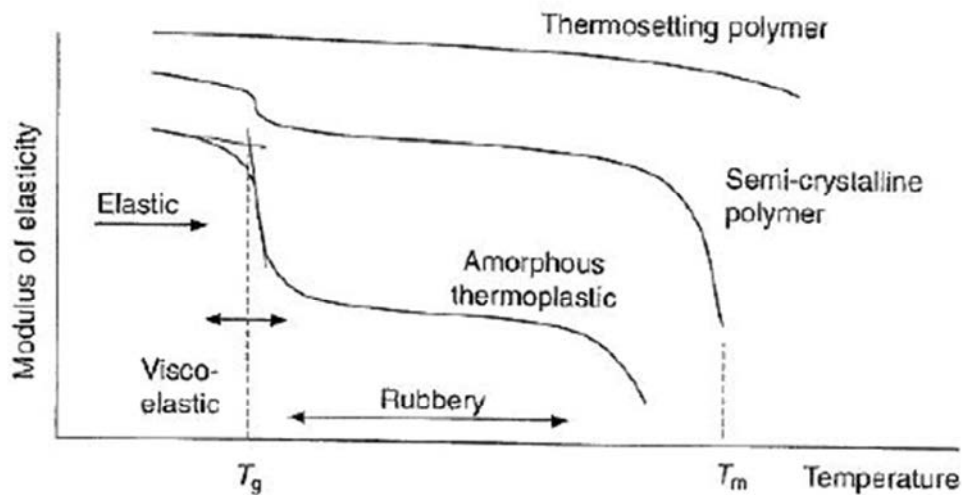


Gráfico 4.4 - Curva característica do módulo de elasticidade em função da temperatura para os polímeros [1].

Sendo:

T_g – Temperatura de transição vítrea

T_m – Temperatura de fusão

4.3.3. Biocompósitos e o PLA

Para se obterem biocompósitos não basta reforçá-los unicamente com fibras naturais, é necessário também que a matriz polimérica seja de origem natural. Para isso deve-se recorrer a matrizes poliméricas termoplásticas como é o caso do PLA.

O PLA é comercialmente interessante devido as suas boas propriedades mecânicas, transparência do filme, biodegradabilidade, biocompatibilidade e disponibilidade a partir de fontes renováveis. Também pode sofrer ajustes através de variações na morfologia polimérica e cristalinidade, copolímeros de PLA podem-se comportar como um vidro ou um material do tipo elástico com uma grande variação das propriedades mecânicas. Em geral, as propriedades do PLA (por exemplo resistência à tração) estão fortemente dependentes do peso molecular. Estudos mostram que polímeros e copolímeros de ácido láctico/ácido glicólico podem manter a sua estabilidade em condições de armazenamento durante pelo menos um ano. No entanto, em água destilada à temperatura ambiente as propriedades mecânicas baixam em poucos meses [1;9].

O PLA e os seus copolímeros degradam-se em produtos não-tóxicos abaixo de certas condições mínimas de temperatura e humidade e a degradação ocorre inicialmente através de um processo hidrolítico não-enzimático. Visto que o PLA e os seus copolímeros são solúveis em água só com muito baixo peso molecular, o peso molecular pode reduzir rapidamente depois da penetração da água mas a massa bem como a forma do PLA podem ser preservadas até que haja uma degradação muito profunda [1;9].

Em geral, a taxa de decomposição depende não só das características do polímero aquele nível molecular mas também das propriedades superficiais, porosidade e a presença de aditivos no processo.

Os polímeros baseados em ácido láctico podem sofrer o mesmo tipo de processos que os termoplásticos convencionais sofrem, no entanto, é preciso algum cuidado para que reações químicas, térmicas e mecânicas não se sucedam, provocando a degradação do polímero durante o processo. Temperaturas de processo acima de 200 [°C] devem ser evitadas.

4.3.4. Reciclagem

A reciclagem pode ser dividida em quatro categorias [4;9]:

- Primária: Envolve o reprocessamento dos resíduos com o objetivo de obter um produto igual ou similar ao original. Em geral é o que acontece aos componentes fabricados com resinas termoplásticas não reforçadas;
- Secundária: O produto obtido após reciclagem não apresenta as mesmas propriedades do material original. Isso acontece porque, durante a vida do produto, algumas das suas propriedades degradaram-se e não são recuperáveis;
- Terciária: Os polímeros usados nos compósitos são separados nos seus componentes químicos. Os hidrocarbonetos obtidos podem ser usados como monómeros, polímeros, combustíveis e outros químicos, contribuindo para a conservação dos recursos petrolíferos;
- Quaternária: Os resíduos são queimados e a energia obtida a partir do gás ou fuel produzido pelo processo é usada para outras aplicações.

As técnicas atualmente mais usadas para a reciclagem de compósitos são: trituração, pirólise, incineração e dissolução por ácidos.

4.3.5. Resinas de epóxido

São resinas termoendurecíveis com baixo peso molecular e apresentam grande variedade de formulações químicas. O esquema de cura destas resinas passa pela adição de um agente endurecedor apropriado, como aminas alifáticas, aromáticas ou algumas poliamidas. O custo destas resinas é cerca de quatro vezes o preço das resinas de poliéster e cerca de duas vezes o custo das resinas de viniléster.

Como vantagens principais [4;9]:

- Elevada resistência mecânica;
- Resistência à abrasão;
- Resistência química (sobretudo em meios alcalinos);
- Boas propriedades de adesão à fibra (quando sintética);
- Processo de cura sem libertação de voláteis;
- Grande estabilidade dimensional em resultado da sua baixa contração (2 a 3 [%]);
- Baixa absorção de água;
- Temperaturas de funcionamento tipicamente entre 100 e 220 [°C];
- Apresentam bom processamento, embora inferior à apresentada pelas resinas de poliéster, face às maiores viscosidades iniciais e aos tempos de cura longos.

Por outro lado, as formulações de base são frágeis, mas esta deficiência é facilmente colmatada através de aditivos de alta tenacidade, tais como alguns termoplásticos como o ABS e borrachas CTBN. Não podem ser reciclados.

Apresenta-se de seguida uma tabela com algumas vantagens e desvantagens de três resinas muito utilizadas [6]:

Tabela 4.17 - Vantagens e desvantagens de três resinas largamente utilizadas [6].

<i>Resina</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Poliéster</i>	Fácil uso Possui o menor preço das resinas disponíveis (1 – 2 £/kg)	Propriedades mecânicas moderadas Alta emissão de estireno em moldes abertos Encolhimento a curas de temperatura elevada Baixo intervalo de tempo para trabalho
<i>Viniléster</i>	Elevada resistência ao meio ambiente ou a ataques químicos Melhores propriedades mecânicas que o Poliéster	Necessidade de pós-cura para melhoramento das propriedades Alto conteúdo de estireno Preço superior ao Poliéster (2 – 4 £/kg) Encolhimento a curas de temperatura elevada
<i>Epóxi</i>	Elevadas propriedades mecânicas e térmicas Elevada resistência à água Alto intervalo de tempo para trabalho Resistência a temperaturas acima de 140°C molhada ou 220°C seca Encolhimento a curas de temperatura elevada	Preço superior ao Viniléster (3 – 15 £/kg) Mistura crítica Corrosivo durante manuseamento

E algumas propriedades de resinas termoplásticas [1]:

Tabela 4.18 - Propriedades físicas de PLA, PGA, PCL e PHB [1].

<i>Tipo de polímero</i>	<i>Densidade [g/cm³]</i>	<i>Resistência à tração [MPa]</i>	<i>Módulo de tensão [GPa]</i>	<i>Deformação [%]</i>	<i>T_g [°C]</i>	<i>T_m [°C]</i>
<i>PLA</i>	1,21 – 1,25	21 – 60	0,35 – 3,5	2,5 – 6	45 – 60	150 – 162
<i>PGA</i>	1,5 – 1,707	60 – 99,7	6 – 7	1,5 – 20	35 – 45	220 – 233
<i>PCL</i>	1,11 – 1,146	20,7 – 42	0,21 – 0,44	300 – 1000	–60 a – 65	58 – 65
<i>PHB</i>	1,18 – 1,262	40	3,5 – 4	5 – 8	5 – 15	168 – 182

4.4. APLICAÇÕES E EVOLUÇÃO DOS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS

Como é sabido, os compósitos reforçados com fibras sintéticas já ocupam um lugar de grande importância em muitas das aplicações de média e especialmente de elevada performance, como é o caso das fibras de carbono na indústria aeronáutica, aeroespacial e automóvel de competição. Onde estas apresentam propriedades mecânicas de excelência.

Contudo, muitas das aplicações de baixa exigência estrutural já estão a ser tomadas por compósitos reforçados com fibras naturais, especialmente na indústria automóvel. Esta vontade já existiu em 1930, onde Henry Ford promoveu o uso de *compósitos verdes* em aplicações da indústria automóvel. 50 anos depois a indústria automóvel tornou a ganhar interesse nos *compósitos verdes* e hoje em dia muitas empresas de automóveis já os implementam nos carros produzidos [1].

Os compósitos reforçados com fibras naturais têm geralmente mais baixa densidade do que os compósitos convencionais (por exemplo, fibra de vidro com polímero) e por isso oferece, apesar de baixa, uma redução do peso; isto é uma característica importante no transporte moderno onde a preocupação ambiental passa pela redução dos consumos e dos gases produzidos. A renovabilidade deste tipo de compósitos também é um factor importante, bem como a biodegradabilidade que é uma vantagem do ponto de vista da reciclagem e uma desvantagem durante o tempo de vida do produto. Atualmente as fibras naturais ainda estão atrasadas relativamente às fibras sintéticas em termos de desenvolvimento tecnológico para uso industrial. É necessário que as fibras naturais sejam desenvolvidas de forma a se obterem fibras bem caracterizadas com propriedades uniformes e serem distribuídas com mais controlo e segurança para que não sofram degradação na exportação/importação [10].

No mundo atual onde o consumismo perdura, o tempo de vida de um produto é curto e por vezes a durabilidade não é tão importante, mas o fim de vida já é. Compósitos poliméricos reforçados com madeira WPC⁹ e cuja matriz polimérica é biodegradável, como por exemplo o PLA têm excelentes potencialidades [1].

A introdução de diretivas como fim de vida de um veículo ELV¹⁰ e diretiva de desperdício elétrico e de equipamento eletrónico WEEE¹¹, baseadas no princípio do poluidor-pagador, pode não só estimular o aperfeiçoamento na reciclagem dos produtos mas também criar oportunidades dos materiais biodegradáveis serem aplicados nestes produtos. Produtos como por exemplo: caixas para computadores e monitores, proteções para telemóveis, podem teoricamente, ser produzidos com materiais biodegradáveis [1].

⁹ Wood Plastic Composites

¹⁰ End-of-Life Vehicle

¹¹ Waste Electrical and Electronic Equipment Directive

Atualmente, painéis de acabamentos interiores em automóveis, como painéis das portas, painéis de instrumentos e coberturas interiores do teto dos carros são feitos com compósitos que usam fibras naturais provenientes do caule e da folha, sendo que do caule se inclui a muito usual fibra de juta, como reforço. As vantagens inerentes ao uso destes compósitos são [2]:

- Torna o veículo mais leve, levando a poupança de energia;
- Baixa condutividade térmica da fibra de juta, que portanto age como uma boa barreira de transferência de calor;
- Performances equivalentes quando comparados com o uso de compósitos reforçados com fibras sintéticas.

Foram desenvolvidos painéis para carros pela IJIRA¹² através do processo de fabrico RTM¹³, usando matriz polimérica de poliéster com fibras de juta e foram determinadas as seguintes vantagens relativamente a compósitos de matriz polimérica de poliéster com fibras de vidro [32]:

- Substancialmente mais barato que o vidro;
- Oferece grandes reduções de peso;
- Permite mais fácil reciclagem das partes moldadas;
- Não são tão abrasivas como as fibras de vidro e portanto desgastam menos as ferramentas.

¹² Indian Jute Industrie's Research Association [32]

¹³ Reaction Transfer Moulding

Na tabela apresentada de seguida constata-se algumas das áreas de aplicação e quais as aplicações para os compósitos reforçados com fibras de juta.

Tabela 4.19 - Algumas áreas de influência dos compósitos reforçados com fibras de juta e suas vantagens [33].

<i>Áreas de aplicação</i>	<i>Vantagens</i>
<i>Industria automóvel</i>	Painéis de portas; Bancos traseiros; Revestimento interior para insonorização e rigidez; Painéis de bordo; Forro de malas. Leve; Uso mais reduzido de Matéria-prima; Custo reduzido; Propriedades mecânicas razoáveis; Uso de fonte renovável.
<i>Componentes de construção</i>	Portas; Janelas; Paredes divisórias; Isolamento; Chão. Melhores propriedades físicas; Melhor resistência ao fogo, térmitas e humidade; Disponível num estado semiacabado o que reduz o custo de finalização.
<i>Setor do transporte</i>	Pavimentação; Isolamento; Banco. Melhores propriedades físicas; Melhor resistência ao fogo, térmitas e humidade; Disponível num estado semiacabado o que reduz o custo de finalização.
<i>Mobiliário</i>	Mesas; Cadeiras; Armário de cozinha. Melhores propriedades físicas; Melhor resistência ao fogo, térmitas e humidade; Disponível num estado semiacabado o que reduz o custo de finalização.

4.5. PROCESSOS DE FABRICO

Os processos de fabrico representam uma das fases mais importantes para a criação de compósitos, conseguindo-se:

- Reprodutibilidade do produto a produzir;
- Melhores propriedades mecânicas do produto fabricado;
- Possibilidade de produzir produtos de maior complexidade;
- Aumentar a produção de compósitos e reduzir tempos de ciclo;
- Permite alterações do projeto com alguma facilidade e precisão (como por exemplo pressões e temperaturas aplicadas).

Foram feitos compósitos manualmente e pré-impregnados sendo estes depois consolidados na prensa de pratos quentes. É importante que na continuidade deste trabalho se façam compósitos segundo outros processos de fabrico para se tentarem obter melhorias das propriedades mecânicas como por exemplo o uso de autoclave para consolidação do pré-impregnado.

4.5.1. Moldação Manual

A moldação manual é um processo não automatizado e que é destinado à produção de compósitos em baixa série. Neste método, o empilhamento e a impregnação de sucessivas camadas de reforço (sob a forma de manta ou tecido) é feito manualmente em molde aberto.

Sendo este um processo que requer elevada mão-de-obra, embora pouco qualificada, tem um peso considerável nos custos. As principais vantagens do método são: simplicidade, reduzido investimento inicial, poucas restrições à geometria das peças a realizar (espessuras mínimas de 1 [mm] e raios de curvatura mínimos de 5 [mm]). As maiores desvantagens estão associadas à necessidade de uma quantidade de mão-de-obra importante, à forte dependência da habilidade e cuidado do operário, baixa produtividade, bom acabamento superficial numa só face, teor de fibra heterogêneo, necessidade de maquinaria da peça para eliminação de rebarbas e melhorar acabamento [4].

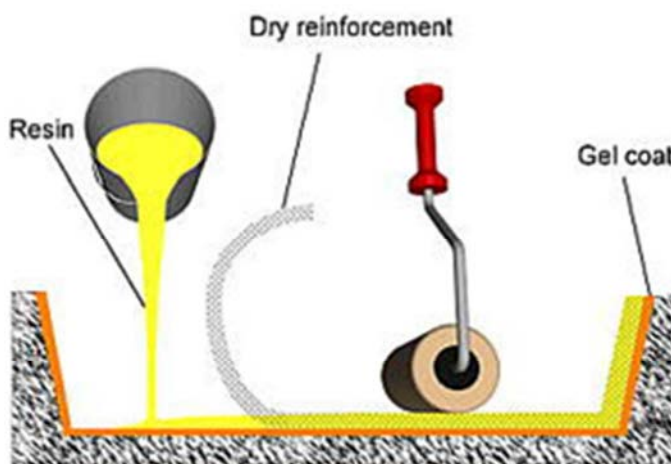


Fig. 4.14 - Esquema da moldação manual [35].

4.5.2. Moldação por compressão a quente

Este processo consiste na compressão de reforços juntamente com uma matriz que é adicionada sobre a forma líquida por cima do reforço. Este processo também pode ser utilizado para a compressão de semi-produtos, como é o exemplo dos pré-impregnados. Como foi o caso tratado neste trabalho. Adicionalmente ao processo de compressão a frio, neste são aquecidos o prato superior e inferior a uma temperatura desejada do processo. Devido à temperatura e pressões do processo os moldes deverão ser metálicos. O ciclo de produção depende das condições do compósito a criar, ou seja, variam com o tipo de matriz (se for termoplástica para além do aquecimento o arrefecimento deverá ser possível: forçado, rápido e sob pressão. Ou pode ser termoendurecível onde se criam ligações cruzadas definitivas na polimerização dos monómeros e estes cuidados já podem ser desprezados).

As peças obtidas incorporam maiores quantidades de reforço, o que melhora as propriedades mecânicas conseguidas. As velocidades de produção, tolerâncias dimensionais e repetibilidade do processo aumentam significativamente relativamente ao processo de moldação manual [4].

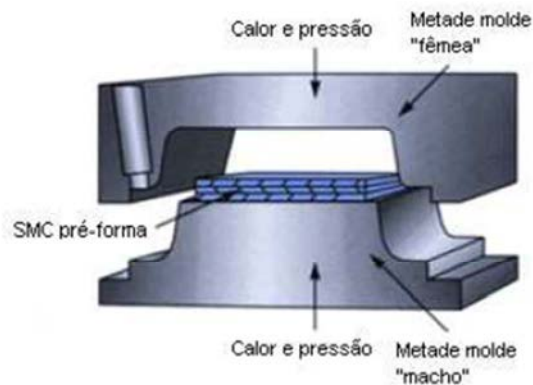


Fig. 4.15 - Esquema do processo de fabrico por compressão a quente.



Fig. 4.16 - Prensa de pratos quentes.

4.5.3. Moldação em autoclave

O processo de moldação em autoclave consiste em consolidar um componente pré-formado através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. É um processo utilizado para produção de componentes em baixas séries, devido à morosidade na moldação, que estejam sujeitos aos mais exigentes requisitos de desempenho mecânico e qualidade, como se verifica na indústria aeronáutica e no desporto automóvel. Permite a produção de peças de grandes dimensões, geometria complexa com elevada qualidade e excelentes propriedades mecânicas, devido à elevada fração volúmica de reforço.

Numa primeira fase procura-se baixar a viscosidade da resina para eliminação de voláteis e promover o fluxo de resina, de modo a garantir teores de fibra elevados e homogêneos. A aplicação de vácuo no molde é decisiva para eliminação de porosidades e aumentar a adesão das fibras à matriz. A etapa seguinte é a cura e consolidação do componente, na qual a pressão desempenha papel mais relevante [4].

A lista de consumíveis para o processo de moldação em autoclave é extensa [1]:

- Agente de desmoldagem: permite a libertação do pré-impregnado dos moldes no fim do processo;
- Teflon poroso: camada opcional que permite o escoamento do excesso de resina e voláteis durante a cura. Pode ser removido facilmente após a cura para proporcionar uma superfície de ligação ou para pintura;
- Tecido absorvente: normalmente feito de tecido de vidro que tem como objetivo absorver a matriz em excesso. O fluxo da matriz pode ser regulado pela quantidade de tecido por forma a produzir compósitos com um volume de fibra conhecido;
- Filme de desmoldagem: esta camada impede a propagação da matriz, permitindo apenas a passagem de ar e voláteis para a camada de respiro acima;
- Tecido de respiro: proporciona os meios para a aplicação do vácuo e auxilia na remoção do ar e voláteis de todo o conjunto. São necessários respiradores mais grossos quando são utilizadas pressões de processo elevadas;
- Saco de vácuo e selante: fornece um saco selado para permitir a remoção do ar e a consequente formação de vácuo. Normalmente é uma película de Nylon e a vedação nas bordas é garantida pela aplicação de tiras de silicone.

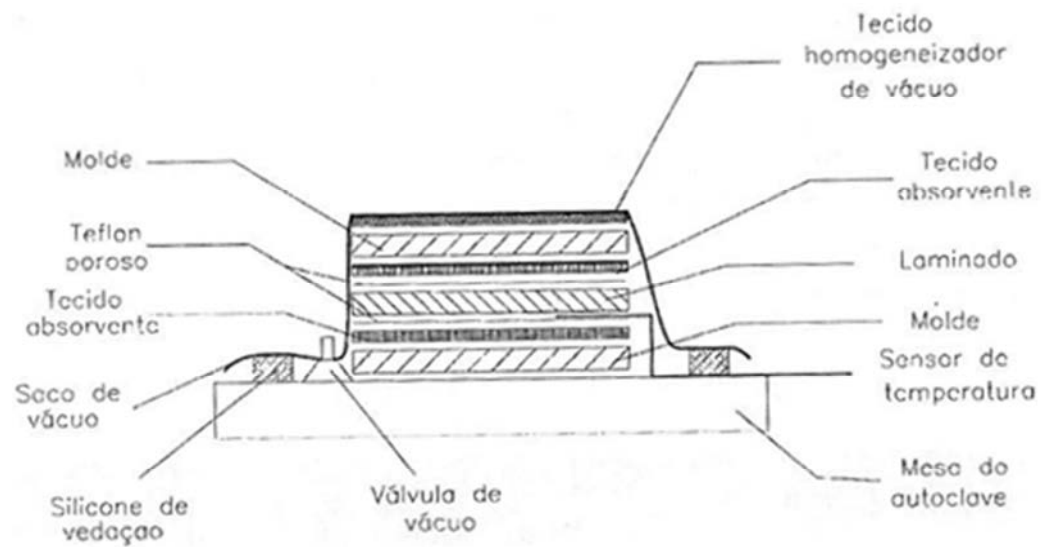


Fig. 4.17 - Representação esquemática da obtenção de um laminado através do processo de moldação em autoclave [4].



Fig. 4.18 - Autoclave.

4.6. PRÉ-IMPREGNADOS

4.6.1. Introdução

Os pré-impregnados são semi-produtos que constituem misturas de fibra e resina para posterior consolidação. Nos pré-impregnados termoendurecíveis, o sistema de resina mais comum é o epóxi. À resina são adicionados inibidores que impedem a cura antes do processamento, desde que armazenados a temperaturas baixas (por exemplo, congelador). Como características mais importantes salientam-se: maneabilidade, auto-adesão de camadas no empilhamento, facilidade de posicionamento, boa conformabilidade a curvaturas do molde, mas validade limitada. Ao invés, os pré-impregnados termoplásticos têm um tempo de validade ilimitado à temperatura ambiente. São processados à temperatura de fusão da resina, cuja elevada viscosidade dificulta a impregnação e consolidação. São também rígidos e mais difíceis de manter em posição no empilhamento. Como não possuem capacidade de auto-adesão de camadas, o processamento posterior exige pré-aquecimento. Os maiores benefícios do uso de impregnados termoplásticos são a sua capacidade de reciclagem, o reduzido tempo de processamento, elevada tenacidade e resistência ao impacto [4].

A conjugação de semi-produtos como é o caso dos pré-impregnados com o processo de fabrico por moldação em autoclave [1]:

- Quando se usam pré-impregnados consegue-se um bom controlo da direção da fibra;
- Permitem propriedades a altas temperaturas quando usadas resinas termoendurecíveis;
- É um processo que é utilizado para produzir compósitos com elevadas características mecânicas e dimensionais, portanto, se as fibras naturais não estiverem mais desenvolvidas, sob o ponto de vista químico e de adesão à matriz (interface) por exemplo, as potencialidades deste não serão devidamente aproveitadas;
- As peças que constituem a máquina praticamente não apresentam custos pois não há desgaste;
- A formulação da resina e impregnação da fibra é unicamente dependente das condições da zona em que foram fabricados, impede assim a exposição da máquina e processo de voláteis libertados durante a criação destes;
- Matéria-prima (como os filmes de poros, absorventes, sacos de vácuo) é dispendiosa porque é necessária renovação para cada trabalho a efetuar;
- Os pré-impregnados têm tempo de vida útil (quando fabricados com resinas termoendurecíveis). É necessária refrigeração para que possam ser armazenados sem que haja perda de propriedades;
- Tempo requerido para a preparação da peça é grande e acarreta elevados custos;
- Longos ciclos de cura com elevados consumos de energia (podem ser necessários múltiplos ciclos para permitirem a cura das diferentes camadas do compósito).

4.6.2. Processo de pré-impregnação

A produção de pré-impregnados pode ser automatizada, permitindo assim o aumento da produção, redução de custos, reprodutibilidade, controlo preciso das variáveis intervenientes no processo e redução da mão-de-obra.

Foi feito um estudo de pré-impregnados moldados por um processo de compressão a quente em vácuo e sem vácuo [31]. Interessa referir neste capítulo que a fabricação dos pré-impregnados foi segundo um sistema de rolos como a seguinte figura ilustra:

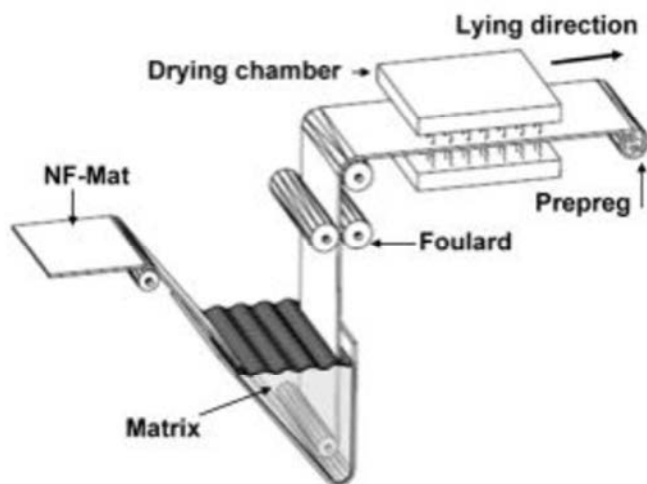


Fig. 4.19 - Sistema de rolos usado para pré-impregnação de fibras naturais [31].

No artigo [31] é referido que este sistema permite uma boa distribuição da matriz polimérica nas fibras e análises por MEV mostram uma matriz polimérica homogénea a cobrir todas as fibras.

No próximo capítulo este tema será aprofundado para se determinar um processo de impregnação ideal para a produção de pré-impregnados de fibras naturais tendo em consideração o processo anteriormente desenvolvido para o INEGI, no sentido do reaproveitamento das peças.

5. DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO AUTOMATIZADO DE PRÉ-IMPREGNAÇÃO DE FIBRAS NATURAIS

5.1. ABORDAGEM AO PROBLEMA

Com este capítulo pretende-se desenvolver um processo de fabrico automático para pré-impregnação de fibras naturais.

Para isso será adaptada uma máquina existente no INEGI. Esta máquina teve como principal objetivo a pré-impregnação automatizada de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras sintéticas, mas que, devido a diversas falhas técnicas se tornou inviável.

Para a resolução dos vários problemas da máquina tentar-se-á ser o mais sucinto e explicito possível procedendo na seguinte ordem de ideias:

- Analisar a máquina existente atualmente no INEGI, percebendo o seu funcionamento.
- Cruzar o funcionamento da máquina com o funcionamento desejado para assim serem enunciados os problemas desta.
- Determinar soluções possíveis e enuncia-las.
- Proceder à resolução dos problemas da máquina através das soluções mais viáveis.

A máquina descrita apresenta-se na seguinte figura.



Fig. 5.1 - Imagem da máquina atualmente existente no INEGI.

5.1.1. Estudo e apresentação do funcionamento atual da máquina

Apresenta-se a máquina da figura do capítulo anterior de uma forma mais esquemática a seguir.

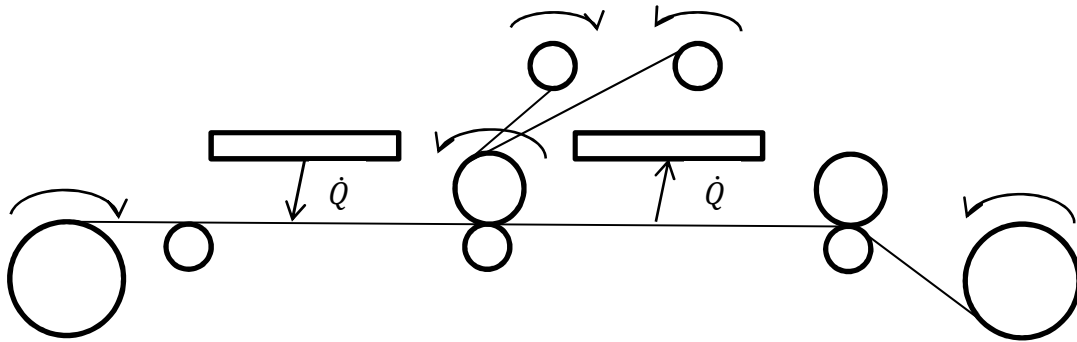


Fig. 5.2 - Esquema da máquina atualmente existente no INEGI.

As várias fases do processo desta máquina são apresentadas no seguinte fluxograma.

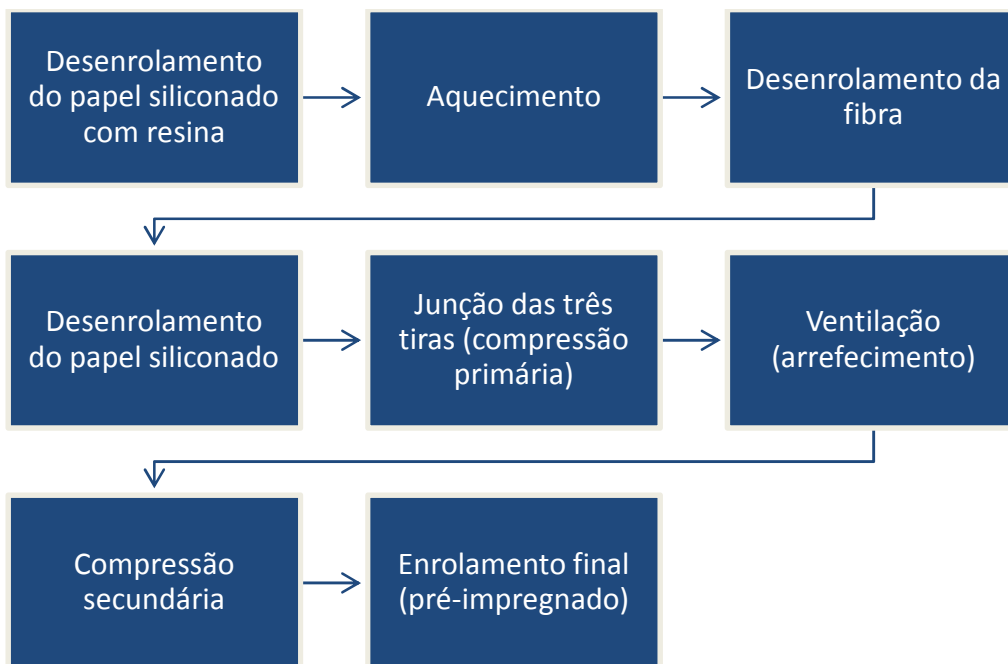


Fig. 5.3 – Fluxo do processo de fabrico da máquina existente no INEGI.

5.1.2. Detecção dos problemas

Tal processo é ineficaz devido a diversas falhas técnicas, tais como:

- O sistema de papel de silicone com resina não é comercializado;
- Esticador inexistente numa das correntes de transmissão de potência;
- Ventilação existente no final do processo é desnecessária;
- A largura das fibras que se podem utilizar são demasiado reduzidas ($L = 300 [mm]$) para se poder tornar num processo de maiores séries e prático quando se pretenderem usar em componentes de maiores dimensões na medida em que é necessário usarem muitas tiras. Podendo originar problemas de continuidade estrutural no componente;
- O moto-redutor transmite potência a dois rolos (o último ativado pneumáticamente e o rolo de enrolamento), não se teve em conta que à medida que o diâmetro aumenta (devido ao enrolamento de pré-impregnado), para se manter a velocidade, o último rolo deveria diminuir a velocidade de rotação e o último rolo de prensagem deveria manter a velocidade, no entanto isto não se verifica dado que a transmissão é feita para ambos os rolos pelo mesmo moto-redutor e não existe mecanismo que faça alterar a velocidade do último sem alterar a do penúltimo. Isto levaria a que o pré-impregnado fosse tracionado entre estes dois rolos e pudesse até romper as fibras;
- Não existe regulação da pressão dos cilindros pneumáticos, impedindo assim o ajuste da pressão aplicada no pré-impregnado. Variável importante para investigação.



Fig. 5.4 - Transmissão feita a dois rolos com um moto-redutor e ausência de esticador para uma das transmissões.

O objetivo da máquina passa pela automatização do processo de impregnação de fibras sem qualquer tipo de fase de pré-cura ou cura e segundo um pressuposto de impregnação viável, que é a impregnação por contato direto da fibra com a resina numa tina.

As fibras a usar pela máquina poderão ser todo o tipo de fibras, já que apesar de ter sido pensada inicialmente para o uso de fibras naturais de juta, as dimensões aplicadas também permitem o uso de outro tipo de fibras para produções de $100 [m]$ de comprimento e $0,3 [m]$ de largura. A resina a usar poderá ser qualquer uma desde que o investigador tenha em conta o tempo de vida desta numa produção de pré-impregnado. Esta deverá ter um tempo útil de trabalho maior que o tempo que a máquina demora a impregnar um tecido com as dimensões apresentadas e para a velocidade máxima conseguida de forma a se obter uma boa impregnação com esse conjunto de fibra e resina.

5.1.3. Apresentação de possíveis soluções, estudo e escolha da solução a adotar

Apresentam-se de seguida algumas configurações possíveis da máquina.

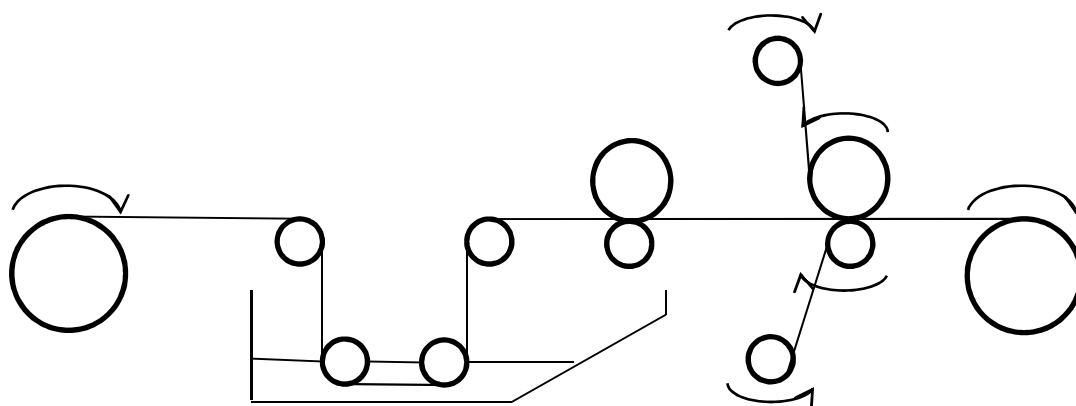


Fig. 5.5 - Esquema da primeira hipótese de construção da máquina.

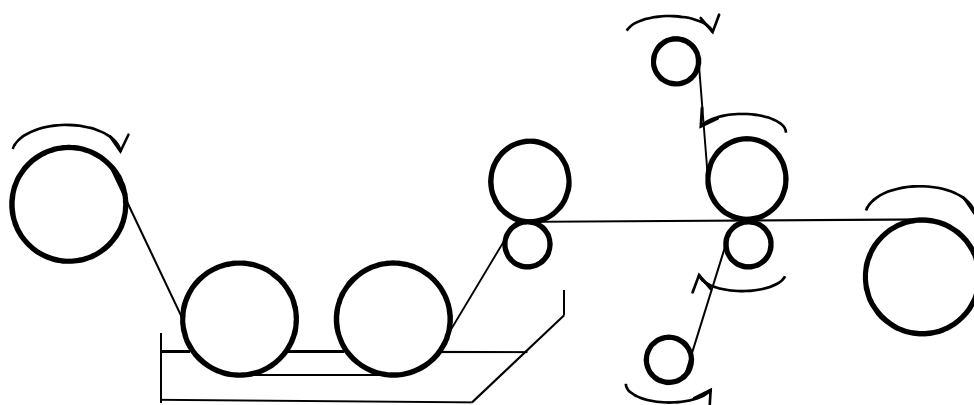


Fig. 5.6 - Esquema da segunda hipótese de construção da máquina.

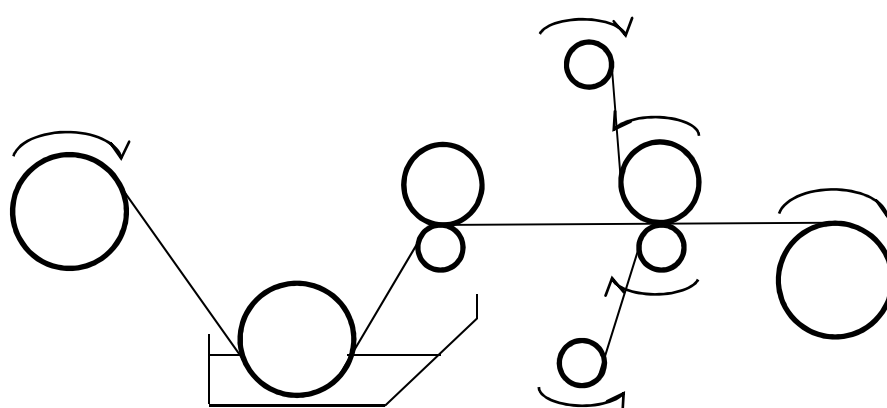


Fig. 5.7 - Esquema da terceira hipótese de construção da máquina.

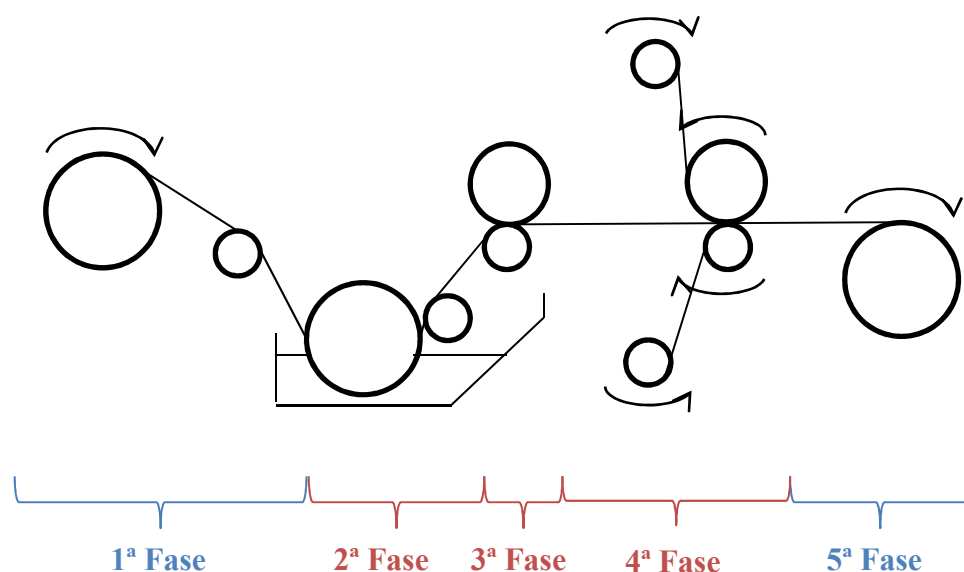


Fig. 5.8 - Esquema da quarta hipótese de construção da máquina.

As várias fases do processo da máquina adaptada são apresentadas no seguinte fluxograma.

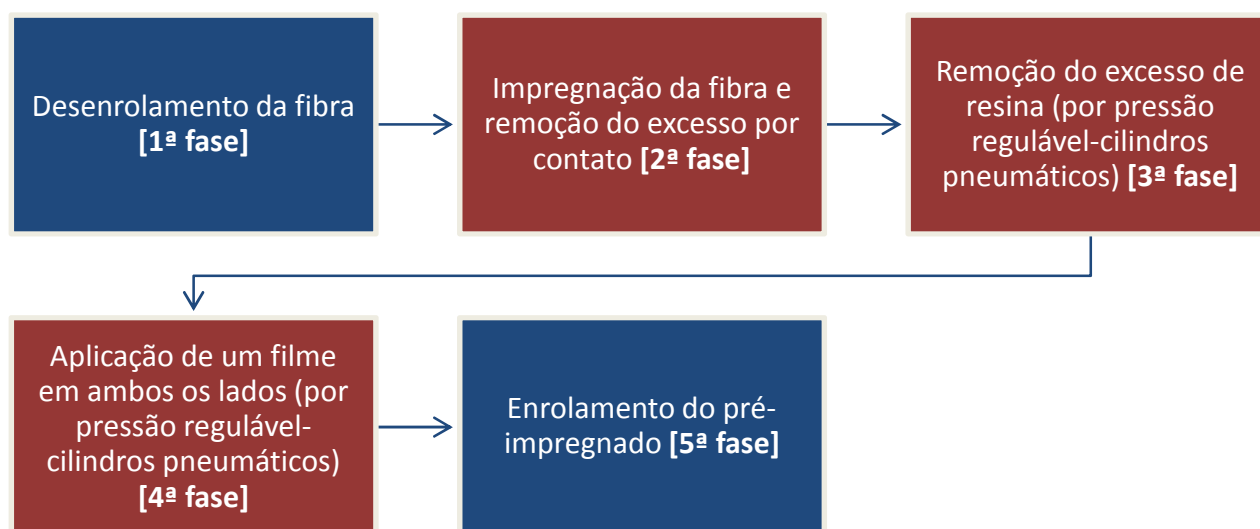


Fig. 5.9 - Fluxo do processo de fabrico a adaptar na máquina existente no INEGI.

De entre as várias configurações, as alterações (blocos a vermelho deste fluxograma) focam-se na etapa de impregnação da fibra visto que este é o processo principal para se conseguir uma boa impregnação da fibra ao longo de toda a espessura.

Da primeira hipótese para a segunda

- Removeram-se rolos porque são desnecessários. A fibra pode entrar diretamente na tina;
- Aumentou-se o diâmetro dos rolos de impregnação por forma a alargar também o contato da fibra com a resina;

Da segunda hipótese para a terceira

- Retirou-se um rolo do módulo de impregnação (2ª fase) após verificar-se eficácia na capacidade de impregnação do tecido de juta pela resina;
- Evitou-se a fabricação de mais um elemento (não existe para reaproveitamento);

Da terceira hipótese para a quarta (versão final)

- Acrescentou-se um rolo de guiamento logo após o rolo de alimentação por forma a manter o ângulo de entrada na impregnação constante, independentemente da variação do diâmetro do rolo de alimentação e consequentemente do ângulo de saída;
- Acrescentou-se um rolo na saída da fibra da tina. Este terá como objetivo fazer a primeira limpeza do excesso de resina. E visto que será um aspeto experimental que deverá ser alterado tendo em conta os resultados obtidos, este rolo será controlado por fuso para que a distância deste ao rolo principal possa ser alterada mediante os resultados que se venham a obter;

Conseguiu-se assim com a última solução e hipótese adotada o maior aproveitamento possível das peças existentes da máquina anterior, sem comprometer o bom funcionamento da próxima.

5.2. DESCRIÇÃO DA CONCLUSÃO DO PROCESSO DE IMPREGNAÇÃO

Tendo-se obtido o rolo de pré-impregnado, este deverá ser posto logo de seguida num forno para se fazer uma pré-cura. O tempo de pré-cura será ligeiramente inferior ao tempo indicado na tabela para qualquer das temperaturas, uma vez que o processo químico de polimerização na resina epóxi nunca está parado e portanto, já se iniciou quando o pré-impregnado foi feito na máquina. De salientar que este poderá ser atrasado, não no sentido de retrocedê-lo mas sim de lhe reduzir a velocidade da reação química de polimerização.

Depois de feita a cura inicial, o pré-impregnado tem de ser guardado no congelador a uma temperatura $T = -18^{\circ}\text{C}$, conseguindo-se assim um tempo de vida máximo do pré-impregnado de 3 meses. Permitindo usá-la, posteriormente, quando necessário.

Depois de retirado do congelador e após corte do pré-impregnado para se obterem placas de compósito regulares (de dimensões iguais), estas terão que ser submetidas a um estágio de cura para finalizar o ciclo de polimerização da resina, que pode ser feito, por exemplo:

- Prensa de pratos quentes (sob ação de temperatura e pressão);
- Manualmente, sobre ação de pressão em moldes e à temperatura do ambiente em que é deixada a curar;
- Infusão (sob ação de pressão);
- Moldação por transferência de resina (sob ação de temperatura e pressão);
- Autoclave (sob ação de temperatura, pressão e vácuo).

Destas hipóteses foram estudados os compósitos segundo o método de prensa de pratos quentes e manualmente. Os resultados serão abordados e estudados no capítulo referente ao estudo estrutural dos compósitos.

5.3. AVALIAÇÃO E PROJETO DA MÁQUINA DE PREPREG

5.3.1. Avaliação da máquina: pormenores, principais alterações e reaproveitamento de equipamento

Pormenores que se deverão ter em conta para o correto funcionamento da máquina:

- Para uma temperatura $T = 25^{\circ}\text{C}$, de acordo com a ficha técnica, a resina tem um período de vida de 1 mês. No entanto, o período de trabalho é inferior a 12 horas como verificado no capítulo 5.3.2.3. – Avaliação do tempo de trabalho da resina epóxi SR121 + KTA21;
- Tempo de vida das resinas que se poderão utilizar no processo de pré-impregnação pode ser diferente e portanto ter-se-á de ter em conta a evolução da viscosidade destas ao longo do tempo, tendo o cuidado de verificar qual o tempo de trabalho ótimo para se impregnar;
- A máquina está preparada para trabalhar a uma temperatura constante (controlada em ambiente de laboratório) de $T = 22 [^{\circ}\text{C}]$;
- A velocidade de rotação do rolo final (ao qual será transmitida a potência para puxar o pré-impregnado) deverá respeitar a velocidade de passagem da fibra pela resina para que esta seja bem impregnada;
- Na fase de remoção dos excessos de resina deverá haver um reaproveitamento da resina;
- A aplicação do filme tem que ser feita em ambas as faces do pré-impregnado para que no enrolamento para finalização do processo de fabrico, os pré-impregnados não se colem uns aos outros;
- Deverá haver o cuidado de barrar a propagação da resina para fora da zona de trabalho e para componentes indispensáveis para o bom funcionamento da máquina, como as chumaceiras e rolamentos.

Principais alterações a fazer na máquina:

- Estrutura da máquina completamente nova devido à alteração do funcionamento da máquina e consequente reorganização dos seus elementos;
- Reposicionamento dos rolos intermédios para que se possa fazer o novo percurso e etapas de funcionamento;
- Reposicionamento do equipamento pneumático, nomeadamente cilindros e válvulas de comando. Dois cilindros e uma válvula de comando na fase de remoção do excesso de resina e mais dois cilindros e outra válvula de comando na fase de aplicação do filme superior e inferior;
- Acréscimo de um rolo para regulação da impregnação da fibra através de fuso;
- Acréscimo de uma tina para impregnação das fibras;
- Projeto novo do sistema de transmissão de potência;

Reaproveitamento de peças da máquina anterior:

O tipo de equipamento que deverá ser reutilizado é o seguinte:

- Todo o equipamento pneumático:
 - 4 Cilindros pneumáticos de duplo efeito;
 - 2 Válvulas pneumáticas com acionamento por encravamento;
 - 2 Válvulas reguladoras de caudal;
 - 2 Manómetros;
 - Ligações;
- Todos os rolos:
 - 4 Rolos de suporte de matéria-prima:
 - Para fibra;
 - Para filme superior;
 - Para filme inferior;
 - Para pré-impregnado;
 - 2 Rolos superiores acionados pelos cilindros pneumáticos:
 - Fase de remoção do excesso de resina;
 - Fase de aplicação dos filmes na fibra impregnada;
 - 2 Rolos inferiores de guiamento para formar conjunto com os 2 rolos do ponto anterior;
 - 1 Rolo para guiamento da fibra depois do desenrolamento desta (para eliminação da variação do ângulo à entrada da etapa de impregnação).
- Todos os apoios dos rolos de suporte da matéria-prima e elementos constituintes;
- Chumaceiras dos rolos de guiamento;
- Parafusos e elementos de fixação.

O balanço do reaproveitamento depois de finalizado o projeto da máquina será feito nos anexos, contendo neste caso mais informação relevante de cada um dos elementos reaproveitados através de uma lista de peças.

5.3.2. Projeto da máquina

5.3.2.1. Definição das características

Antes do início do dimensionamento da máquina deverão ser enunciadas todas as características que definirão a máquina quando concluído o seu projeto. Características que exigirão algum cálculo preliminar e considerações importantes. Deverão ser identificados os seguintes parâmetros:

- Velocidade de trabalho máximo da máquina?
- Capacidade de produção da máquina?
- Versatilidade da máquina? (Capacidade de trabalhar com outras fibras e resinas)
- Variáveis a controlar na máquina?
 - Intervalo de velocidades disponíveis no moto-reductor;
 - Capacidade de controlo dos rolos de consolidação ou remoção de resina excedente;
 - Intervalo de pressões disponíveis nos cilindros pneumáticos;
 - Intervalo de deslocamento disponível no controlo do rolo por fuso;

- Tempo de cada ciclo de trabalho?
 - Depende da velocidade do moto-redutor;
 - Depende da quantidade de pré-impregnado a produzir;
- Características do produto final?
 - Proteção do pré-impregnado;
 - Vão depender do controlo das variáveis da máquina; (velocidade, pressão, impregnação)
- *Set-up* da máquina?
 - Percurso a percorrer manualmente com a fibra e filmes;
 - Fixação do pré-impregnado ao rolo motorizado;
 - Renovação da matéria-prima fundamental para o funcionamento da máquina;
 - Fibra;
 - Resina;
 - Filme de proteção superior e inferior;
- Dimensões máximas da máquina?
- Limpeza da máquina?

A velocidade de trabalho máximo da máquina vai ser de $v = 12 [m/min]$. No entanto, deverá ser aplicado um variador de frequência no moto-redutor por forma a poder regular a sua velocidade na consola da máquina.

Para o dimensionamento do moto-redutor é necessário ter em conta a velocidade que se pretende para o trabalho da máquina bem como as forças que este terá de vencer para funcionar nas condições exigidas.

As forças existentes serão as forças resultantes do atrito de rolamento nas chumaceiras. Sabendo que:

$$F_{atrito} = \mu \times N \quad (5.1)$$

Sendo:

F_{atrito} – Força a aplicar para provocar o movimento [N]

μ – Coeficiente de atrito estático ou dinâmico

N – Força normal à direção do movimento [N]

No entanto, sabendo que a força aplicada será também ela dependente do coeficiente de atrito com os rolos, esta será praticamente impossível de obter uma vez que não se conhece o coeficiente de atrito entre a fibra impregnada e o rolo de impregnação, bem como o coeficiente de atrito entre o filme aplicado e o rolo.

Mas para um dimensionamento cuidado deverão ser consideradas situações de acidente. Esta situação pode ser representada pelo encravamento do rolo de alimentação de fibra ou a fibra prender nalguma das etapas do processo. Nesta situação, o moto-redutor deverá parar de maneira a que a fibra não sofra rotura por tração.

Para se saber qual a resistência à tração da fibra de juta usada, foram tracionadas cinco tiras com as dimensões de 20 [cm] de comprimento e 6 [cm] de largura. O ensaio de tração foi feito com a direção das fibras paralelas à direção da força aplicada.

Os resultados são apresentados na seguinte tabela:

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de tração à fibra de juta.

<i>Nº ensaios</i>	<i>Valor máximo Força [N]</i>	<i>Valor máx. Força imediatamente antes da primeira rotura [N]</i>
1	536	450
2	473	473
3	479	375
4	669	520
5	640	540

No dimensionamento do moto-redutor, para o cálculo da potência necessária deverá ser considerado o valor mínimo da força máxima lida imediatamente antes da primeira rotura que é $F_{m\acute{a}x\ primeira\ rotura} = 375\ [N]$, então, a potência útil será dada por:

$$Pot_{\acute{u}til} = F \times v \quad (5.2)$$

Sendo:

$Pot_{\acute{u}til}$ – Potência útil [W]

F – Força [N]

v – Velocidade [m/s]

Que para este caso, resultará:

$$Pot_{\acute{u}til} = 375 \times 0,2 = 75\ [W]$$

No mercado só existem moto-redutores de 90 [W], portanto o moto-redutor irá ter mais força do que a que a fibra aguenta. Os seguintes problemas foram detetados:

- A potência do moto-redutor será sempre superior à calculada porque no mercado não vão existir moto-redutores com a potência exatamente necessária para que, caso se suceda este acidente, o moto-redutor não consiga fazer mais força do que a necessária para provocar a rotura da fibra e consequentemente não estragar todo o lote de produção;
- Foram feitos cinco ensaios e destes conclui-se que os valores variam bastante, o que sugere que em toda a fibra existirão zonas de resistência menor que o valor mais baixo obtido $F_{m\acute{a}x\ primeira\ rotura} = 375\ [N]$;
- O moto-redutor senão estiver controlado por um autómato irá continuar a trabalhar até que o termostato dispare e o faça parar. Contudo, até que este sobreaqueça e pare o tecido pode romper.

Desta forma o problema não poderá ser resolvido. Portanto, o moto-redutor será calculado para a média das forças obtidas: $F_{m\acute{a}x\ primeira\ rotura} = 471,6\ [N]$ e será usado um sistema para controlar a desativação do moto-redutor quando uma destas situações de acidente se verificar.

Resumo dos dados necessários para o dimensionamento do sistema de transmissão de potência:

Tabela 5.2 - Resumo dos dados necessários ao dimensionamento do sistema de transmissão de potência.

<i>Velocidade</i> [m/s]	0,2
<i>Força</i> [N]	471,6

A máquina terá de ser capaz de produzir pré-impregnados com 100 [m] de comprimento e 30 [cm] de largura, portanto, a quantidade de fibra que será posta no início da máquina deverá ter estas dimensões mais uma tolerância no comprimento devido à necessidade de fazer o *set-up* desta antes do início da produção (fazer passar a fibra por todo o percurso da máquina e fixá-la no último rolo, juntamente com os filmes de proteção, porque este será o rolo motorizado). Foi feita uma previsão do diâmetro que estas dimensões de fibra originam.

Esta previsão foi fundamental para verificar as dimensões que a máquina teria de ter (tolerâncias entre rolos) e pesos envolvidos no processo.

Sabendo que a fibra tem uma espessura média de aproximadamente 1 [mm] e serão produzidas séries de 100 [m] de comprimento e 30 [cm] de largura, para o cálculo foram feitas as seguintes considerações:

- Por cada volta que será dada, o diâmetro do rolo incrementará 1 [mm] (espessura média da fibra);
- O comprimento da fibra será dado pelo perímetro da circunferência de cada camada no rolo;
- O perímetro vai aumentando de camada para camada devido ao aumento de espessura que é dado pela fibra;
- O diâmetro mínimo é determinado pelo diâmetro do cilindro utilizado para desenrolar a fibra;
- O diâmetro máximo será determinado pela espessura total de 100 [m] de fibra de juta;

Tendo em conta os parâmetros de trabalho e as considerações feitas:

$$D_{total} = f(n, e, D_{interior}) \quad (5.3)$$

Sendo:

D_{total} – Diâmetro final do rolo com fibra

n – número de voltas

e – espessura da fibra

$D_{interior}$ – Diâmetro definido pelo rolo de desenrolamento

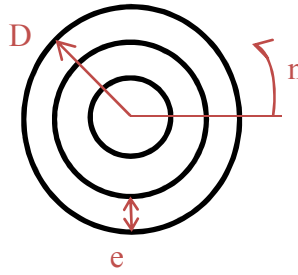


Fig. 5.10 - Representação das relações existentes na equação.

A equação fica então definida por:

$$C_n = C_{n-1} + \pi \times (48 + (n - 1) \times 2) \quad (5.4)$$

Sendo:

C – Comprimento da fibra [mm]

n – número de voltas

Verifico com esta expressão que o número de voltas necessárias para obter um comprimento de 100 [m] é de 157, que corresponde a um comprimento de 100618,9 [mm].

Como a expressão considera sempre a o diâmetro interior para cada iteração, ou seja, na primeira iteração, o comprimento de fibra obtido será o correspondente ao diâmetro do rolo de desenrolamento, vou considerar o número de voltas 156 porque a espessura só é considerada a partir da segunda volta (incluindo).

Para um número de voltas de 156, consigo um diâmetro total do rolo de:

$$D_{total} = 48 + 156 \times 2 = 360 \text{ [mm]}$$

Sendo que o diâmetro correspondente só à fibra é o resultado da subtração do diâmetro total menos o diâmetro do rolo de desenrolamento:

$$D_{fibra} = D_{total} - D_{rolo} \quad (5.5)$$

$$D_{fibra} = 360 - 48 = 312 \text{ [mm]}$$

Com isto, foi considerado um diâmetro total (rolo de suporte mais fibra) de desenrolamento de $D_{m\acute{a}x \text{ desenrolamento}} = 400 \text{ [mm]}$ já com tolerância associada.

Para o diâmetro de enrolamento (rolo final), foi considerado:

- Aumento da espessura da fibra devido à absorção de resina existente na impregnação;
- Diminuição da espessura da fibra devido à remoção de excedente por meio do rolo de controlo por fuso e dos rolos acionados pneumaticamente;
- Aumento da espessura devido à aplicação de dois filmes de proteção (superior e inferior);

Devido à possibilidade de regulação da pressão dos rolos, tanto acionados pneumaticamente como por fuso, a espessura de saída do pré-impregnado vai variar e portanto será considerada a espessura máxima possível na saída do pré-impregnado. Esta espessura contemplará:

- Espessura da fibra impregnada de 1,5 [mm];
- Espessura para os dois filmes de 0,05 [mm];

Como o diâmetro do rolo no enrolamento é igual ao do desenrolamento, a única variação no cálculo é a espessura. Portanto, se para 1 [mm] de espessura obtenho um diâmetro total de 360 [mm], para 1,55 [mm] de espessura o diâmetro total será de 558 [mm] depois de enrolado o pré-impregnado no fim do processo. Devido às aproximações feitas no aumento das espessuras e também ao comprimento inicial desperdiçado no *set-up* mas que será também enrolado: $D_{máx\ enrolamento} = 600 [mm]$.

Os diâmetros máximos considerados para os dois desenrolamentos do filme de proteção serão de $D_{máx\ desenrolamento\ filme} = 300 [mm]$, valor que permitirá ter matéria prima para mais do que um ciclo de produção dada a espessura muito reduzida de um filme.

Após esta análise dimensional é possível definir a posição dos rolos por forma a não interferirem com os restantes elementos da máquina.

Resumo dos diâmetros dos rolos:

Tabela 5.3 - Resumo dos diâmetros dos rolos de matéria-prima.

Rolo	Diâmetro [mm]
Rolo desenrolamento da fibra	400
Rolos desenrolamento dos filmes	300
Rolo enrolamento do pré – impregnado	600

Apesar da definição das características da máquina terem como base fundamentalmente a produção de pré-impregnados de fibra natural de juta com resina epóxi. Isto não impede a produção de outro tipo de pré-impregnados, desde que as fibras usadas não excedam os diâmetros dos rolos de desenrolamento e enrolamento permitidos. Situação dificilmente alcançada pelas fibras sintéticas uma vez que têm um acabamento superficial mais perfeito e espessuras mais reduzidas. Este problema poder-se-á por noutras fibras naturais com um acabamento mais grosseiro e espessuras maiores.

O peso da juta que será imposto ao rolo de desenrolamento é dado por:

$$P_{juta\ des} = P_{juta}/A \times A_{produção} \quad (5.6)$$

Sendo:

$P_{juta\ des}$ – Peso da juta aplicado ao rolo de desenrolamento [gr]

P_{juta}/A – Peso da juta por unidade de área [gr/m²]

$A_{produção}$ – Área de juta que será usada no processo [m²]

Então:

$$P_{juta\ des} = 294,28 \times 100 \times 0,3$$

$$P_{juta\ des} = 8828,4 \text{ [gr]}$$

O peso da juta que será imposto ao rolo de enrolamento é obtido pela expressão que é usada para determinar a quantidade de resina epóxi necessária para uma determinada quantidade de juta, considerando que o compósito será constituído por 30% de fibra e 70% de resina. Então, sabendo que 8828,4 [gr] correspondem a 30% de fibra, 70% de resina correspondem a 20599,6 [gr] (composto de resina mais endurecedor para o caso do epóxi).

Resultando assim num peso total aplicado no rolo de enrolamento (desprezando peso dos filmes de proteção e as perdas de resina devido às limpezas de excesso ao longo do processo):

$$P_{rolo\ enr} = P_{juta\ des} + P_{resina} \quad (5.7)$$

Sendo:

$P_{rolo\ enr}$ – Peso total de enrolamento (pré – impregnado) [gr]

$P_{juta\ des}$ – Peso da juta aplicada ao rolo de desenrolamento [gr]

P_{resina} – Peso de resina para impregnar 30 [m²] de juta [gr]

Então:

$$P_{rolo\ enr} = 8828,4 + 20599,6 = 29428 \text{ [gr]}$$

Resumo dos pesos mais significativos envolvidos no dimensionamento da máquina:

Tabela 5.4 - Resumo dos pesos aplicados nos rolos de desenrolamento e enrolamento.

<i>Rolos</i>	<i>Pesos [kg]</i>
<i>Rolo de desenrolamento (fibra)</i>	10
<i>Rolo de enrolamento (fibra + resina)</i>	30

A máquina foi pensada para trabalhar com a fibra natural de juta, que é a fibra principal no âmbito do projeto, e com resina epóxi. Contudo, dadas as características mais grosseiras da fibra de juta e os elementos variáveis da máquina que terão um papel fundamental na produção dos pré-impregnados, resultando pré-impregnados com características diferentes devido às características de produção serem também elas diferentes, a máquina poderá ser usada para produzir outro tipo de pré-impregnados (conjugações diferentes de fibras/matrizes).

Das regulações possíveis da máquina:

- O moto-redutor terá um intervalo de velocidades selecionáveis a partir da consola da máquina com um intervalo de $[0; 12] [mm/min]$;
- Os cilindros pneumáticos terão reguladores de pressão associados, permitindo regular a pressão destes entre o valor mínimo possível de controlar pelo regulador de pressão escolhido e a pressão máxima existente à saída do circuito para o utilizador, que é $p_{saída\ rede} = 7 [Bar]$;
- O cilindro regulado por fuso tem um curso que vai desde o contato tangencial com o cilindro de impregnação até $25,40 [mm]$ afastado.

O tempo de ciclo produtivo vai ser definido pela velocidade do moto-redutor e a quantidade de pré-impregnado que se vai produzir. Para o comprimento da fibra definido de $100 [m]$, o tempo de ciclo máximo conseguido será de:

$$t_{ciclo\ min} = \left(\frac{v_{máx}}{C_{fibra}} \right)^{-1} \quad (5.8)$$

Sendo:

$t_{ciclo\ min}$ – Tempo mínimo por cada ciclo de produção $[min]$

$v_{máx}$ – velocidade máxima do moto – redutor $[m/min]$

C_{fibra} – comprimento da fibra a produzir $[m]$

Resultando:

$$t_{ciclo\ máx} = \left(\frac{12}{100}\right)^{-1} \approx 8,3 [min]$$

Ao pré-impregnado deverá ser aplicado um filme superior e inferior que terá como objetivos:

- Proteger o pré-impregnado para que quando for manobrado este não seja afetado pelo contato com impurezas ou descuido humano;
- Evitar a colagem entre o próprio pré-impregnado uma vez que vai ser enrolado depois da impregnação e as faces superior e inferior vão estar em contato com o restante pré-impregnado;
- Deixá-lo previamente preparado para a cura que será feita, onde, devido às elevadas temperaturas que o pré-impregnado será sujeito, o filme protetor deverá estar apto a resisti-las.

Quanto às dimensões da máquina a projetar, esta não pode exceder as dimensões da máquina anterior na largura porque faz parte dos objetivos reaproveitar o máximo de componentes possíveis da máquina anterior, como por exemplo os rolos que dependem desta largura.

O dimensionamento e verificação tal como, sistema de transmissão de potência, sistema pneumático e algum cálculo estrutural deverá ser consultado nos anexos para mais informações.

5.3.2.2. Limpeza e cuidados da máquina

O uso de resinas na produção de pré-impregnados é adverso para a máquina que os produz, especialmente se estas forem termoendurecíveis uma vez que não é possível retroceder o seu estado químico depois de este já ter sido completado. E portanto, se esta não for limpa no fim de cada ciclo de produção, começarão a formar-se camadas ou depósitos de resina curada nos elementos que estiveram em contato. Como são o caso:

- Rolos de guiamento;
- Rolos de curso pneumático;
- Rolo de curso controlado por fuso;
- Tina;

Teve-se cuidado relativamente à limpeza da máquina, nomeadamente na prevenção aquando do seu dimensionamento e desenho, como por exemplo:

- Proteção das extremidades dos rolos com beiras que impeçam a propagação da resina para fora da zona de trabalho e especialmente para as chumaceiras, permitindo que este seja reaproveitada ao cair novamente na tina;
- Desenho da tina foi feito com maiores tolerâncias nas laterais e prolongamento na frente por forma a receber parte da resina removida pelos rolos de compressão;
- Os rolos de compressão ajustados pneumaticamente são reaproveitados mas deverão ser fechados nos topos para impedir que, por escorrimento, a resina entre para o interior destes;
- O desenho da tina e o suporte desta foram pensados para que esta possa ser retirada mesmo que contenha resina para limpeza;

Os tipos de químicos que poderão ser considerados para a limpeza da máquina são [18]:

- Álcool desnaturado é um solvente seguro do ponto de vista do contato com o corpo do ser humano. Comummente chamado de aguarrás (diluyente de tinta), o álcool desnaturado é semelhante ao etílico embora contenha acetona ou metanol. É menos perigoso do que outros solventes do ponto de vista de inalação do vapor e ponto de inflamação, bem como dos efeitos para a saúde a longo prazo;
- Acetona é um solvente muito eficaz mas tem um ponto de evaporação muito elevado, sendo necessário mantê-lo num reservatório fechado quando não é usado para segurança e economia. É altamente inflamável;
- Diluentes de laca são um grupo genérico de solventes, têm uma função semelhante à da acetona, no entanto, existem diferentes formulações. Os fumos libertados são facilmente detetados na maior parte dos casos. Não são tão voláteis quanto a acetona, no entanto têm um ponto de inflamação elevado;
- Tolueno é um constituinte comum dos diluentes de laca, não é tão inflamável e volátil quanto a acetona, mas atinge efeitos anestésicos a baixos níveis. Uma mistura de 50/50 de tolueno e acetona é por vezes usada como solvente para moderar as qualidades de cada um;

Apesar dos perigos dos solventes variarem, o contato com a pele deve ser evitado, especialmente quando se trabalha com resina epóxi. Grande parte destes solventes tendem a abrir os poros da pele e removem os óleos que protegem a pele, levando a que ambos os solventes e a resina penetrem mais profundamente na pele e posteriormente na corrente sanguínea do operador. Resultando num maior risco de reação da pele e problemas de saúde [18].

Caso haja contato da resina epóxi com a pele, esta poderá ser removida (enquanto não curada) simplesmente com água e sabão, detergentes com amônia (amoníaco é a solução aquosa de amônia) ou álcool desnaturado. Também podem ser obtidos produtos especialmente concebidos para este tipo de higienização. No entanto, a limpeza é mais simples e a segurança do operador também se este se prevenir usando roupa protetora e luvas, situação preferida [18].

Nos anexos serão apresentadas as imagens do projeto que ilustram estas melhorias para complemento deste capítulo.

5.3.2.3. Avaliação do tempo de trabalho da resina epóxi *SR121 + KTA21*

Como foi enunciado anteriormente, a resina à temperatura ambiente terá um tempo de vida útil, que é definido pela sua viscosidade, que se for baixa, fá-la fluída o suficiente para permitir o seu trabalho.

Para se garantir que a máquina esteja operacional durante o horário de trabalho completo do investigador foi feita uma amostra de resina epóxi (*SR 121 + KTA 21*) e colocada na sala de trabalho da máquina para que esta ficasse sujeita às condições de temperatura e humidade existentes quando se trabalhar e foi feita uma monitorização de 30 em 30 minutos com o objetivo de se anotar a temperatura, humidade e a evolução da resina a um nível qualitativo.

As quantidades aplicadas de cada constituinte para se obter a resina epóxi foram as seguintes:

Tabela 5.5 - Resina e a composição usada para este estudo.

Constituinte	Quantidade [<i>gramas</i>]
<i>SR 121 (resina)</i>	99,81
<i>KTA 21 (endurecedor)</i>	20,62

Quando esta atingir o tempo de gel deixará de estar num estado ótimo de trabalho dado que a sua viscosidade é muito elevada, tendendo para infinito ao longo do tempo. Este fenómeno é verificado quando a resina cura totalmente, estado em que a polimerização está completa e a coesão entre os monómeros é estabelecida, tornando-se num sólido.

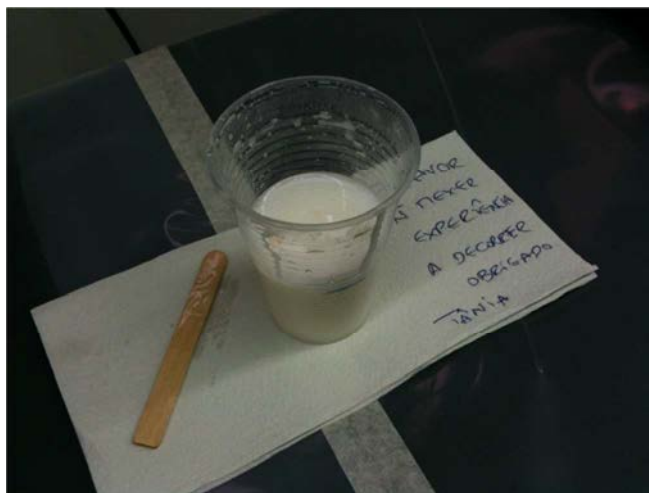


Fig. 5.11 - Imagem da amostra criada.

Foram recolhidos dados ao longo de 8 horas, a tabela com as informações é apresentada de seguida:

Tabela 5.6 - Dados recolhidos da experiência do tempo de trabalho da resina epóxi à temperatura ambiente da área de trabalho.

Tempo [horas: minutos]	Temperatura ambiente [°C]	Humidade [%]
00: 00	18,6	43
00: 30	18,4	43
01: 00	18,2	44
01: 30	18,5	44
02: 00	18,8	44
02: 30	21,2	41
03: 00	18,7	45
03: 30	18,7	47
04: 00	21,7	39
04: 30	20,3	42
05: 00	19,8	44
05: 30	20,1	43
06: 00	19	46
06: 30	19,2	45
07: 00	18,7	49
07: 30	20,2	43
08: 00	18,6	49
Valores médios	19,34	44,18

Conclui-se assim que, tendo em conta que o reservatório que se usará nunca terá uma quantidade de resina muito grande e que a velocidade de trabalho da máquina não será baixa, a resina epóxi usada para este tipo de impregnação permite uma condição de trabalho ótima uma vez que permite uma boa impregnação na direção transversal da fibra, ou seja, ao longo da espessura da fibra, podendo assim o processo ser automatizado segundo o modelo anteriormente idealizado.

O tempo previsto de duração da resina para ser bem trabalhada é de aproximadamente 4 horas. A partir desta hora foram detetadas pequenas formações de aglomerados que apesar de manuseáveis já não permitem a impregnação da fibra e criam defeitos dimensionais e de interface.

Estes aglomerados são devidos à diferença do progresso da reação da resina em cada ponto desta. Sendo que algumas partes poderão ser mais rápidas na polimerização devido, por exemplo, ao facto de se ter de mexer nesta de meia em meia hora, quando se pretendia saber o seu estado de fluidez.

Um estudo foi feito sobre as propriedades superficiais e adesão interna entre fibra de juta e matriz polimérica de epóxi [15]. Neste estudo foram descritos alguns métodos usados, entre os quais, o teste de molhabilidade da fibra na resina. Este teste é particularmente interessante para o estudo feito neste capítulo. Em que, se pode determinar a capacidade da fibra absorver a resina a uma determinada velocidade de molha.

Este método funciona da seguinte forma: é presa uma ponta de uma única fibra a um gancho que está solidário a uma microbalança. A ponta livre da fibra é imersa no líquido a uma profundidade final de 1 [mm] e a uma velocidade de 1 [mm/min]. Do teste, obtêm-se os dados da força e posição, sendo depois a força convertida para o ângulo de contato usado a equação de Wilhelmy. A energia de superfície e as duas componentes (interação dispersa ou não-polar e interação polar) da fibra são depois calculadas para avaliar o comportamento da molha das superfícies das fibras [15].

Este método é descrito mais detalhadamente na referência [28].

Para além do método descrito, outros também podem ser considerados para determinar melhor as propriedades do fluido a usar na máquina, neste caso uma resina. Entre os quais se destacam: o viscosímetro e um reómetro.

O viscosímetro é indicado para medir unicamente a viscosidade de um fluido a uma determinada temperatura e pressão naquele instante de tempo. O reómetro permite obter a forma como flui uma mistura líquida ou em suspensão sob a ação de forças externas. É utilizado para fluídos que não podem ser definidos com um valor de viscosidade e, portanto, exigem mais parâmetros do que a viscosidade fornecida por um viscosímetro. O reómetro determina o comportamento reológico de um fluido.

É desta forma um ensaio com um reómetro o mais adequado para o tipo de trabalho pretendido uma vez que a máquina funcionará durante um intervalo de tempo considerável e sabendo que as propriedades do fluido em causa (resina epóxi ou outra) se alterarão ao longo do tempo.

Para além do estudo focado unicamente na resina, deverão ser feitos testes ao pré-impregnado. Um estudo foi feito [41] sobre o *tack* de pré-impregnados. Nesse trabalho desenvolveu-se um dispositivo e uma metodologia de estudo de *tack* baseados em ensaios cíclicos de compressão, pressão constante e tração, que medem a energia de separação entre camadas de pré-impregnados. Este sistema mede somente a resistência de ligação entre as várias camadas.

5.4. EFEITO DA HUMIDADE NA PRODUÇÃO DE PRÉ-IMPREGNADOS

Como a humidade reduz significativamente a adesão das fibras à matriz, é essencial que a fibra esteja com uma percentagem de humidade mais reduzida possível, ou mesmo nula, para se conseguirem compósitos com propriedades mecânicas superiores.

As piores propriedades dos compósitos criados sem controlo da humidade da fibra são devidas a fracas interfaces uma vez que a humidade existente na fibra se intromete entre a resina. Situação facilmente visível pelos poros existentes nas placas de compósito obtidas. Estes poros são devidos as bolhas de vapor de água que foram criadas pela aplicação de temperatura durante o processo de cura, que provocou a evaporação da água que depois não pode sair devido à pressão aplicada pela prensa. A humidade da fibra também gera inconsistência dimensional na medida em que pode agravar as diferenças de espessuras numa placa. Isto depende da zona onde o vapor de água se conseguirá acumular mais.

As soluções possíveis para se evitar a absorção da humidade pelas fibras são:

1. A máquina ser envolvida numa estrutura que isola-se todo o processo de pré-impregnação da fibra do exterior, sendo que o interior da máquina seria controlado por forma a manter o ambiente absolutamente seco;
2. Criar um forno localizado logo após o desenrolamento da fibra para que esta fosse seca imediatamente antes de ser impregnada;

Os problemas para estas soluções são:

Primeiro caso

Apesar de todos os intervenientes na produção do pré-impregnado serem variáveis (regulação da pressão dos cilindros pneumáticos, regulação da velocidade de trabalho (motor-reductor), regulação do primeiro rolo de contato por fuso), esta máquina poderá ser suscetível de alterações para diferentes trabalhos futuros ou aumento da produção, o que implicaria a alteração da estrutura envolvente e características necessárias para produzir um ambiente seco.

A necessidade de perturbar o ambiente de trabalho da máquina sempre que se termine uma produção é elevada, tendo em conta que esta máquina está projetada para baixa produção.

A energia despendida sempre que fosse necessário criar um ambiente de trabalho seco é elevada. Seria necessário sempre que houvesse reposição dos rolos de alimentação, recolha de um rolo de pré-impregnado finalizado ou alguma avaria (neste caso a produção feita não partilharia das mesmas condições de trabalho do início ao fim e deveria ser rejeitada) repor este ambiente seco controlado.

Segundo caso

Esta alternativa foi levada mais em conta devido ao seu menor impacto na estrutura e ao seu custo de aplicação e produção mais reduzido. A ideia está representada no seguinte esquema.

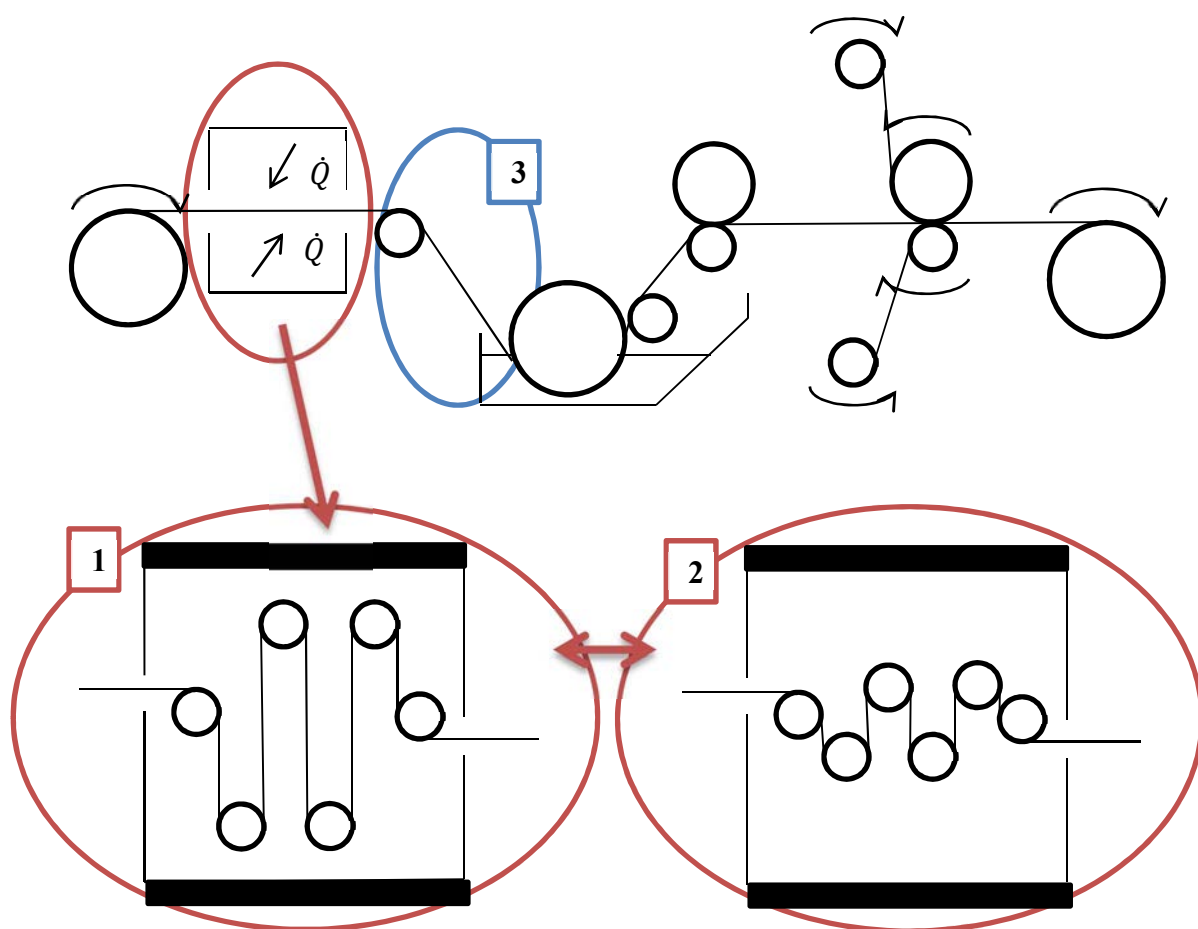


Fig. 5.12 – Esquema de configuração da máquina com secagem da fibra e pormenor construtivo do interior do forno.

O tipo de circuito pensado dentro do forno iria permitir que para uma mesma velocidade de acionamento do moto-reductor, a fibra tivesse que percorrer uma maior distância, permanecendo dentro do forno mais tempo (situação 1), ou ajustando os rolos e aproximando-os, conseguir-se-ia que para a mesma velocidade de acionamento o tempo dentro do forno reduzisse (situação 2) porque a distância a percorrer seria menor.

Nesta caso o forno cumpriria com a sua função de secagem da fibra (configurando-o para a melhor posição dos rolos e velocidade de trabalho para a fibra em questão), no entanto, foram detetados os seguintes problemas:

- O tempo de secagem da fibra de juta é muito demorado, cerca de 3 horas a 130°C , o que tornaria o processo de pré-impregnação demasiado lento e acarretaria outros problemas:
 - A viscosidade da resina varia ao longo do tempo (processo de polimerização vai decorrendo embora lentamente) e portanto as propriedades do compósito variam significativamente numa mesma produção, podendo mesmo impedir a finalização da produção;
 - Para investimentos em ambiente industrial este caso não seria viável, pelo elevado tempo de produção, no entanto para investigações futuras seria um ponto interessante a analisar;
- Entre a saída do forno e a entrada do tecido na tina, há uma reabsorção de alguma percentagem da humidade perdida no processo de secagem (vêr situação 3 da figura anterior) pelo que a secagem em estufa perderia o efeito inicialmente desejado. Há também absorção de humidade quando a fibra se encontra impregnada, no entanto esta quantidade de humidade é reduzida tornando o processo após impregnação exequível.

Desta forma, a aplicação de um forno para secagem da fibra na própria máquina ficou invalidada. Esta etapa da produção deverá ser considerada à parte para não interferir com a velocidade de trabalho da máquina bem como com os restantes elementos inerentes à produção do pré-impregnado já enunciados.

5.5. PROJETO FINAL DA MÁQUINA DE PREPREG

De seguida é apresentada uma vista 3D do projeto final da máquina de pré-impregnação:

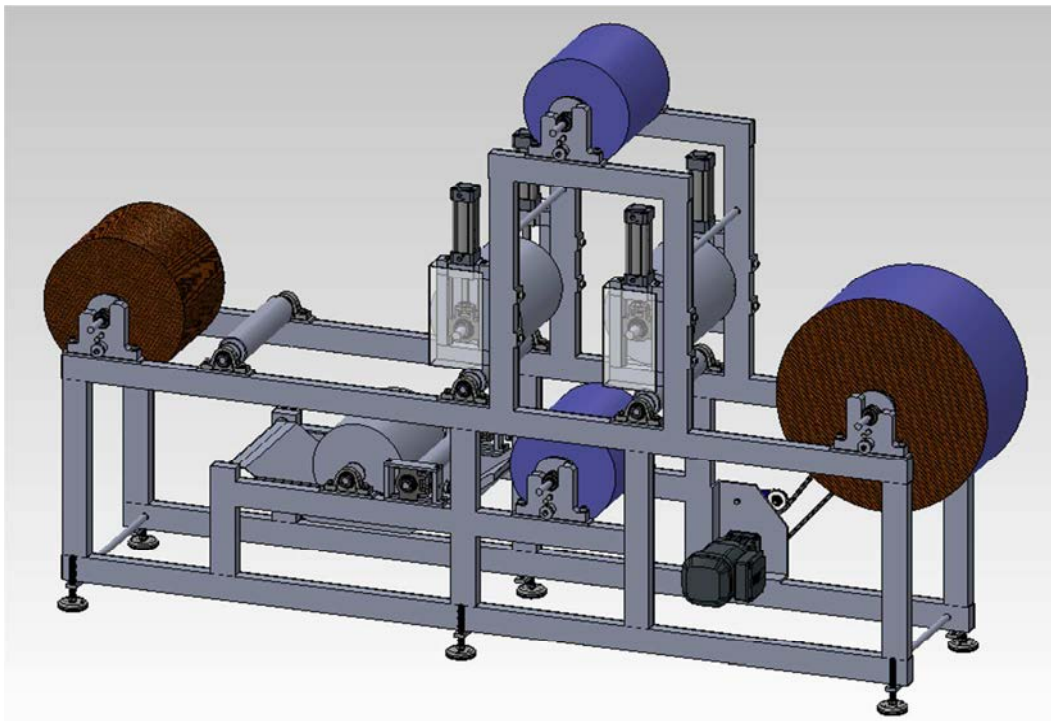


Fig. 5.13 - Máquina de Prepreg final.

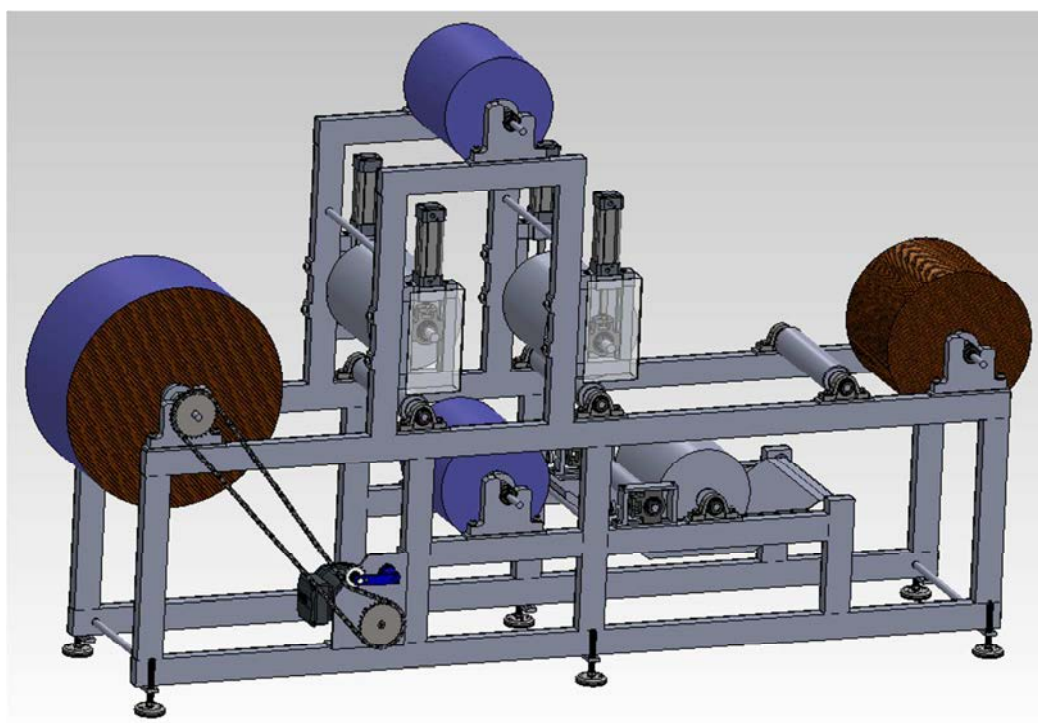


Fig. 5.14 - Máquina de Prepreg final.

6. ESTUDO ESTRUTURAL

6.1. DADOS DAS RESINAS E FIBRAS NATURAIS

6.1.1. Resinas

Foram utilizados dois tipos de resina: epóxi e PLA (Ácido polilático). Foram feitas duas resinas epóxi, sendo que uma constituída pela resina *SR1500 – 250* e o endurecedor *SD2505* e a outra pela resina *Si Preg SR121* e o endurecedor *KTA21*. Estes dois tipos de resinas foram criados para a moldação manual e criação do semi-produto, uma vez que o composto *SR1500 – 250 + SD2505* deverá ser utilizado para moldação manual e o composto *SR121 + KTA21* deverá ser utilizado para a criação de pré-impregnados. Que foram posteriormente moldados na prensa de pratos quentes. Ambas as resinas e endurecedores utilizados são provenientes da empresa *Sicomín* (SC).

A resina PLA encontra-se sob a forma de fibras bidirecionais no próprio tecido de Linho/PLA fornecido pela empresa *Composites Evolution*.

A quantidade de resina aplicada na moldação manual foi calculada de acordo com a ficha técnica do produto, resultando numa quantidade total de resina e endurecedor:

Tabela 6.1 - Quantidade de resina utilizada na impregnação manual.

<i>Compósito</i>	<i>Resina total [gr]</i>
<i>PLM1</i>	798
<i>PLM2</i>	864,5
<i>PLMS1</i>	532
<i>PLMS2</i>	598,5

A impregnação para a criação dos semi-produtos foi feita considerando 70 [%] de resina e 30 [%] de fibras. Foram impregnadas tiras de grandes dimensões para serem armazenadas em ambiente refrigerado para futura utilização. A criação dos compósitos consistiu no corte destas tiras com as dimensões desejadas (300 × 300) e empilhamento no número de camadas pretendidas para posterior consolidação na prensa de pratos quentes (PPQ).

6.1.2. Fibras

Foram utilizadas duas fibras: Juta e Linho. A fibra de juta é de origem Indiana e foi fornecida pela *Casa dos linhos* no Porto, a fibra de Linho foi fornecida pela empresa *Composites Evolution*.

Ambas são do tipo longo e bidirecional.

Foi pesada a fibra de juta sem qualquer tipo de secagem e com secagem, os pesos foram os seguintes:

Tabela 6.2 - Pesos da fibra de juta sem secagem e com secagem.

<i>Tipo de fibra de juta</i>	<i>Peso por unidade de área [gr/m²]</i>
<i>Sem secagem</i>	294,28
<i>Com secagem</i>	190,36

As condições de secagem para se obter este peso foram as seguintes:

Tabela 6.3 - Condições de secagem da fibra de juta.

<i>Condições de secagem da fibra de juta</i>	
<i>Tempo [horas]</i>	3
<i>Temperatura [°C]</i>	130

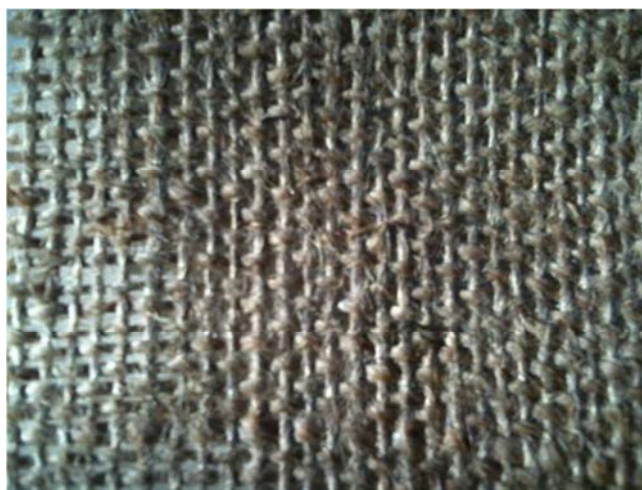


Fig. 6.1 - Tecido de fibra de juta bidirecional testado neste trabalho.

No tecido composto, de Linho/PLA não se efetuou qualquer tipo de tratamento térmico antes de se fazer a moldação na prensa de pratos quentes.

De entre os vários tipos de configurações fabricados pela *Composites Evolution*, o que se usou foi o *Biotex 4x4 Hopsack 510gsm* com 40 [%] de resina PLA. Este é produzido em tecido híbrido bidirecional com fibras de linho e PLA como a imagem seguinte ilustra.



Fig. 6.2 - Configuração do tecido produzido pela *Composites Evolution* e testado neste trabalho [34].

As propriedades típicas, publicadas pela *Composites Evolution*, deste compósito fabricado na prensa de pratos quentes e testado à temperatura ambiente são:

Tabela 6.4 - Propriedades típicas do linho/PLA publicadas pela empresa *Composites Evolution* [34].

Propriedades		Normas
Densidade [g/cm^3]	1,33	
Módulo de tração [GPa]	13,2	ISO 527 – 4
Resistência tração [MPa]	102	ISO 527 – 4
Alongamento [%]	1,6	ISO 527 – 4
Módulo de flexão [GPa]	7,8	ISO 14125
Resistência flexão [MPa]	131	ISO 14125
Impato Charpy (plano) [kJ/m^2]	32,8	ISO 179 – 1 sem entalhe, perp. ao plano
Impato Charpy (borda) [kJ/m^2]	28,4	ISO 179 – 1 sem entalhe, dir. da borda

6.2. DADOS DOS COMPÓSITOS EM ANÁLISE

No estudo experimental dos compósitos, foram analisados quatro tipos de compósitos reforçados com fibras naturais que variam essencialmente no processo de moldação, resina e fibra utilizada.

1. Compósito de matriz polimérica epóxi (SR1500 – 250 + SD2505) reforçada com fibra de juta e moldado manualmente.

Tabela 6.5 - Placas de compósitos (resina epóxi com fibra de juta) moldados manualmente.

<i>Compósito</i>	<i>Quantidade de camadas</i>	<i>Dimensões (C × L) [mm]</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>Quantidade de fibra em peso [%]</i>
PLM1	6	286 × 278,5	4,74	32,43
PLM2	4	285,5 × 285,8	3,88	25,95

2. Compósito de matriz polimérica epóxi (SR1500 – 250 + SD2505) reforçada com fibra de juta seca e moldado manualmente.

Tabela 6.6 - Placas de compósitos (resina epóxi com fibra de juta seca) moldados manualmente.

<i>Compósito</i>	<i>Quantidade de camadas</i>	<i>Dimensões (C × L) [mm]</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>Quantidade de fibra em peso [%]</i>
PLMS1	4	276,8 × 280,8	4,12	16,05
PLMS2	6	98,3 × 277,7	4,86	21,37

3. Compósito de matriz polimérica epóxi (SR121 + KTA21) reforçada com fibra de juta e moldado na prensa de pratos quentes.

Tabela 6.7 - Placas de compósitos (resina epóxi com fibra de juta) moldados na prensa de pratos quentes.

<i>Compósito</i>	<i>Quantidade de camadas</i>	<i>Dimensões (C × L) [mm]</i>	<i>Dias após impregnação</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>Quantidade de fibra em peso [%]</i>
PLPR1	6	284,8 × 274,2	42	3,35	48,97
PLPR2	6	278,67 × 280,33	64	2,34	63,62
PLPR3	8	283,17 × 279,17	70	3,04	66,73
PLPR4	8	285,67 × 280,67	71	3,21	68,84
PLPR5	6	290,17 × 282,00	89	2,17	72,20
PLPR6	6	292,17 × 280,83	90	2,21	69,30
PLPR7	6	290,70 × 271,90	18	2,24	74,26
PLPR8	6	285,5 × 285,5	19	2,16	78,26

4. Compósito de matriz polimérica PLA reforçada com fibra de linho e moldada na prensa de pratos quentes.

Tabela 6.8 - placas de compósitos (resina PLA com fibra de linho) moldados na prensa de pratos quentes.

<i>Compósito</i>	<i>Quantidade de camadas</i>	<i>Dimensões (C × L) [mm]</i>	<i>Dias após moldação</i>	<i>Quantidade de fibra em peso [%]</i>
PLA1	6	286,36 × 279,33 ± 5	56	40
PLA2	6	286,36 × 279,33 ± 5	56	40
PLA6	6	286,36 × 279,33 ± 5	36	40

É apresentada de seguida uma tabela com mais informações para comparação dos compósitos criados:

Tabela 6.9 - Resumo dos compósitos criados e dados complementares para a análise.

<i>Compósito</i>	<i>Fibra</i>	<i>Resina</i>	<i>Orientação</i>	<i>Pressão [Bar]</i>	<i>Temperatura [°C]</i>	<i>Tempo [min]</i>
PLM1	Juta Normal	Epóxi	[0,0,0,0]	P_{fecho}	Ambiente	—
PLM2	Juta Normal	Epóxi	[0,0,0,0]	P_{fecho}	Ambiente	—
PLMS1	Juta Seca	Epóxi	[0,0,0,0]	P_{fecho}	Ambiente	—
PLMS2	Juta Seca	Epóxi	[0,0,0,0]	P_{fecho}	Ambiente	—
PLPR1	Juta Normal	Epóxi	[0,0,0,0]	P_{fecho}	120	60
PLPR2	Juta Normal	Epóxi	[0,0,0,0]	27	120	60
PLPR3	Juta Normal	Epóxi	[0,0,0,0]	20	120	60
PLPR4	Juta Normal	Epóxi	[0,0,0,0]	20	120	60
PLPR5	Juta Normal	Epóxi	[0,0,0,0]	20	120	60
PLPR6	Juta Normal	Epóxi	[0,0,0,0]	27	120	60
PLPR7	Juta Normal	Epóxi	[0,0,0,0]	20	120	60
PLPR8	Juta Normal	Epóxi	[0,0,0,0]	27	120	60
PLA1	Linho Normal	PLA	[0,0,0,0]	3,68	180	20
PLA2	Linho Normal	PLA	[0,0,0,0]	3,27	190	15
PLA3	Linho Normal	PLA	[0,0,0,0]	20	190	15

A pressão de fecho é de aproximadamente $p_{fecho} \approx 3,7 [Bar]$.

6.3. ETAPAS E PROCESSOS UTILIZADOS

O objetivo neste capítulo é apresentar os passos e a sequência de como foram experimentados os compósitos nos processos utilizados.

Os processos utilizados foram o de moldação manual e moldação na prensa de pratos quentes, métodos que tinham vindo a ser utilizados já noutros trabalhos anteriores a este. No entanto, as diferenças residem principalmente na resina que foi utilizada, resina epóxi, que resultou da conclusão de que esta é a resina que permite obter as melhores propriedades mecânicas, e nas variáveis inerentes ao processo.

No processo de moldação manual, as variáveis não são controladas com precisão dado que a pressão aplicada é determinada pela força de aperto das placas de molde (espessura que é determinada pelos calços na periferia) e a temperatura de cura é definida pela temperatura da sala em que o processo está a decorrer.

No processo de prensa de pratos quentes, as variáveis a controlar são a temperatura dos pratos em contato com o compósito e a pressão aplicada ao compósito.

6.3.1. Produção Pré-impregnados

Todas as placas criadas com a designação *PLPR* foram pré-impregnadas. As etapas mais importantes são descritas de seguida.

Após mistura da resina *SR121* com o endurecedor *KTA21* na proporção certa para a quantidade de fibra a impregnar, é iniciado o processo de impregnação:

1. Preparação da fibra



Fig. 6.3 - Preparação da fibra para impregnação.

2. Aplicação da resina em toda a fibra



Fig. 6.4 - Impregnação da fibra.

3. Aplicação de um filme protetor em ambas as faces e enrolado para ser sujeito a uma pré-cura e colocação posterior em ambiente refrigerado



Fig. 6.5 - Pré-impregnado finalizado.

6.3.2. Moldação Manual

Todas as placas criadas com a designação *PLM* foram moldadas manualmente. As etapas mais importantes são descritas de seguida.

Após a mistura da resina *SR1500* – 250 com o endurecedor *SD2505* na proporção certa para a quantidade de fibra a impregnar, inicia-se o processo de moldação manual:

1. Preparação da fibra



Fig. 6.6 - Marcação da fibra para o corte das várias camadas (dimensões 300×300 à direita).

É aplicada uma camada de cera desmoldante em todas as peças do molde que estarão em contato com a resina para permitir a desmoldação no fim do processo. De seguida é colocada a primeira camada e impregnada com resina, este processo repete-se tantas vezes quantas as camadas que irão constituir o compósito resultando num empilhamento de camadas com resina entre cada nível para garantir uma boa impregnação. Obtém-se no final o seguinte molde:

2. Molde fechado, compósito sob compressão



Fig. 6.7 - Molde fechado para cura do compósito sob pressão.

A pressão a que o compósito será sujeito é a originada pela força de aperto gerada pelos pares parafusos/porcas situados nos bordos dos moldes. De notar que esta pressão é limitada pela rigidez dos batentes que são colocados em todas as laterais e entre os moldes com o objetivo de estabelecer uma espessura de fabrico o mais constante possível.

Após um dia de cura, obtém-se a seguinte placa:

3. Desmoldação do compósito

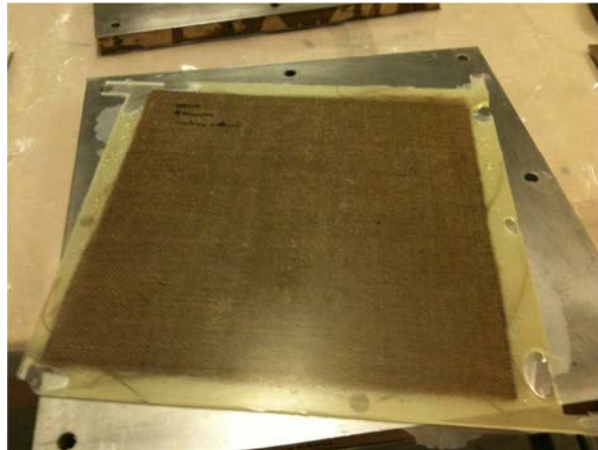


Fig. 6.8 - Desmoldação do compósito após um dia de cura.

O compósito obtido necessita de maquinação para que se obtenha uma placa com dimensões bem definidas e possibilitar assim um cálculo mais preciso de percentagens de fibra ou resina no fim do processo de moldação e permitir o corte de provetes com quantidades de resina e fibra mais ou menos constantes.

De citar que a preparação das fibras nos casos dos compósitos *PLMS* sofreu um processo de secagem a uma temperatura de $T = 130 [^{\circ}C]$ durante um tempo de $t = 3 [horas]$ com o objetivo de lhes retirar a humidade e conseguir assim uma melhor adesão com a matriz polimérica. Esta etapa situou-se entre o ponto 1 e 2. No fim da secagem as fibras de juta foram imediatamente colocadas dentro de sacos herméticos para evitar a reabsorção da humidade durante o percurso até ao local de trabalho e preparação dos moldes.



Fig. 6.9 - Colocação das fibras dentro do forno para secagem na imagem do lado esquerdo. Preparação dos moldes para iniciar o processo. Note-se que as fibras estão dentro dos sacos herméticos.

6.3.3. Moldação Prensa Pratos Quentes

Todas as placas criadas por pré-impregnação, *PLPR*, e os tecidos híbridos (Linho/PLA) da *Composites Evolution*, foram moldadas por compressão a quente. Este processo permite o controlo da pressão e temperatura durante a moldação, estes valores foram tabelados para cada um dos casos no capítulo 6.2.

Este processo dá continuidade à etapa final da pré-impregnação dos compósitos, explicada no capítulo 6.3.1. Portanto, depois de retirados os rolos de pré-impregnados da refrigeração, estes são processados como é descrito de seguida:

1. Preparação do pré-impregnado



Fig. 6.10 - Marcação do pré-impregnado para o corte das várias camadas (dimensões 300×300 à direita).

Teve-se cuidado com o desenrolamento do pré-impregnado dado que este ainda estava muito frágil devido às temperaturas baixas a que esteve sujeito no congelador. Sob pena de fraturar ou danificar as fibras e comprometer as propriedades mecânicas do compósito.

2. Empilhamento das camadas



Fig. 6.11 - Empilhamento das várias camadas de pré-impregnado e aplicação de um filme protetor para não haver contato direto com a PPQ ou placa usada para melhorar acabamento de superfície.

3. Moldação por compressão a quente

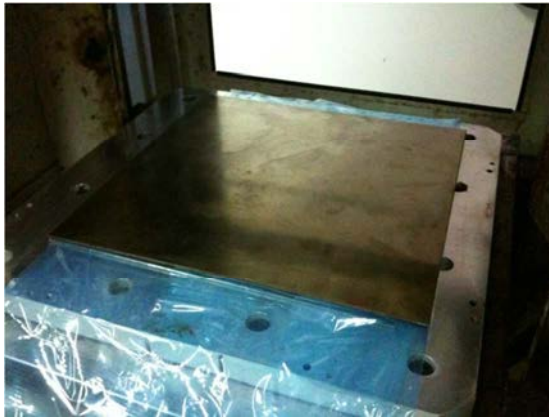


Fig. 6.12 – Placa de metal posta na face superior e inferior do compósito para se conseguir um melhor acabamento superficial na imagem do lado esquerdo. Moldação na PPQ na imagem do lado direito.

4. Remoção do filme protetor

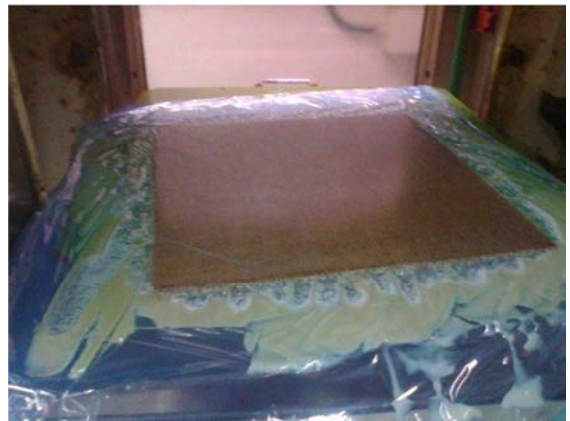


Fig. 6.13 - Resultados obtidos após moldação na PPQ.

De realçar o facto deste compósito necessitar igualmente de maquinaria para controlo dimensional, permitindo assim o cálculo mais preciso da percentagem de fibras e resina finais. Este processo permite obter maiores percentagens de fibra devido às pressões de moldação mais elevadas face à moldação manual, resultando em propriedades mecânicas superiores como se constatará no capítulo da análise dos resultados de tração e flexão.

No caso do linho/PLA, o processo foi o mesmo, sendo que todas as etapas ocorreram mas com o tecido fornecido pela *Composites Evolution*.

6.4. ENSAIOS MECÂNICOS

Foram ensaiados os provetes obtidos das placas realizadas segundo as várias condições enunciadas anteriormente. Estes foram ensaiados à tração e flexão. De seguida são analisados os resultados obtidos e enunciadas as normas utilizadas para cada um deles.

6.4.1. Tração

6.4.1.1. Norma, máquina e montagem

Os provetes obtidos para ensaios de tração foram todos preparados para serem ensaiados segundo a norma *ISO 527 – 1: 1996*.

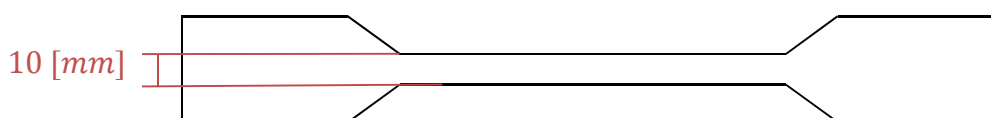


Fig. 6.14 - Esquema do formato dos provetes de tração da norma *ISO 527 – 1: 1996* e dimensão da largura.

A velocidade do ensaio de tração foi de $v = 2 \text{ [mm/min]}$ e a célula de carga utilizada foi de 5 [kN] . As condições em que os ensaios foram feitos são: temperatura de $T = 23 \pm 1 \text{ [}^\circ\text{C]}$ e a humidade de $50 \pm 5 \text{ [%]}$.

A máquina de ensaios usada para tracionar os provetes foi a *INSTRON modelo 4208*.



Fig. 6.15 - Na imagem do lado esquerdo apresenta-se o equipamento utilizado para os ensaios de tração. Na imagem do lado direito o aparato com extensômetro montado para ensaio de tração.

6.4.1.2. Apresentação resultados

Foram tracionados 5 provetes por cada placa para se conseguir minimizar o erro introduzido pela diferença de propriedades entre os vários pontos dessa placa devido à anisotropia que é característica dos compósitos reforçados com fibras naturais.

PLM1

Tabela 6.10 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLM1.

Propriedades Mecânicas	Módulo de Young [Mpa]	Tensão Máx. [Mpa]	Deformação Máx. [%]
Média	5961	58,91	0,0143
Desvio – Padrão [%]	3,78	2,03	9,03

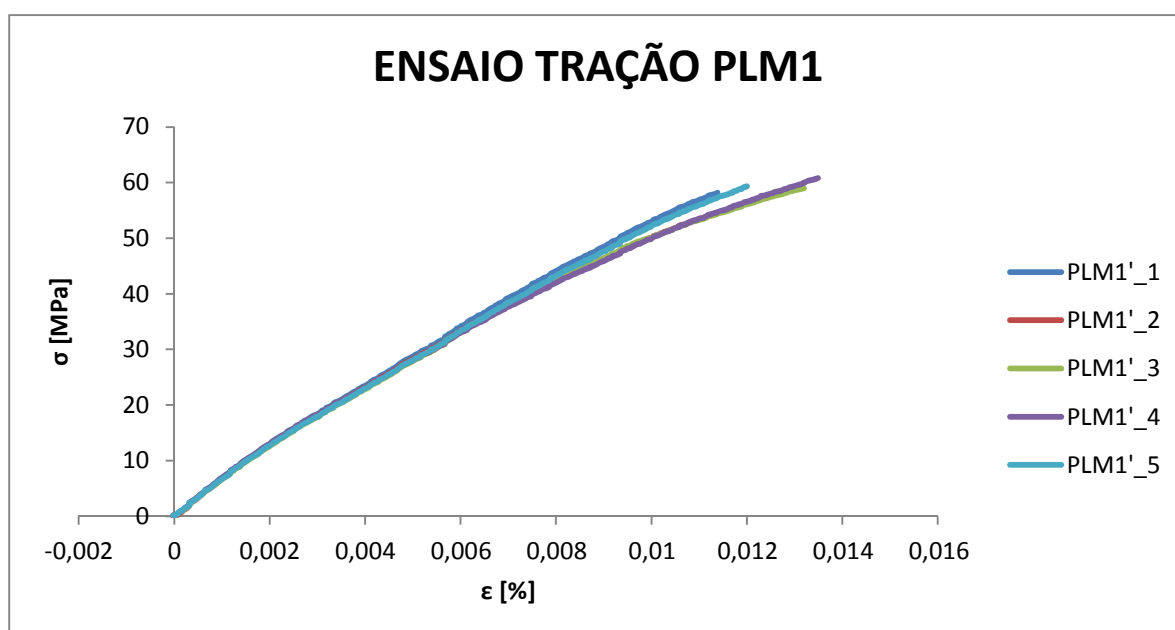


Gráfico 6.1 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLM1.

PLM2

Tabela 6.11 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLM2.

Propriedades Mecânicas	Módulo de Young [Mpa]	Tensão Máx. [Mpa]	Deformação Máx. [%]
Média	5694	58,32	0,0135
Desvio – Padrão [%]	2,79	1,67	4,25

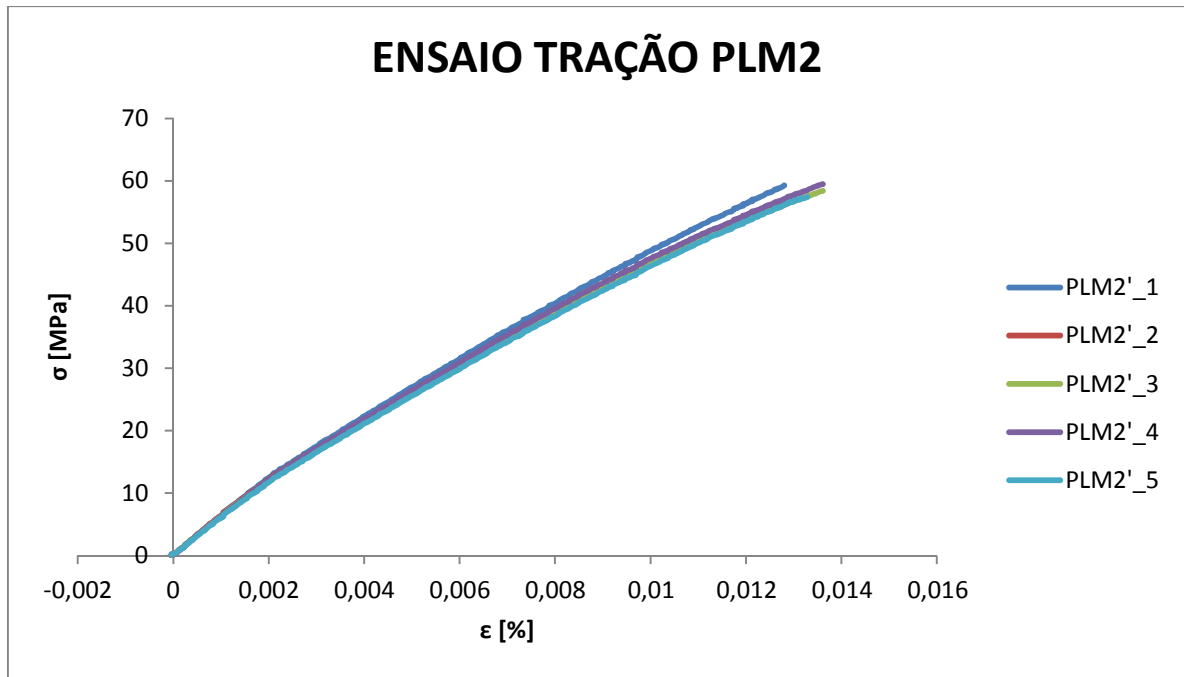


Gráfico 6.2 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLM2.

PLMS1'

Tabela 6.12 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLMS1.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	6328	66,79	0,0137
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	4,88	3,46	5,88

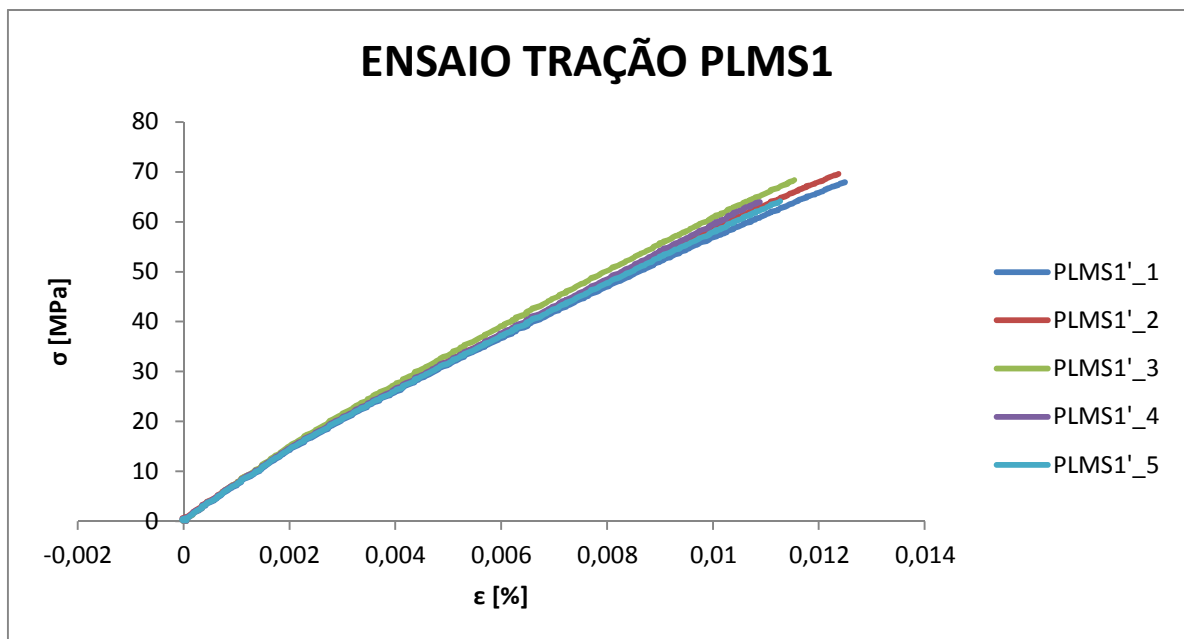


Gráfico 6.3 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLMS1.

PLMS2'

Tabela 6.13 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLMS2.

Propriedades Mecânicas	Módulo de Young [Mpa]	Tensão Máx. [Mpa]	Deformação Máx. [%]
Média	6711	65,96	0,0132
Desvio – Padrão [%]	3,50	4,70	9,75

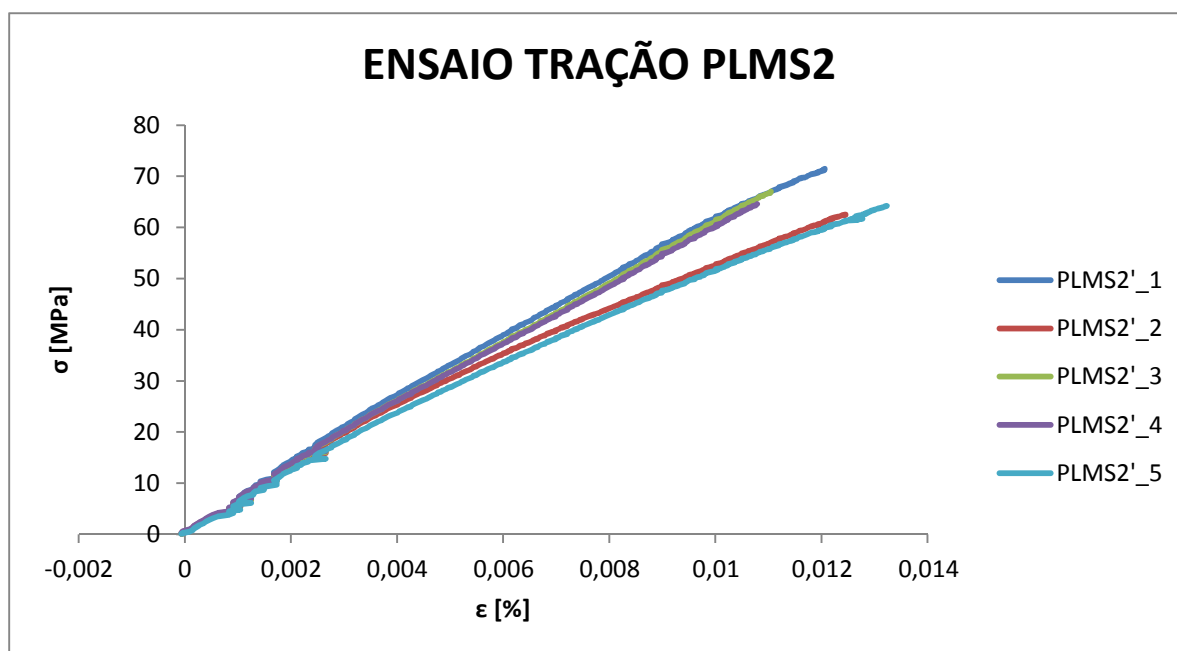


Gráfico 6.4 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLMS2.

PLPR1

Tabela 6.14 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR1.

Propriedades Mecânicas	Módulo de Young [Mpa]	Tensão Máx. [Mpa]	Deformação Máx. [%]
Média	7499	70,35	0,0153
Desvio – Padrão [%]	6,62	6,62	13,12

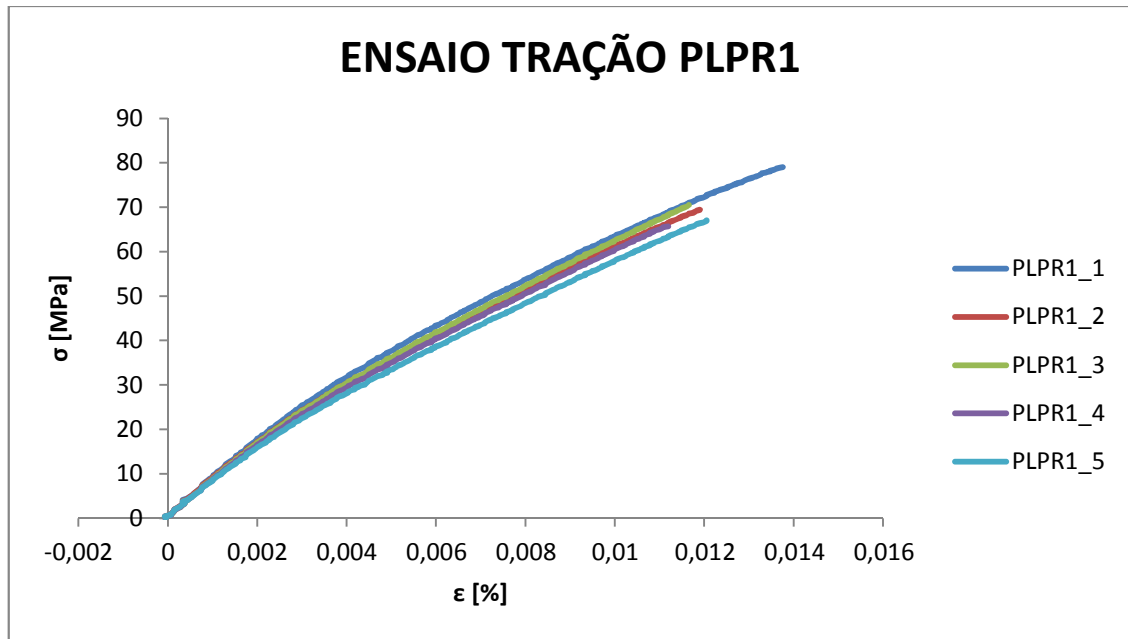


Gráfico 6.5 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR1.

PLPR2

Tabela 6.15 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR2.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	9748	79,37	0,0130
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	1,64	8,47	11,44

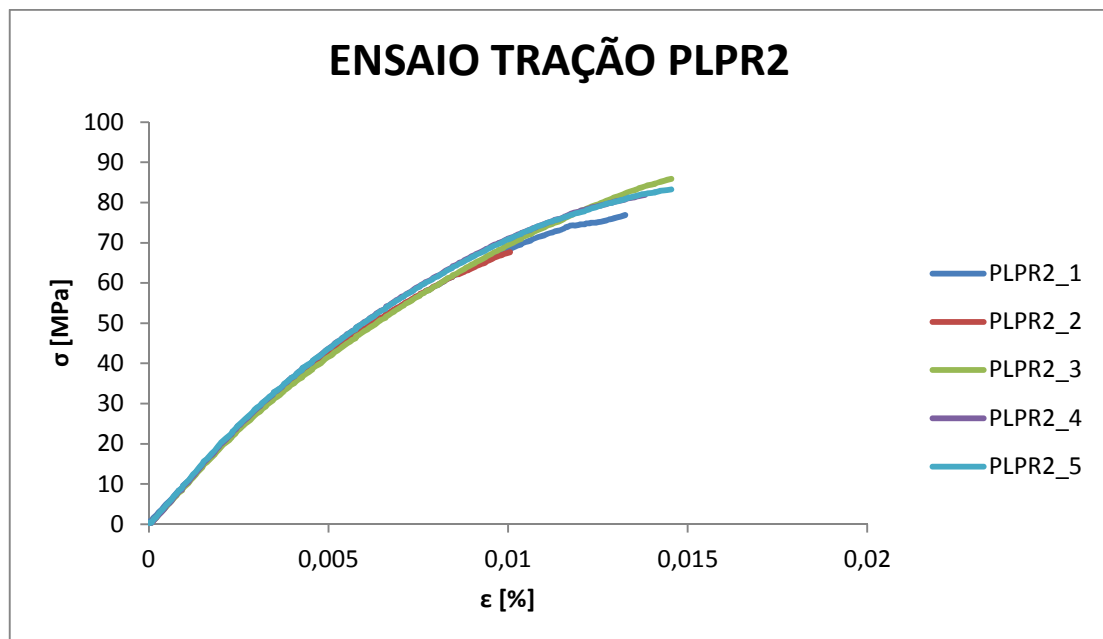


Gráfico 6.6 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR2.

PLPR3

Tabela 6.16 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR3.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young</i> [Mpa]	<i>Tensão Máx.</i> [Mpa]	<i>Deformação Máx.</i> [%]
<i>Média</i>	8933	70,32	0,0133
<i>Desvio – Padrão</i> [%]	3,37	4,21	12,59

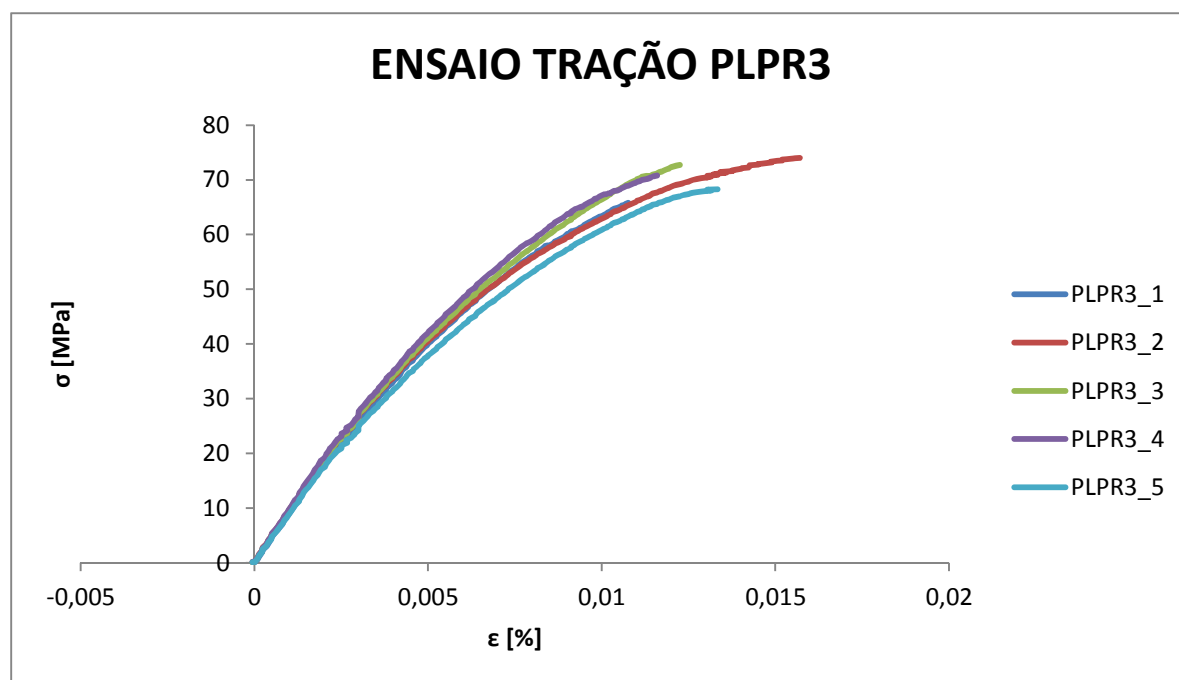


Gráfico 6.7 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR3.

PLPR4

Tabela 6.17 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR4.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young</i> [Mpa]	<i>Tensão Máx.</i> [Mpa]	<i>Deformação Máx.</i> [%]
<i>Média</i>	8481	76,16	0,0144
<i>Desvio – Padrão</i> [%]	6,21	2,51	6,04

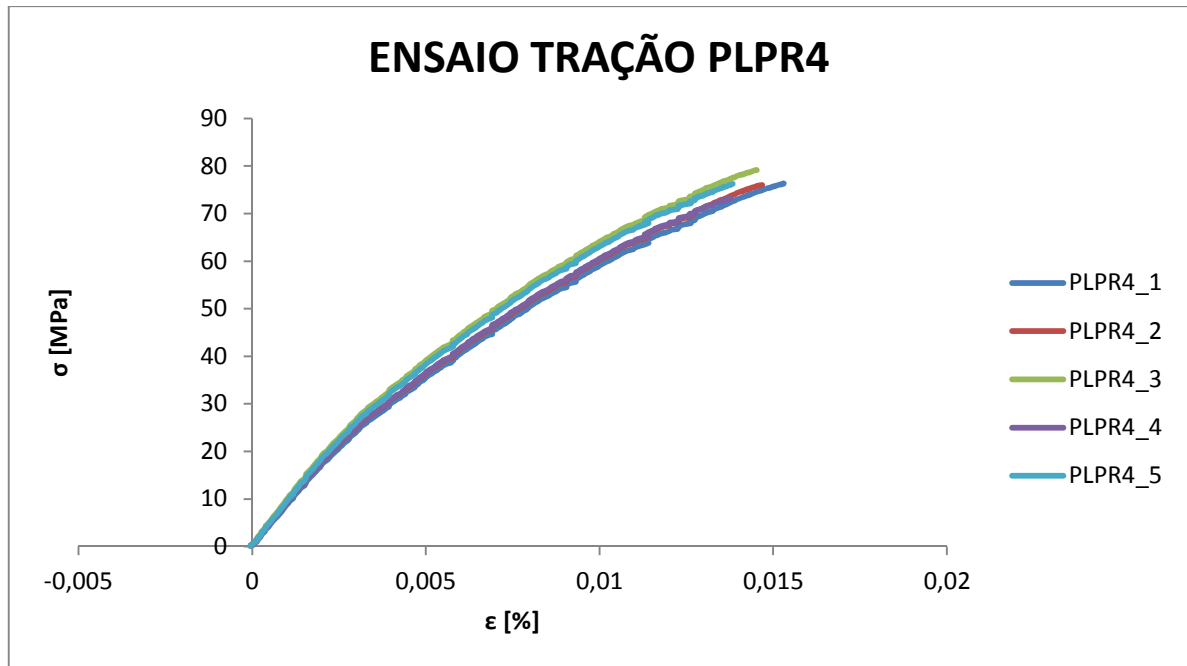


Gráfico 6.8 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR4.

PLPR5

Tabela 6.18 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR5.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	8967	66,02	0,0119
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	5,51	6,41	11,39

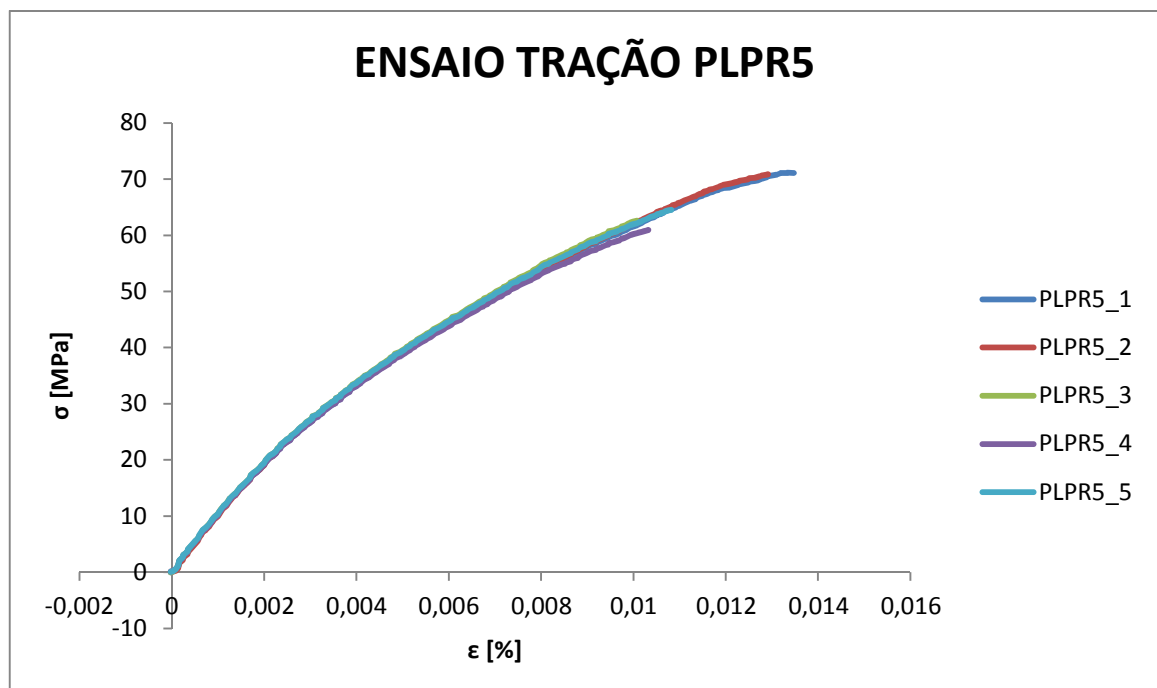


Gráfico 6.9 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR5.

PLPR6

Tabela 6.19 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR6.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	8697	65,49	0,0133
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	9,48	8,61	12,70

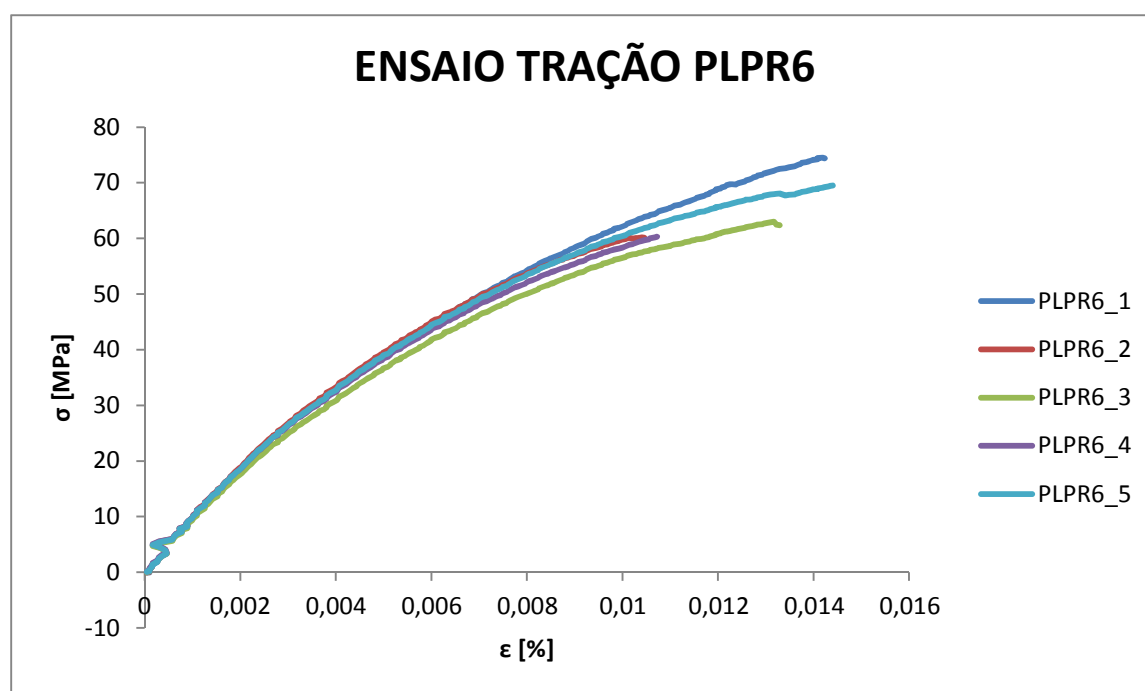


Gráfico 6.10 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR6.

PLPR7

Tabela 6.20 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR7.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	7639	46,51	0,0162
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	6,62	2,73	13,44

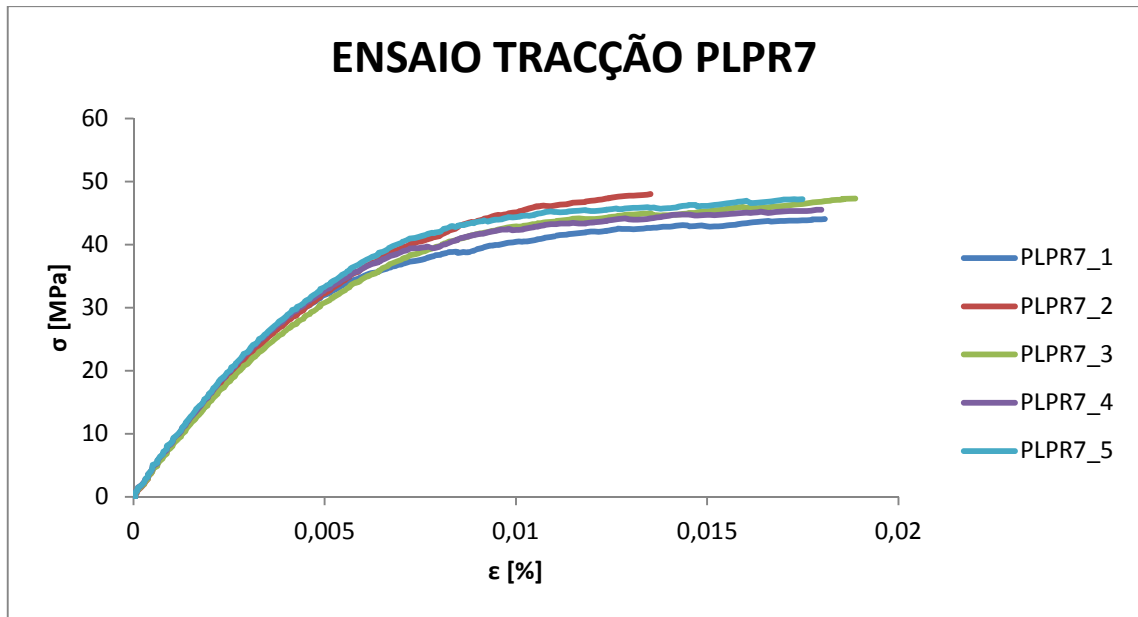


Gráfico 6.11 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR7.

PLPR8

Tabela 6.21 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLPR8.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	8438	57,36	0,0124
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	6,08	6,20	13,80

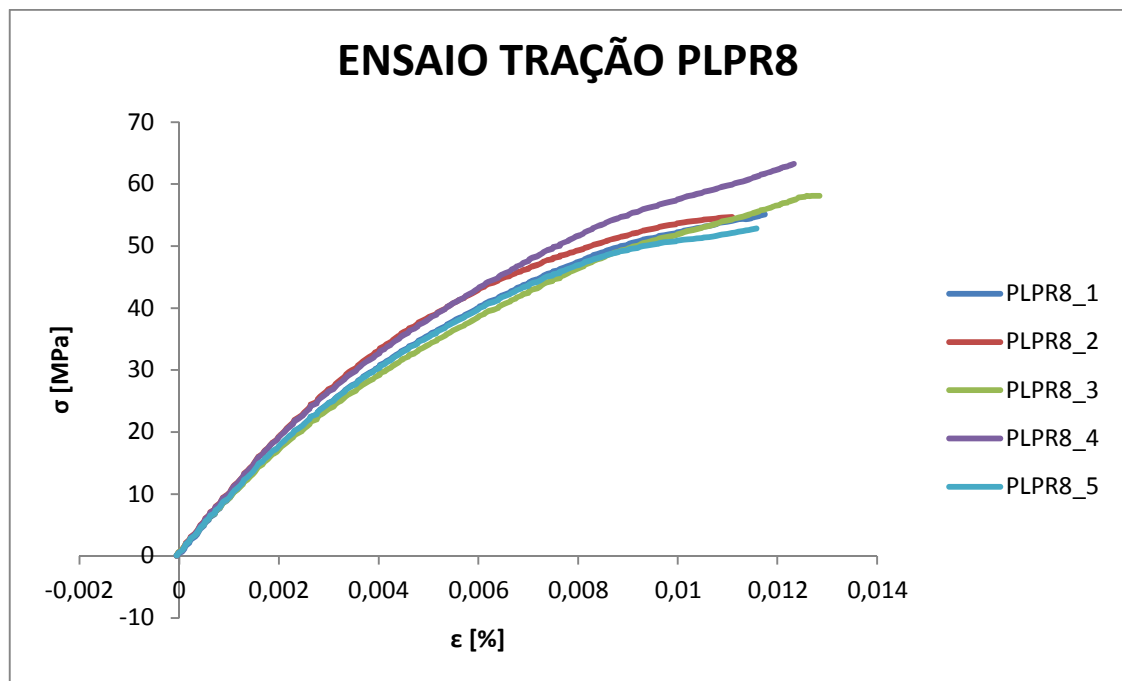


Gráfico 6.12 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR8.

PLA1

Tabela 6.22 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLA1.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	4995	37,18	0,0194
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	22,57	6,10	15,48

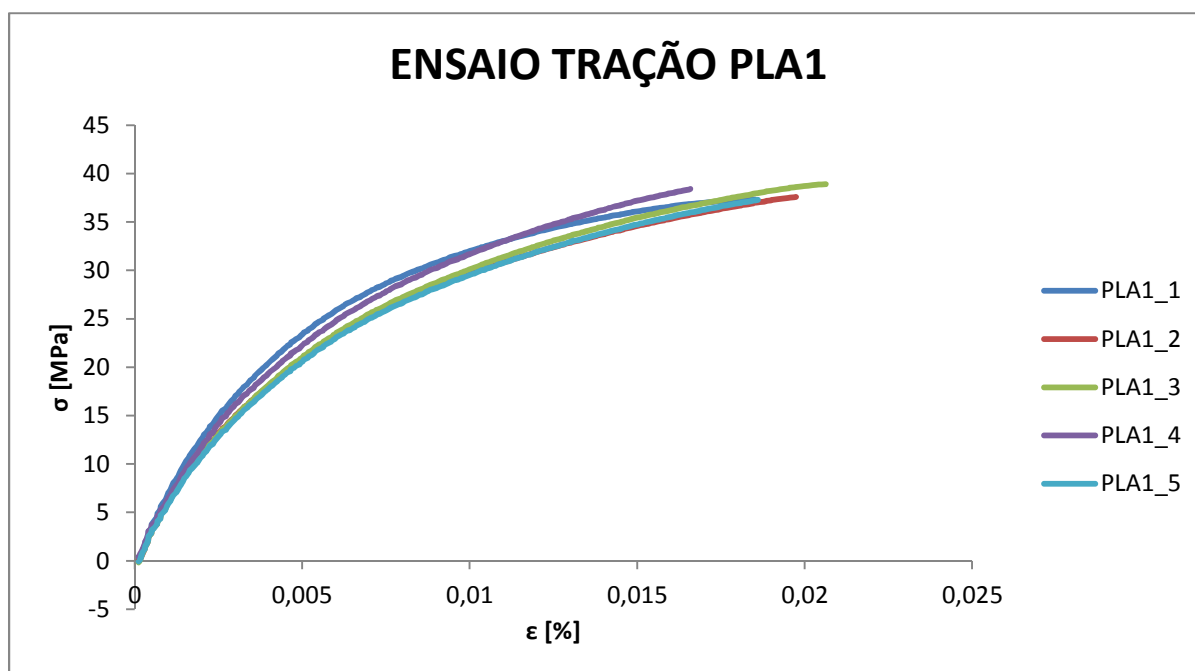


Gráfico 6.13 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA1.

PLA2

Tabela 6.23 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLA2.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	5050	35,40	0,0211
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	11,30	7,88	17,96

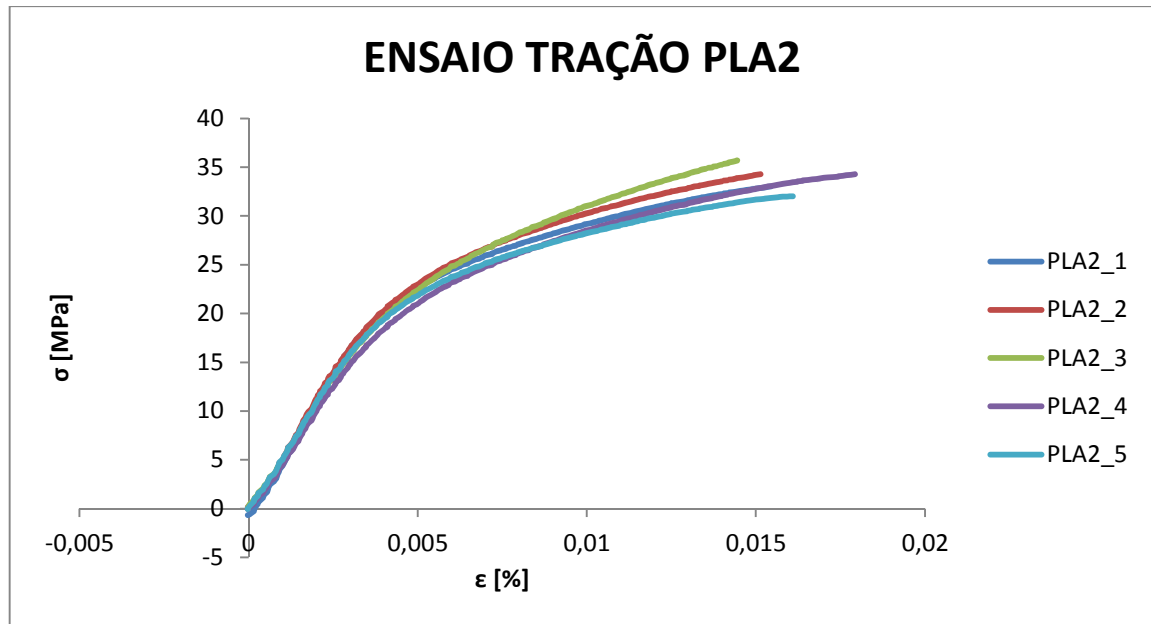


Gráfico 6.14 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA2.

PLA6

Tabela 6.24 – Média e desvio-padrão dos ensaios de tração provenientes dos provetes da placa PLA6.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	8175	59,52	0,0136
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	2,56	9,56	7,82

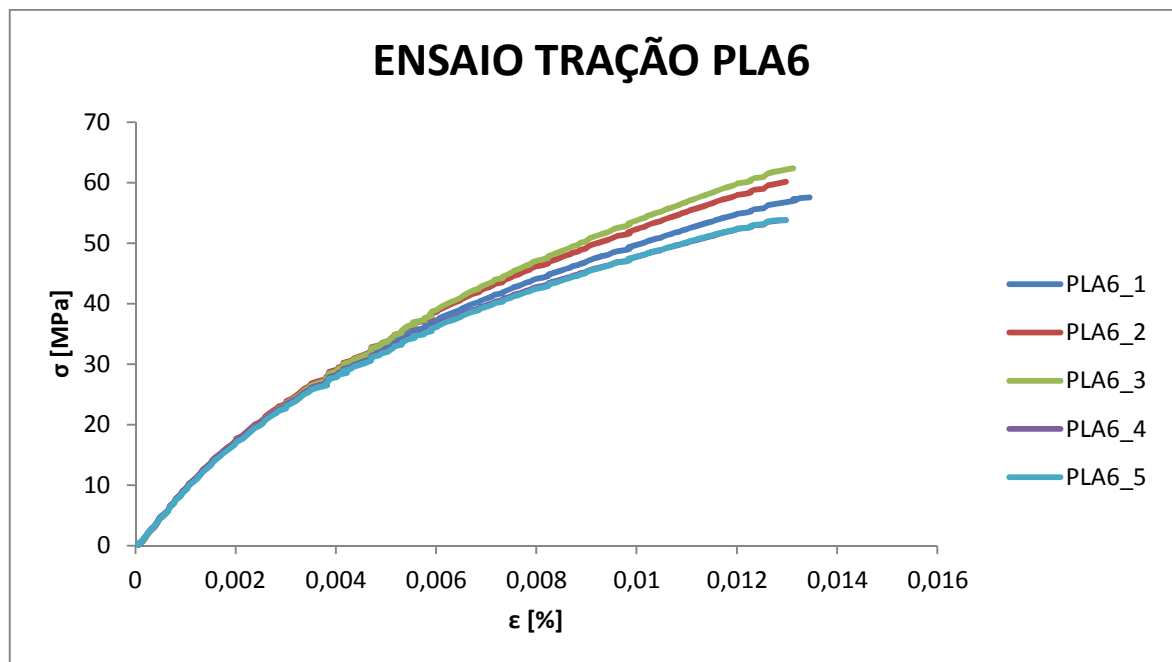


Gráfico 6.15 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA6.

Apresenta-se de seguida uma tabela resumo dos resultados médios e desvios padrões obtidos dos ensaios de tração para todas as placas:

Tabela 6.25 - Valores médios e desvios padrões das propriedades mecânicas dos compósitos à tração.

Compósito	Módulo de Young [MPa]		Tensão Máx. [MPa]		Deformação Máx. [%]	
	Média	Desvio Padrão [%]	Média	Desvio Padrão [%]	Média	Desvio Padrão [%]
PLM1	5961	3,78	58,91	2,03	0,0166	9,03
PLM2	5694	2,79	58,32	1,67	0,0135	4,25
PLMS1	6328	4,88	66,79	3,46	0,0149	5,88
PLMS2	6711	3,50	65,96	4,70	0,0132	9,75
PLPR1	7499	6,62	70,35	6,62	0,0153	13,12
PLPR2	9748	1,64	79,37	8,47	0,0130	11,44
PLPR3	8933	3,37	70,32	4,21	0,0133	12,59
PLPR4	8481	6,21	76,16	2,51	0,0157	6,04
PLPR5	8967	5,51	66,02	6,41	0,0634	11,39
PLPR6	8697	9,48	65,49	8,61	0,0133	12,70
PLPR7	7639	6,62	46,51	2,73	0,0162	13,44
PLPR8	8438	6,08	57,36	6,20	0,0260	13,80
PLA1	4995	22,57	37,18	6,10	0,0194	15,48
PLA2	5050	11,30	35,40	7,88	0,0369	17,96
PLA3	8175	2,56	59,52	9,56	0,0503	7,82

Como são tratados compósitos reforçados com fibras naturais, aceitam-se desvios padrões com um máximo de 30 [%], ou seja, o intervalo de confiança situa-se nos 70 [%]. Portanto, todos os ensaios de tração aqui presentes são válidos.

6.4.1.3. Discussão dos resultados

Tabela 6.26 - Valores médios e desvios padrões das propriedades mecânicas dos *PLM* e *PLMS* à tração.

<i>Compósito</i>	<i>Camadas</i>	<i>E</i> [MPa]	$\sigma_{M\acute{a}x}$ [MPa]	ϵ [%]	<i>Esp.</i> [mm]	<i>Quantidade</i> <i>fibra em</i> <i>peso [%]</i>	<i>Pressão</i>
<i>PLM1</i>	6	5961	58,91	0,0166	4,74	32,43	<i>Aperto</i>
<i>PLM2</i>	4	5694	58,32	0,0135	3,88	25,95	<i>Aperto</i>
<i>PLMS1</i>	4	6328	66,79	0,0149	4,12	16,05	<i>Aperto</i>
<i>PLMS2</i>	6	6711	65,96	0,0132	4,86	21,37	<i>Aperto</i>

Das placas *PLM1* para *PLM2* verifica-se uma ligeira redução do $E = 267$ [MPa] e $\sigma_{max} = 0,59$ [MPa]. Mostrando que para a mesma pressão e temperatura, a vantagem de um compósito com 6 camadas sobre o de 4 camadas é quase impercetível e a nível de aplicabilidade, não se conseguem melhorias. Como era esperado, a percentagem de fibra em peso aumenta do compósito de 4 camadas (25,95 [%]) para 6 camadas (32,43 [%]) porque a espessura com que ambos são fabricados é a mesma. Este aumento de percentagem de fibra oferece, como era esperado, um aumento das propriedades mecânicas, embora este aumento seja muito reduzido.

Das placas *PLMS1* para *PLMS2* conseguiu-se um aumento do $E = 383$ [MPa], embora haja redução da $\sigma_{m\acute{a}x} = 0,83$ [MPa]. Este aumento do E deve-se não só ao aumento do número de camadas mas também ao processo de secagem a que as fibras foram submetidas. Esta secagem permitiu a criação de uma interface mais forte entre a matriz polimérica e a fibra, como foi explicado ao longo do trabalho. De referir que as placas reforçadas com juta seca (*PLMS*) apresentaram, na globalidade, propriedades mecânicas superiores (E e $\sigma_{m\acute{a}x}$) relativamente às placas reforçadas com juta normal (*PLM*). Este resultado encaminha a investigação futura a processos otimizados de secagem prévia da juta e/ou tratamentos químicos para melhoramento das propriedades de adesão matriz/fibra. Estes processos deverão ser idealizados considerando a máquina de pré-impregnação aqui desenvolvida.

A percentagem de fibra em peso diminuiu das placas *PLM* para as placas *PLMS* devido à redução do peso das fibras que se conseguiu com a extração da humidade. No entanto, a esta redução da percentagem de fibra não esteve associada uma redução de espessura porque a pressão foi aproximadamente a mesma e os calços definiram a espessura destas, Sendo portanto o espaço restante do molde preenchido por resina.

As placas *PLPR* foram moldadas por compressão a quente na PPQ. Como era esperado, devido às pressões maiores comparativamente à moldação manual foram obtidas placas com percentagens de fibra mais elevadas, isto deve-se à expulsão de mais quantidade de resina da placa, continuando com a quantidade de fibra constante.

Tabela 6.27 - Valores médios e desvios padrões das propriedades mecânicas dos *PLPR* à tração.

<i>Compósito</i>	<i>Camadas</i>	E [MPa]	$\sigma_{M\acute{a}x}$ [MPa]	ϵ [%]	<i>Esp.</i> [mm]	<i>Quantidade</i> <i>fibra em</i> <i>peso [%]</i>	<i>Pressão</i>
<i>PLPR1</i>	6	7499	70,35	0,0153	3,35	48,97	3,7
<i>PLPR2</i>	6	9748	79,37	0,0130	2,34	63,62	27
<i>PLPR3</i>	8	8933	70,32	0,0133	3,04	66,73	20
<i>PLPR4</i>	8	8481	76,16	0,0157	3,21	68,84	20
<i>PLPR5</i>	6	8967	66,02	0,0634	2,17	72,20	20
<i>PLPR6</i>	6	8697	65,49	0,0133	2,21	69,30	27
<i>PLPR7</i>	6	7639	46,51	0,1373	2,24	74,26	20
<i>PLPR8</i>	6	8438	57,36	0,0260	2,16	78,26	27

As propriedades mecânicas (E e $\sigma_{m\acute{a}x}$) das placas *PLPR* aumentaram significativamente comparativamente às placas *PLM* ou *PLMS* devido ao aumento da percentagem de fibra. Em nenhum dos casos *PLPR* foi usada fibra de juta seca porque não fazia parte integrante desta fase de pré-impregnação, apesar de ser necessário em fases posteriores, pois baseado nos resultados com moldação manual, a utilização de fibra seca melhora as propriedades mecânicas das placas.

A placa *PLPR1* não é comparável com as restantes placas pois foi moldada à pressão de fecho $p_{fecho} = 3,7$ [Bar], bastante inferior às restantes. Verificou-se uma percentagem de fibra mais reduzida (48,97 [%]) justificada pela redução de pressão exercida na placa, resultando num aumento da espessura (3,35 [mm]).

O valor médio de tensão obtido para a *PLPR1*, $\sigma_{max} = 70,35$ [MPa], é um valor bastante elevado em comparação com as restantes placas. Mostra que aplicando pressões menores no compósito as fibras deverão manter a sua forma mais ou menos circular e estrutura celular intacta porque esta tensão é relativamente elevada e pode ser comparada com compósitos que foram produzidos com maior número de camadas e/ou pressões diferentes, como é o caso do *PLPR3* e *PLPR6*, em que $\sigma_{m\acute{a}x} \approx 70,32$ [MPa] e $\sigma_{m\acute{a}x} \approx 65,49$ [MPa].

É importante referir que o corte das placas *PLPR1*, *PLPR2*, *PLPR3* e *PLPR4* feito para controlo dimensional foi executado na máquina de corte com disco diamantado e refrigerada a água. Este método de corte pode degradar os provetes daqui obtidos porque apesar das fibras já estarem embebidas na matriz polimérica e portanto, relativamente bem protegidas, nos bordos estas terão sempre um contato direto com a água.



Fig. 6.16 - Máquina de corte com disco diamantado e refrigerada a água.

As placas *PLPR5*, *PLPR6*, *PLPR7* e *PLPR8* foram cortadas numa máquina de serra de fita com elevada precisão e sem refrigeração a água, prevenindo assim a degradação dos provetes daí resultantes.

A placa *PLPR2* foi a que obteve melhores resultados do grupo *PLPR*. Apesar de existirem compósitos fabricados com 8 camadas, as propriedades mecânicas não aumentaram porque a pressão aplicada na placa *PLPR3* ou *PLPR4* foi de $p = 20$ [Bar], uma pressão inferior à que foi utilizada para fabricar a placa *PLPR2*, $p = 27$ [Bar]. Desta forma conclui-se que a pressão utilizada para a compressão dos compósitos influencia bastante as propriedades mecânicas resultantes. Deverá ser produzida uma placa com as mesmas condições da placa *PLPR3* ou *PLPR4* mas com uma pressão de compressão de $p = 27$ [Bar] para verificar se as propriedades mecânicas obtidas deste compósito são superiores às obtidas do compósito *PLPR2*. Esperam-se que as propriedades mecânicas sejam superiores, no entanto, caso isso não aconteça, as possíveis causas serão:

- Percentagem de resina no compósito demasiado baixa e portanto, a transmissão de cargas entre camadas de fibra não resultar;
- As várias camadas não estarem todas devidamente esticadas, impedindo assim que trabalhem ao mesmo tempo, como se ilustra de seguida;
- O compósito não deverá ser sujeito a pressões elevadas sob pena de haver alteração da geometria mais ou menos circular das fibras e consequente redução das propriedades mecânicas.



Fig. 6.17 - Comportamento de um compósito de 6 camadas à tração com um empilhamento mal feito.

As placas *PLPR4* (8 camadas) e *PLPR5* (6 camadas) foram moldadas nas mesmas condições. Verificou-se que a percentagem de fibra aumentou da *PLPR4* para a *PLPR5*. O E aumentou da *PLPR4* para a *PLPR5*, mas a tensão máxima reduziu.

Os tempos de armazenamento dos pré-impregnados também foram anotados, permitindo assim verificar para compósitos com as mesmas condições de moldação se há redução das propriedades mecânicas com o tempo.

Existe uma redução do módulo de Young e da tensão máxima de $E = 1051 [MPa]$ e $\sigma_{m\acute{a}x} = 13,88 [MPa]$ do *PLPR2* para o *PLPR6*. O *PLPR2* ficou armazenado 64 dias, enquanto o *PLPR6*, 90 dias. Constata-se assim que uma diferença de 26 dias no tempo que se considera (que já ultrapassa os 2 meses no primeiro caso e quase atinge os 3 meses no segundo caso) é suficiente para que as propriedades mecânicas desçam devido à degradação da fibra.

É de referir que o compósito *PLPR8* foi produzido noutro lote e os ensaios foram realizados passados 19 dias. Seguindo a mesma lógica do parágrafo anterior, seria suposto que este compósito apresenta-se as melhores propriedades mecânicas. No entanto, isso não acontece, mesmo com uma percentagem de fibra superior (78,26 [%]).

Tabela 6.28 - Valores médios e desvios padrões das propriedades mecânicas dos PLA à tração.

<i>Compósito</i>	<i>Camadas</i>	<i>E</i> [MPa]	<i>$\sigma_{M\acute{a}x}$</i> [MPa]	<i>ϵ</i> [%]	<i>Quantidade fibra em peso [%]</i>	<i>Pressão</i>
<i>PLA1</i>	6	4995	37,18	0,0194	40	3,68
<i>PLA2</i>	6	5050	35,40	0,0369	40	3,27
<i>PLA3</i>	6	8175	59,52	0,0503	40	20

Relativamente aos compósitos de Linho/PLA, verificaram-se resultados muito baixos comparativamente aos indicados pelo fabricante ($E = 13,2 [GPa]$, $\sigma_{m\acute{a}x} = 102 [MPa]$ e um alongamento de 1,6 [%]). Estes resultados muito negativos deveram-se essencialmente às condições finais do processo de fabrico. Isto é, sendo este compósito formado por uma resina termoplástica, esta sofre a polimerização durante o arrefecimento, portanto, o arrefecimento deve ser rápido para que não haja degradação da resina e sob pressão para que ao decorrer a polimerização, exista um contato muito bom com o reforço, neste caso as fibras de linho, criando assim uma boa interface. Isto não foi feito por falta do equipamento ou condições necessárias. Estas foram arrefecidas à temperatura ambiente sobre pressão de uma peça de metal relativamente pesada.

Para que este processo seja satisfatoriamente concluído, a PPQ deve ter sistema de refrigeração. Caso não exista, a placa deve ser rapidamente transferida para uma outra prensa que não esteja aquecida e seja colocada à pressão desejada de fabrico nessa prensa até que arrefeça por completo.

Os resultados obtidos, bem como a oscilação das curvas tensão-deformação dos *PLA* foram devidos à fraca interface criada entre a fibra e a matriz. Este facto leva a ocorrência de delaminação e/ou desfibramento quando são cortadas as placas ou delaminação quando são ensaiados os provetes.



Fig. 6.18 - Na imagem do lado esquerdo ocorreu delaminação durante o corte. Na imagem do lado direito ocorreu desfibramento durante o corte.

É de salientar também que, tratando-se de um termoplástico, o PLA sofre degradação muito facilmente ao longo do tempo:

- Se estiver em contacto com a luz;
- Se estiver em contacto com humidade;
- Se estiver em contacto com diferentes pressões ou temperaturas.

Daí existirem grandes variações das propriedades de provete para provete de uma mesma placa. Por exemplo, se os provetes forem guardados num saco transparente e mais ou menos empilhados (foi o caso), os provetes que estiverem em contacto direto com a luz solar sofreram uma degradação mais acelerada que os que estiverem protegidos (de baixo dos outros).

O facto de todos os provetes estarem guardados num mesmo saco também influencia as propriedades do conjunto porque apesar de os que estiverem em contacto com a luz solar se degradarem, essa degradação influenciará os provetes de baixo, ainda que estes não sejam afetados diretamente pela luz solar.

Como solução, os provetes deverão ser guardados em ambiente controlado com ausência total de luminosidade. Também deverão ser mantidos cada um deles num reservatório próprio.

Mais informações sobre este tema podem ser consultadas as referências [39;40].

Os tempos de armazenamento das placas *PLA* foram:

Tabela 6.29 - Dias de armazenamento das placas *PLA*.

Compósito	Dias após impregnação
<i>PLA1</i>	56
<i>PLA2</i>	56
<i>PLA6</i>	36

6.4.2. Flexão

6.4.2.1. Norma, máquina e montagem

Os provetes obtidos para ensaios de flexão foram todos preparados para serem ensaiados segundo a norma *ASTM D 790 – 03*.

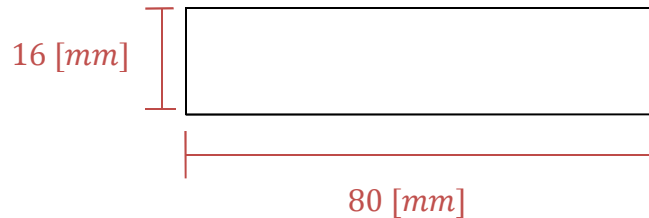


Fig. 6.19 - Esquema do formato dos provetes de flexão da norma *ASTM D 790 – 03* e dimensão da largura e comprimento.

A velocidade do ensaio de flexão foi de $v = 2 \text{ [mm/min]}$. A célula de carga utilizada foi de 5 [kN].

A máquina de ensaios usada para fletir os provetes foi a *TIRA modelo 2705*.



Fig. 6.20 - Na imagem do lado esquerdo apresenta-se o equipamento utilizado para os ensaios de flexão. Na imagem do lado direito o aparato para o ensaio de flexão.

6.4.2.2. Apresentação dos resultados

Foram fletidos 5 provetes pelo mesmo motivo descrito na apresentação e discussão dos resultados dos ensaios de tração.

PLM1

Tabela 6.30 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLM1.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	4303	80,06	0,0262
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	4,33	4,68	4,16

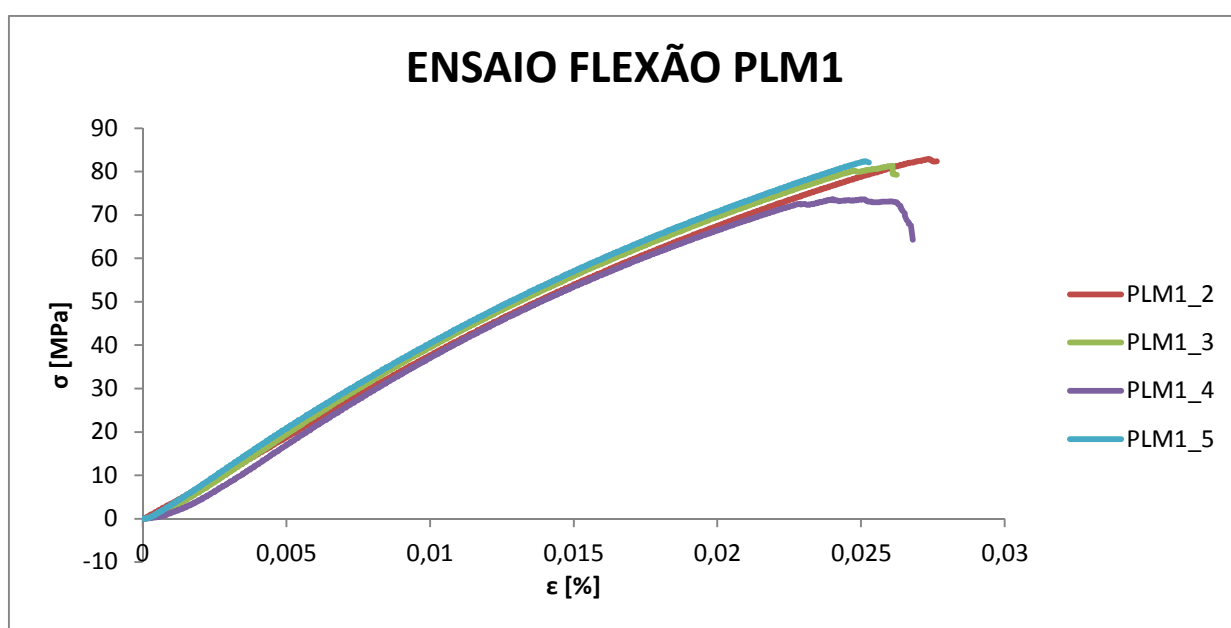


Gráfico 6.16 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLM1.

PLM2

Tabela 6.31 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLM2.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	4411	82,19	0,0243
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	1,77	3,56	2,22

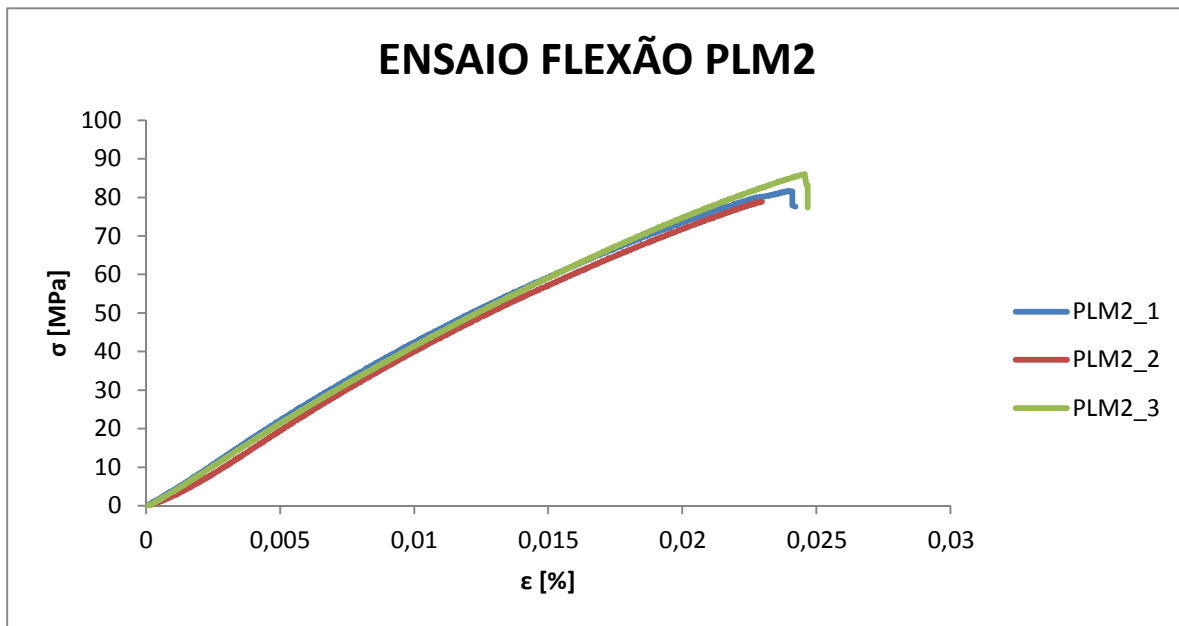


Gráfico 6.17 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLM2.

PLMS1

Tabela 6.32 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLMS1.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	4884	92,04	0,0244
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	3,57	7,01	6,63

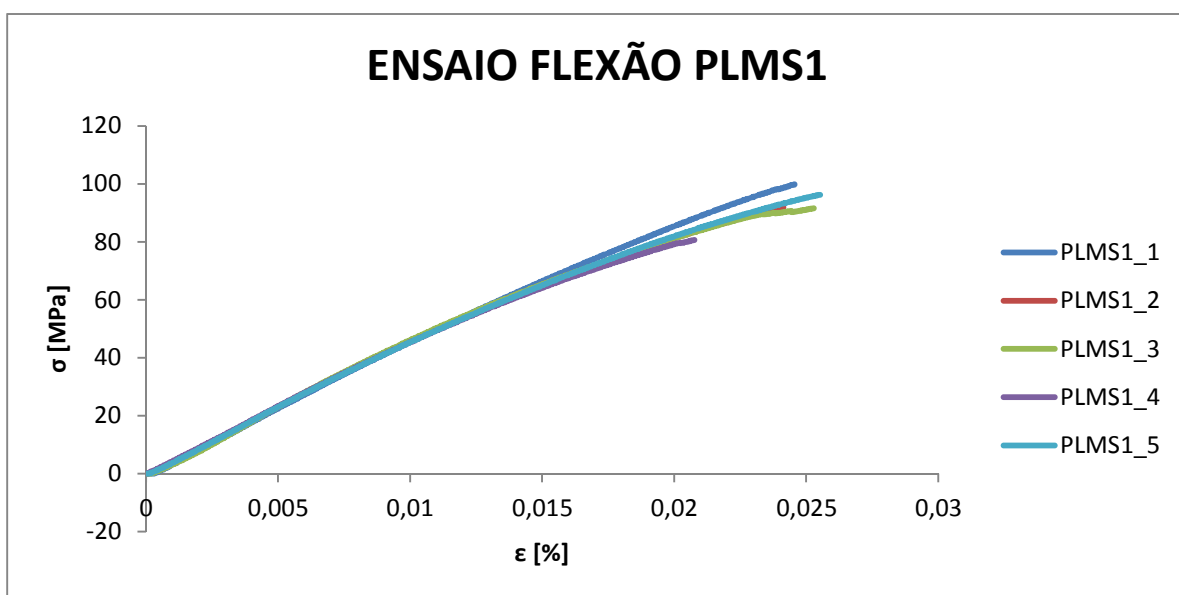


Gráfico 6.18 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLMS1.

PLMS2

Tabela 6.33 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLMS2.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	5504	97,39	0,0230
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	2,61	2,45	2,36

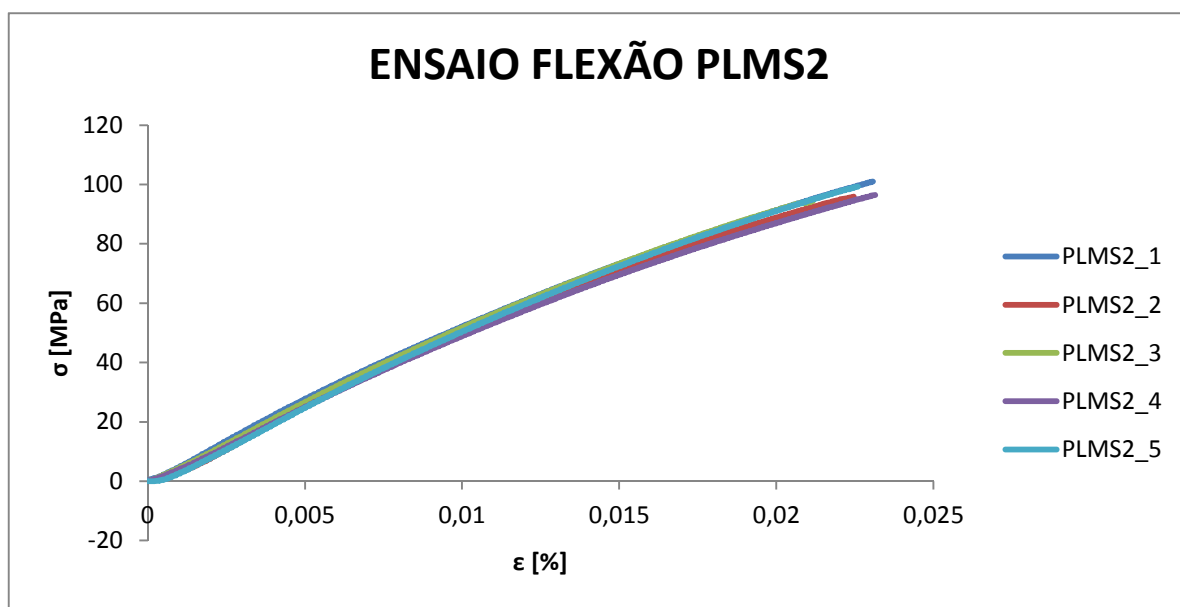


Gráfico 6.19 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLMS2.

PLPR1

Tabela 6.34 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR1.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	5612	89,62	0,0249
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	2,60	2,17	2,09

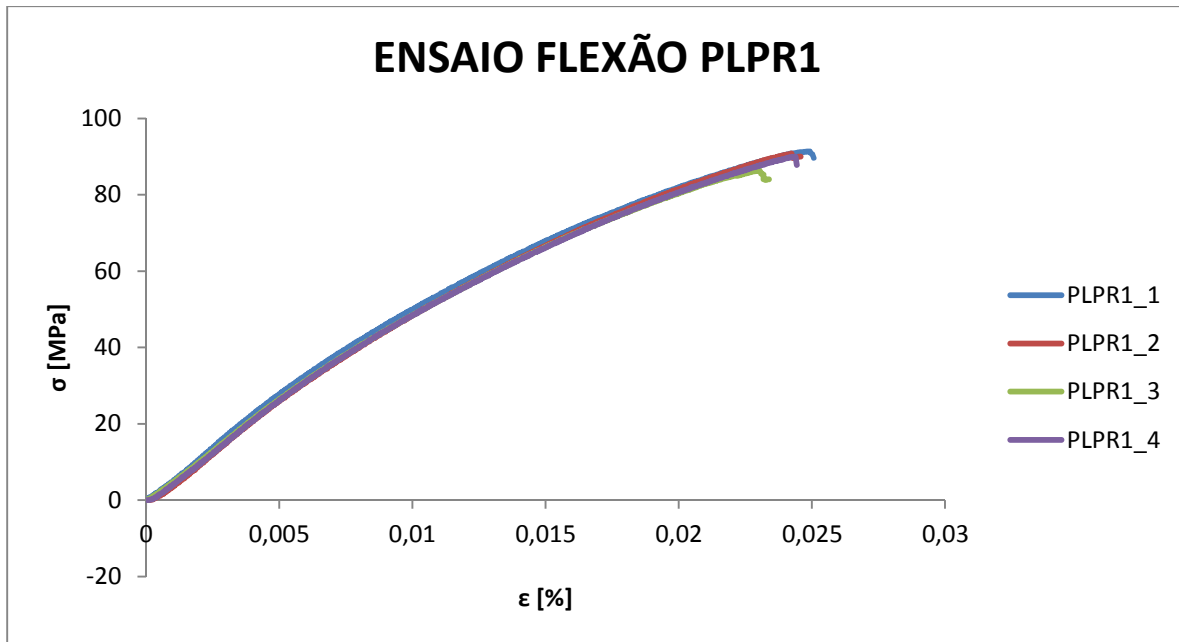


Gráfico 6.20 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR1.

PLPR2

Tabela 6.35 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR2.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	7369	110,15	0,0270
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	3,68	6,05	5,28

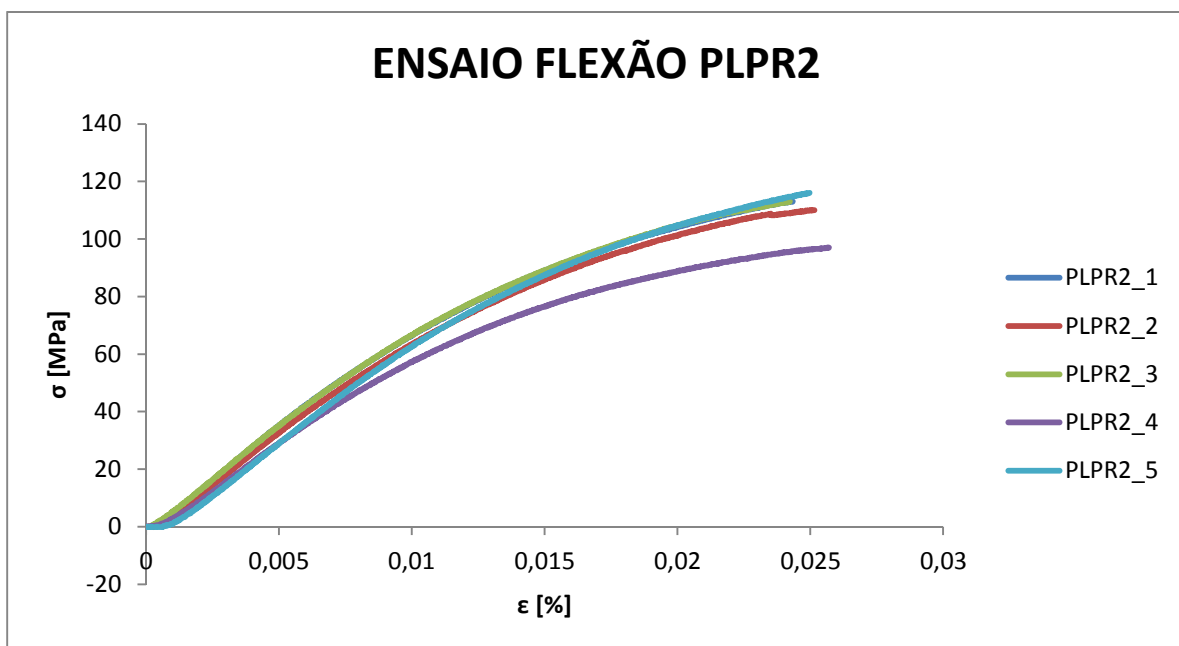


Gráfico 6.21 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR2.

PLPR3

Tabela 6.36 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR3.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young</i> [Mpa]	<i>Tensão Máx.</i> [Mpa]	<i>Deformação Máx.</i> [%]
<i>Média</i>	6600	97,41	0,0282
<i>Desvio – Padrão</i> [%]	2,81	3,49	9,27

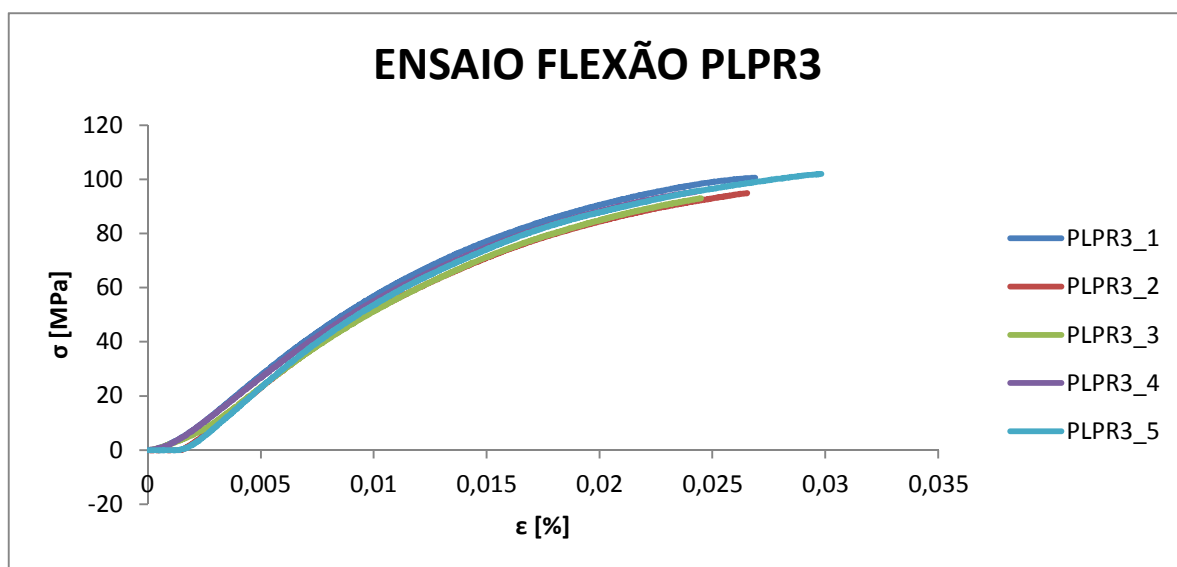


Gráfico 6.22 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR3.

PLPR4

Tabela 6.37 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR4.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young</i> [Mpa]	<i>Tensão Máx.</i> [Mpa]	<i>Deformação Máx.</i> [%]
<i>Média</i>	7312	97,03	0,0276
<i>Desvio – Padrão</i> [%]	4,64	6,08	6,72

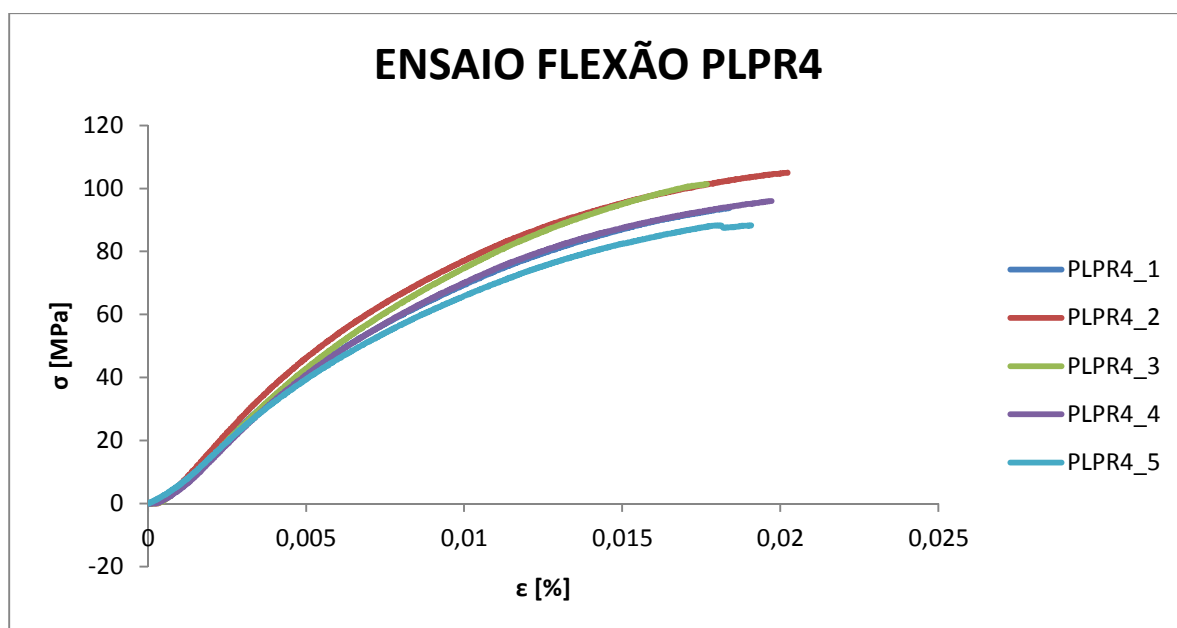


Gráfico 6.23 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR4.

PLPR5

Tabela 6.38 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR5.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	6630	82,24	0,0268
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	5,20	4,73	5,65

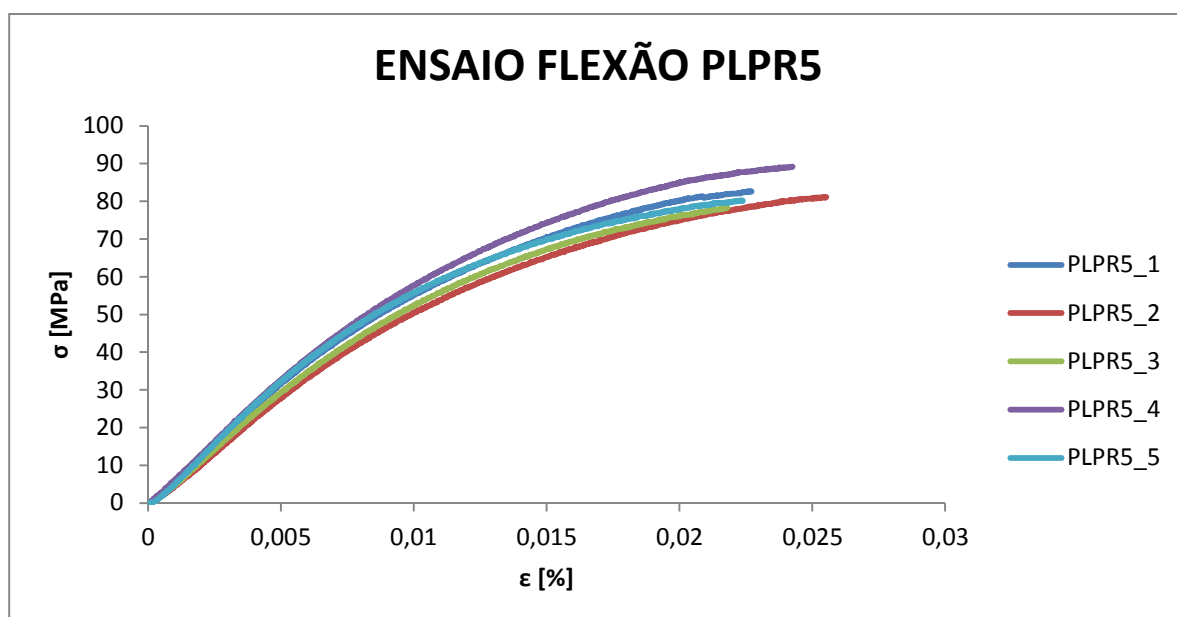


Gráfico 6.24 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR5.

PLPR6

Tabela 6.39 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR6.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young</i> [Mpa]	<i>Tensão Máx.</i> [Mpa]	<i>Deformação Máx.</i> [%]
<i>Média</i>	6529	83,38	0,0304
<i>Desvio – Padrão</i> [%]	4,64	4,90	9,89

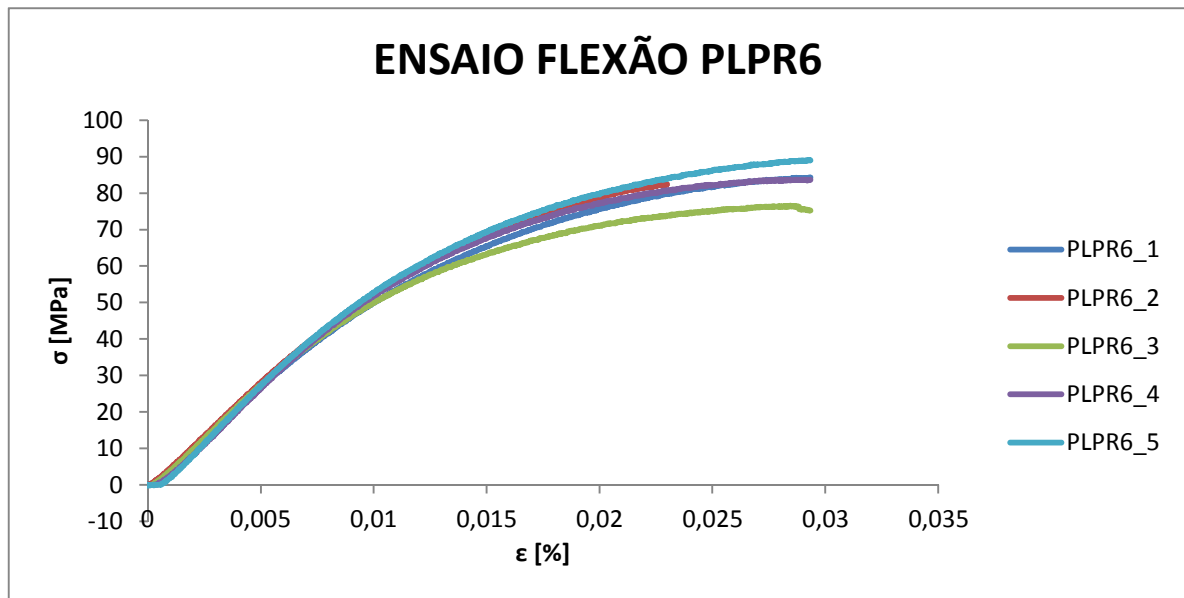
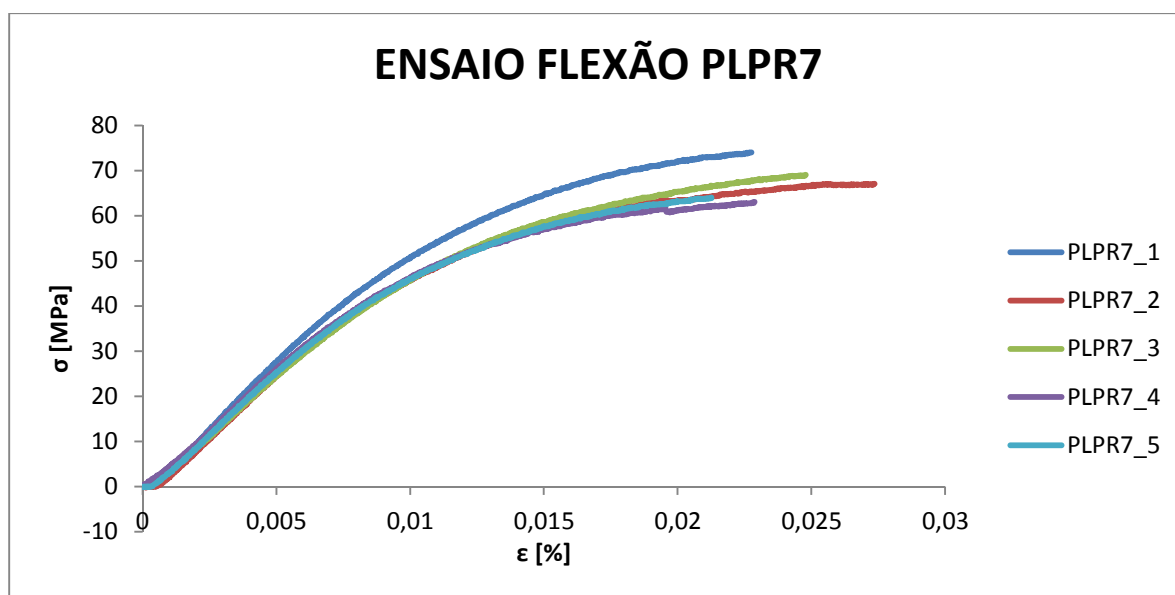


Gráfico 6.25 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLPR6.

PLPR7

Tabela 6.40 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR7.

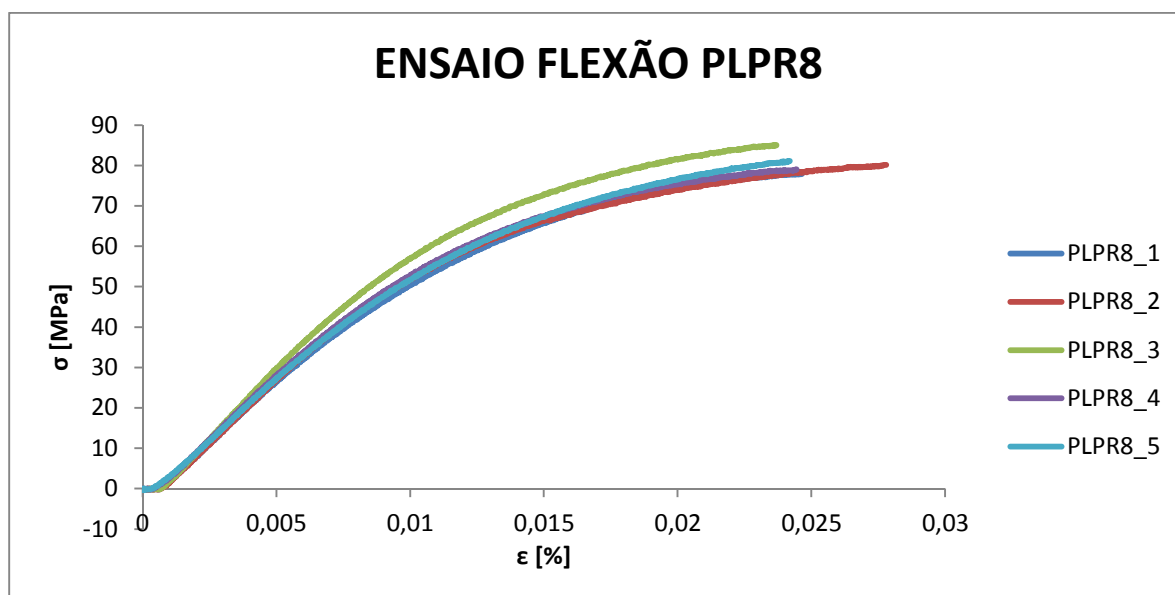
<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young</i> [Mpa]	<i>Tensão Máx.</i> [Mpa]	<i>Deformação Máx.</i> [%]
<i>Média</i>	5657	68,14	0,0287
<i>Desvio – Padrão</i> [%]	5,42	6,02	5,13



PLPR8

Tabela 6.41 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLPR8.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	6510	81,21	0,0286
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	5,73	2,96	13,41



PLA1

Tabela 6.42 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLA1.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young</i> [Mpa]	<i>Tensão Máx.</i> [Mpa]	<i>Deformação Máx.</i> [%]
<i>Média</i>	2226	32,22	0,0619
<i>Desvio – Padrão</i> [%]	19,10	15,54	11,51

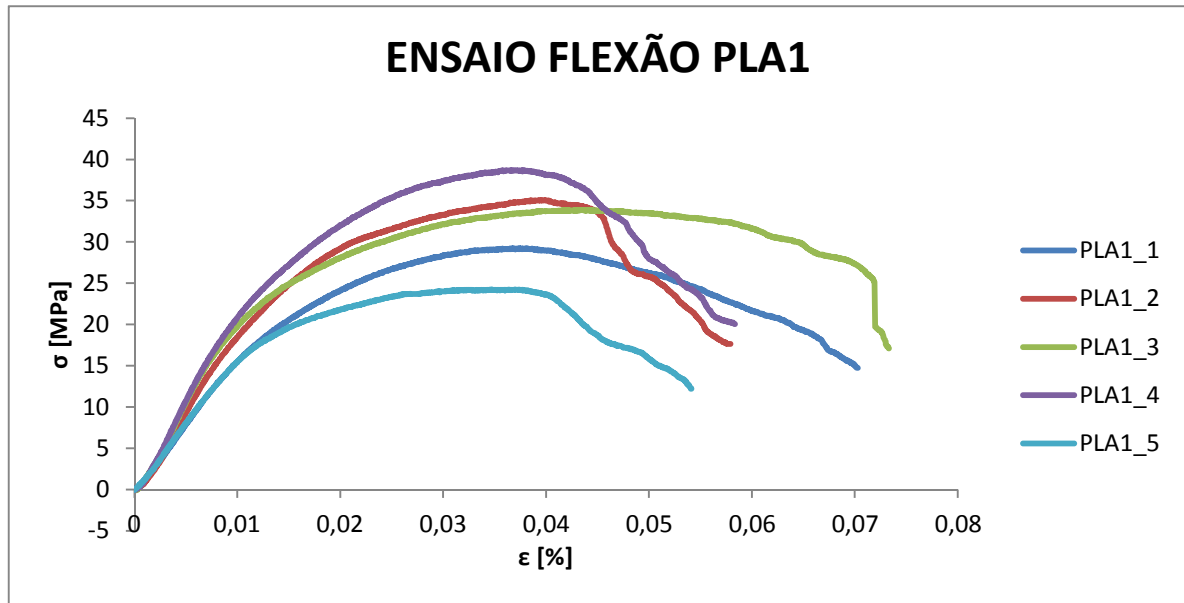


Gráfico 6.28 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA1.

PLA2

Tabela 6.43 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLA2.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young</i> [Mpa]	<i>Tensão Máx.</i> [Mpa]	<i>Deformação Máx.</i> [%]
<i>Média</i>	1992	30,53	0,0607
<i>Desvio – Padrão</i> [%]	9,90	5,99	9,86

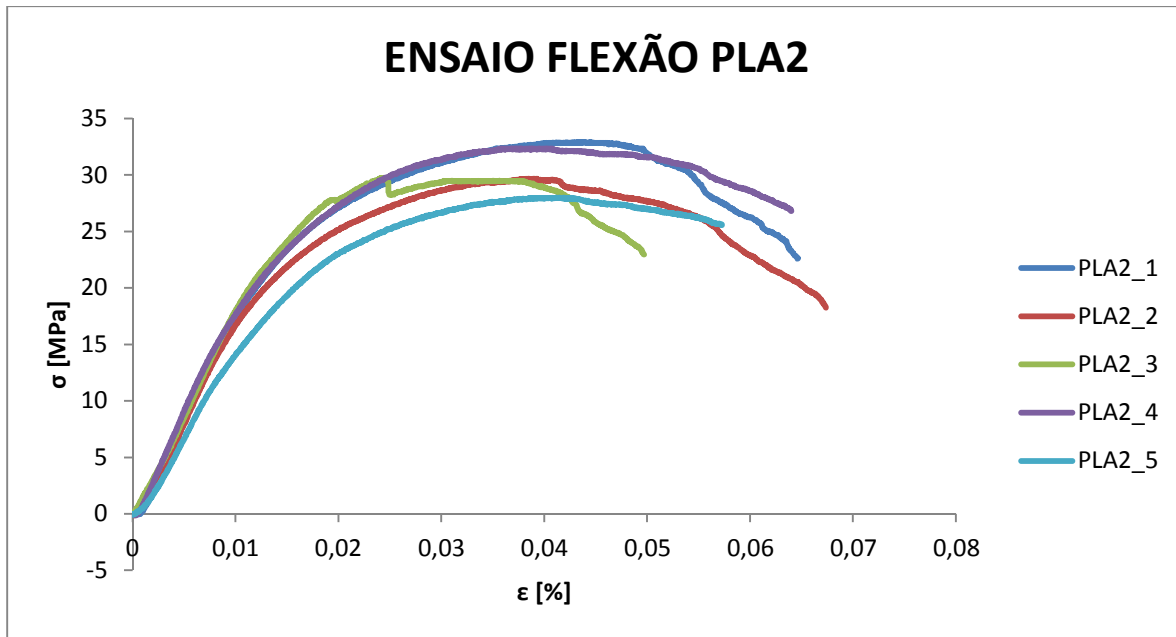


Gráfico 6.29 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA2.

PLA6

Tabela 6.44 – Média e desvio-padrão dos ensaios de flexão provenientes dos provetes da placa PLA6.

<i>Propriedades Mecânicas</i>	<i>Módulo de Young [Mpa]</i>	<i>Tensão Máx. [Mpa]</i>	<i>Deformação Máx. [%]</i>
<i>Média</i>	5981	81,92	0,0281
<i>Desvio – Padrão [%]</i>	8,89	4,30	5,18

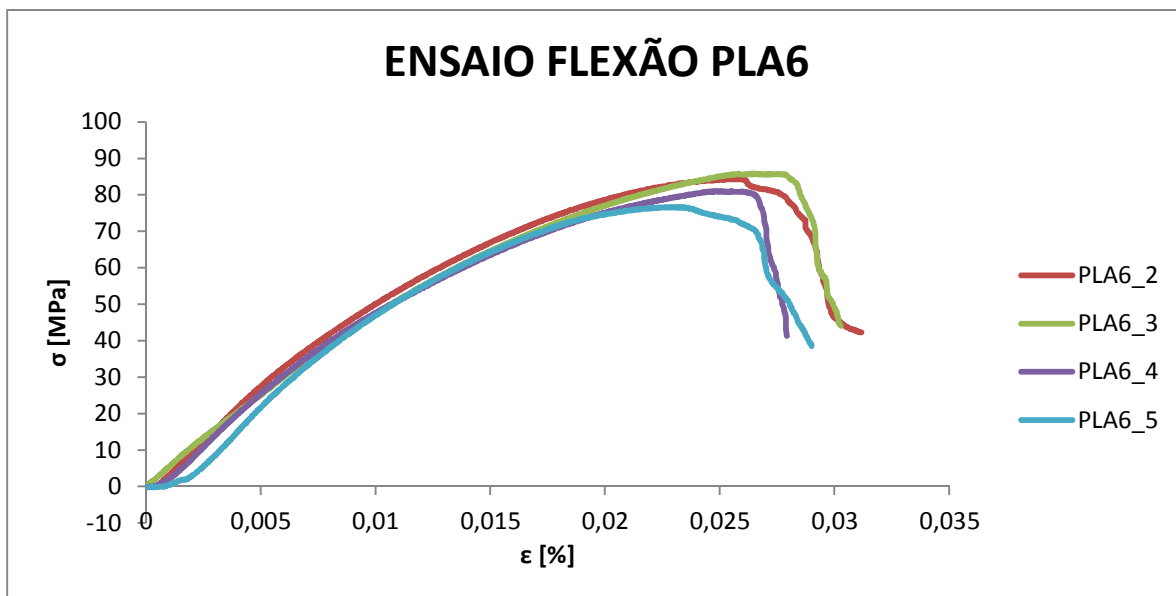


Gráfico 6.30 - Curvas Tensão/Deformação dos provetes da placa PLA6.

Apresenta-se de seguida uma tabela resumo dos resultados e desvios padrões obtidos dos ensaios de flexão para todas as placas:

Tabela 6.45 - Valores médios e desvios padrões das propriedades mecânicas dos compósitos à flexão.

Compósito	Módulo de Young [MPa]		Tensão Máx. [MPa]		Deformação Máx. [%]	
	Média	Desvio Padrão [%]	Média	Desvio Padrão [%]	Média	Desvio Padrão [%]
PLM1	4303	4,33	80,06	4,68	0,0262	4,16
PLM2	4411	1,77	82,19	3,56	0,0243	2,22
PLMS1	4884	3,57	92,04	7,01	0,0244	6,63
PLMS2	5504	2,61	97,39	2,45	0,0230	2,36
PLPR1	5612	2,60	89,62	2,17	0,0249	2,09
PLPR2	7369	3,68	110,15	6,05	0,0270	5,28
PLPR3	6600	2,18	97,41	3,49	0,0282	9,27
PLPR4	7312	4,64	97,03	6,08	0,0276	6,72
PLPR5	6630	5,20	82,24	4,73	0,0268	5,65
PLPR6	6529	4,64	83,38	4,90	0,0304	9,89
PLPR7	5657	5,42	68,14	6,02	0,0287	5,13
PLPR8	6510	3,73	81,21	2,96	0,0286	13,41
PLA1	2226	19,10	32,22	15,54	0,0619	11,51
PLA2	1992	9,90	30,53	5,99	0,0607	9,86
PLA3	5981	8,89	81,92	4,30	0,0281	5,18

Como são tratados compósitos reforçados com fibras naturais, aceitam-se desvios padrões com um máximo de 30 [%], ou seja, o intervalo de confiança situa-se nos 70 [%]. Portanto, todos os ensaios de flexão aqui presentes são válidos.

6.4.2.3. Discussão dos resultados

As placas *PLM* apresentaram uma redução do módulo de Young dos ensaios de tração para os de flexão. A resistência à flexão aumentou relativamente à resistência à tração e a deformação também aumentou.

Isto representa assim um comportamento elástico mais reduzido mas uma tensão máxima à flexão significativamente superior à tensão máxima à tração.

Com os ensaios de flexão conclui-se que efetivamente existe um melhoramento das propriedades mecânicas dos *PLM* para os *PLMS* tanto à tração como flexão. A secagem das fibras permite uma melhor adesão com a matriz polimérica, o que também afeta positivamente o comportamento à flexão.

As placas *PLPR* apresentaram o mesmo comportamento que as *PLM*. Ou seja, redução da rigidez, aumento da resistência à flexão face à tração e deformações também superiores.

As placa *PLA*, apesar de não terem as propriedades mecânicas obtidas próximas das esperadas devido ao problema já enunciado na discussão dos resultados de tração, verificaram um comportamento espectral que seguiu o mesmo caminho das placas *PLM*, *PLMS* e *PLPR*. Ou seja, redução da rigidez, aumento da tensão máxima e deformação máxima.

A única placa que se aproximou dos resultados esperados foi a *PLA6* que foi moldada por compressão a quente mas com uma pressão muito superior ($p = 20 [Bar]$) as *PLA1* ou *PLA2*. Isto propiciou um aumento substancial das propriedades mecânicas, contudo espera-se que mesmo para estas condições haja um melhoramento se o arrefecimento for feito também sobre esta pressão com uma taxa de arrefecimento rápida.

6.5. ESTUDO QUÍMICO DA FIBRA ATRAVÉS DE TGA, DTA E DSC

6.5.1. Introdução TGA¹⁴ (Análise Termogravimétrica), DTA¹⁵ (Derivada Análise Termogravimétrica) e DSC¹⁶ (Calorimetria Diferencial de Varrimento)

Numa análise termogravimétrica, a massa de uma amostra colocada num ambiente de atmosfera controlada é registada continuamente em função da temperatura ou do tempo, enquanto a temperatura da amostra é aumentada (geralmente linearmente com o tempo). Obtendo-se um gráfico de massa ou percentagem de massa em função do tempo, que é chamado de termograma ou curva de decomposição térmica.

Um instrumento deste tipo é constituído por uma termo balança, um forno e um sistema de gás de purga para criação de uma atmosfera inerte ou, algumas vezes, reativa.

A TGA é usada para determinar a perda de massa a determinadas temperaturas, mas não pode identificar os elementos responsáveis. Para se obter este tipo de informação, a saída de um analisador termogravimétrico é frequentemente conectada a um espectrómetro de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) ou a um espectrómetro de massa (MS).

Como a TGA monitoriza a massa do composto em função da temperatura, a informação fornecida é quantitativa, mas limitada às reações de decomposição e oxidação e aos processos físicos, como vaporização, sublimação e dessorção. Entre as aplicações mais importantes de uma TGA estão as análises de composição e os perfis de decomposição de sistemas compostos.

A análise térmica diferencial (DTA) é uma técnica que mede a diferença de temperatura entre uma substância e um material de referência em função da temperatura enquanto a substância e o material de referência são submetidos a um programa de temperatura controlada e igual. [25]

A calorimetria diferencial de varrimento (DSC) é uma técnica de análise térmica que regista o fluxo de energia calorífica associado a transições nos materiais em função da temperatura. É um método de variação da entalpia, no qual a diferença no fornecimento de energia calorífica entre uma substância e um material de referência é medida em função da temperatura, enquanto ambas são submetidas a um mesmo programa de aquecimento ou arrefecimento, rigorosamente controlado.

¹⁴ Thermogravimetric Analysis

¹⁵ Differential Thermal Analysis

¹⁶ Differential Scanning Calorimetry

Estas medidas fornecem dados qualitativos e quantitativos em processos endotérmicos (absorção de energia calorífica) e exotérmicos (libertação de energia calorífica), permitindo obter informações referentes a alterações de propriedades físicas e/ou químicas como, por exemplo:

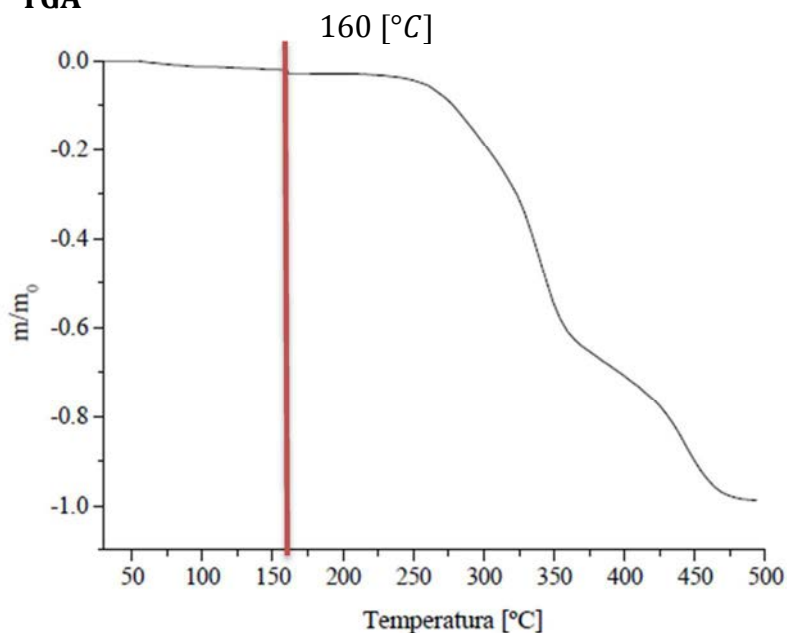
- Temperaturas características (fusão, cristalização, transição vítrea);
- Grau de cristalinidade de um polímero;
- Diagrama de fases;
- Entalpias de transição de fase e de reação;
- Estabilidade térmica e oxidativa;
- Grau de pureza;
- Cinética de reações.

6.5.2. Análise dos dados obtidos por TGA, DTA e DSC

O objetivo principal desta análise é descobrir qual a evolução da perda de massa e até que temperatura esta se prevê que seja só pela perda de humidade da fibra e a partir de que temperatura já se começam a volatilizar alguns constituintes, implicando assim uma perda de propriedades mecânicas. A temperatura para a qual se verificar a perda de massa por constituintes será a temperatura máxima para a criação das placas e para a secagem da fibra.

O tipo de amostra levado foi fibra natural de juta sem qualquer tipo de tratamento ou secagem prévia. A massa da amostra analisada nos ensaios foi de $m_{amostra} = 7,5 [mg]$ com uma atmosfera de ar (caudal de $q_{ar} = 50 [cm^3/min]$). A análise consistiu num aquecimento de $30 [^{\circ}C]$ até $160 [^{\circ}C]$ a $5 [^{\circ}C/min]$, mantendo esta temperatura durante uma hora. Ao fim deste tempo aumentou-se a temperatura até $500 [^{\circ}C]$, com uma velocidade de aquecimento de $10 [^{\circ}C/min]$.

Destas três análises foram obtidos os seguintes gráficos.

6.5.2.1. TGA**Gráfico 6.31 - Curva da TGA.**

Durante o aquecimento da amostra até 160 [°C] ocorreu uma perda de massa de 0,15 [mg] o que corresponde a 2 [%] da massa inicial; durante o patamar a 160 [°C] o material perde 0,05 [mg] o que corresponde a 0,67 [%] da massa inicial.

Até ao final dos 160 [°C] devido à perda de massa tão reduzida e mais ou menos constante, prevê-se que esta perda de massa tenha sido só devido à perda de humidade. Situação que não se veio a verificar quando foram feitos os ensaios de tração da fibra de juta sem secagem e com secagem a 160 [°C] discutida de seguida. No entanto, é de salientar que o tempo a que a fibra foi sujeita na secagem de 130 [°C] foi de 2 dias. Este tempo foi muito superior ao que a fibra analisada no TGA foi submetido visto que demorou 32 [min] para atingir os 160 [°C] e o estágio a esta temperatura foi de apenas 1 [hora].

Sabe-se que a degradação das fibras naturais de juta se alteram não só para temperaturas e tempos variáveis mas também para temperaturas constantes e tempos variáveis. Sendo esta degradação crescente para temperaturas constantes e tempos crescentes.

6.5.2.2. DTA

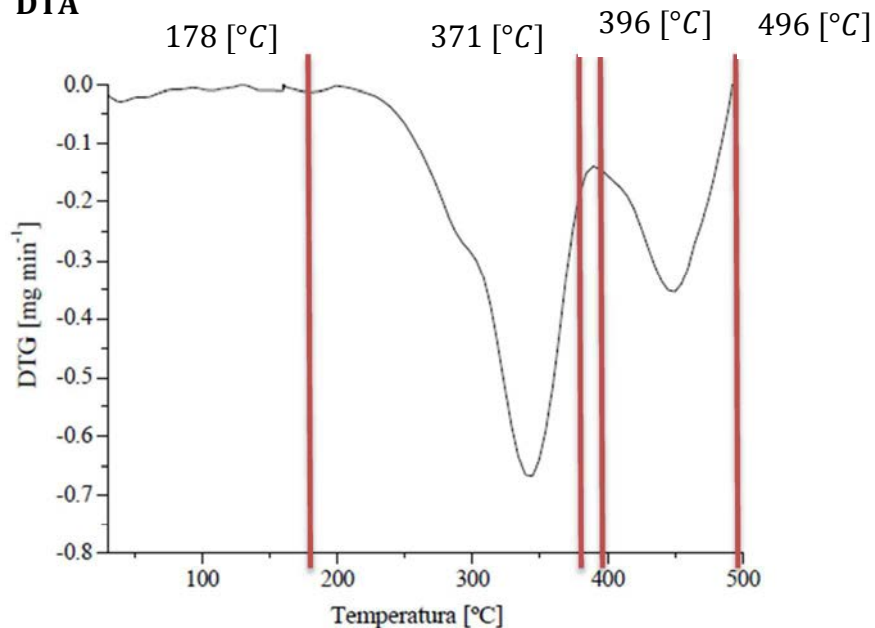


Gráfico 6.32 - Derivada da TGA.

Desta análise, obtêm-se dois picos, o primeiro entre 178 [°C] e 371 [°C], a que corresponde uma perda de massa de 4,61 [mg] (61,47 [%] da massa inicial) e o segundo pico entre 396 [°C] e 496 [°C], a que corresponde uma perda de massa de 2,16 [mg] (28,88 [%] da massa inicial).

6.5.2.3. DSC

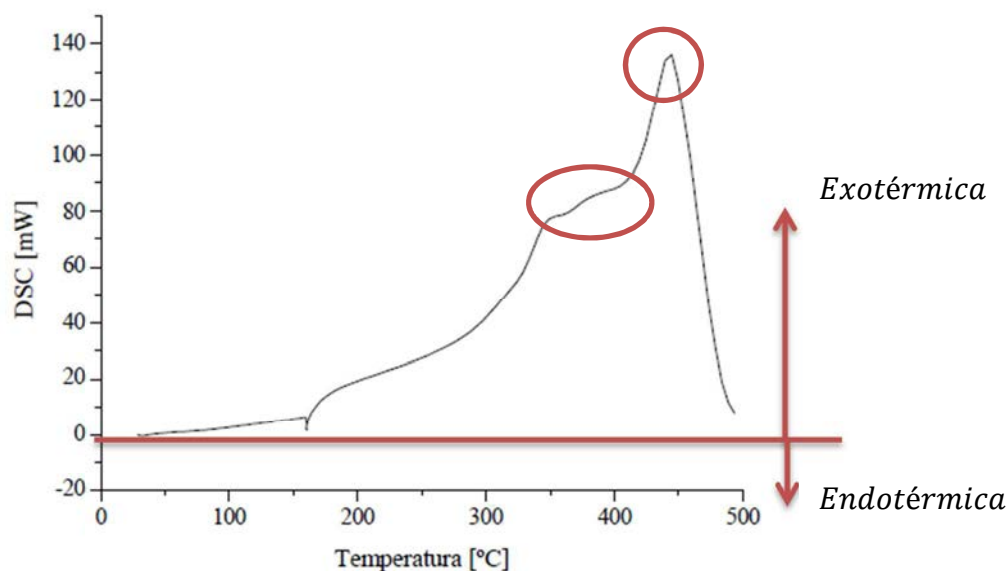


Gráfico 6.33 - Curva da DSC.

São igualmente observados dois picos exotérmicos na análise por DSC, confirmando que há duas etapas distintas na degradação do material.

6.5.3. Apoio aos resultados das análises com testes de secagem diferentes

Foram realizados ensaios de tração à fibra de juta em três condições:

- Fibra de juta normal;
- Fibra de juta seca a $T = 120 [^{\circ}C]$ durante 3 horas;
- Fibra de juta seca a $T = 160 [^{\circ}C]$ durante 2 dias.

O tamanho das amostras foram os mesmos para ambas as fibras, com um comprimento de $C = 20 [cm]$ e largura de $L = 6 [cm]$ e a velocidade do ensaio foi de $v = 20 [mm/min]$.

Aparato do ensaio realizado, com especial ênfase para o tipo de agarras utilizadas no ensaio:

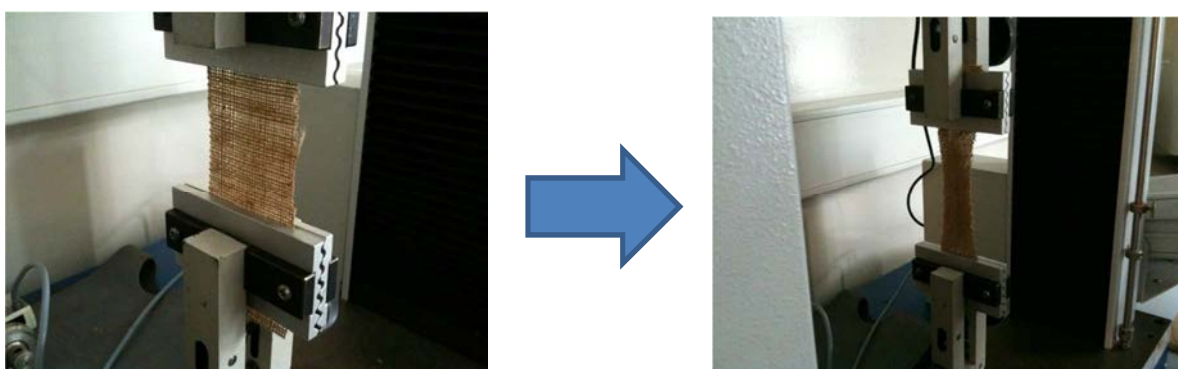


Fig. 6.21 - Ensaio de tração à fibra (sem tensão à esquerda, durante a tração à direita).

Os resultados obtidos para a fibra de juta normal foram:

Tabela 6.46 - Resultados dos ensaios de tração para fibra de juta sem secagem.

<i>Nº ensaios</i>	<i>Força [N]</i>
1	536
2	473
3	479
4	669
5	640
Média	559,4

Os resultados obtidos para a fibra de juta seca a $120 [^{\circ}C]$ e durante 3 horas foram:

Tabela 6.47 - Resultados dos ensaios de tração para fibra de juta com secagem ($120 [^{\circ}C]$ e 3 horas).

<i>Nº ensaios</i>	<i>Força [N]</i>
1	529,34
2	534,98
3	533,90
4	416,39
5	484,46
Média	499,8

Os resultados obtidos para a fibra de juta seca a 160 [°C] e durante 2 dias nas condições anteriormente descritas foram:

Tabela 6.48 - Resultados dos ensaios de tração para fibra de juta com secagem (160[°C] e 2 dias).

<i>Nº ensaios</i>	<i>Força [N]</i>
1	300,82
2	329,95
3	330,49
4	340,48
5	340,75
Média	328,5

Conclui-se assim que, efetivamente, a fibra de juta quando seca a 160 [°C] durante 2 dias não perde massa apenas pela perda de humidade mas também pela perda de constituintes da fibra, o que enfraquece significativamente a fibra. Pode-se confirmar pelo decréscimo da resistência à tração, fibra natural: $F = 559,4 [N]$ e fibra seca: $F = 328,5 [N]$. Relativamente à fibra de juta seca a 120 [°C], observa-se um ligeiro decréscimo, que não é suficiente para admitir que esta perdeu também constituintes que lhe proporcionassem melhores propriedades mecânicas, sendo mais congruente admitir um erro elevado devido ao número de ensaios ser reduzido.

A figura seguinte apresenta os cinco provetes da fibra de juta normal do lado esquerdo e os cinco provetes da fibra de juta seca do lado direito. É de realçar a alteração da cor quando foram secas a 160 [°C], mais escurecidas, indicando que estas já estariam a sofrer uma degradação das suas propriedades. O mesmo não se sucede para a fibra de juta seca a 120 [°C]. As alterações físicas são impercetíveis a olho nu.



Fig. 6.22 - Provetes de tração da fibra de juta não seca (do lado esquerdo) e da fibra de juta seca a 160 [°C] (do lado direito).



Fig. 6.23 - Comparação da coloração da fibra de juta não seca (fibra de baixo) e da fibra de juta seca a 160 [°C] (fibra de cima).

Concluindo, a análise mais apropriada para verificar realmente quais os constituintes que se vão eliminando, é o FTIR. Ou neste caso, os grupos funcionais que se vão volatilizando.

Breve explicação do FTIR¹⁷ (Espectrómetro de Infravermelho com Transformada de Fourier) [42]

Na espectroscopia por infravermelho, as radiações infravermelhas são passadas através de uma amostra. Uma parte da radiação é absorvida pela amostra e outra parte atravessa-a (é transmitida). O espectro resultante apresenta a absorção e transmissão molecular, criando uma identidade da amostra em análise. Como não existem duas amostras a produzirem o mesmo espectro infravermelho, não existem duas amostras iguais.

Desta forma o FTIR pode providenciar:

- Identificação de materiais desconhecidos;
- Determinar a qualidade ou consistência de uma amostra;
- Determinar a quantidade de componentes de uma mistura.

Obtém-se um espectro do estilo que é apresentado na página seguinte.

¹⁷ Fourier Transform Infrared Spectroscopy

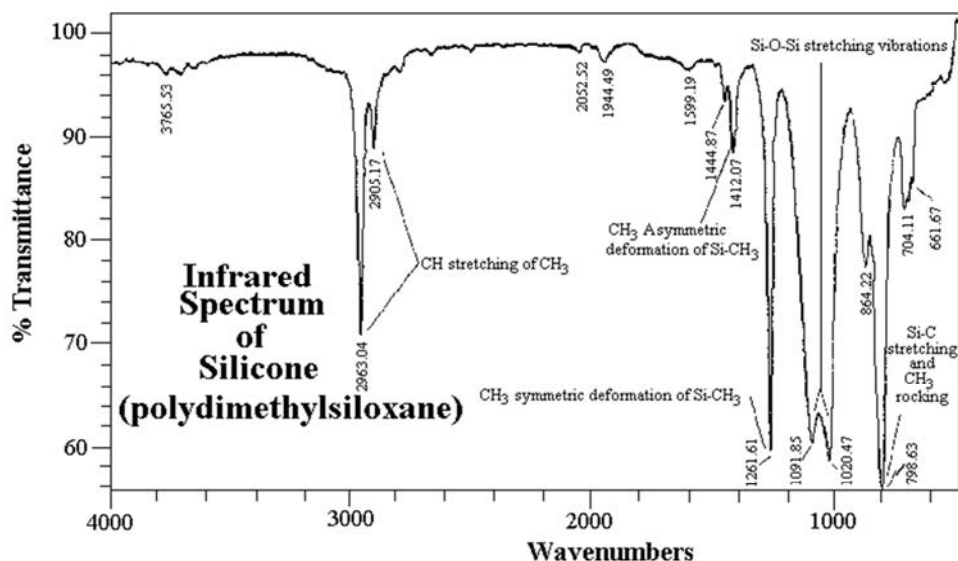


Fig. 6.24 - Espectro do Silicone obtido através de uma análise FTIR.

Algumas das maiores vantagens do FTIR sobre a técnica de dispersão são:

- **Velocidade:** porque todas as frequências são medidas simultaneamente, a maioria das medições em FTIR são feitas em segundos. Isto é por vezes referido como a vantagem de *Felgett*;
- **Sensibilidade:** é substancialmente melhorada com o FTIR por muitas razões. Os detetores implementados são muito mais sensíveis, o rendimento ótico é muito maior (referido como a vantagem *Jacquinot*) resultando em níveis de ruído menores, e os exames rápidos permitem a adição de várias verificações, a fim de reduzir o ruído de medição aleatório para qualquer nível desejado (referido como *nivelamento de sinal*);
- **Simplicidade mecânica:** o único elemento que se move no interferómetro é um espelho. Portanto, a probabilidade de haver alguma avaria é muito reduzida;
- **Calibração interna:** estes instrumentos utilizam um laser de *HeNe* como um padrão interno de comprimento de onda de calibração (referida como a *vantagem de Connes*). Estes instrumentos são auto-calibrados, logo, nunca precisam de ser calibrados pelo utilizador.

Estas vantagens possibilitam que as medições feitas por FTIR sejam muito precisas e tenham alta reprodutibilidade. Então, é uma técnica muito fiável para identificação positiva de praticamente qualquer amostra. A elevada sensibilidade permite a identificação de contaminantes com dimensões extremamente reduzidas. Desta forma, caso o objetivo da análise seja determinar os constituintes de uma amostra pura, é necessário ter o cuidado de esta não ser contaminada durante a preparação ou transporte.

Uma desvantagem do FTIR é o estudo da análise resultante que é observada na figura acima. Esta requer conhecimentos aprofundados de química e a experiência do utilizador pode ser um fator decisivo no resultado final da análise.

6.6. ESTUDO SUPERFICIAL DO COMPÓSITO

6.6.1. Introdução MEV (Microscopia Eletrônica por Varrimento)

A microscopia eletrônica por varrimento permite observação e caracterização de materiais heterogêneos orgânicos e inorgânicos numa escala de micrómetros (μm) ou nanômetros (nm). Obtêm-se imagens do tipo tridimensional e a uma ampliação de $10 - 10,000 \times$ [26].

Neste tipo de microscopia, a área ou o microvolume a ser analisado é irradiada com um feixe de elétrons muito fino e focado que varrerá a superfície do espécime para formar imagens ou pode ficar estático para se obter uma análise de uma só posição. O tipo de sinais produzidos pela interação do feixe de elétrons com a amostra inclui elétrons secundários, elétrons retro espelhados, raios-x característicos, e outros fótons de vários níveis de energia. Estes sinais são obtidos a partir de volumes de emissão específicos dentro da amostra e podem ser usados para examinar várias características da amostra, como por exemplo: topografia da superfície, cristalografia, composição [26].

Os sinais de imagem de maior interesse são os elétrons secundários e os elétrons retro espelhados porque estes variam primariamente como resultado das diferenças topográficas da superfície. A emissão de elétrons secundários, confinados a um volume muito pequeno perto da área de impacto do feixe para certos níveis de energia do feixe, permite que as imagens a serem obtidas tenham uma resolução aproximadamente igual à da dimensão do feixe de elétrons focado. A aparência tridimensional das imagens é devida à elevada profundidade de campo do microscópio eletrônico de varrimento, bem como o alívio da sombra promovido pelo contraste de elétrons secundários e retro espelhados. [26]

São de salientar os dois tipos de análises em MEV: alto vácuo e baixo vácuo.

- As análises em MEV de alto vácuo (ou alta voltagem, na faixa de $10 [kV]$) requerem materiais condutores para que não se crie o efeito de carga negativa, efeito que representa a acumulação de elétrons negativos em zonas de focagem do feixe. A análise de materiais não condutores também é possível, sendo no entanto necessária a aplicação de um microfilme condutor. Mesmo quando é conseguida uma boa condução de elétrons pode-se aplicar uma camada mais forte com o objetivo de melhorar o contraste.
- As análises em MEV de baixo vácuo (ou baixa voltagem, na faixa de $1 [kV]$) permitem a análise de materiais não condutores sem que estes tenham de ser tratados com qualquer tipo de micro-filme condutor.

6.6.2. Preparação da amostra

Foram selecionados cinco provetes diferentes para serem analisados e comparados através de microscopia em alto vácuo.

O tipo de ensaio a que estes provetes foram submetidos foi de tração e o tipo de fratura foi frágil para os provetes PLPR2, PLPR3, PL0S, PL45N e o PLA6 superior e ocorreu delaminação no provete PLA6 central.

A preparação da amostra requer desde logo atenção no corte dos provetes fraturados, sendo que a superfície da fratura não deve estar desprotegida aquando do corte sob pena de alterar a morfologia desta devido às poeiras que são libertadas e ao contato que poderá ter com outros objetos ou mesmo com o manuseamento da amostra, levando a análises, e consequentemente, a conclusões erradas. Deverão, portanto, serem seguidas as seguintes etapas:

- Ensaiair os provetes;
- Os provetes que serão analisados deverão ser protegidos (zona da fratura, área a ser analisada), envolvendo-os com folha de alumínio ou selofan e colados por fora;
- Efetuar o corte dos provetes com no máximo 1 a 1,5 [cm] de altura (este requisito é importante devido às dimensões que deverão ser respeitadas pela câmara do microscópio);
- A base onde se vão colar as amostras têm de ser condutora, portanto, deverá ser uma base de cobre ou alumínio com no máximo 30 [mm] de diâmetro e 1 [cm] de altura;
- As amostras deverão ser coladas segundo uma ordem e orientação lógica e devidamente identificadas. A cola usada deverá ser araldite;
- Por fim, as amostras, que neste caso não são condutoras, necessitam de uma cobertura condutora (para serem analisados em microscopia em alto vácuo), que poderá ser por exemplo: ouro, ouro/paládio, platina, tungsténio e grafite. Neste caso foi feita uma cobertura de ouro/paládio.

Relativamente ao último ponto das etapas enunciadas acima. Esta fase é essencial para uma boa visualização e contraste da amostra pelo que, numa mostra irregular (como é o caso) a cobertura deverá ser aplicada segundo vários ângulos para que todas as superfícies permitam posteriormente uma melhor análise. A razão pela qual é muito importante um bom revestimento condutor é devida à necessidade da condução dos eletrões pela amostra, ora, se não existir uma boa camada condutora, quando se incidir o feixe de eletrões num determinado local com pouca condutividade vai-se gerar efeito de carga, efeito este que indica uma baixa condutividade dos eletrões para fora daquela zona e portanto a acumulação destes, impedindo assim uma boa visualização da área em questão. Essa zona tornar-se-á muito clara e cada vez mais ao longo de toda a análise uma vez que uma vez injetados eletrões numa determinada área, se estes não se dispersarem, ficarão acumulados até ao fim. Impedindo melhores visualizações da próxima vez que se focar a área anteriormente analisada.

Na microscopia em baixo vácuo consegue-se contrabalançar a carga negativa injetando um gás com carga positiva para que se consiga equilibrar a atmosfera e reduzir o efeito de carga negativa. Este método apesar de permitir uma melhor visualização porque elimina o problema anterior, tem a desvantagem de não permitir ampliações tão elevadas como em microscopia em alto vácuo. No entanto, para este tipo de amostras, em que se retiraram imagens a um máximo de 5,000 $\times$, não é um problema, sabendo que este tipo de microscopia, nos casos mais recentes pode ir até ampliações de 200,000 $\times$.

Após preparação enunciada anteriormente resultou:

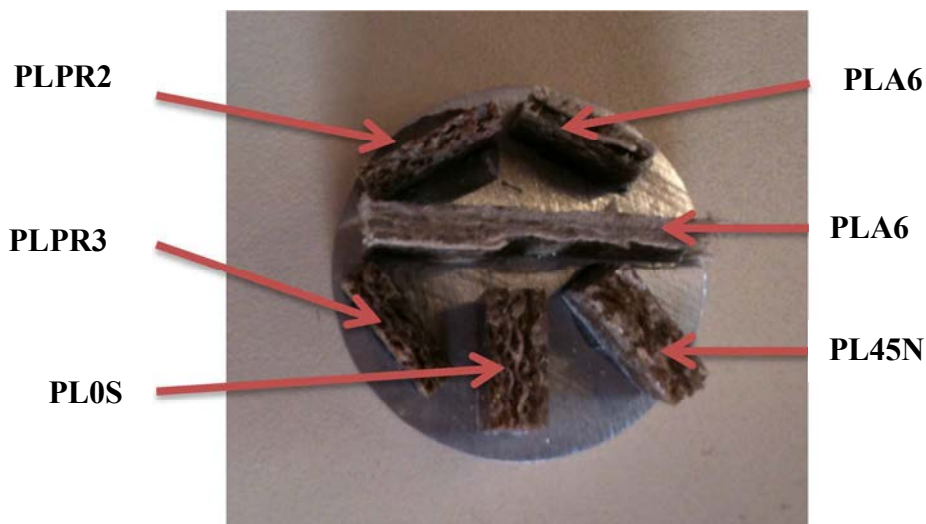


Fig. 6.25 - Disposição das 6 amostras analisadas por MEV.

Com:

Tabela 6.49 - Dados dos compósitos analisados em MEV.

Compósito	Fibra	Resina	Camadas	Moldação
PLPR2	<i>Juta Normal</i>	<i>Epóxi</i>	6	<i>PPQ</i>
PLPR3	<i>Juta Normal</i>	<i>Epóxi</i>	8	<i>PPQ</i>
PL0S	<i>Juta Seca</i>	<i>Poliéster</i>	4	<i>Manual</i>
PL45N	<i>Juta Normal</i>	<i>Poliéster</i>	4	<i>Manual</i>
PLA6	<i>Linho</i>	<i>PLA</i>	6	<i>PPQ</i>

Tabela 6.50 - Dados dos compósitos analisados em MEV. (Continuação)

Compósito	Orientação	P [Bar]	T [°C]	T [min]
PLPR2	[0,0,0,0]	27	120	60
PLPR3	[0,0,0,0]	20	120	60
PL0S	[0,0,0,0]	<i>Aperto</i>	<i>Ambiente</i>	720
PL45N	[45,45,45,45]	<i>Aperto</i>	<i>Ambiente</i>	720
PLA6	[0,0,0,0]	20	190	15

Como foi visto na introdução e preparação da amostra, o tipo de microscopia mais apropriado para este tipo de amostras, não condutoras, é de baixo vácuo (LVSEM¹⁸), que também se encontra disponível no CEMUP. Não foi possível requisitá-lo devido há longa fila de espera existente, o que impediria o estudo da superfície a ampliações muito elevadas neste trabalho. Foi desta forma feito o estudo em alto vácuo, aplicando uma camada de filme condutor de ouro/paládio às amostras, proporcionando assim a sua visualização em microscopia de alto vácuo (SEM¹⁹).

¹⁸ Light Vacuum Scanning Electron Microscopy

¹⁹ Scanning Electron Microscopy

6.6.3. Análise imagens obtidas por MEV

Houve alguma dificuldade na visualização e interpretação das imagens obtidas por MEV porque se verificou muito efeito de carga negativa na amostra devido à insuficiência da micro-camada condutora aplicada, no sentido de que esta não penetrou bem nas zonas com ângulos mais acentuados que existem significativamente dada a irregularidade da superfície em análise. Desta forma só foram recolhidas imagens dos provetes *PLPR2*, *PL05* e *PLA6*. Provetes que apresentaram imagens reveladoras de alguma informação importante. Estas serão apresentadas e discutidas de seguida.

6.6.3.1. Proвете PLPR2

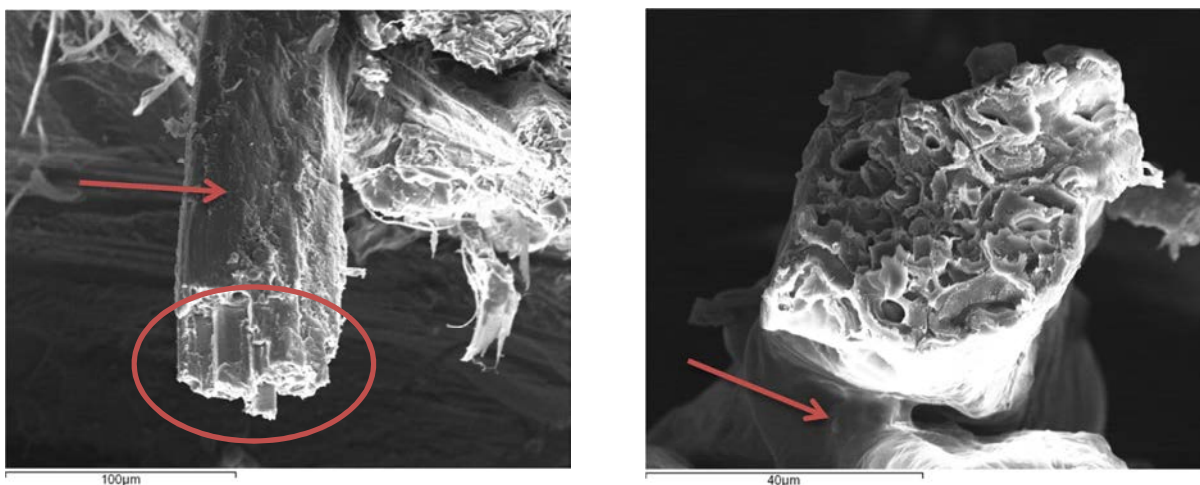


Fig. 6.26 - Vista lateral de uma fibra na imagem do lado esquerdo (100 [μm]) e vista de topo de uma fibra na imagem do lado direito (40 [μm]).

Verifica-se na imagem do lado esquerdo da figura 6.26 o conjunto de fibras que constituem a fibra visível a olho nu. Este conjunto de fibras pode variar, contendo normalmente um mínimo de 10 fibras. De notar também na pequena superfície que envolve o conjunto de fibras que em princípio será a resina de epóxi do compósito, que devido à falha que se observa do lado direito da fibra, dá mais certeza de que assim seja pois alguma da resina poderá ter ficado na outra parte do provete quando este sofreu a fratura. Esta fibra gerou um buraco na outra parte do compósito quando este fraturou, verificar-se-á numa das figuras seguintes.

Na imagem do lado direito da figura 6.26 observa-se o topo de uma fibra do mesmo tipo que a representada do lado esquerdo e é possível verificar a resina que a envolve, sobretudo na zona inferior. É normal tal situação dado que a fibra foi sujeita à tração e fraturou dentro da outra parte do provete, tendo ficado no outro provete a resina que cobria a fibra visível nesta imagem.

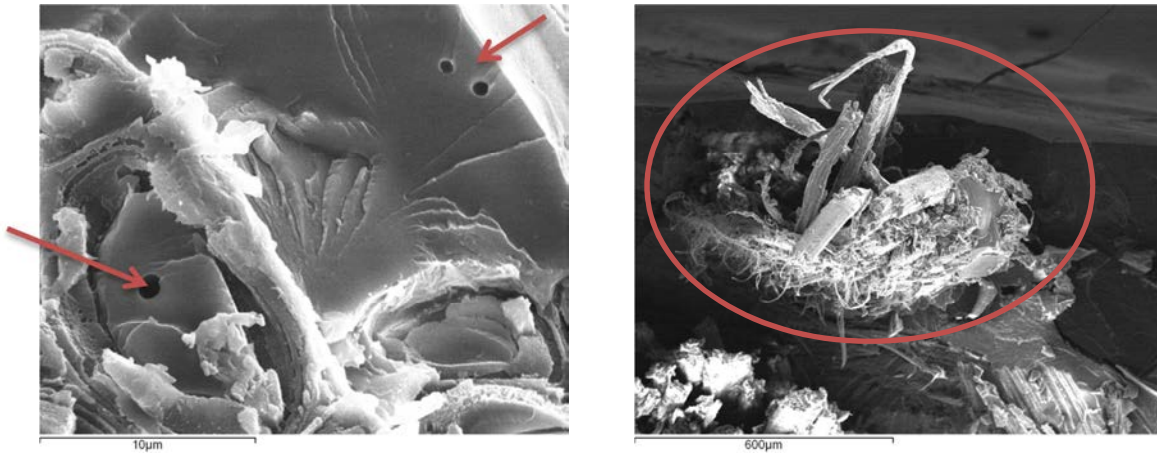


Fig. 6.27 - Resina com defeitos do lado esquerdo (10 $[\mu m]$) e desfibramento na imagem do lado direito (600 $[\mu m]$).

A resina visualizada na imagem do lado esquerdo da figura 6.27 apresenta defeitos bem definidos como é o caso das esferas num tom mais escuro que representam as porosidades criadas pela evaporação da água quando se sujeitou o compósito a temperaturas elevadas na PPQ ou as bolhas de ar retidas durante a moldação. Os poros nesta visualização apresentam um diâmetro de $D \approx 1,06 [\mu m]$.

Na imagem do lado direito da figura 6.27 dá-se conta de um desfibramento de um conjunto de fibras, que pode ser devido à fraca adesão à matriz, fazendo com que as fibras se desfibrassem bastante. Um dos estímulos para este resultado também se deve à energia da deformação que se foi acumulando nas fibras quando estas estavam a ser tracionadas. Quando se deu a fratura, a energia que se vinha a acumular durante a deformação libertou-se num instante de tempo, provocando o caos entre as fibras porque estas não tinham uma boa adesão com a matriz que as podia manter unidas.

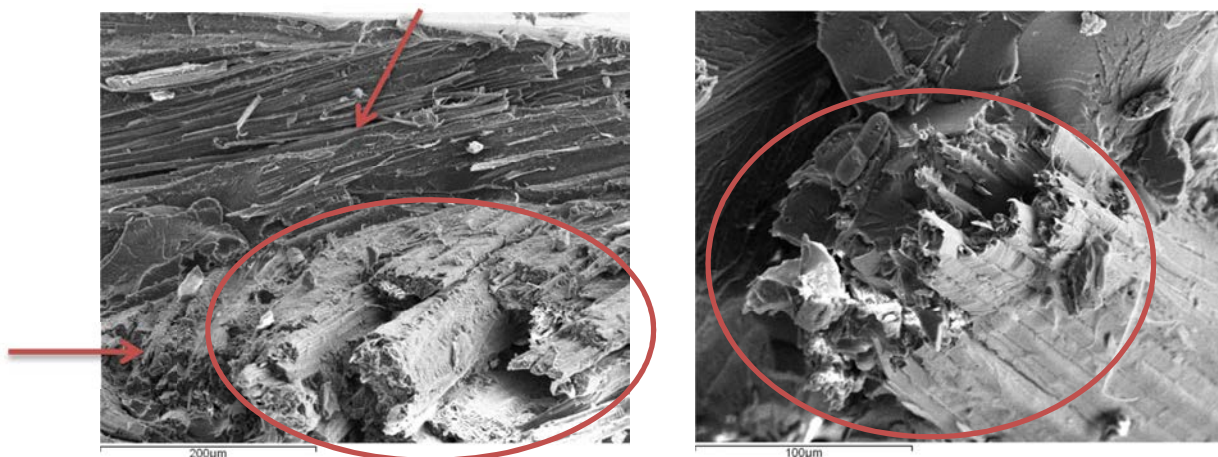


Fig. 6.28 - Perceção das fibras bidirecionais na imagem do lado esquerdo (200 $[\mu m]$) e arrancamento de algumas fibras de um conjunto destas na imagem do lado direito (100 $[\mu m]$)

Na imagem do lado esquerdo da figura 6.28 é dado conta da bidirecionalidade da malha de fibras utilizada. Também se apura a descontinuidade entre a profundidade das fibras de um conjunto destas, validando-se o facto de o arrancamento num mesmo conjunto de fibras variar significativamente porque o diâmetro varia bastante não só de fibra para fibra mas também numa mesma fibra (ao longo do comprimento, longitudinalmente), fazendo com que esta frature na secção com diâmetro mais reduzido (secção mais reduzida).

Na imagem do lado direito da figura 6.28 também se dá conta do mesmo problema confirmado na imagem do lado esquerdo da figura 6.28.



Fig. 6.29 - Visualização de toda a superfície de fratura do provete em análise (3 [mm]).

Na figura 6.29 corrobora-se o arrancamento de alguns conjuntos de fibras que portanto ficaram livres na outra parte do provete, algum desfibramento de outros conjuntos de fibras e a forma achatada dos conjuntos de fibras que se deve ao processo de fabrico utilizado que neste caso foi PPQ e portanto implicava a aplicação de pressão que neste caso foi de $p = 27$ [Bar]. Pode assim ter havido degradação das fibras.

6.6.3.2. Provete PLOS

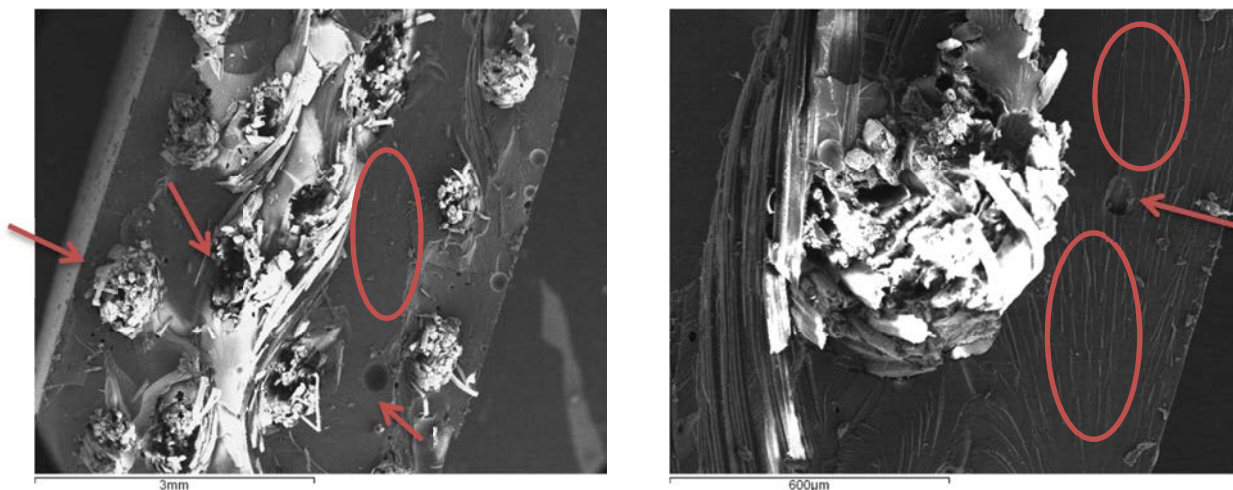


Fig. 6.30 - Superfície do provete em análise (3 [mm]).

Neste provete da figura 6.30 e ao contrário do analisado na figura 6.29, os conjuntos de fibras apresentam geometrias muito mais circulares, que é devido ao fabrico do compósito ter sido feito manualmente, a pressão aplicada é muito mais reduzida, é a pressão gerada pelo aperto dos moldes.

Os defeitos também são de maiores dimensões devido à situação anterior e é de notar a continuidade quase perfeita da resina, característica de uma fratura frágil, quando não existem porosidades ou quando não se encontra próxima de um conjunto de fibras. Também se verifica um desfasamento na fratura das fibras de cada um dos conjuntos pelos tons de cinzentos muito diferentes. Na imagem do lado direito da figura 6.30 já se constata algumas fendas frágeis.

Devido à reduzida pressão aplicada neste compósito são perceptíveis as 4 camadas que o constituem na imagem do lado esquerdo.

É de realçar o efeito das porosidades como pontos de concentração de tensão. Na imagem do lado direito da figura 6.30 verifica-se que muitas das fendas que se propagavam do lado inferior ao poro desapareceram no lado superior visto que o poro funcionou como um absorvedor de tensões e eliminou a propagação das fendas.

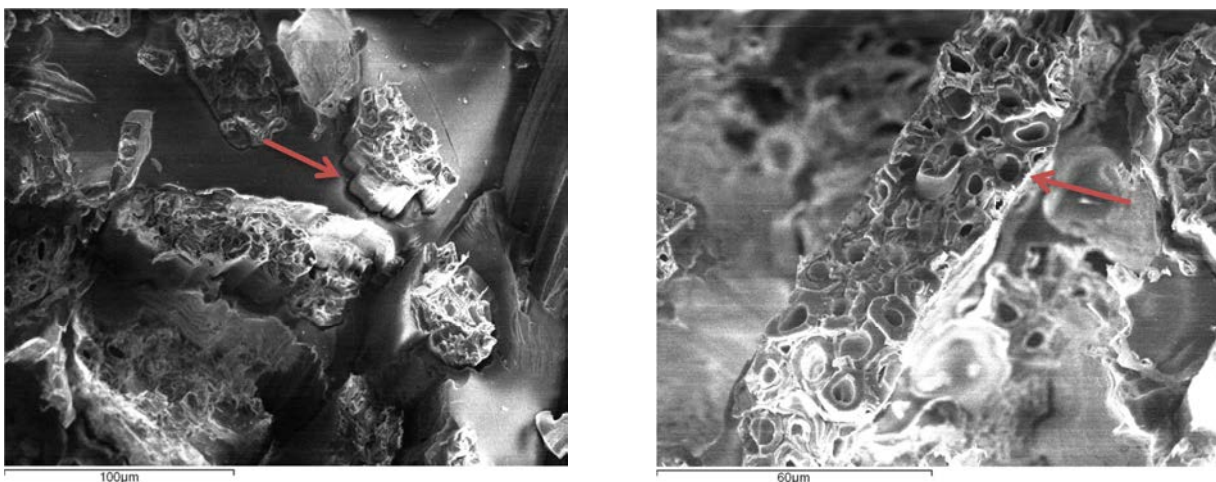


Fig. 6.31 - Imagem de conjunto de fibras e resina do lado esquerdo (100 [μm]) e imagem de um conjunto de fibras do lado direito (60 [μm]).

As zonas mais escuras que envolvem os conjuntos de fibras na imagem do lado esquerdo da figura 6.31 denotam alguma profundidade nessa zona o que significa que o contato entre o conjunto de fibras e a resina é reduzido, ou seja, houve um descolamento entre a fibra e a matriz. Esta situação foi gerada durante a fratura do provete no ensaio mecânico.

Verifica-se na imagem do lado direito da figura 6.31 a estrutura biológica de cada uma das fibras de juta, com especial pormenor o interior oco característico deste tipo de fibras provenientes do caule da planta.

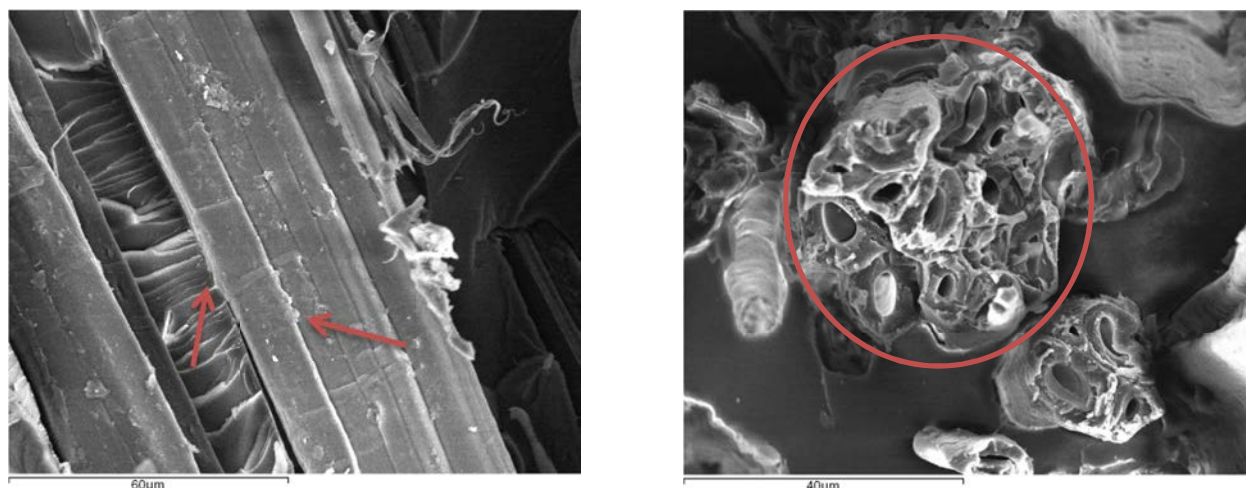


Fig. 6.32 - Vista lateral de um conjunto de fibras na imagem do lado esquerdo (60 μm) e vista de topo de um conjunto de fibras na imagem do lado direito (40 μm).

Na imagem do lado esquerdo da figura 6.32 é de notar as interseções de cada fibra, ao longo do comprimento, características da fibra de juta. Na imagem do lado direito da figura 6.32 consegue-se ver mais uma vez o interior oco das fibras de juta. Verifica-se também que o conjunto de fibras em foco tem uma forma mais ou menos circular, ou seja, como já se constatou anteriormente, a moldação manual, devido às baixas pressões que gera não danifica o conjunto de fibras. No entanto, verifica-se que cada um das fibras que constitui o conjunto, tem uma secção mais oval. Esta secção mostra que, apesar de a fibra de juta nunca ter a forma completamente circular, esta forma oval pode ser mais acentuada devido aos tratamentos e à torção a que estas são sujeitas para formar o conjunto de fibras.

Relativamente a este compósito, é de salientar que a fabricação foi feita durante trabalhos anteriores. As características mais relevantes são:

Tabela 6.51 - Características do compósito PL0S criado em trabalhos anteriores.

PL0S		
Percentagem de fibra [%]		32,43
Número de camadas		4
Secagem	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	130
	Tempo [horas]	3
Resina		Poliéster
Módulo de Young [MPa]		53,61
Tensão Máxima [Mpa]		5069
Deformação Máxima [%]		0,014

6.6.3.3. Provete PLA6



Fig. 6.33 - Imagem do lado esquerdo apresenta uma delaminação (3 [mm]) e a imagem do lado direito um conjunto de fibras de linho (60 [μm]).

A imagem do lado esquerdo da figura 6.33 apresenta uma delaminação que ocorreu durante o ensaio de tração. Esta delaminação deve-se à fraca adesão das fibras de linho com a matriz de PLA que foi consequência da ausência de pressão aquando do arrefecimento do compósito. Isto é, o tipo de matriz que se usou no compósito foi termoplástica (PLA) e neste caso, depois de aplicada pressão e temperatura na PPQ, o arrefecimento deve ser dado com elevada pressão para que a matriz solidifique em contato com as fibras, criando assim uma boa interface. Se não houver pressão suficiente enquanto se dá a polimerização da matriz durante o arrefecimento, esta ficará com pouco contato com as fibras, solidificando portanto sem uma boa interface com estas. A solução então para este tipo de problema com matriz termoplástica passa por conseguir um elevado arrefecimento na PPQ e mantendo a pressão elevada e constante sobre o compósito ou então conseguir aplicar essa pressão numa outra máquina ou PPQ que não esteja aquecida. É importante que a transição de uma máquina para a outra seja muito rápida e que não demore muito tempo a arrefecer o compósito, sob pena de este se degradar entretanto.

Na imagem do lado direito da figura 6.33 observam-se um conjunto de fibras de linho com muito fraca adesão entre elas. Notam-se também as secções que se vão repetindo ao longo das fibras e o interior com a ausência da zona oca existente na juta, característica das fibras naturais de linho.

7. Conclusões

- A secagem do tecido de juta depende não só da temperatura mas também do tempo a que seca a cada uma das temperaturas, ou seja, na análise TG foi feito um ensaio de 30 [°C] a 160 [°C] a 6 [°C/min] e verificou-se que a fibra perdeu um conteúdo de massa muito reduzido, indicando que este teria sido só devido à perda de humidade. No entanto, quando seco o tecido de juta a 160 [°C] durante 2 dias e feito o ensaio de tração verificou-se que as propriedades mecânicas desta relativamente à que foi seca a 120 [°C] durante 3 horas reduziram bastante, indicando que teria havido perda de constituintes e degradação da fibra que permitissem melhores propriedades mecânicas. Houve descoloração inclusive;
- A humidade existente na fibra prejudica a criação de uma interface boa entre a fibra e a matriz;
- Para além da secagem deverão ser aplicados tratamentos químicos à fibra para melhorar a adesão destas à matriz: quer seja por compatibilização química ou por aumento da rugosidade que permite um maior atrito e ligação com a matriz;
- A maior percentagem de fibra é um indicativo de melhores propriedades mecânicas;
- Deverá haver um equilíbrio ótimo entre quantidade de fibra e quantidade de resina para que as propriedades mecânicas sejam as melhores, pois quantidades muito elevadas de percentagem de fibra implica uma matriz polimérica com pouca resina e portanto a transmissão de carga não funcionará corretamente;
- Moldação na PPQ com pré-impregnados produz compósitos com propriedades mecânicas muito mais elevadas dos que foram feitos em moldação manual, mesmo quando estes foram feitos com juta seca (menor percentagem de humidade);
- As fibras naturais têm muitos defeitos. Existem, por exemplo, variações de diâmetro numa mesma fibra quando percorrida longitudinalmente, Esta variabilidade enorme das fibras gera por vezes muita alteração dos resultados mesmo que todas as outras condições de fabrico ou ensaio tenham sido as mesmas;
- Os compósitos de linho/PLA precisam de um rápido arrefecimento sob elevadas pressões. Doutra maneira, a interface entre a fibra e a matriz fica muito fraca pois o contato que houve entre estas enquanto a matriz solidificava foi reduzido;
- Problemas como delaminação e desfibramento são obtidos quando uma interface é mal estabelecida. As várias camadas podem-se separar;
- Os ensaios de tração provocam não só a fratura do provete (como era de esperar) mas também o arrancamento das fibras da matriz das duas partes do provete;
- Ambos os processos de moldação utilizados continham grande quantidade de defeitos. Isto é, elevada porosidade devido ao gás libertado durante a impregnação para os *PLM* e *PLPR*, e evaporação da água durante a aplicação de elevadas temperaturas na PPQ para o caso dos *PLPR*;
- Um conjunto de fibras contem no mínimo 10 fibras, estas foram torcidas durante o processo de formação dos conjuntos de fibras para se manterem unidas. Esta torção diminui as propriedades mecânicas do compósito na medida em que impede que os espaços interiores sejam impregnados e as fibras têm melhores comportamentos quando estendidas e longas;

- Maiores deformações estão, na generalidade dos casos estudados, associadas a menores rigidezes e tensões máximas.
- O processo de moldação por autoclave permitirá um melhoramento das propriedades dos compósitos porque este cria um ambiente de vácuo e utiliza pressão e temperatura. O ambiente em vácuo será fundamental para extrair o máximo de impurezas e poros possíveis, criando assim compósitos com melhores qualidades dimensionais e estruturais;
- O tipo de fratura observada nos compósitos *PLM*, *PLMS* e *PLPR* é frágil;
- Microscopia eletrónica de alto vácuo não é boa para a análise de materiais não condutores, como por exemplo os compósitos. Deverá ser usada microscopia eletrónica de baixo vácuo;
- O PLA tem uma degradação muito acentuada ao longo do tempo, especialmente quando exposto à luz solar ou em contato com a atmosfera;
- As fibras naturais têm degradação ao longo do tempo, portanto, ao longo da vida de trabalho, estas tenderão a diminuir a resistência mecânica;
- As fibras naturais de juta como são importadas, neste caso da Índia, poderão vir com tratamentos desconhecidos para o cliente. É necessário saber-se o percurso do lote de tecido que se comprou e quais os tratamentos a que foi sujeito. Permitindo desta forma determinar com mais precisão o comportamento das fibras de juta;
- O reaproveitamento de algumas peças da máquina anterior bem como o projeto de uma máquina para a produção de pré-impregnados é viável;

8. Trabalhos futuros

Estando o projeto numa fase inicial (cerca de um ano dos três previstos para a duração total do projeto), ainda muitos objetivos estão por cumprir. Ficam aqui alguns que advém deste trabalho:

- Definir módulo de secagem da fibra para a máquina;
- Definir módulo de aplicação de químicos para melhoramento das capacidades de adesão;
- Montar máquina Prepreg;
- Aplicar tratamentos químicos à fibra para melhorar as capacidades de adesão com a matriz;
- Determinar as capacidades de adesão com a matriz:
 - Através de ensaios de arrancamento de fibra;
 - Fazer também ensaios de tração, flexão, impacto e fratura;
- Experimentar novos processos, como por exemplo: Autoclave;
- Testes de tração só ao tecido de juta depois de secagens segundo um intervalo grande de temperaturas diferentes com tempos iguais para definir um intervalo de temperaturas seguras para secagem da fibra mais apertado;
- Fazer testes de humidade à fibra (tempo, temperatura);
- Estudo reológico da viscosidade das resinas principais para uso na máquina Prepreg;
- Fazer estudo dos constituintes do tecido de juta através de FTIR;
- Fazer estudo da tenacidade do compósito e identificar as propriedades mecânicas para desenvolver um modelo de simulação em *Abaqus*;

9. Bibliografia

- [1] Caroline Baillie (2004) – “Green Composites – Polymer composites and the environment”, Woodhead Publishing Ltd.
- [2] Robert R. Franck (2005) – “Bast and other plant fibre”, Woodhead Publishing Ltd.
- [3] <http://www.fao.org/DOCREP/004/Y1873E/y1873e0a.htm> - “Natural Fibre Composites in Structural Components: Alternative Applications for Sisal?” (2012)
- [4] Marcelo F.S.F. de Moura, Alfredo B. de Moraes, António G. de Magalhães (2011) – “Materiais compósitos – Materiais, fabrico e comportamento mecânico”, Publindústria, Produção de comunicação Lda.
- [5] Paul Wambua, Jan Ivens, Ignaas Verpoest (2003) – “Natural fibres: Can they replace glass fiber reinforced plastics?”, *composites science technology* 63 (2003) 1259-1264, Elsevier Publishing Company.
- [6] Manuel Freitas, Arlindo Silva (---) – “Materiais Compósitos”, Apresentação IST.
- [7] Anabela Mendes Moreira (2008) – “Materiais de Construção I”, Apontamentos Instituto Politécnico de Tomar.
- [8] Ana Mafalda F.M. Ventura (2009) – “Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas”, *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, Vol. 21, nº 3/4.
- [9] Anthony Kelly, Carl Zweben (Editors-in-chief); Ramesh Talreja, Jan-Anders E. Månson (Volume Editors) – “Polymer Matrix Composites”, Vol.2, Elsevier Science Ltd., the Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX51GB, UK (2000).
- [10] Anthony Kelly, Carl Zweben (Editors-in-chief); Tsu-Wei Chou (Volume Editor) – “Fiber Reinforcements and General Theory of Composites”, Vol.1, Elsevier Science Ltd., the Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX51GB, UK (2000).
- [11] F. Corrales, F. Vilaseca, M. Llop, J. A. Méndez, P. Mutjé (2007) – “Chemical modification of jute fibers for the production of green-composites”, *Journal of Hazardous Materials* 144 (2007) 730-735, Elsevier Publishing Company.
- [12] R. C. Santiago, R. M. Braga, R. C. T. S. Felipe, R. N. B. Felipe (2007) – “Comportamento mecânico do compósito de resina ortoftálica reforçado com fibra de juta e tratado quimicamente com hidróxido de sódio”, Departamento Académico de Tecnologia Industrial – CEFET-RN.
- [13] Camerini, A. L.; Terrones, L. A. H.; Monteiro, S. N. (2007) – “Tenacidade ao impacto de compósitos de tecido de juta reforçando matriz de polietileno reciclado”, *Revista matéria*, v. 13, n. 1, pp. 180-185.
- [14] Betiana A. Acha, Norma E. Marcovich, María Reboredo (2005) – “Physical and Mechanical Characterization of Jute Fabric Composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 98, 639-650 (2005), Wiley Periodicals, Inc.
- [15] Thi-Thu-Loan Doan, Hanna Brodowsky, Edith Mäder (2012) – “Jute fibre/epoxy composites: surface properties and interfacial adhesion”, *Composites Science and Technology* xxx (2012) xxx-xxx, Elsevier Publishing Company.

- [16] Giuseppe Cristaldi, Alberta Latteri, Giuseppe Recca and Gianluca Cicala (---) – “Composites Based on Natural Fibre Fabrics”, University of Catania – Department of Physical and Chemical Methodologies for Engineering, Catania. Italy.
- [17] <http://www.jute.org/home2.htm> - “International Jute Study Group” (2012)
- [18] <http://www.glen-l.com/supplies/pxman-cleanup.html> - “Epoxy system Technical Manual” (2012)
- [19] Catálogo de correntes, Renold, 2010.
- [20] Catálogo de rodas dentadas, Renold, 2010.
- [21] Catálogo de dimensionamento de correntes de rodas dentadas, Renold, 2010.
- [22] Catálogo de moto-redutores, SEW-Eurodrive, 2009.
- [23] Catálogo de rolamentos e chumaceiras, INA-FAG, 2010.
- [24] Catálogo de equipamento pneumático, Metalwork, 2012.
- [25] Douglas A. Skoog, F. James Holler, Stanley R. Crouch (2007) – “Principles of Instrumental Analysis”, 6th Edition, Thomson Wadsworth.
- [26] Joseph Goldstein, Dale Newbury, David joy, Charles Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer, and Joseph Michael (2003) – “Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis”, 3rd edition, Springer.
- [27] Catálogo de elementos de transmissão, YUK, 2012.
- [28] A. P. Luz, S. Ribeiro, V. C. Pandolfelli (2008) – “Review article: use of the wettability in the investigation of the corrosion behaviour of the refractory materials”, Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais – GEMM, Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de S. Paulo, A. P. Luz et al. / Cerâmica 54 (2008) 174-183.
- [29] <http://www.naturalfibres2009.org/en/index.html> - “International Year of Natural Fibres” (2012)
- [30] <http://www.saskflax.com/index.html> - “Saskatchewan Flax Development Commission (SFDC)” (2012)
- [31] Luisa Medina, Ralf Schledjewski, Alois K. Schlarb (2009) – “Process related mechanical properties of press molded natural fiber reinforced polymers”, Composites Science and Technology 69 (2009) 1404-1411, Elsevier Publishing Company.
- [32] <http://www.ijira.org/index.htm> - “Indian Jute Industrie’s Research Association” (2012)
- [33] S. Das (---) – “Jute composite and its applications”, Indian Jute Industries Research Association. 17 Taratola Road, Kolkata – 700088, India
- [34] <http://www.compositesevolution.com/Home/tabid/37/Default.aspx> - “Composites Evolution” (2012)
- [35] <http://www.designinsite.dk> - “Design inSite – The Designer’s Guide to Manufacturing” (2012)
- [36] Catálogo de esticadores, ROSTA, 2010.
- [37] BS EN ISO 527 – Plastics – Determination of Tensile Properties (1993) – Part 1: General Principles (1996)
- [38] ASTM D790-03 – Standar Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (2003)

- [39] A. C. Vieira, J. C. Vieira, R. M. Guedes, A. T. Marques (2010) - “Degradation and Viscoelastic Properties of PLA-PCL, PGA-PCL, PDO and PGA Fibres”, Materials Science Forum Vols. 636-637, pp 825-832.
- [40] A. C. Vieira, J. C. Vieira, J. M. Ferra, F. D. Magalhães, R. M. Guedes, A. T. Marques (2011) – “Mechanical study of PLA-PCL fibers during in vitro degradation”, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 4, 451-460.
- [41] M. L. Costa, C. L. Braga, V. A. Silva, L. B. Nohara, M. C. Rezende (2006) – “Desenvolvimento de metodologia e de dispositivos para estudo do *tack* de pré-impregnados aeronáuticos”, 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil
- [42] <http://mmrc.caltech.edu/FTIR/FTIRintro.pdf> - “Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry” – Thermo Nicolet Corporation (2012)

10. Anexos

ANEXO A: Nota de cálculo do sistema de transmissão de potência

Para dimensionar o sistema de transmissão de potência são necessários os dados determinados na tabela 5.2 (capítulo 5).

Corrente

Para escolher a corrente é necessário saber-se qual a força de tração que esta terá de suportar, esta força é corresponde à força apresentada na tabela 5.2 (capítulo 5): $F_{m\acute{a}x \text{ primeira rotura}} = 471,6 \text{ [N]}$.

Aplicando o coeficiente de segurança da seguinte tabela de correntes:

Tabela 10.1 - Coeficiente de segurança das correntes. [19]

Safety Factors		
Axial breaking force/max working load	12	Harsh Environments
	11	
	10	Passenger Lifts
	9	
	8	Transmission
	7	High Cycle Lifting
	6	Low Cycle Lifting
	5	
	4	
	3	
	2	
	1	Not Normally Used
		Safety Critical

De acordo com o tipo de trabalho da máquina, o coeficiente de segurança a aplicar será de 7 (elevado ciclo de uso). Então, a força máxima para a qual a corrente terá de ser escolhida é:

$$F_{m\acute{a}x} = 7 \times F_{m\acute{a}x \text{ primeira rotura}} \quad (10.1)$$

$$F_{m\acute{a}x} = 7 \times 471,6 = 3301,2 \text{ [N]}$$

Obtém-se do catálogo de correntes de aço da *Renold* a seguinte corrente simples:

Tabela 10.2 - Corrente selecionada. [19]

<i>Nº corrente Renold</i>	<i>Passo [mm]</i>	<i>ISO 606</i> <i>Força tração resistente [N]</i>	<i>Peso [kg/m]</i>
111044	12,7	8900	0,30

Como 8900 [N] > 3301,2 [N], verifica.

Tabela 10.3 - 1º Coeficiente para cargas dinâmicas tendo em conta qualquer tipo de sobrecarga no uso da corrente. [21]

DRIVEN MACHINE CHARACTERISTICS		CHARACTERISTICS OF DRIVER		
		SMOOTH RUNNING Electric Motors, Steam and Gas Turbines, Internal Combustion Engines with Hydraulic coupling	SLIGHT SHOCKS Internal Combustion Engines with 6 cyls or more with mechanical Coupling, Electric Motors with frequent starts	MODERATE SHOCKS Internal Combustion Engines with less than 6 cyls, with mechanical coupling
SMOOTH RUNNING	Centrifugal Pumps and Compressors, Printing Machines, Paper Colanders, Uniformly Loaded Conveyors, Escalators, Liquid Agitators and Mixers, Rotary Driers, Fans	1	1.1	1.3
MODERATE SHOCKS	Pumps and Compressors (3+ cyls), Concrete Mixing Machines, Non uniformly Loaded Conveyors, Solid Agitators and Mixers	1.4	1.5	1.7
HEAVY SHOCKS	Planers, Excavators, Roll and Ball Mills, Rubber Processing Machines, Presses and Shears 1 & 2 Cyl Pumps and Compressors, Oil Drilling Rigs	1.8	1.9	2.1

Da tabela anterior e considerando para as características da máquina e do sistema de transmissão, um trabalho suave:

$$f_1 = 1$$

Tabela 10.4 - 2º Coeficiente para cargas dinâmicas tendo em conta o número de dentes da roda dentada. [21]

f2 factors for standard sprocket sizes	
Z1	f2
15	1.27
17	1.12
19	1.00
21	0.91
23	0.83
25	0.76

Como não é possível determinar o fator 2 com os dados da tabela anterior, é estabelecida a seguinte relação no catálogo da *Renold*:

$$\frac{f_2}{Z_1} = \frac{19}{Z_1} \quad (10.2)$$

Sendo:

f_2 – fator definido na expressão com o valor de 19

Z_1 – Número de dentes da roda dentada em causa

Então:

$$\frac{19}{30} \approx 0,61 \Rightarrow f_2$$

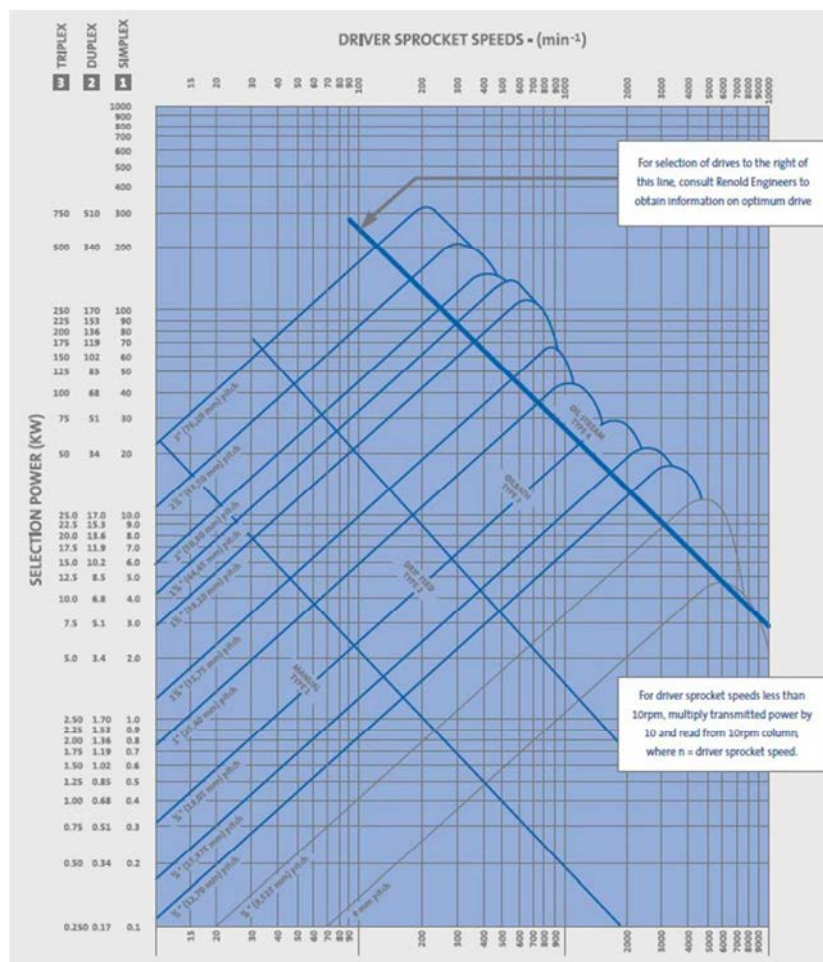


Fig. 10.1 - Ábaco para verificar se o passo da corrente para as especificações dinâmicas está correto. [21]

Abordando o ábaco com os dados apresentados de seguida.

No eixo dos yy' :

$$Pot. = Pot_{Motor} \times f1 \times f2 \quad (10.3)$$

$$Pot. = 0,18 \times 1 \times 0,61$$

$$Pot. \approx 0,11 \text{ [kW]}$$

E tendo em conta a variável de entrada nos xx'

$$n = 31 \text{ [rot/min]}$$

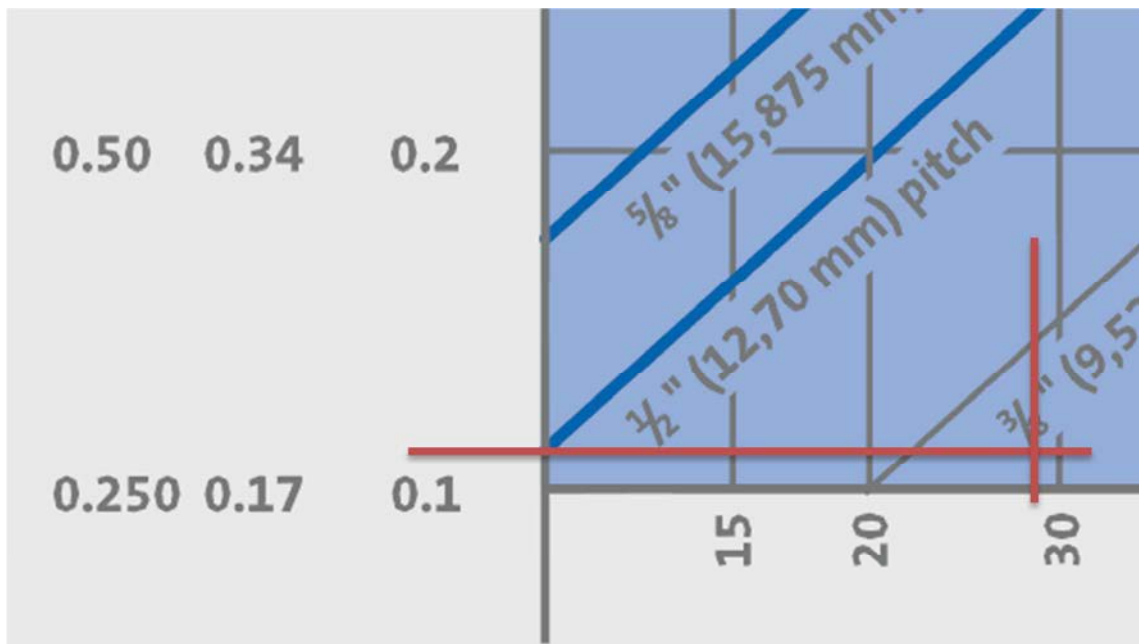


Fig. 10.2 - Recorte do ábaco anterior. [21]

Verifica-se que como a interseção das duas retas se dá abaixo da reta referente ao passo de 12,7 [mm] a seleção deste passo é permitida.

Rodas-dentadas e moto-redutor

As rodas dentadas terão de ter o mesmo passo da corrente seleccionada. Então, para um passo de 12,7 [mm] deverá ser escolhido o número de dentes da roda dentada, que serão função do diâmetro da roda e da velocidade pretendida para o movimento linear. Dando uso às potencialidades do programa *excel*, foram relacionados estes dados com os dados de moto-redutores com potências de $Pot. = 0,18 \text{ [kW]}$.

Esta potência resultou do seguinte procedimento de cálculo seguido pelo catálogo da SEW-Eurodrive.

Em que o fator de serviço f_B é definido no gráfico apresentado de seguida e para os seguintes dados:

$$\text{Tempo de trabalho/dia} = 8 \text{ horas/dia}$$

Tipo de carreg.: Não uniforme, fator de aceleração de massa permitido ≤ 3

Ciclo de início e paragem, bem como mudanças de veloc.: 200 ciclos/hora

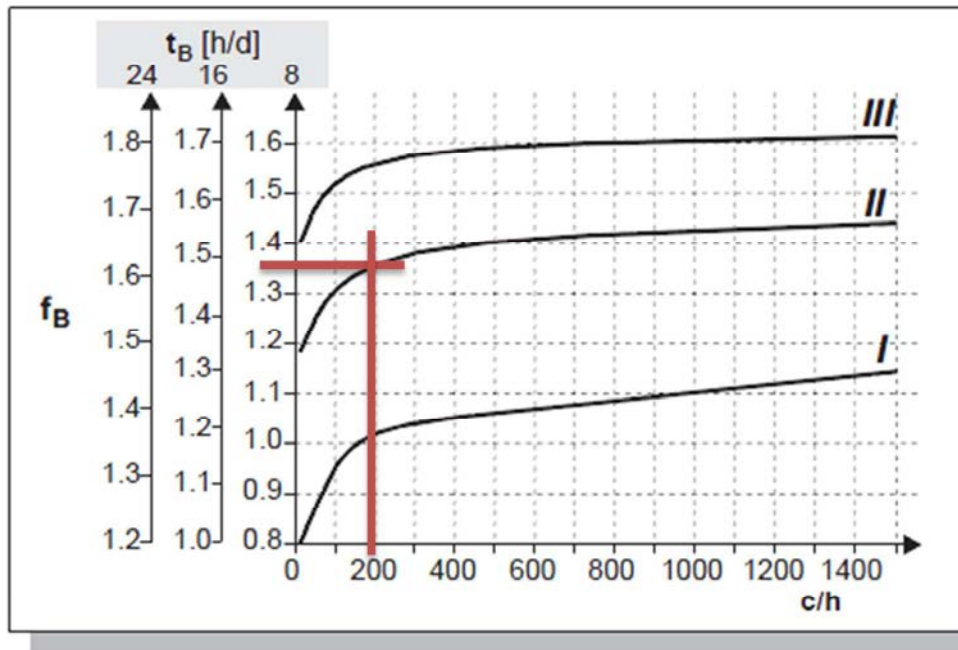


Gráfico 10.1 - Fator de serviço necessário para redutores do tipo: R, F, K, W, S.

Resultando do gráfico anterior:

$$f_B = 1,35$$

Para o tipo de redutores de engrenagens helicoidais (tipo R) têm de ser considerados mais dois fatores:

f_{B1} – Fator de serviço de temperatura ambiente

f_{B2} – Fator de serviço para duração cíclica

Para o seguinte gráfico e considerações retiram-se estes fatores.

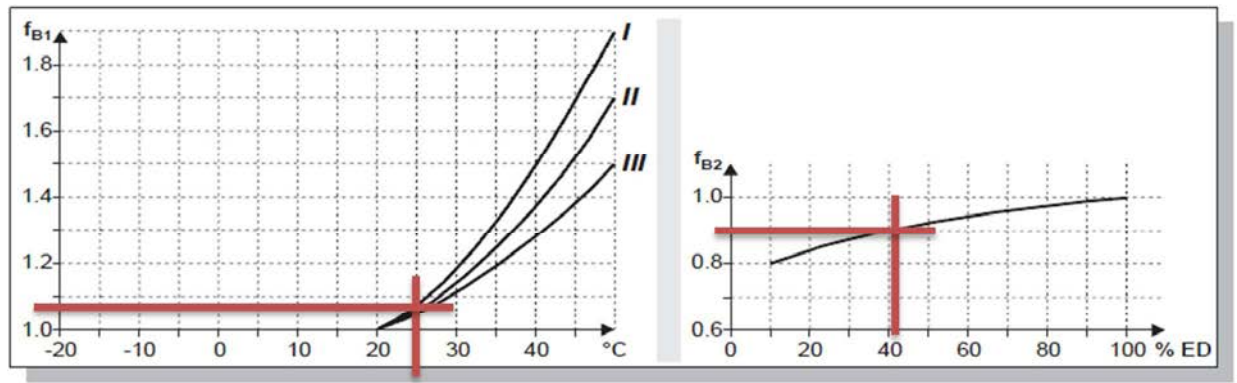


Gráfico 10.2 - Fatores de serviço adicionais para redutores de engrenagens helicoidais.

Para determinar o f_{B1} :

$$Temperatura = 25^{\circ}C^{20}$$

$$Tipo\ carregamento = II$$

Resultando do gráfico anterior (lado esquerdo):

$$f_{B1} = 1,07$$

Para determinar o f_{B2} :

$$ED [\%] = \frac{t_B}{60} \times 100 \quad (10.4)$$

Sendo:

ED – Fator de duração do ciclo

t_B – Período de carga em $[min/h]$

Então, admitindo um caso mais desfavorável, em que a velocidade do moto-redutor foi reduzida para $v = 4 [m/min]$:

$$ED = \frac{25}{60} \times 100 = 41,67 [\%]$$

Resultando do gráfico anterior (lado direito):

$$f_{B2} = 0,91$$

Depois de obtidos todos os fatores intervenientes, o fator global é dado por:

$$f_{Btotal} = f_B \times f_{B1} \times f_{B2} \quad (10.5)$$

$$f_{Btotal} = 1,35 \times 1,07 \times 0,91 = 1,31$$

²⁰ Temperatura admitida para o ambiente em que este moto-redutor irá trabalhar.

Sabendo que:

$$Pot. \acute{u}til = v \times F \quad (10.6)$$

Sendo:

$Pot. \acute{u}til$ – Potência útil [W]

v – velocidade [m/s]

F – Força [N]

Resulta:

$$Pot. \acute{u}til = 0,2 \times 471,6 = 94,32 [W]$$

O rendimento de um par de transmissão de rodas dentadas mais corrente é de:

$$\eta_{parrodadentada/corrente} = 98 [\%]$$

Então:

$$Pot. nominal = Pot. \acute{u}til / \eta_{parrodadentada/corrente} \quad (10.7)$$

$$Pot. nominal = 94,32 / 0,98 = 96 [W]$$

Aplicando o fator de segurança global:

$$Pot. = Pot. nominal \times f_{Btotal}$$

$$Pot. = 96 \times 1,31 = 126,51 [W]$$

Ora, como a próxima potência disponível é de $Pot. = 180 [W]$, é esta a optada.

As rodas dentadas são:

Tabela 10.5 - Linha de cálculo da tabela para determinação da roda-dentada e do moto-redutor.

$Z [unid]$	$D [mm]$	$W desejado [rad/s]$	$n desejado [rot/min]$
30	121,5	3,29	31,44

Tabela 10.6 - Linha de cálculo da tabela para determinação da roda-dentada e do moto-redutor.
(Continuação)

$W real [rad/s]$	$Momento [Nm]$	$n real [rot/min]$	$Erro [\%]^{21}$
3,25	55,00	31,00	-1,393

²¹ O erro permitido é de [-3;2] [%]

Sabendo que o rendimento do redutor de engrenagens helicoidais (tipo R) é de:

$$\eta_{\text{redutor tipo R}} = 98 \text{ [\%]}$$

E que o rendimento do par rodas dentadas e corrente é de:

$$\eta_{\text{par rodadentada/corrente}} = 98 \text{ [\%]}$$

Então, o rendimento global do sistema de transmissão de potência é dado por:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{redutor tipo R}} \times \eta_{\text{par rodadentada/corrente}} \quad (10.8)$$

$$\eta_{\text{total}} = 0,98 \times 0,98 = 0,96 \Rightarrow 96 \text{ [\%]}$$

Esticador

O esticador é um elemento indispensável para uma boa transmissão de potência através de rodas dentadas e corrente. É aplicado pelos seguintes motivos:

- Dependendo do sentido de rotação da roda dentada, um dos tramos da corrente ficará folgado, zona onde deverá ser aplicado o esticador para tencionar a corrente;
- Ao longo do tempo de trabalho da transmissão, vão-se criando folgas. Estas folgas deverão ser igualmente compensadas pela tensão aplicada pelo esticador.

O esticador escolhido foi o Esticador da marca *ROSTA* do tipo SE 18.

Associado a este esticador também foi selecionada uma roda dentada, que é de dentado simples e do tipo N ½"-10S/D.

Chavetas

Para o veio do moto-redutor, $D_{\text{veio moto-redutor}} = 20 \text{ [mm]}$ e para o veio de acoplamento da roda dentada do rolo de desenrolamento a fibra, $D_{\text{veio acop. rolo desenr.}} = 18 \text{ [mm]}$ as dimensões da chaveta e do escatel são definidas na seguinte tabela:

Tabela 10.7 - Dimensões da chaveta e escatel para diâmetros de veios entre 17 e 22 [mm].

d	$> 17 \text{ a } 22$
b	6
h	6
a	3,5
$t_1^{+0,1}$	$d + 2,6$
$s^{+0,1}$	0,1
r	0,4

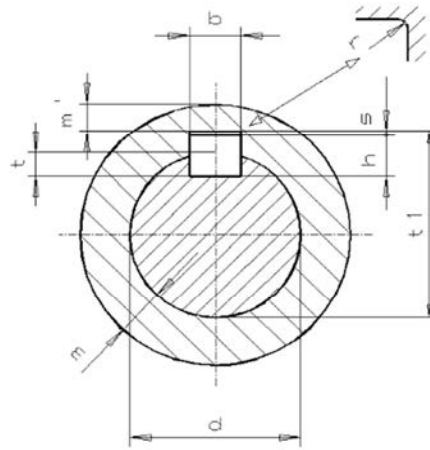


Fig. 10.3 - Ilustração da ligação veio-roda dentada através de chaveta/escatel.

Com a largura b , altura h e altura do escatel no veio t definidos, aplicando a seguinte fórmula:

$$M_t \approx (h - a) \times \frac{d}{2000} \times \sigma_{chaveta} \times L \quad (10.9)$$

Sendo:

 M_t – Momento torsor [Nm]

h – altura da chaveta [mm]

a – altura do escatel do veio [mm]

d – diâmetro do veio [mm]

$$\sigma_{chaveta} - \text{tensão da chaveta utilizada [MPa]}$$

Considerando a chaveta maquinada em cubo de aço:

$$\sigma_{chaveta} \leq 100 [MPa]$$

Então, resulta um comprimento do escatel e da chaveta, para o veio de acoplamento do rolo de desenrolar:

$$55 \approx (6 - 3,5) \times \frac{18}{2000} \times 100 \times L$$

$$L \approx 25 [mm]$$

Para o veio do moto-redutor:

$$55 \approx (6 - 3,5) \times \frac{20}{2000} \times 100 \times L$$

$$L \approx 22 \text{ [mm]}$$

No entanto, o moto-redutor já trás um conjunto chaveta/escatel predefinido e que sobredimensiona a ligação, como as exigências da ligação são igualmente cumpridas, será considerada a ligação predefinida do moto-redutor que têm as seguintes dimensões:

$$b = 6 \text{ [mm]}$$

$$h = 6 \text{ [mm]}$$

$$a = 3,5 \text{ [mm]}$$

$$L = 32 \text{ [mm]}$$

ANEXO B: Nota de cálculo do sistema pneumático

O sistema pneumático aplicado na máquina representa uma etapa importante no processo uma vez que vai permitir a criação de pré-impregnados com diferentes pressões aplicadas, determinando consequentemente a quantidade de resina que este irá conter depois desta etapa.

Para os cálculos seguintes foi escolhido um regulador de pressão da Metalwork – Precision Pressure Regulator with exhaust flow, serie GS 1/8”. Este regulador de pressão permite um intervalo de regulação de pressões de $p = [0; 8] [Bar]$, no entanto, como a pressão útil do circuito pneumático do INEGI está limitada a aproximadamente $p_{m\acute{a}x} = 7 [Bar]$, esta será a pressão máxima considerada.

Ora, para cada cilindro a força máxima exercida será:

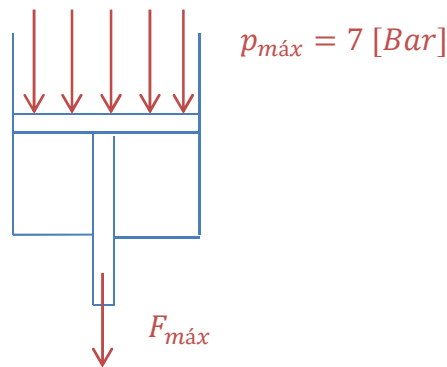


Fig. 10.4 - Esquema de forças para o acionamento do cilindro pneumático.

Com:

$$p = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (10.10)$$

Sendo:

p – Pressão [Pa]

$F_{m\acute{a}x}$ – Força máxima exercida por um cilindro pneumático [N]

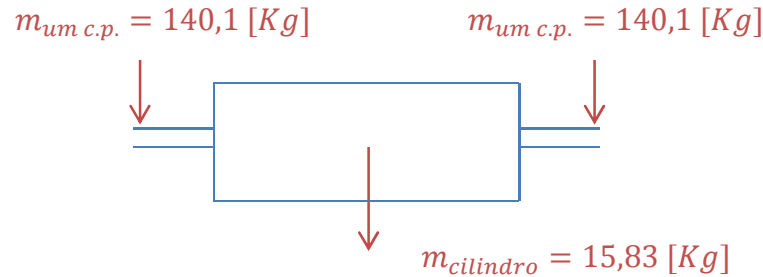
A – Área [m^2]

Obtenho assim:

$$F_{m\acute{a}x} = 700000 \times \pi \times 0,025^2 = 1374,45 [N]$$

Que resulta numa massa de 140,107 [Kg] por cilindro. Como são dois a acionar simultaneamente e na mesma direção a massa total é de 280,2 [Kg].

O diagrama de forças seguinte ilustra a força total que será aplicada no pré-impregnado sabendo que o cilindro de guiamento inferior (onde este terá contato) é rígido, indeformável e fixo, não permitindo nenhuma translação, apenas rotação.



Através da equação de equilíbrio estático em y :

$$\sum F_y = 0 \quad (10.11)$$

$$F_y = 140,1 \times 2 + 15,83 = 296,03 \text{ [Kg]}$$

Verifica-se que a força total aplicada no pré-impregnado quando os cilindros pneumáticos forem atuados com a pressão máxima da rede é $F_{total} = 296,03 \times 9,81 = 2904,05 \text{ [N]} = 2,9 \text{ [kN]}$

O regulador de pressão só funciona no sentido do acionamento do cilindro pneumático para esmagar o pré-impregnado, portanto, a recolha da haste é feita sempre à pressão máxima existente na rede, vou considerar: $p_{máx} = 7 \text{ [Bar]}$. Desta forma, verificar-se-á a capacidade de recolha dos cilindros pneumáticos sabendo que a massa do cilindro usando aço inoxidável é de aproximadamente (recorrendo às potencialidades do *Solidworks*) $m_{cilindro} = 15,83 \text{ [Kg]}$.

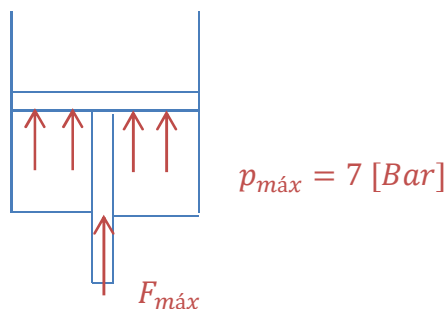


Fig. 10.5 - Esquema de forças para a recolha do cilindro pneumático.

Então:

$$F_{m\acute{a}x} = 700000 \times \pi \times (0,025 - 0,005)^2 = 879,646 [N]$$

Que resulta numa massa de 89,67 [Kg] por cilindro. Como são dois a acionar simultaneamente e na mesma direção a massa total é de 179,34 [Kg] o que é bastante superior à força que têm de vencer por par, que é maioritariamente o peso do cilindro usado para o esmagamento do pré-impregnado e mais alguns elementos de baixo peso como as chumaceiras e porcas.

$$F_{m\acute{a}x \text{ par cilindros pneumáticos}} = 179,34 [Kg] > m_{cilindro} = 15,83 [Kg]$$

ANEXO C: Nota de cálculo dos rolos de matéria-prima

Tendo em vista a reutilização dos rolos de desenrolamento e enrolamento de matéria-prima, deverá ser feita a verificação à resistência estática para as novas cargas em causa.

Como os rolos são todos iguais, considera-se apenas um rolo com um caso de carga crítico, que corresponde ao enrolamento do pré-impregnado.

Dando uso às potencialidades do programa *ANSYS* seguem-se as seguintes etapas:

1. Criação da geometria no *Solidworks* e implementação no *ANSYS*.

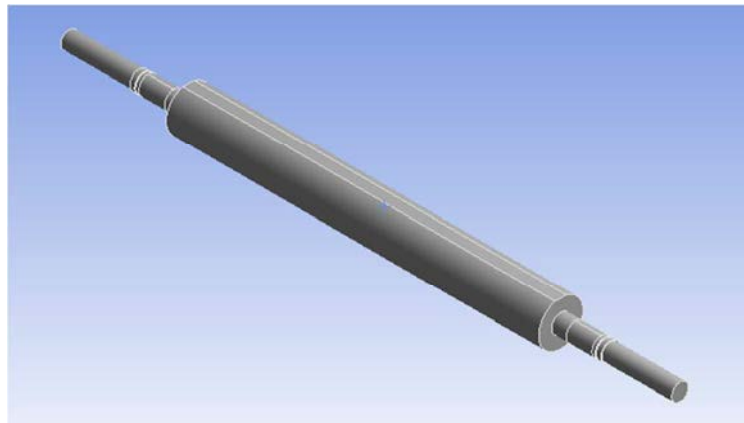


Fig. 10.6 - Geometria em estudo.

2. Aplicação de uma malha. Foi formada por elementos tetraédricos e gerada automaticamente pelo programa. Com um número total de elementos de 2809 e um número total de nós de 4658. O material que define a peça é um aço com as seguintes características: $\rho = 7300 [kg/m^3]$, $E = 1,9 \times 10^{11} [N/m^2]$, $\nu = 0,26 [N/A]$ e $\sigma_{ced} = 448082500 [N/m^2]$.

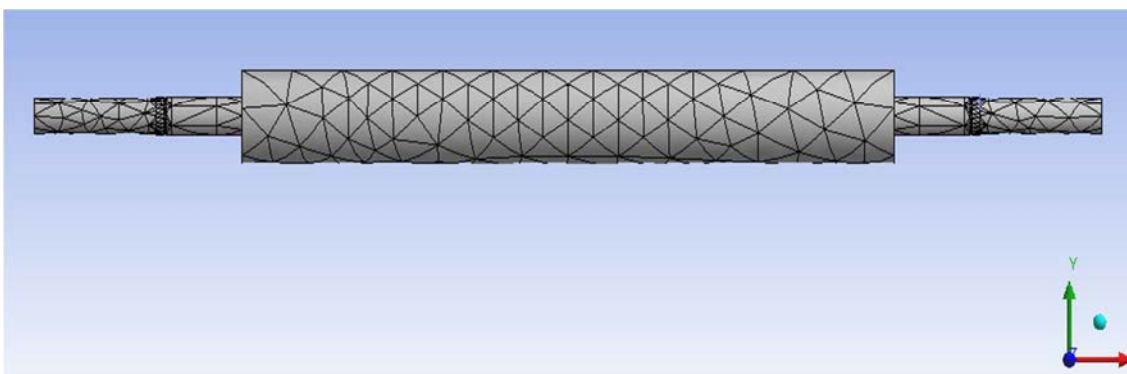


Fig. 10.7 - Malha gerada.

3. Determinação das condições de fronteira. Neste caso corresponderão aos rolamentos no apoio da estrutura. No rolo corresponde a um apoio radial de 180°.

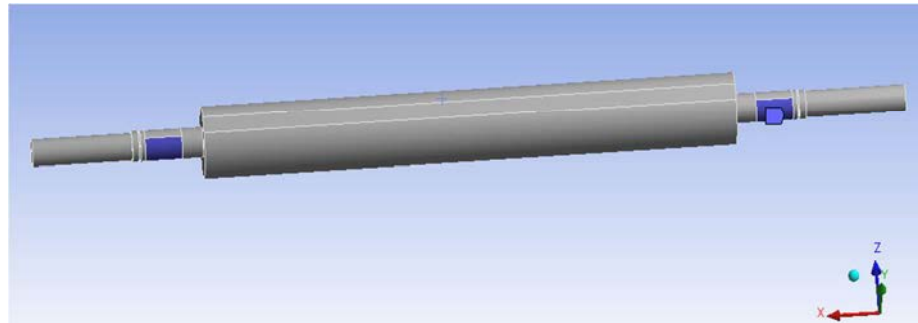


Fig. 10.8 - Condições de fronteira do rolo.

4. Determinação das condições de carregamento. Neste caso corresponderá à força vertical da matéria-prima $P_{rolo\ enr} = 288,7 \text{ [N]}$ e com sentido contrário ao das reações dos apoios.

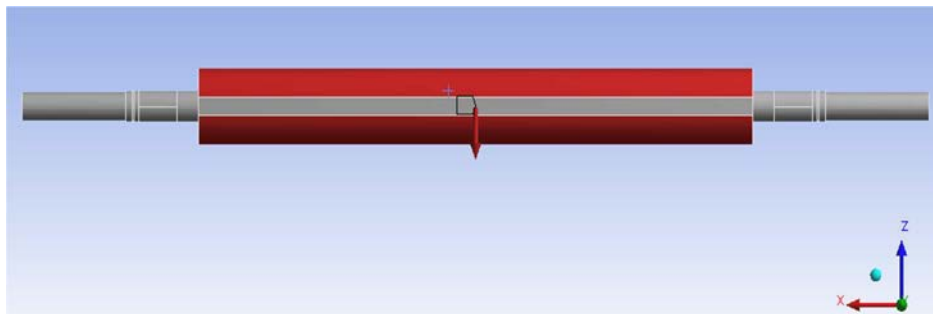


Fig. 10.9 - Condições de carregamento do rolo.

Depois de determinadas todas as variáveis necessárias para definir o caso em estudo, prossegue-se para a simulação. Da simulação vão-se retirar:

- Deformação total.

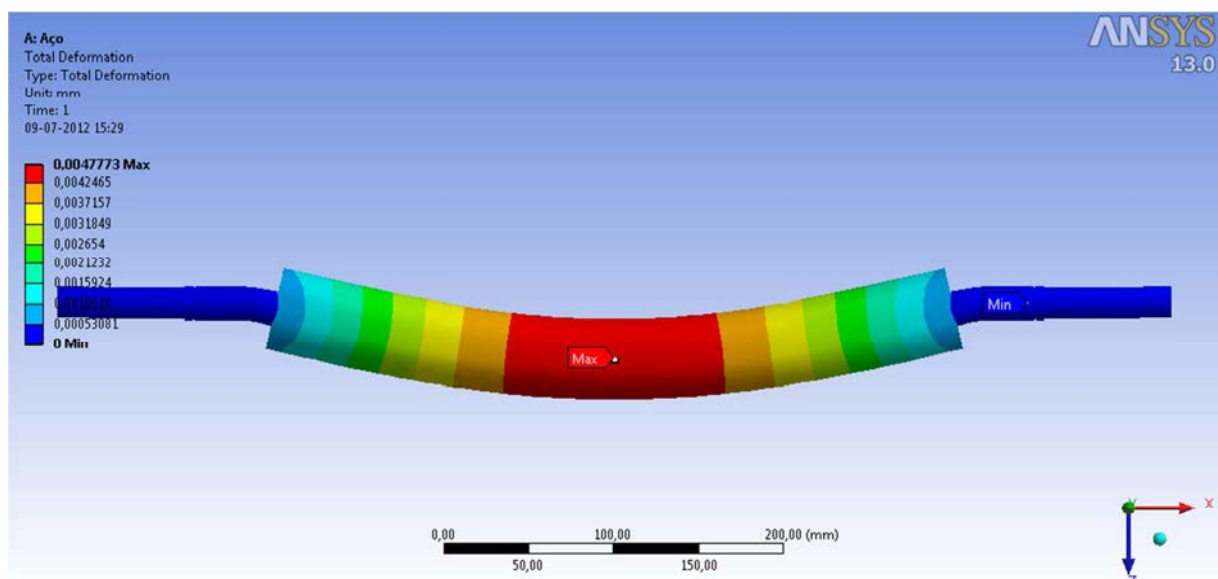


Fig. 10.10 - Deformação total segundo as condições definidas anteriormente.

- Tensão equivalente segundo von-Mises.

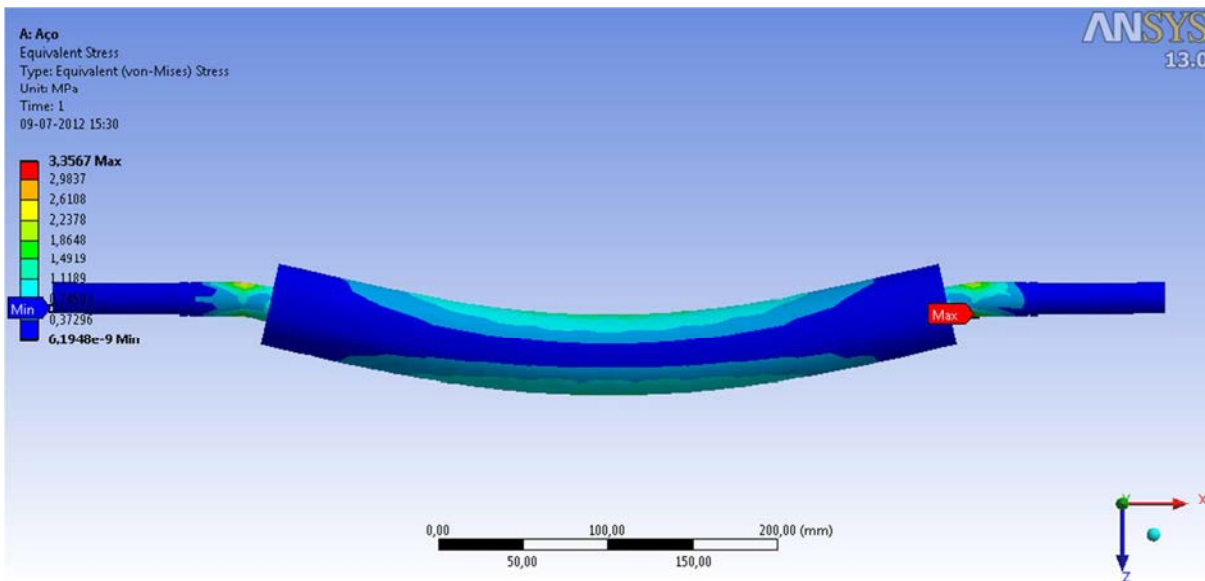


Fig. 10.11 - Tensão equivalente de von-Mises segundo as condições definidas anteriormente.

Como era esperado, a deformação máxima localiza-se no centro do rolo e a tensão máxima nos dois apoios dos rolamentos. A deformação máxima é de 0,0047773 [mm] o que representa uma deformação muito reduzida, apesar de na figura parecer elevada devido ao coeficiente de proporcionalidade do programa. A tensão máxima é de 3,3567 [MPa]. A deformação e tensão mínima localizam-se nas extremidades do rolo, como era esperado.

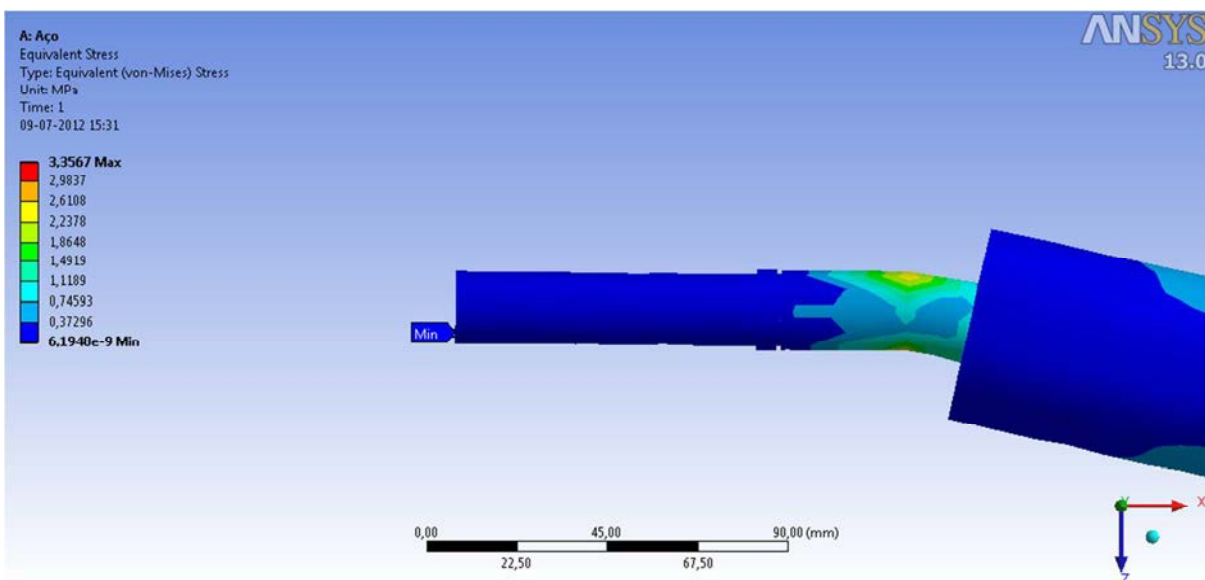


Fig. 10.12 - Localização da tensão máxima e mínima segundo as condições definidas anteriormente.

ANEXO D: Ciclo de *set-up* e funcionamento

O objetivo da máquina é produzir pré-impregnados com a maior fiabilidade possível. Desta forma foram introduzidos alguns elementos variáveis, ou seja, podem ser alterados para permitirem um ajuste do pré-impregnado final e são: rolo para extração do excesso de resina (controlado pneumaticamente com regulação de pressão), rolo para aplicação do filme protetor superior e inferior (controlado pneumaticamente com regulação de pressão), cilindro para regular a camada de resina a aplicar (controlado por fuso) e moto-redutor com regulador de velocidade (através de um variador de frequência).

Antes de se acionarem qualquer um destes elementos é preciso seguir-se um procedimento de configuração da máquina:

1. Introduzir o rolo de fibra no sistema de desenrolamento;
2. Fazer passar o tecido de fibra através de todo o caminho da máquina. Notar que no fim (sistema de enrolamento) este deve ser fixo juntamente com a película de proteção superior e inferior. É ilustrado de seguida;

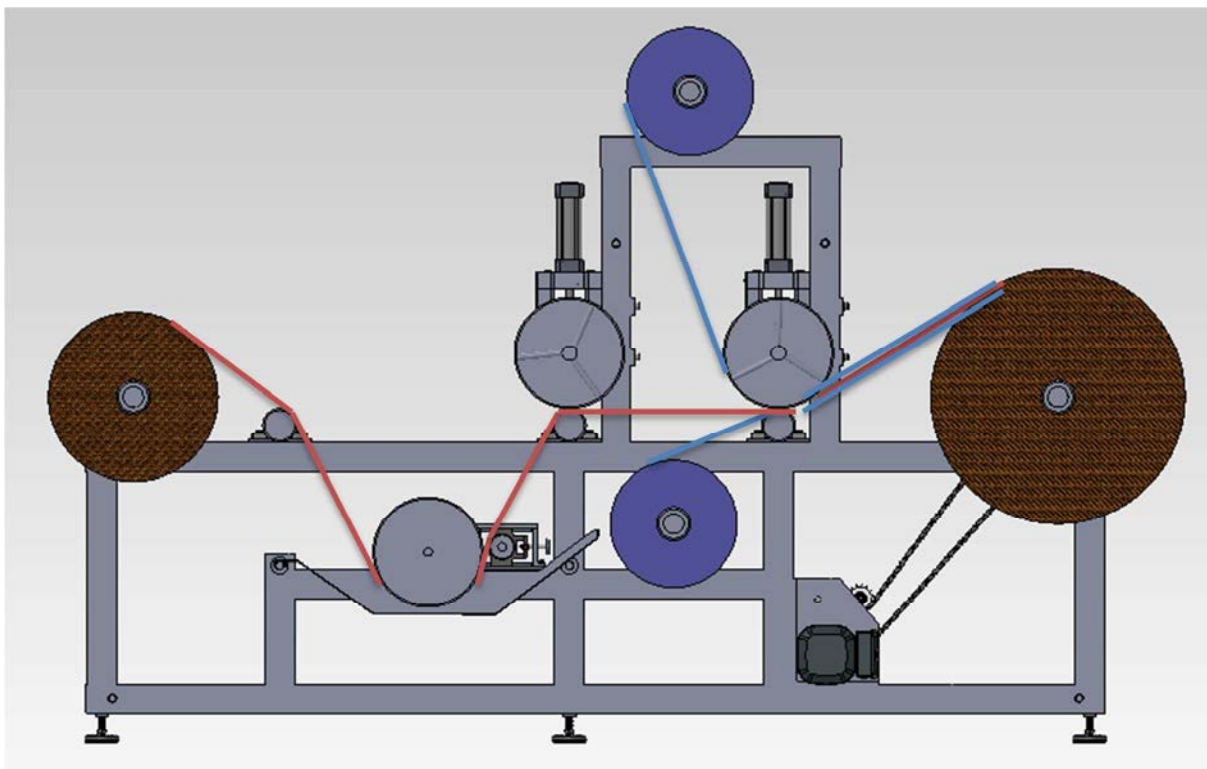


Fig. 10.13 - Vista lateral da máquina com corte longitudinal.

3. Introduzir a resina na tina;
4. Ajustar o rolo de impregnação através do fuso e ajustar ambos os rolos do sistema de compressão para consolidação do pré-impregnado e aplicação dos filmes, através do regulador de pressão dos cilindros pneumáticos;
5. Acionar o moto-redutor e regular a velocidade pretendida.

ANEXO E: Complemento ao capítulo 5.3.2.2. – “Limpeza e cuidados da máquina”

De seguida apresentam-se as imagens em pormenor das melhorias descritas anteriormente. São:

- Proteção das extremidades dos rolos com beiras que impeçam a propagação da resina para fora da zona de trabalho e especialmente para as chumaceiras, permitindo que este seja reaproveitada ao cair novamente na tina;

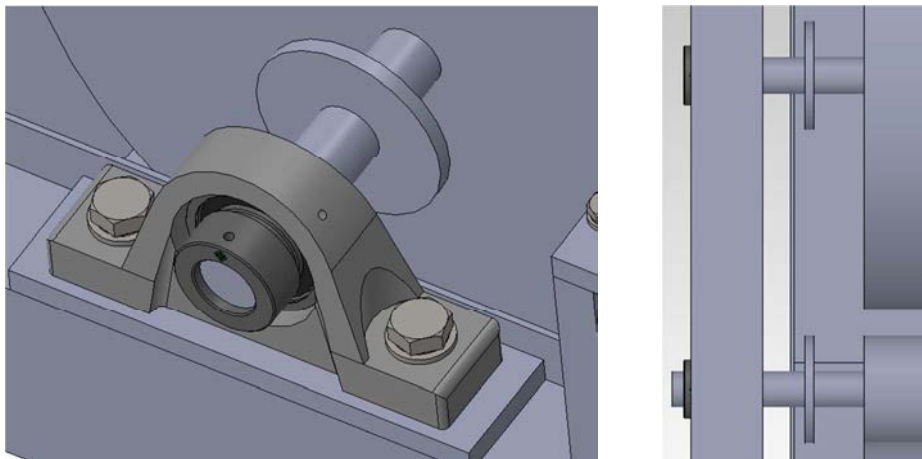


Fig. 10.14 - Na imagem do lado esquerdo é possível notar a aba soldada ao tubo para impedir a propagação da resina até a chumaceira. Na imagem do lado direito verifica-se que as abas estão soldadas numa posição que permita que a resina volte a cair dentro da tina para reaproveitamento.

- Os rolos de compressão ajustados pneumaticamente são reaproveitados mas deverão ser fechados nos topos para impedir que, por escorrimento, a resina entre para o interior destes;

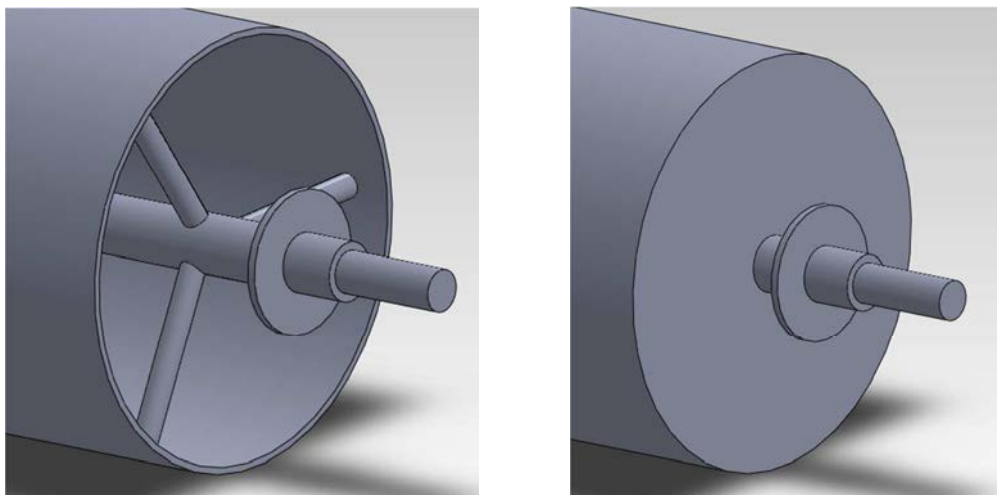


Fig. 10.15 - Na imagem do lado esquerdo encontra-se a geometria antiga da qual a aba para o impedimento do escorrimento também não faz parte. Na imagem do lado direito encontra-se a geometria atual com as melhorias implementadas.

- Desenho da tina foi feito com maiores tolerâncias nas laterais e prolongamento na frente por forma a receber parte da resina removida pelos rolos de compressão;

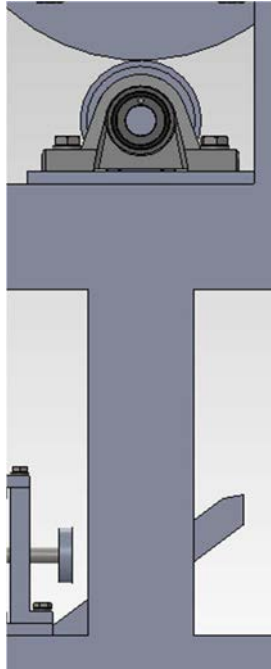


Fig. 10.16 - De notar o prolongamento da tina em baixo, que ultrapassa a zona da compressão primária.

- O desenho da tina e o suporte desta foram pensados para que seja retirada mesmo que contenha resina para limpeza;

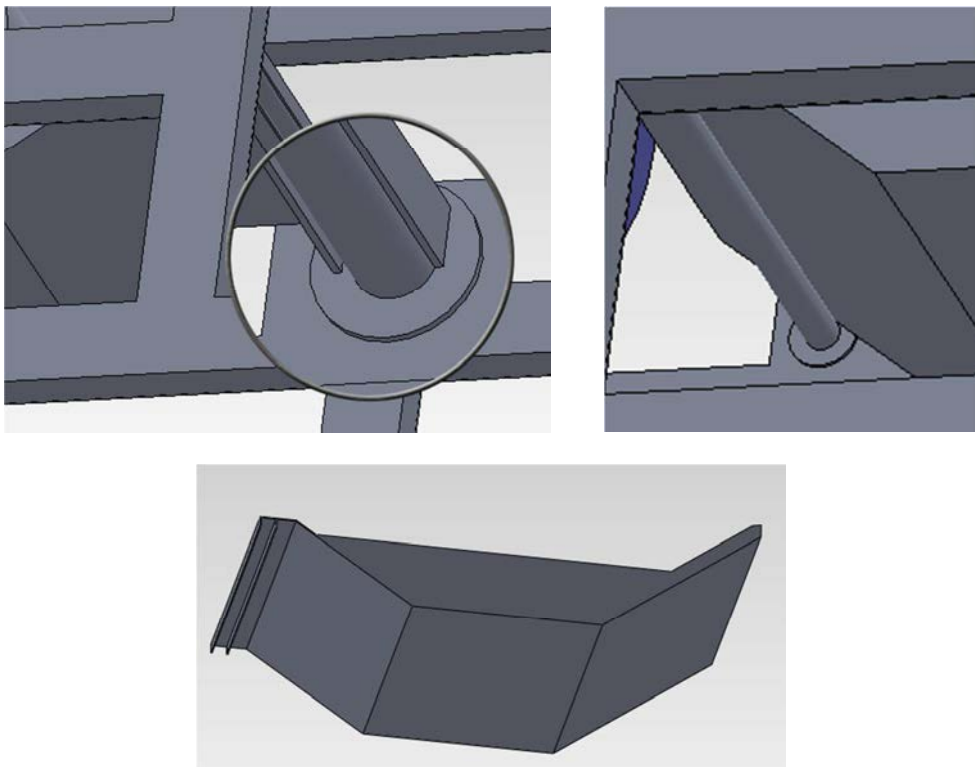


Fig. 10.17 - Na imagem superior esquerda verifica-se o apoio da tina com restrição de movimentos lineares. Na imagem superior direita nota-se o apoio livre do outro lado da tina, permitindo todo o tipo de movimentos. Na imagem inferior tem-se uma visualização generalizada da tina.

ANEXO F: Lista de peças e balanço do reaproveitamento conseguido

Na tabela que se apresenta de seguida são listadas todas as peças que constituem a máquina. Dada a importância do reaproveitamento de algumas peças quando foi desenvolvida a máquina, estas serão destacadas também na seguinte lista de peças.

Conjunto	Peça	Referência/medidas/outros	Quantidade	Estado
Sistema Pneumático	Cilindros Pneumáticos	Metalwork ISO 6431-VDMA	4	Reaproveitado
	Válvulas Comando	Metalwork Valves Series 70, hand operated, 90° Lever 5/2 1/8"	2	Reaproveitado
	Válvulas Reguladoras Caudal	Metalwork MRF NMC6 1/8"	2	Reaproveitado
	Válvulas Reguladoras Pressão	Metalwork Precision Pressure Regulator with exhaust flow, serie GS 1/8"	2	Novo
	Manómetros	Metalwork MAN L 6-6	2	Reaproveitado
	Ligações Saídas Cilindros Pneumáticos	Metalwork Central Tee, Male, Technopolymer (RL35) $D = 6 [mm]$	4	Reaproveitado
	Ligações Entradas Cilindros Pneumáticos	Metalwork	4	Reaproveitado
	Ligações Saídas Válvulas Comando Pneumáticas	Metalwork Rotary Elbow, Male, Cylindrical (R31) $D = 6 [mm]$	2	Reaproveitado
	Ligações Entradas Válvulas Comando Pneumáticas	Metalwork Rotary Elbow, Male, Cylindrical (R31) $D = 8 [mm]$	2	Reaproveitado
Sistema Compressão	Chumaceiras Cilindros Pressão	INA PTUE 25	4	Reaproveitado
	Porca Hexagonal união	ISO 4035 – M16-N	8	Reaproveitado

	Chumaceira/Haste			
	Cilindro Pressão	$D = 260 [mm]$ $L = 308 [mm]$ Maquinado/Soldado	2	Reaproveitado (Alterado)
	Guiamento Vertical Haste (p/ fixação estrutura)	Maquinado	4	Reaproveitado (Alterado)
	Parafuso umbrako	ISO 4762 M10 x 90-32N	8	Reaproveitado
	Anilhas planas	ISO 7089-10	8	Reaproveitado
	Guiamento Vertical Haste (s/ fixação estrutura)	Maquinado	4	Novo
	Suporte Horizontal Cilindros Pneumáticos	Maquinado	4	Reaproveitado (Alterado)
	Parafuso umbrako	ISO 4762 M12 x 50-50N	8	Reaproveitado
	Proteção Acrílico	Conformada	3	Reaproveitado
	Proteção Acrílico	Conformada	1	Novo
	Parafuso cabeça botão	ISO 7380 – M5 x 12-12N	3	Reaproveitado
	Parafuso cabeça botão	ISO 7380 – M5 x 12-12N	1	Novo
	Ligação Inferior Guiamentos Verticais Haste	Maquinado	4	Novo
	Parafuso umbrako	ISO 4762 M12 x 50-50N	8	Novo
Sistema Guiamento	Chumaceiras Cilindros Guiamento	INA PASE 20-N	6	Reaproveitado
	Parafuso hexagonal	ISO 4017 – M10 x 30-N	12	Reaproveitado
	Anilha plana	ISO 7089-10	12	Reaproveitado
	Cilindro Guiamento	$D = 80 [mm]$ $L = 350 [mm]$ Maquinado/Soldado	3	Reaproveitado (Alterado)
Sistema Impregnação	Chumaceiras Cilindro Impregnação	INA PASE 20-N	2	Novo
	Parafuso hexagonal	ISO 4017 – M10 x 30-N	4	Novo
	Anilha plana	ISO 7089 – 10	4	Novo

	Cilindro Impregnação	$D = 260 [mm]$ $L = 308 [mm]$ Maquinado/Soldado	1	Novo
	Chumaceira Regulada por Fuso	INA PTUE 20	2	Novo
	Caixa guiamento chumaceira regulada por fuso	Maquinado	1	Novo
	Parafuso hexagonal	ISO 4014 – M6 x 30 x 18-N	6	Novo
	Anilha plana	ISO 7089 – 6	6	Novo
	Fuso especial	Maquinado	2	Novo
	Tina	Chapa Soldada	1	Novo
Apoios Matéria-prima (s/ travamento)	Apoio	Maquinado	4	Reaproveitado
	Freio externo	DIN 471 – 19 x 1,2	4	Reaproveitado
	Parafuso umbrako	ISO 4762 M10 x 45-45N	8	Reaproveitado
	Anilha plana	ISO 7089-10	8	Reaproveitado
	Rolamento Esferas	NSK 6204-Z	8	Reaproveitado
Apoios Matéria-prima (c/ travamento)	Apoio	Maquinado	4	Reaproveitado
	Freio externo	DIN 471 – 19 x 1,2	4	Reaproveitado
	Parafuso umbrako	ISO 4762 M10 x 45-45N	8	Reaproveitado
	Anilha plana	ISO 7089-10	8	Reaproveitado
	Disco Travamento	Maquinado	4	Reaproveitado
	Parafuso embutido cabeça plana	ISO 4026 – M4 x 10-N	8	Reaproveitado
	Parafuso hexagonal	ISO 4017 – M8 x 60-N	4	Reaproveitado
	Porca	ISO 4034 – M8-N	4	Reaproveitado
	Parafuso umbrako	ISO 4762 M8 x 80-20N Soldado	4	Reaproveitado
	Mola	---	4	Reaproveitado
	Calços	---	8	Reaproveitado
	Parafuso cabeça embutida	ISO 10642 – M5 x 12-12S	8	Reaproveitado
	Rolamento Esferas	NSK 6204-Z	8	Reaproveitado

Cilindros Desenrolamento/ Enrolamento	Cilindro Desenrolamento	$D = 48 [mm]$	3	Reaproveitado
	Cilindro Enrolamento	$D = 48 [mm]$	1	Reaproveitado
	Ajuste axial rolo matéria-prima	Maquinado	8	Reaproveitado
	Parafuso embutido cabeça plana	ISO 4026 – M5 x 20-N	8	Reaproveitado
Sistema Transmissão Potência	Esticador de corrente	ROSTA Tipo SE 18 06011002	1	Novo
	Roda dentada do esticador de corrente	ROSTA N ½”-10S/D 06510002	1	Novo
	Anilha	DIN 127 - A 8	1	Novo
	Parafuso	DIN EN 24017 - M8x25	1	Novo
	Corrente	Renold $n^{\circ}111044$ - Simples $Passo = 12,7 [mm]$	1	Novo
	Rodas dentadas transmissão	Renold ISO 606 – FuroSimplesAço $Z = 30$ $D = 121,5 [mm]$ $Passo = 12,7 [mm]$	2	Novo
	Moto-redutor	SEW-Euro Drive $P = 180 [W]$ código: RF07DRS71S4	1	Novo
	Anilha plana	DIN 125 – A 6.4	4	Novo
	Fuso	Maquinado e soldado na chapa do moto-redutor $D = 6 [mm]$	4	Novo
	Porca autoblocante	DIN EN ISO 7040 – M6 - N	4	Novo
	Chaveta moto- redutor	DIN 6885 $L = 6 [mm]$ $C = 32 [mm]$	1	Novo
	Chaveta roda- dentada	DIN 6885 $L = 6 [mm]$	1	Novo

		$C = 25 [mm]$		
Estrutura Máquina	Estrutura	Tubular quadrada soldada $espessura = 1 [mm]$	1	Novo
	Tubos união	Tubular circular soldada $D_{ext} = 20 [mm]$ $D_{int} = 16 [mm]$ $L = 420 [mm]$	4	Novo
	Pés	System Plast 170475	6	Novo
	Porcas Pés	ISO 4034 – M16-N	12	Novo

Tabela 10.8 - Lista de peças da máquina desenvolvida.

ANEXO G: Vistas 3D do modelo desenhado em *SolidWorks*

De seguida apresentam-se duas vistas 3D da máquina de Prepreg projetada. A primeira apresenta uma vista lateral da máquina com todos os módulos da máquina que vêm em função dos conjuntos descritos na lista de peças. Na segunda imagem apresenta-se uma vista em perspectiva dimétrica para uma visualização generalizada da máquina.

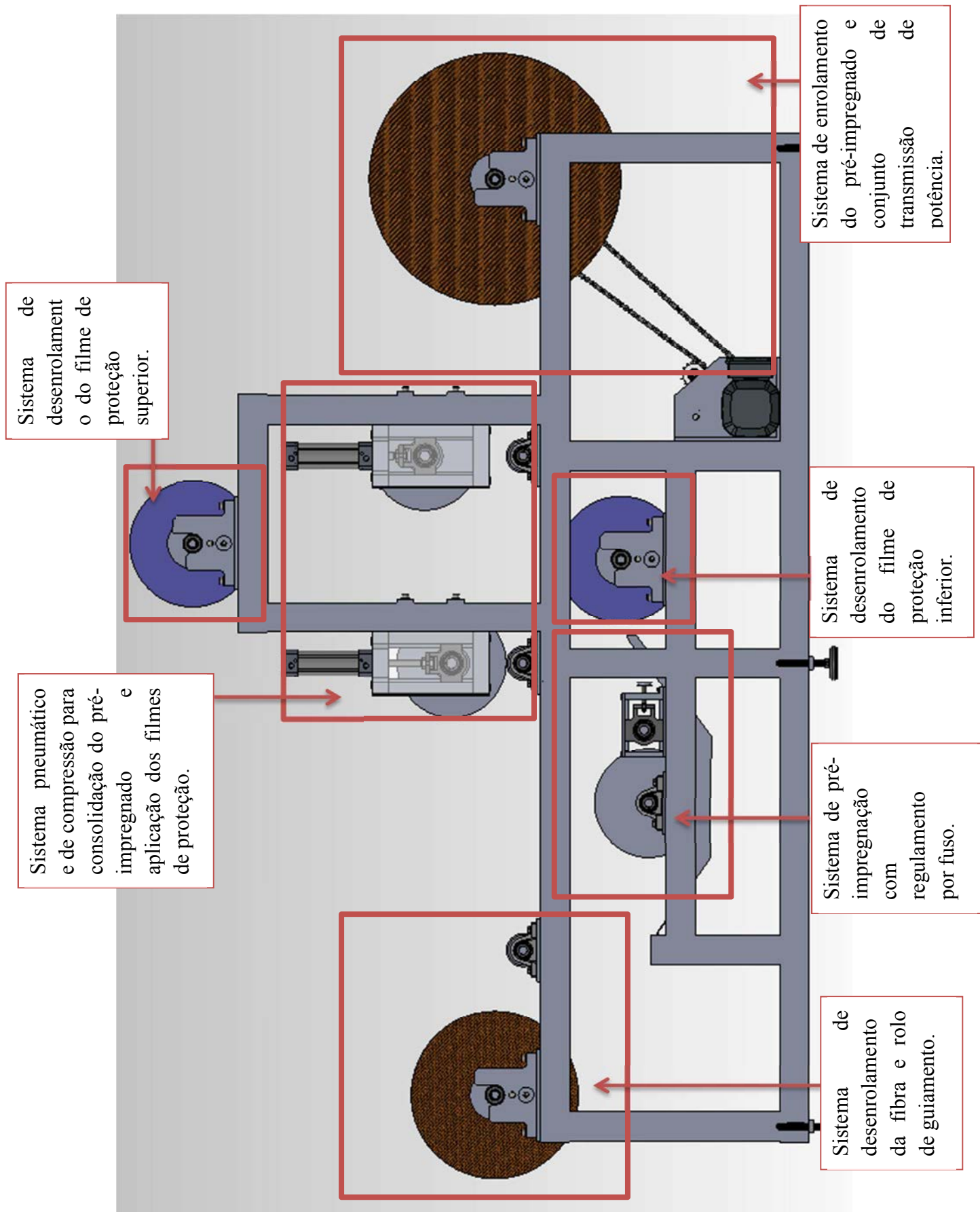


Fig. 10.18 - Vista lateral com conjuntos identificados.

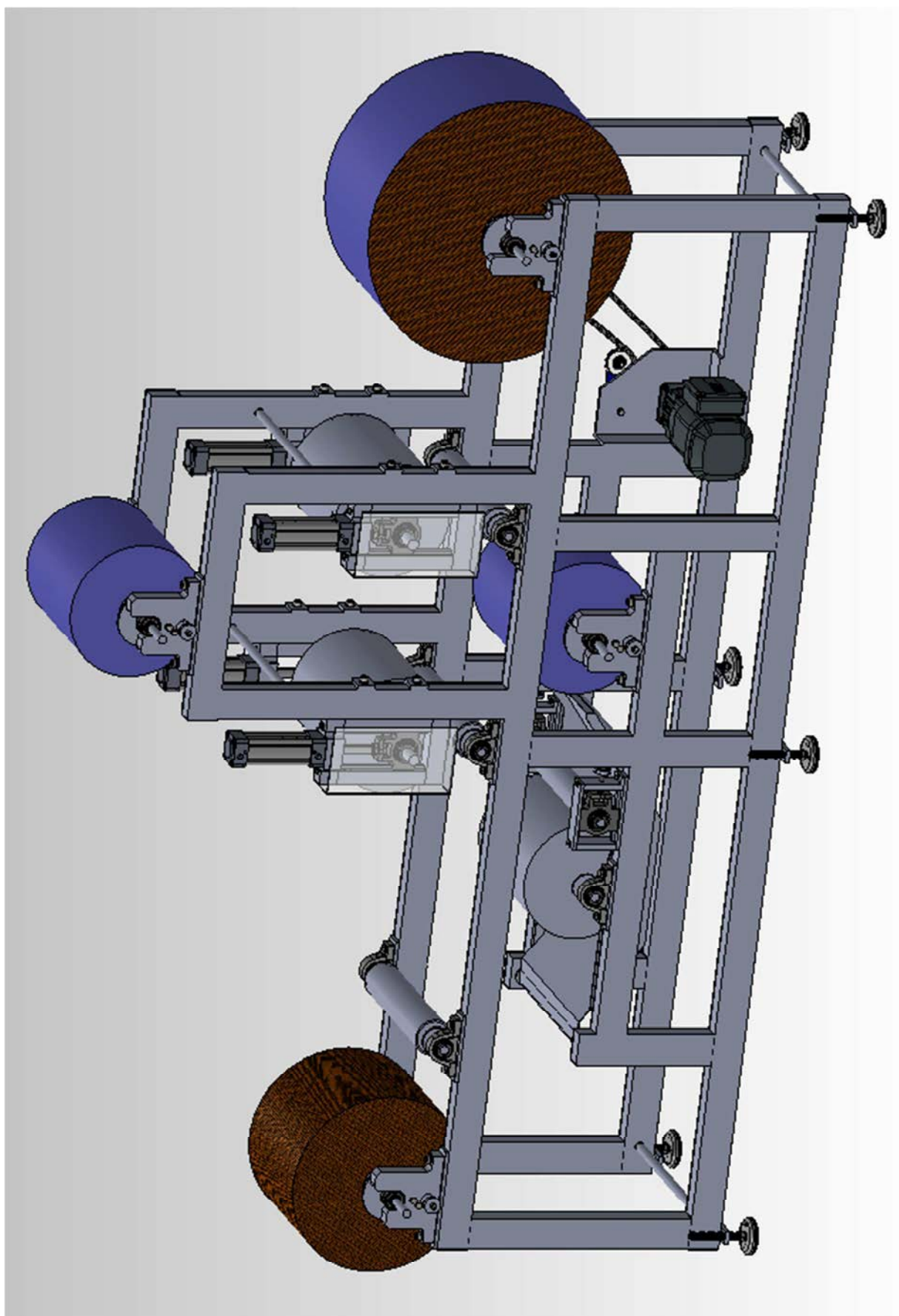


Fig. 10.19 – Vista em perspectiva dimétrica da máquina PrePreg.

ANEGO H: Fichas técnicas das resinas utilizadas



SR 1500

Epoxy laminating system

Description

This modified epoxy resin has been formulated to be cristalization free and low toxicity.

The formulation bases of SR 1500 are bisphenol A and F

This epoxy system has very good wet-out, degazing properties and an excellent adhesion to all type of reinforcements (glass, aramid, carbon, polyester...)

Adjustable working time depending on the choice of the hardener

Respecting the ratio resin / hardener, the hardeners are mixable by weight, to achieve the most adapted reactivity for the application.

Glass transition : 75 - 81 °C

The parts can be in service after 7 to 14 days @ 23°C for the hardeners **SD 2507**, **SD 2505** and **SD 2503**.

Post-cure @ a minimum of 40°C for a Tg above 55°C.

Developped for : ship building, aeronautic, automotive prototypes, tool making.

Other applications : putty for coating with microspheres, syntactic core material, casting volume depending on the hardeners.(see technical data sheet of **SD 4871** or **SD 597.20**)

Epoxy resin SR 1500

Aspect / color	Light yellow liquid	
Viscosity (mPa.s)	@ 20 °C	2 100
	@ 25 °C	1 180
Density (g/cm ³)	@ 20 °C	1.13
Storage	Cristalization free	

Hardeners SD 250x or SD 6131

Hardeners		SD 2507	SD 2505	SD 2503	SD 6131
Type of reactivity		"fast"	"standard"	"slow"	"very slow"
Aspect / color		Yellow liquid	Yellow liquid	Yellow liquid	Red liquid
Viscosity (m.Pas)	@ 20 °C	1 800	280	180	80
	@ 25 °C	1 400	210	125	55
Viscosity of the mix (mPa.s)	@ 20 °C	1 700	800	700	650
	@ 25 °C	1 160	550	510	470
Density (g/cm ³)	@ 20 °C	1.09	1.00	1.00	0.98
Mixing ratio by weight		100 g / 33 g	100 g / 33 g	100 g / 33 g	100 g / 31 g
Mixing ratio by volume		100 ml / 35 ml	100 ml / 37 ml	100 ml / 37 ml	100 ml / 36 ml



Specific applications

SR 1500 / SD 2507 :

Thin laminate, low temperature curing (10 – 15°C)
Quick repairs or bondings
Putty for structural foam core, sandable coating.

SR 1500 / SD 2505 , SD 2503:

Standard laminating systems : all type of part sizes, tooling, fillet joints...

SR 1500 / SD 6131

Large parts and thick laminate, injection, casting of small volume
Long working time on the laminate
Post-cure temperature : 55°C minimum

Other formulations based on the SR 1500

SR 1500 i : Fire resistant M1

SR 1500 / SD 597.20.: Casting of large volume

Reactivities of the mixes SR 1500 / SD 250. and SD 6131

Systems		1500 / 2507	1500 / 2505	1500 / 2503	1500 / 6131
Gel time TECAM on 150 g mix :					
	@ 25 °C	14'	26'	1 h 10'	5 h 30'
	@ 20 °C	19'	54'	3 h 10'	8 h
Pot-life on 500 g mix :					
	@ 25 °C	13'	24'	47'	6 h 10'
	@ 20 °C	16'	35'	1 h	8 h 45'
Working time on 3 layers of E glass fabric of 300 g/m ² :					
	@ 25 °C	1 h 15'	2 h 15'	3 h 30'	7 h
	@ 20 °C	2 h	3 h 15'	5 h	9 h

Curing

SD 2507 and **SD 2505** have been developed to offer excellent mechanical properties after a post –cure at moderate temperature

	SD 2507 SD 2505	SD 2503	SD 6131
Time to wait @ 20 °C before post-cure	2 to 4 hours	24 hours	48 hours
Minimum post-cure cycle	2 to 7 days @ 20 °C	14 days @ 20 °C	20 hours @ 55 °C
Advised post-cure cycle	2 to 7 days @ 20 °C	14 days @ 20 °C	20 hours @ 55 °C
	Or	Or	
	12 hours @ 40 °C	24 hours @ 40 °C	
	Or	Or	
	6 hours @ 60 °C	16 hours @ 60 °C	



Packaging (in Kg)

Kits	Resin SR 1500	hardeners SD 250x
260.00	1 x 200	6 x 10
43.00	1 x 33	1 x 10
15.60	1 x 12	1 x 3.6
4.30	1 x 3.3	1 x 1
1.30	1 x 1	1 x 0.3
	Resin SR 1500	Hardener SD 6131
320	240	8 x 9.3
40	30	9.3

Safety data- (EEC classification 67 / 548 / EEC Directive)

Reference	Symbol	Danger	Risk phrase
SR 1500		Xi : Irritating	36/38 51/53 43
		N : Dangerous for the environment	
SD 2503 SD 2505		C : Corrosive	21/22 34 43
SD 2507		T : Toxic	20 24/25 35 43
SD 6131		T : Toxic	45 48/20/21/22 37 43

The informations that we give by writing or verbally, in the context of our technical assistance and our trials, do not engage our responsibility. We advice the users of SICOMIN's epoxy system, to verify by some practical trials if our products are suitable for the envisaged processes and applications. The use, the implementation and the transformation of the supplied products, are not under our controle and your responsibility only will respond for it. If our responsibility should nevertheless be involved, it would be, for all the damages, limited to the value of the goods supplied by us and implement by you. We guaranty the non-reproachable quality of our products, in the general context of sales and delivery.



Mechanical properties on cast resin :

SR 1500 /	SD 6131				SD 2503		SD 2505			SD 2507			
	48 h AT + 24 h @ 40 °C	48 h AT + 20 h @ 50 °C	48 h AT + 16 h @ 60 °C	48 h AT + 8 h @ 80 °C	14 days AT	24hAT + 16 h @ 60 °C	14 days AT	24 h AT + 24 h @ 40 °C	24 h AT + 8 h @ 60 °C	14 days AT	24 h AT + 24 h @ 40 °C	24 h AT + 8 h @ 60 °C	
Curing cycles													
Tension													
	Modulus of elasticity	3160	3130	3000	2820	3350	2860	3100	2900	2900	3300	3200	3140
	Maximum resistance	67	69	81	78	77	71	77	74	74	80	80	80
	Resistance at break	67	69	81	75	72	65	71	68	68	74	72	74
	Elongation at max.load	2.5	2.6	4.3	4.8	3.6	4.7	3.6	4.4	4.7	3.7	3.9	4.3
Elongation at break	2.5	2.6	4.4	6.2	5.4	8.0	4.5	6.0	7.4	4.5	4.7	5.6	
Flexion													
	Modulus of elasticity	3360	3330	3070	3010	3300	2760	3200	3100	3100	3450	3400	3300
	Maximum resistance	111	119	120	124	125	123	115	115	117	123	121	123
	Elongation at max. resistance	3.5	4.8	5.5	6.0	4.6	6.4	4.8	5.4	5.6	4.8	5.0	5.4
	Elongation at break	3.5	5.6	7.9	7.6	7.2	7.5	7.7	8.0	7.9	7.8	8.1	8.4
Compression													
	Compressive yield strength	115	112	110	105								
	Offset compressive yield	5.7	6.1	7.0	6.2								
Choc Charpy													
	Resilience	15	16	23	28	12	30	25	30	26	19	27	24
Glass transition													
	Tg1	67	74	88	95	55	70	56	68	72	55	69	73
	Tg1 max.				99		76			76			75

AT : Ambient Temperature

Tests carried out on cast resin, without prior degassing, between steel plates.

Procedures carried out in accordance with AFNOR norms:

Tension : NF T51-034

Flexion : NF T51-001

Compression: NF T51-101

Charpy Impact Strength: NF T51-501

Glass transition : DSC Tg 1 = 1 °point at 10 °C / minute



Si Preg

Système pour preg "in situ" à froid

Système époxy bicomposant
Sans solvant ni diluant réactif
Avant mélange, les composants sont stables au stockage au moins 1 an.
Imprégnation de tissus et évolution du tack à température ambiante.
Post cuisson possible à partir de 80 °C et jusqu'à 150 °C

Durcisseur:

	Réactivité	Flow
KTA 21 :	Lent	Très bon

Application :

Préimprégnation de tissus au contact ou par machine, enroulement filamentaire...
Pour production de grandes pièces sous presse à chaud

Résine époxy SR 121 :

SR 121		
Apparence		Liquide visqueux
stockage		Ne cristallise pas
Extrait sec		100 %
Couleur		Jaune clair Gardner <2
Densité	20 °C	1.176 ± 0.004
<i>Pycnomètre ISO 2811-1</i>		
Viscosité (mPa.s)	15 °C	24 500 ± 2000
<i>Rhéomètre</i>	20 °C	9 800 ± 500
<i>CP 50 mm</i>	25 °C	4 500 ± 500
<i>Gradient de cisaillement 10 s⁻¹</i>	30 °C	2 300 ± 200
	40 °C	750 ± 100

Durcisseur KTA 21

KTA 21		
Aspect		Liquide visqueux
Couleur		Blanc
Réactivité type		Lent
Extrait sec		100 %
Stockage		Stable chimiquement (1 an) Décante après un stockage prolongé – Agiter avant emploi
Viscosité		
<i>Rhéomètre</i>	20 °C	6 000 ± 1 000
<i>CP 50 mm</i>	25 °C	5 000 ± 1 000
<i>Gradient de cisaillement 10 s⁻¹</i>		
Densité	20 °C	1.14 ± 0.01
<i>Pycnomètre ISO 2811-1</i>		



Ratio de mélange :

	SR 121 / KTA 21
En poids	100 g / 21 g
En volume	100 ml / 21.6 ml

Evolution du tack:

SR 121 / KTA 21: laisser à 30 °C pendant 24 heures ou 12 heures à 40 °C

Temps de gel / sec au toucher* :

Température	SR 121 / KTA 21	
	Temps de gel	Sec au toucher
150 °C	1' 23''	1' 53''
130 °C	3'	4' 30''
120 °C	5' 40''	8' 40''
110 °C	11'	20'
100 °C	20'	38'
90 °C	36'	1 h 37'
80 °C	1 h 20'	3 h 10'
70 °C	-	-

* Après maturation, le mélange SR 121 / KTA 21 est immédiatement mis à la température

Post-cuisson recommandée*:

Température	SR 121 / KTA 21
70 °C	
80 °C	24 heures
90 °C	8 heures
100 °C	4 heures
110 °C	2 heures
120 °C	1 heure
130 °C	15'
150 °C	8'

* Après maturation, le mélange SR 121 / KTA 21 est immédiatement mis à la température

Durée de vie:

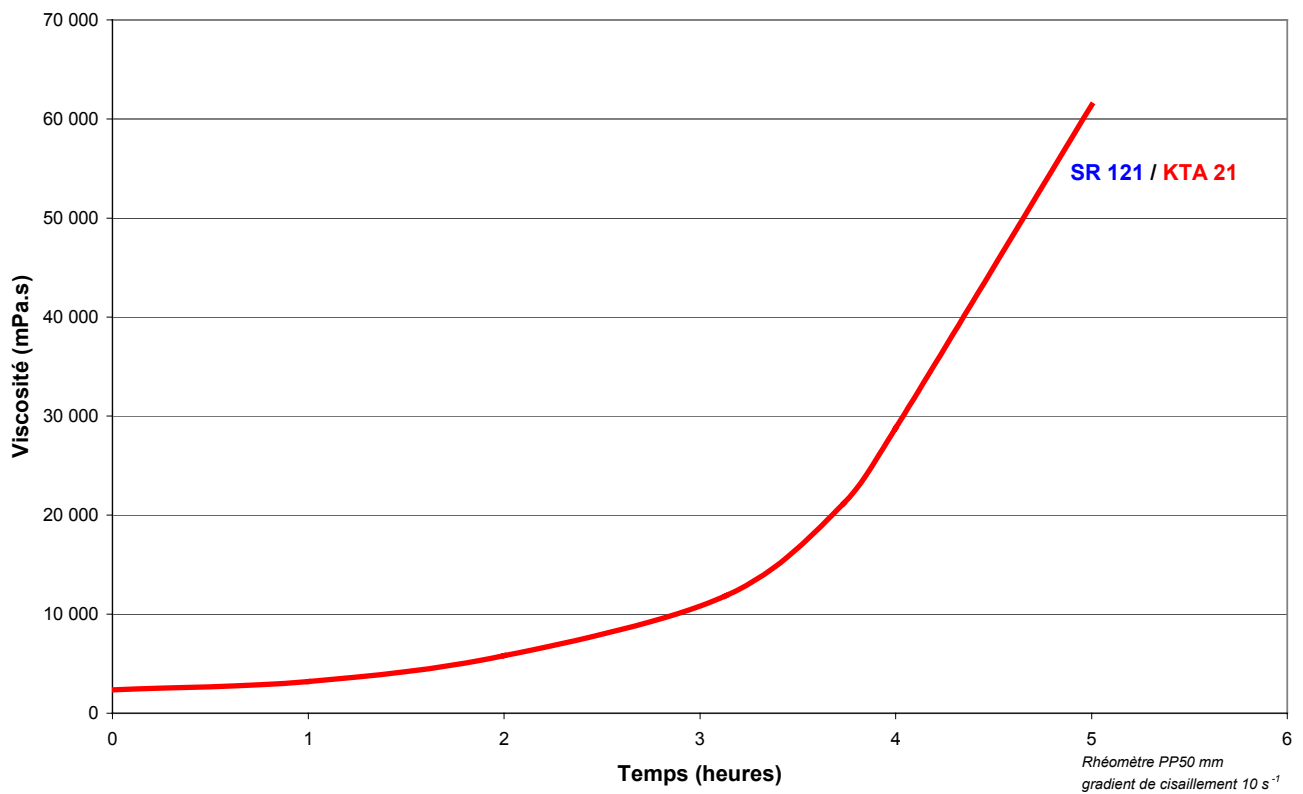
- SR 121 : 2 ans à 20-25°C dans les conditionnements d'origine bien fermés
- KTA 21 : 1 an à 20-25°C dans les conditionnements d'origine bien fermés
- SR 121 / KTA 21 : supérieure à un mois à 25°C

Attention:

- KTA 21 : Décante après un stockage prolongé, agiter avant emploi.
Les amines contenues réagissent au gaz carbonique et à l'humidité ambiants. Tenir les seaux correctement fermés lorsque non utilisés

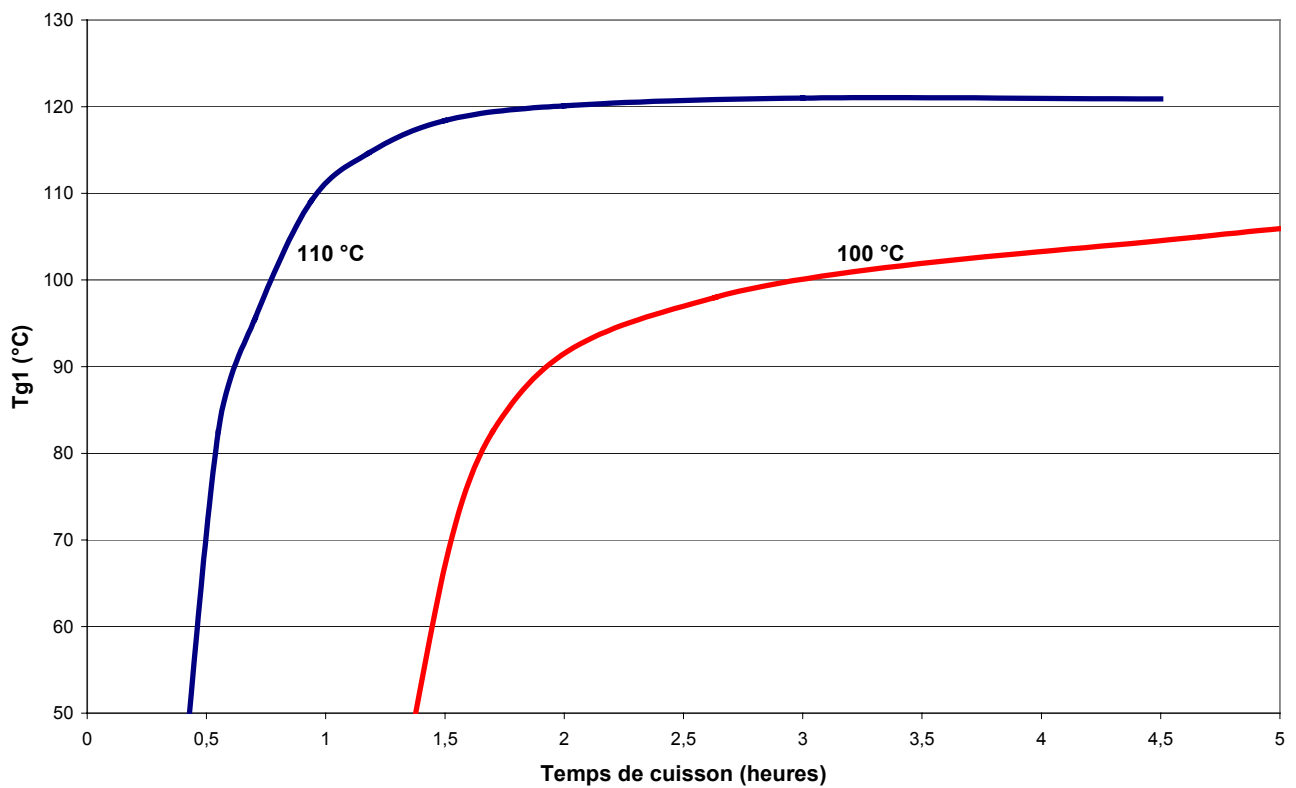
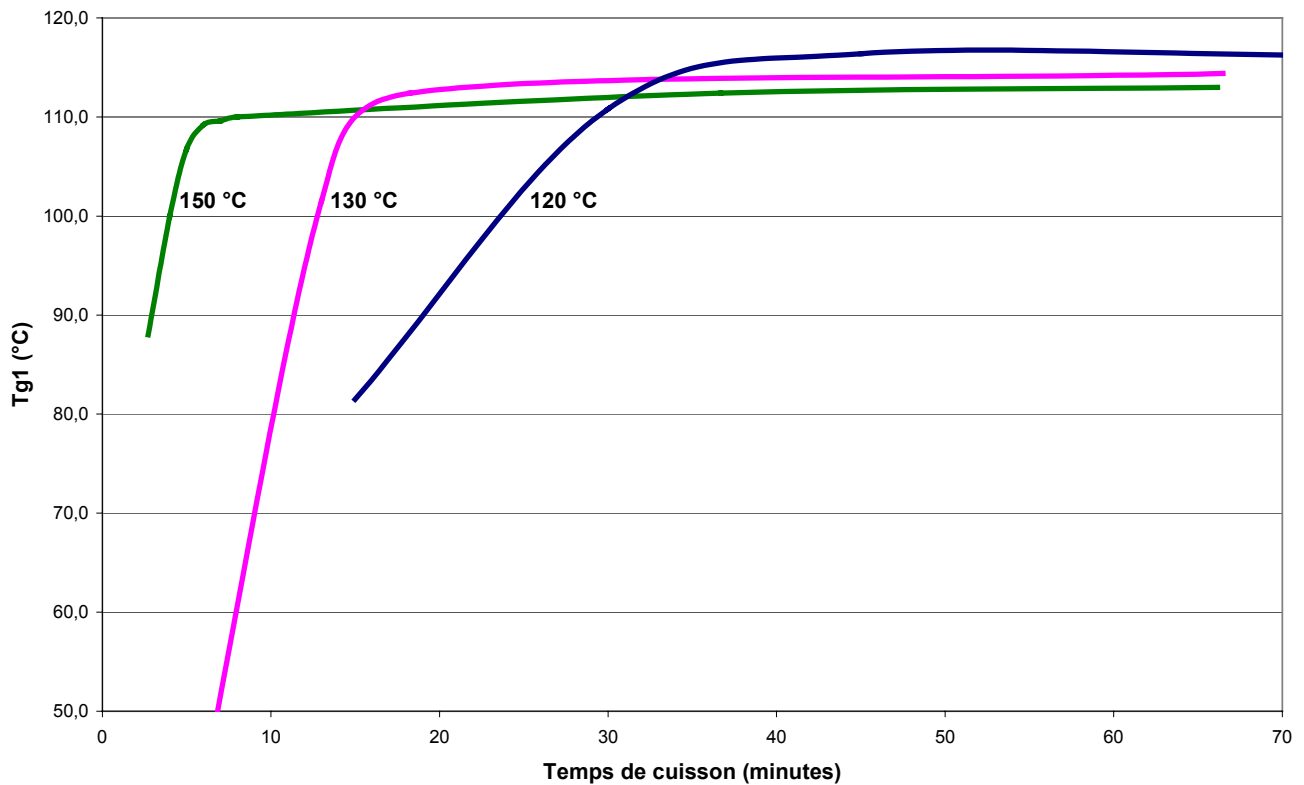


SR 121 / KTA 21 – Evolution de viscosité à 25 °C en film de 1 mm





SR 121 / KTA 21 – cinétique sur plaque chaude



Transition vitreuse:

ISO 11357-2 : 1999 -5°C/180°C sous azote
Tg1 ou Onset : 1er point à 20 °C/mn
Tg1 maximum ou Onset : deuxième passage

ANEXO I: Documento técnico das análises TGA, DTA e DSC



Laboratório de Catálise e Materiais, Laboratório Associado LSRE/LCM
Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, Univ. Porto

RELATÓRIO DE ANÁLISE

CLIENTE: Tânia Estêvão, INEGI, Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas

TIPO de ANÁLISE: Análise Térmica (TG, DTG, DSC)

AMOSTRA: Fibra de Juta

DATA de ENTRADA: 16 de Maio de 2012

ANALISTA: Juliana Sousa

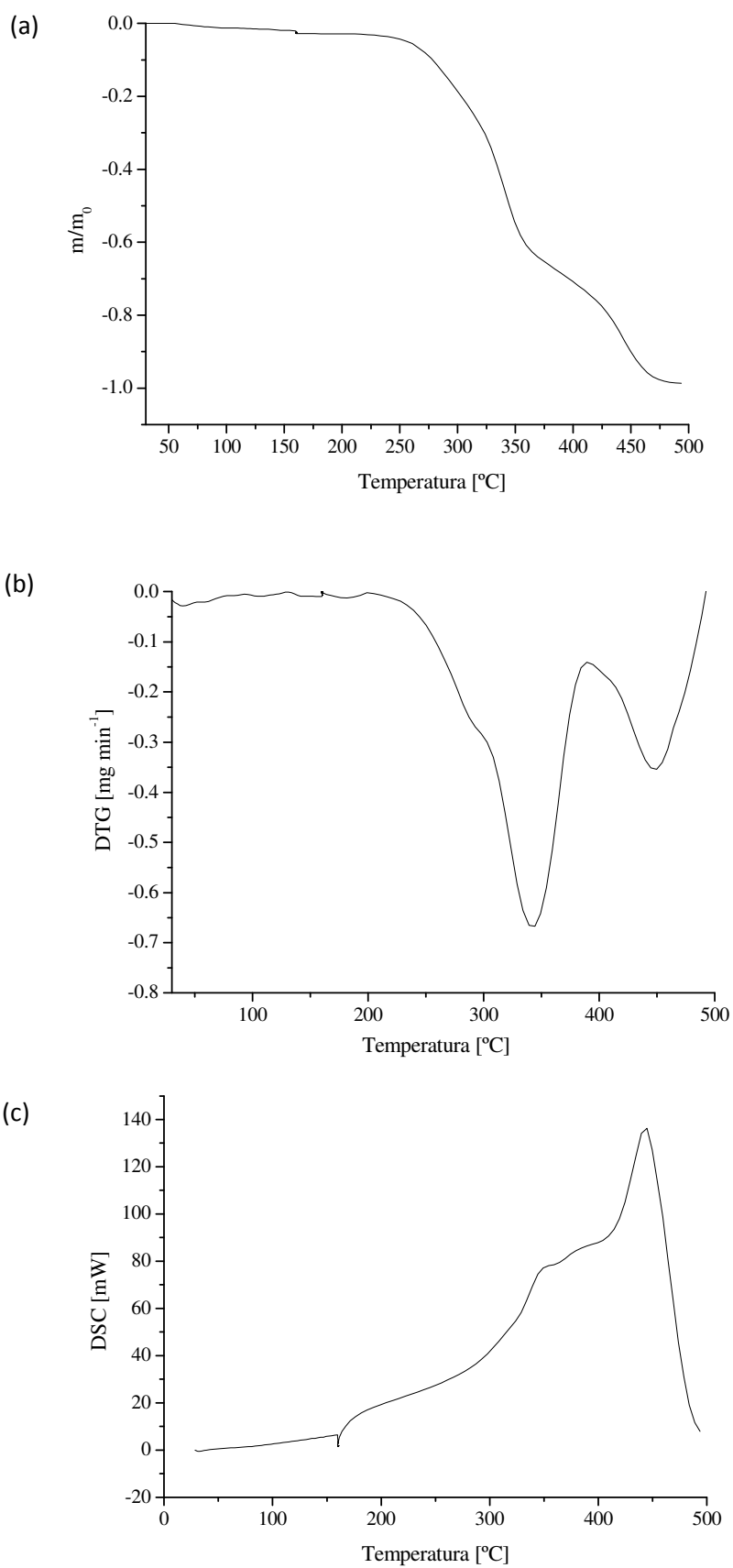
Condições experimentais e resultados

Os ensaios foram realizados num equipamento de análise térmica Netzsch STA 409 PC Luxx com aquisição de dados pelo programa STA 409 PC.

Os ensaios consistiram no aquecimento da amostra (7,5 mg) em ar (caudal: $50 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$) de 30°C até 160°C a 5°C min^{-1} , mantendo esta temperatura durante 1 hora. Ao fim deste tempo aumentou-se a temperatura até 500°C , com uma velocidade de aquecimento de $10^\circ\text{C min}^{-1}$.

Durante o aquecimento da amostra até 160°C ocorreu uma perda de massa de 0.15 mg (2% da massa inicial); durante o patamar a 160°C o material perde 0.05 mg (0.67% da massa inicial). A perda de massa total durante o ensaio foi de 7.396 mg (98,61% da massa inicial).

A curva derivada (DTG) apresenta dois picos. O primeiro pico, entre 178°C e 371°C , corresponde a uma perda de massa de 4.61 mg (61.47% da massa inicial) e o segundo pico, entre 396°C e 496°C , corresponde a uma perda de massa de 2.16 mg (28.88% da massa inicial). Dois picos (exotérmicos) são também observados na curva DSC, confirmando que há duas etapas distintas na combustão do material.



(a) Curva de TG, (b) Derivada do TG e (c) Curva de DSC