

Estudo das propriedades mecânicas de compósitos verdes reforçados com lã de ovelha e pêlo de cão da Serra da Estrela

Versão final após defesa

Cláudia Sofia Baptista Antunes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Química Industrial
(2º ciclo de estudos)

Orientadora: Prof. Doutora Joana Magalhães Gonçalves Costa Vieira
Coorientadora: Prof. Doutora Ana Paula Nunes de Almeida Alves da Costa
Coorientador: Prof. Doutor André Ferreira Costa Vieira

Dezembro de 2024

Declaração de Integridade

Eu, Cláudia Sofia Baptista Antunes, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M12628 no 2º ciclo de estudos do curso de química industrial da Faculdade de Ciências, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 13/12/2024

Cláudia Antunes

Agradecimentos

A realização deste projeto não teria sido possível sem o apoio de várias pessoas. Sendo assim, gostaria de agradecer:

À Professora Doutora Joana, orientadora deste projeto, pela orientação, disponibilidade e inúmeras contribuições que permitiram a concretização deste projeto.

À Professora Doutora Ana Paula, por ter coorientado este projeto e por ter produzidos os vários tecidos têxteis sem os quais não seria possível realizar este trabalho.

Ao Professor Doutor André pela disponibilidade, sugestões e ajuda prestada durante a realização deste projeto.

À Sra. Ângela pela fiação manual das fibras de pêlo do cão Serra da Estrela.

Ao Sr. Francisco pelo desenvolvimento do tear e pela tecelagem dos tecidos.

Às pessoas presentes no laboratório pela simpatia e prontidão em ajudar sempre que foi necessário.

Aos meus pais por acreditarem em mim, pelo carinho e pelos sacrifícios para que eu chegasse aqui.

Aos meus avós Teresa e Manuel sem os quais nada disto seria possível.

Aos meus amigos pelo apoio ao longo desta etapa.

Obrigada.

Resumo

A consciencialização ambiental levou as indústrias a substituir os produtos derivados de recursos petrolíferos por produtos de origem natural. No setor dos materiais compósitos, a substituição das fibras sintéticas (carbono, vidro, aramida) por fibras naturais, como material de reforço, tem aumentado nos últimos anos.

As fibras naturais são biodegradáveis, têm um custo menos elevado que as fibras sintéticas, possuem uma elevada disponibilidade e apresentam boas propriedades mecânicas que podem ser equiparadas às apresentadas pelas fibras sintéticas.

No presente trabalho produziram-se vários compósitos verdes reforçados com diferentes fibras naturais animais (lã de ovelha e pêlo de cão). Como reforço foram produzidos e utilizados vários tecidos têxteis com diferentes arquiteturas.

Os compósitos produzidos foram sujeitos a ensaios de flexão e de tração de modo a estudar e analisar as suas propriedades mecânicas.

Para além disso, as fibras da lã de ovelha e do pêlo de cão utilizadas foram caracterizadas por Difração de Raios-X (DR-X), e os fios produzidos a partir dessas fibras foram também sujeitos a ensaios de tração de modo a avaliar as suas características físico-mecânicas.

Por fim, foi realizada uma análise crítica dos resultados obtidos nos vários ensaios mecânicos realizados. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o número de fios e o diâmetro das agulhas utilizadas durante a produção do reforço têm um impacto significativo nas propriedades mecânicas dos compósitos. Os compósitos reforçados com lã de ovelha apresentam valores mais elevados para a resistência à tração, resistência à flexão e módulo de *Young* do que os reforçados com pêlo de cão (aumento médio de 45,16%, 36,97% e 72,99%, respetivamente). Além disso, foi possível observar que os compósitos reforçados com tecidos feitos por tecelagem e por crochê possuem os valores de resistência à tração, resistência à flexão e módulo de *Young* mais elevados. Os compósitos reforçados com tecidos feitos por tecelagem apresentam os valores mais elevados de deformação à rutura/1ª falha e de tenacidade.

Palavras-chave: Fibras animais, lã de pêlo de cão, lã de ovelha, compósitos verdes, propriedades mecânicas

Abstract

Environmental awareness has led industries to replace products derived from oil resources with products of natural origin. In the composites materials sector, the replacement of synthetic fibres (e.g.: carbon, glass, and aramid) with natural fibres as a reinforcement material has increased in recent years.

Natural fibres are biodegradable, cost less than synthetic fibers, are highly available and have good mechanical properties than can be compared to those of synthetic fibers.

In this study, several green composites reinforced with different animal fibres (sheep's and dog wool) were produced. As reinforcement, various textile fabrics with different architectures were produced and used.

The composites produced were subjected to bending and tensile tests to study and analyze their mechanical properties.

In addition, the sheep's wool and dog hair fibres used were characterized by X-Ray Diffraction (X-RD), and the yarns produced from these fibres were also subjected to tensile tests to assess their physical and mechanical characteristics.

At the end, a critical analysis of the results obtained in the various mechanical tests was carried out. From the results obtained, we can conclude that the number of yarns and the diameter of the needles used during the production of the reinforcement have a significant impact on the mechanical properties of the composites. The composites reinforced with sheep's wool exhibit higher values of tensile strength, flexural strength and *Young's* modulus than those reinforced with dog wool (average increases of 45,16%, 36,97% and 72,99%, respectively). It was also possible to observe that the composites reinforced with fabrics made by weaving and crochet exhibit the highest values of tensile strength, flexural strength and *Young's* modulus. The composites reinforced with fabrics made by weaving exhibit the highest values for deformation at the break/first failure and toughness.

Keywords: Animal fibres, dog wool fibre, sheep wool fibre, green composites, mechanical properties

Índice

Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de figuras	xv
Lista de tabelas	xxi
Lista de acrónimos e símbolos	xxiii
1. Enquadramento e objetivos da dissertação	1
1.1. Enquadramento da dissertação	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização da dissertação	4
2. Estado da arte	7
2.1. Materiais compósitos	8
2.1.1. Biocompósitos	8
2.2. Reforço	9
2.2.1. Fibras sintéticas	10
2.2.2. Fibras naturais	11
2.2.2.1. Fibras animais	14
2.2.3. Tecidos têxteis	19
2.3. Matriz	23
2.3.1. Matrizes poliméricas	24
2.3.1.1. Resina epóxi	26
2.3.2. Resinas poliméricas de base biológica	30

2.3.2.1. Resina epóxi de base biológica	31
2.4. Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais	34
2.4.1. Comportamento mecânico	35
2.4.2. Interface	37
2.5. Processos de fabrico de compósitos	38
2.6. Aplicações dos compósitos poliméricos reforçados com fibras	42
2.6.1. Desafios e perspetivas futuras	43
3. Materiais e métodos	45
3.1. Materiais	46
3.1.1. Fibras	46
3.1.2. Resina	46
3.2. Métodos	46
3.2.1. Caracterização das fibras	46
3.2.2. Cardação das fibras da lã de cão	47
3.2.3. Fiação das fibras da lã de cão	48
3.2.4. Produção dos reforços	50
3.2.5. Produção dos compósitos	52
3.2.6. Testes mecânicos dos compósitos	55
4. Resultados e discussão	61
4.1. Caracterização das fibras	62
4.1.1. Difração de Raios – X (DR-X)	62
4.1.2. Testes de tração dos fios	62

4.1.3. Microscópio Eletrônico de Varrimento (SEM) dos tecidos em crochê feitos a partir da lã de ovelha da Serra da Estrela	66
4.2. Testes mecânicos dos compósitos	68
4.2.1. Testes de tração	68
4.2.2. Testes de flexão	82
4.3. Microscópio Eletrônico de Varrimento (SEM) dos compósitos após os testes de tração	88
5. Conclusões	91
5.1 Apresentação dos resultados	92
5.2. Trabalhos futuros	95
Referências bibliográficas	97
Anexos	105
Anexo A – Ficha técnica da resina SR GreenPoxy 56	106
Anexo B – Gráficos de tensão à tração versus deformação dos fios das fibras utilizados no reforço	112
Anexo C – Gráficos de tensão à tração versus deformação dos compósitos reforçados com tecidos em crochê produzidos a partir dos fios de lã de ovelha	114
Anexo D – Gráficos de tensão à tração versus deformação dos compósitos reforçados com os diferentes tecidos produzidos a partir das duas fibras	116
Anexo E – Gráficos de tensão à flexão versus deformação dos compósitos reforçados com tecidos em crochê produzidos a partir dos fios de lã de ovelha	119
Anexo F - Gráficos de tensão à flexão versus deformação dos compósitos reforçados com os diferentes tecidos produzidos a partir das duas fibras	121
Anexo G – Poster científico “Estudo das propriedades mecânicas de compósitos verdes reforçados com lã de ovelha e pêlo de cão da Serra da Estrela”	124

Lista de figuras

1. Enquadramento e objetivos da dissertação

Figura 1: Número de artigos sobre compósitos reforçados com fibras naturais publicados ao longo dos últimos anos	3
---	---

2. Estado da arte

Figura 2: Esquema da formação de um compósito	8
--	---

Figura 3: Classificação dos biocompósitos	9
--	---

Figura 4: Classificação dos compósitos de acordo com o tipo de reforço	10
---	----

Figura 5: Fibras naturais	12
----------------------------------	----

Figura 6: Estrutura química da queratina	15
---	----

Figura 7: Estrutura da fibra da lã de pêlo de cão	16
--	----

Figura 8: Estrutura da fibra da lã de ovelha	17
---	----

Figura 9: Esquema do tecido plano	20
--	----

Figura 10: Diferentes tipos de padrões dos tecidos planos	20
--	----

Figura 11: Pontos utilizados no tricô	23
--	----

Figura 12: Diferentes tipos de matrizes usadas em compósitos	23
---	----

Figura 13: Grupo oxirano	27
---------------------------------	----

Figura 14: Reação da epiclorigrindrina e o bisfenol A	28
--	----

Figura 15: Processo de cura de uma resina epóxi	28
--	----

Figura 16: Fases da cura de uma resina termoendurecível	29
--	----

Figura 17: Síntese do óleo de soja epoxidado	32
---	----

Figura 18: Estrutura química do cardanol	32
---	----

Figura 19: Reação de epoxidação do cardanol	33
--	----

Figura 20: Estrutura química do ácido gálico	33
Figura 21: Reação de epoxidação do ácido gálico	33
Figura 22: Reação de síntese da lenhina epoxidada	34
Figura 23: Orientação das fibras nos compósitos	36
Figura 24: Tratamentos para modificação da superfície das fibras	38
Figura 25: Moldação manual	39
Figura 26: Moldação manual sob vácuo	39
3. Materiais e métodos	
Figura 27: Fios das fibras usadas no reforço – (a) fio de lã de ovelha; (b) fio de lã de pêlo de cão	47
Figura 28: Tambor rotativo	47
Figura 29: Fibras da lã de cão após a cardação	48
Figura 30: Processo da fiação manual das fibras de lã do cão da Serra da Estrela - (a) Início da alimentação do pêlo ao fuso; (b) Enrolamento do fio contínuo no mandril do fuso; (c) Mandril do fuso cheio de fio de lã de cão	49
Figura 31: Novelo de lã do pêlo do cão da Serra da Estrela após a fiação	50
Figura 32: Esquema dos pontos e padrão utilizados na produção do reforço	50
Figura 33: Esquema da produção dos compósitos	52
Figura 34: Tecido plano produzido com o fio de lã de pêlo de cão embebido pela matriz	52
Figura 35: Compósito sob vácuo	53
Figura 36: Pós-cura do compósito	53
Figura 37: Compósitos reforçados com lã de pêlo de cão da Serra da Estrela - (a) C_C_1F_A5; (b) C_T_1F_A5; (c) C_TT_1F	54

Figura 38: Compósitos reforçados com lã de ovelha da Serra da Estrela - (a) O_C_2F_A3; (b) O_C_2F_A5; (c) O_C_3F_A5; (d) O_T_3F_A5; (e) O_TT_3F	54
Figura 39: Ensaios de tração dos compósitos – (a) Provete a ser ensaiado; (b) Set-up do ensaio de tração com o sistema ZEISS INSPECT Correlate acoplado	56
Figura 40: Provetes usados nos ensaios de tração	57
Figura 41: Máquina Shimadzu, modelo Autograph AGS-X	58
Figura 42: Provetes usados nos ensaios de flexão	59
4. Resultados e discussão	
Figura 43: Padrões DR-X para as fibras de lã de ovelha e de pêlo de cão	62
Figura 44: Gráfico de tensão à tração/deformação média dos fios	63
Figura 45: Resultados da resistência à tração dos fios (MPa)	63
Figura 46: Resultados da resistência específica à tração dos fios (MPa/g.cm ³)	64
Figura 47: Resultados do módulo de <i>Young</i> dos fios (GPa)	65
Figura 48: Resultados da deformação à rutura dos fios (%)	65
Figura 49: Resultados da tenacidade dos fios (J/mm ³)	66
Figura 50: Imagens SEM dos tecidos feitos em crochê com lã de ovelha – (a) O_C_2F_A3; (b) O_C_2F_A5; (c) O_C_3F_A5	67
Figura 51: Tecidos em crochê produzidos com os fios de lã de ovelha e agulhas diferentes – (a) O_C_2F_A3 versus O_C_2F_A5; (b) O_C_2F_A5 versus O_C_3F_A5	68
Figura 52: Gráfico de tensão/deformação média dos ensaios de tração dos compósitos reforçados com tecidos em crochê feitos a partir dos fios de lã de ovelha	69
Figura 53: Resultados da resistência à tração (MPa)	70
Figura 54: Resultados do módulo de <i>Young</i> (GPa)	71
Figura 55: Resultados da deformação à rutura/1 ^a falha (%)	73

Figura 56: Resultados da tenacidade (J/mm ³)	74
Figura 57: Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de tração	75
Figura 58: Resultados da resistência à tração (MPa)	76
Figura 59: Resultados da resistência específica à tração (MPa/g.cm ³)	77
Figura 60: Resultados do módulo de <i>Young</i> (GPa)	79
Figura 61: Resultados da deformação à ruptura/1 ^a falha (%)	80
Figura 62: Resultados da tenacidade (J/mm ³)	81
Figura 63: Gráfico de tensão/deformação médios dos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com tecidos em crochê feitos a partir dos fios de lã de ovelha	82
Figura 64: Resultados da resistência à flexão (MPa)	83
Figura 65: Resultados do módulo de <i>Young</i> (GPa)	84
Figura 66: Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de flexão	84
Figura 67: Resultados da resistência à flexão (MPa)	85
Figura 68: Resultados da resistência específica à flexão (MPa/g.cm ³)	86
Figura 69: Resultados do módulo de <i>Young</i> (GPa)	88
Figura 70: Imagens SEM dos compósitos reforçados com lã de ovelha - (a) O_C_2F_A3; (b) O_C_2F_A5; (c) O_C_3F_A5; (d) O_T_3F_A5; (e) O_TT_3F	89
Figura 71: Imagens SEM dos compósitos reforçados com pêlo de cão - (a) C_C_1F_A5; (b) C_T_1F_A5; (c) C_TT_1F	90
Anexos	
Figura B1: Gráfico de tensão à tração/deformação dos fios de lã de ovelha	112
Figura B2: Gráfico de tensão à tração/deformação dos fios de pêlo de cão	112
Figura B3: Gráfico de tensão à tração/deformação dos fios de lã de ovelha, com a área sob as curvas tensão/deformação destacada	113

Figura B4: Gráfico de tensão à tração/deformação dos fios de pêlo de cão, com a área sob as curvas tensão/deformação destacada	113
Figura C1: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_C_2F_A3	114
Figura C2: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_C_2F_A5	114
Figura C3: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_C_3F_A5	115
Figura D1: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_C_3F_A5	116
Figura D2: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito C_C_1F_A5	116
Figura D3: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_T_3F_A5	117
Figura D4: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito C_T_1F_A5	117
Figura D5: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_TT_3F	117
Figura D6: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito C_TT_1F	118
Figura E1: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_C_2F_A3	119
Figura E2: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_C_2F_A5	119
Figura E3: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_C_3F_A5	120
Figura F1: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_C_3F_A5	121
Figura F2: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito C_C_1F_A5	121
Figura F3: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_T_3F_A5	122
Figura F4: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito C_T_1F_A5	122
Figura F5: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_TT_3F	122
Figura F6: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito C_TT_1F	123

Lista de tabelas

2. Estado da arte

Tabela 1: Vantagens e desvantagens das fibras sintéticas	11
Tabela 2: Vantagens e desvantagens das fibras naturais	13
Tabela 3: Comparação das fibras naturais e das fibras de vidro	13
Tabela 4: Propriedades de algumas fibras naturais e sintéticas	14
Tabela 5: Propriedades físicas da fibra de lã do pêlo do cão	15
Tabela 6: Propriedades físicas da fibra de lã de ovelha	19
Tabela 7: Principais pontos do crochê	22
Tabela 8: Vantagens e desvantagens dos termoplásticos e termoendurecíveis	25
Tabela 9: Propriedades da resina epóxi	27
Tabela 10: Vantagens e desvantagens dos processos de fabrico	41

3. Materiais e métodos

Tabela 11: Alguns dos tecidos utilizados como reforço	51
Tabela 12: Fração das fibras dos compósitos produzidos	55
Tabela 13: Dimensões dos provetes dos ensaios de tração	56
Tabela 14: Dimensões dos provetes e distância entre apoios dos ensaios de flexão	58

4. Resultados e discussão

Tabela 15: Frações volúmicas e módulos de <i>Young</i> da matriz e das fibras utilizados na lei das misturas	72
Tabela 16: Resultados dos módulos de <i>Young</i> obtidos experimentalmente e estimados considerando as condições de isotensão e isodeformação	72

Lista de acrónimos e símbolos

A	Área do provete
b	Largura do provete
C_C_1F_A5	Compósito reforçado com tecido em crochê feito a partir da lã de pêlo de cão utilizando 1 fio e a agulha 5
C_T_1F_A5	Compósito reforçado com tecido em tricô feito a partir da lã de pêlo de cão utilizando 1 fio e a agulha 5
C_TT_1F	Compósito reforçado com tecido feito por tecelagem a partir da lã de pêlo de cão utilizando 1 fio
DIC	Correlação Digital de Imagem
DR-X	Difração de Raios-X
ϵ	Deformação à tração/flexão
$E_{C,L}$	Módulo de <i>Young</i> obtido considerando a condição de isodeformação
$E_{C,T}$	Módulo de <i>Young</i> obtido considerando a condição de isotensão
E_f	Módulo de <i>Young</i> da fibra
E_m	Módulo de <i>Young</i> da matriz
F	Força aplicada
FAO	Organização para a Alimentação e a Agricultura
h	Espessura do provete
L	Distância entre apoios
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
O_C_2F_A3	Compósito reforçado com tecido em crochê feito a partir da lã de ovelha utilizando 2 fios e a agulha 3
O_C_2F_A5	Compósito reforçado com tecido em crochê feito a partir da lã de ovelha utilizando 2 fios e a agulha 5

O_C_3F_A5	Compósito reforçado com tecido em crochê feito a partir da lã de ovelha utilizando 3 fios e a agulha 5
O_T_3F_A5	Compósito reforçado com tecido em tricô feito a partir da lã de ovelha utilizando 3 fios e a agulha 5
O_TT_3F	Compósito reforçado com tecido feito por tecelagem a partir da lã de ovelha utilizando 3 fios
s	Deflexão
V_f	Fração volúmica da fibra
V_m	Fração volúmica da matriz
ΔL_o	Comprimento útil do provete
σ	Tensão à tração/flexão

1. Enquadramento e objetivos da dissertação

1.1. Enquadramento da dissertação

Os contínuos avanços científicos e tecnológicos resultaram numa crescente procura por materiais derivados de recursos naturais, mais sustentáveis e amigos do ambiente. Estes avanços deram origem a preocupações relacionadas com a escassez de materiais e a conservação do meio ambiente. Adicionalmente, o esgotamento dos recursos petrolíferos e o seu elevado custo, as emissões de gases com efeito de estufa resultantes da extensiva utilização de produtos à base de petróleo e a sua não biodegradabilidade, levaram os investigadores e as indústrias a procurar novos materiais que sejam renováveis, biodegradáveis e recicláveis (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020; Kamarudin et al., 2022; Karthik et al., 2024; Peças et al., 2018; Rajeshkumar et al., 2021)).

Nesse sentido, em 2015, os Estados-Membros das Nações Unidas adotaram a Agenda 2030, que é constituída por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), tais como a construção de infraestruturas resilientes, promoção de uma industrialização inclusiva e sustentável (ODS 9), a produção e consumo sustentáveis (ODS 12) e o combate às alterações climáticas (ODS 13), que definem as prioridades e metas globais para 2030 em áreas que afetam a qualidade de vida das atuais e futuras gerações em todo o mundo (Direção-Geral da Educação, United Nations). “Os ODS reconhecem que a erradicação da pobreza e outras privações devem ser acompanhadas de estratégias que melhorem a saúde e a educação, reduzam a desigualdade e estimulem o crescimento económico – ao mesmo tempo que combatem as alterações climáticas e preservam os ecossistemas” (ODS Portugal).

Os compósitos verdes, que são compósitos produzidos a partir de resinas derivadas de resíduos agrícolas e florestais renováveis, e de fibras naturais parecem ser alternativas promissoras para responder a esses problemas (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020; Kamarudin et al., 2022; Karthik et al., 2024; Peças et al., 2018; Rajeshkumar et al., 2021)).

Os compósitos verdes possuem vantagens claras em relação aos compósitos convencionais à base de petróleo: Reciclabilidade, renovabilidade, biodegradabilidade, baixa densidade e baixo custo, características que são essenciais para aplicações comerciais (Rajeshkumar et al., 2021). Além disso, estes compósitos não são tóxicos, o que significa que são mais seguros que os compósitos sintéticos e no fim da sua vida útil podem ser eliminados sem prejudicar o ambiente (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020; Rajeshkumar et al., 2021). Devido a estas vantagens podem ser usados em vários setores,

como o automóvel, aeroespacial, construção, no fabrico de embalagens ou de artigos desportivos (Rajeshkumar et al., 2021).

As fibras naturais utilizadas nos compósitos são obtidas a partir de recursos renováveis, tais como plantas e animais. Estas fibras possuem várias vantagens, como por exemplo: biodegradabilidade, elevada disponibilidade, baixa densidade, baixo custo e são amigas do ambiente (Ekbatani et al., 2024; Gowtham et al., 2024; Karthik et al., 2024; Peças et al., 2018; Suriani et al., 2021).

Tal como se pode ver na Figura 1, as fibras naturais mais abordadas na literatura são as fibras vegetais, mas as fibras animais tem ganho destaque. Pois para além das vantagens que lhe estão associadas, algumas das quais já mencionadas, estas fibras permitem a eliminação de vários resíduos sólidos que iriam parar a aterros (Peças et al., 2018).

Através do *ScienceDirect* foi possível criar o gráfico da Figura 1, que evidencia o número de artigos publicados entre 2005 e 2024 que contém os termos “*composites*”, “*animal fibers*” e “*vegetable fibers*”.

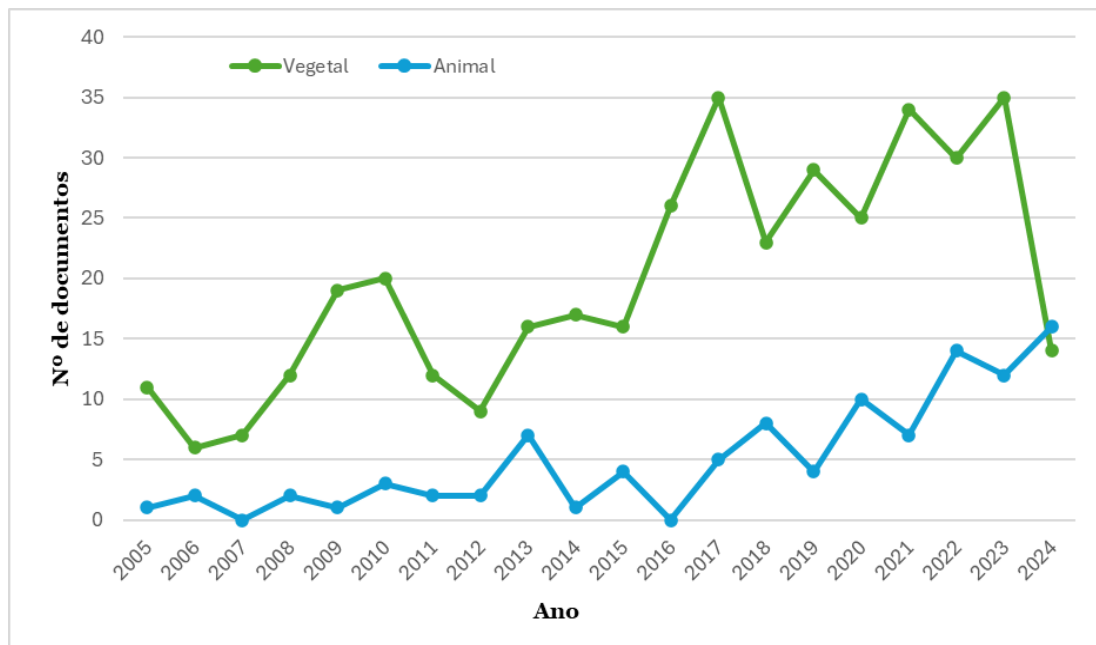


Figura 1: Número de artigos sobre compósitos reforçados com fibras naturais publicados ao longo dos últimos anos

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais de origem animal. Para isso, o objetivo principal foi subdividido em subobjetivos, de modo a facilitar o trabalho:

- 1º - Fiação e produção de fio a partir do pêlo de cão;
- 2º - Produção das estruturas têxteis através das técnicas de crochê, tricô e tecelagem, tanto com o fio de pêlo de cão como com o da lã de ovelha;
- 3º - Produção das placas de compósito verde com as estruturas têxteis produzidas: 5 reforçados com lã de ovelha e 3 reforçados com pêlo de cão, perfazendo um total de 8 compósitos produzidos;
- 4º - Caracterização mecânica das placas de compósito através de ensaios de flexão e de tração.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos:

- Capítulo 1: Enquadramento e objetivos da dissertação – faz-se o enquadramento do trabalho, apresenta-se os objetivos e a organização desta dissertação
- Capítulo 2: Estado da arte – faz-se uma breve revisão bibliográfica acerca dos materiais compósitos e sobre as fibras de lã de ovelha e pêlo de cão
- Capítulo 3: Materiais e métodos – realiza-se a descrição dos materiais e métodos utilizados na produção dos compósitos
- Capítulo 4: Resultados e discussão – são apresentados e discutidos os resultados obtidos
- Capítulo 5: Conclusões – são apresentados os principais resultados obtidos e ideias para trabalhos futuros

No final podem ser encontrados os anexos:

- ✓ Anexo A: Ficha técnica da resina SR GreenPoxy 56
- ✓ Anexo B: Gráficos de tensão à tração versus deformação dos fios das fibras utilizados no reforço
- ✓ Anexo C: Gráficos de tensão à tração versus deformação dos compósitos reforçados com tecidos em crochê produzidos a partir dos fios de lã de ovelha
- ✓ Anexo D: Gráficos de tensão à tração versus deformação dos compósitos reforçados com os diferentes tecidos produzidos a partir das duas fibras
- ✓ Anexo E: Gráficos de tensão à flexão versus deformação dos compósitos reforçados com tecidos em crochê produzidos a partir dos fios de lã de ovelha
- ✓ Anexo F: Gráficos de tensão à flexão versus deformação dos compósitos reforçados com os diferentes tecidos produzidos a partir das duas fibras

- ✓ Anexo G: Poster científico “Estudo das propriedades mecânicas de compósitos verdes reforçados com lã de ovelha e pêlo de cão da Serra da Estrela” no âmbito do evento do Dia Internacional da Mulher na engenharia promovido pela comissão para a igualdade, faculdade de engenharia da UBI (Universidade da Beira Interior) em conjunto com o colégio de engenharia de materiais da região centro e órgãos regionais e nacionais da ordem dos engenheiros sob o projeto INOVC+ no dia 24 de junho de 2024
- ✓ Anexo H: Artigo científico intitulado “Study of the mechanical properties of green composites reinforced with sheep and dog wool from Serra da Estrela”, submetido à revista *Polymers* (Q1), no *Special Issue - New Polymer Fibers: Production and Applications* e que já se encontra publicado

2. Estado da arte

2.1. Materiais compósitos

Um compósito é um material formado pela união de dois ou mais materiais que se combinam entre si para dar origem a um terceiro material com maior performance, seja em termos de resistência e rigidez, ou em termos de estabilidade dimensional, entre outros atributos que podem ser melhorados. Esta combinação permite tirar partido dos atributos individuais de cada componente. É importante realçar que os materiais não se misturam totalmente (os diferentes componentes são facilmente identificados porque existe uma clara interface entre eles) e não perdem as suas características individuais, eles combinam-se e contribuem para melhorar o produto final com as suas propriedades mais úteis. O principal objetivo da produção dos compósitos é a obtenção de um material que tenha determinadas características que não podem ser alcançadas pelos materiais constituintes individualmente. Devido às suas propriedades personalizáveis, os compósitos possuem diversas aplicações (Almeida, 2012; *CompositesLab*; Moreira, 2008; Pereira, 2017; Pinto, 2023).

Os dois principais componentes de um material compósito são o reforço e a matriz (Figura 2) (Kerni et al., 2020).

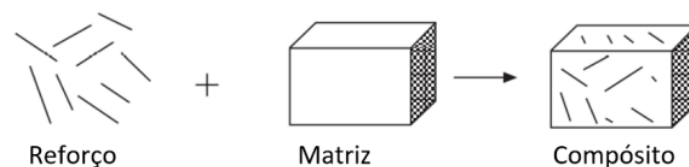


Figura 2: Esquema da formação de um compósito (Pinto, 2023)

Existem vários fatores que influenciam as propriedades dos compósitos, entre eles o tipo de reforço e matriz utilizados, a orientação, o tamanho e a fração volumétrica do reforço e o método de produção utilizado (Kerni et al., 2020). Os compósitos têm vindo a substituir os materiais tradicionais devido às suas excelentes propriedades, tais como a elevada resistência específica, baixa densidade, elevada rigidez e boa resistência ao impacto (Almeida, 2012; Pereira, 2017; Pinto, 2023).

2.1.1. Biocompósitos

Os biocompósitos são materiais compósitos em que pelo menos um dos seus constituintes é de origem natural. Se todos os componentes do biocompósito forem de origem natural ou provenientes de fontes renováveis este é denominado de compósito

verde, mas se algum dos seus constituintes for derivado do petróleo então é denominado de biocompósito parcialmente ecológico (Figura 3) (Ahmad et al., 2022).

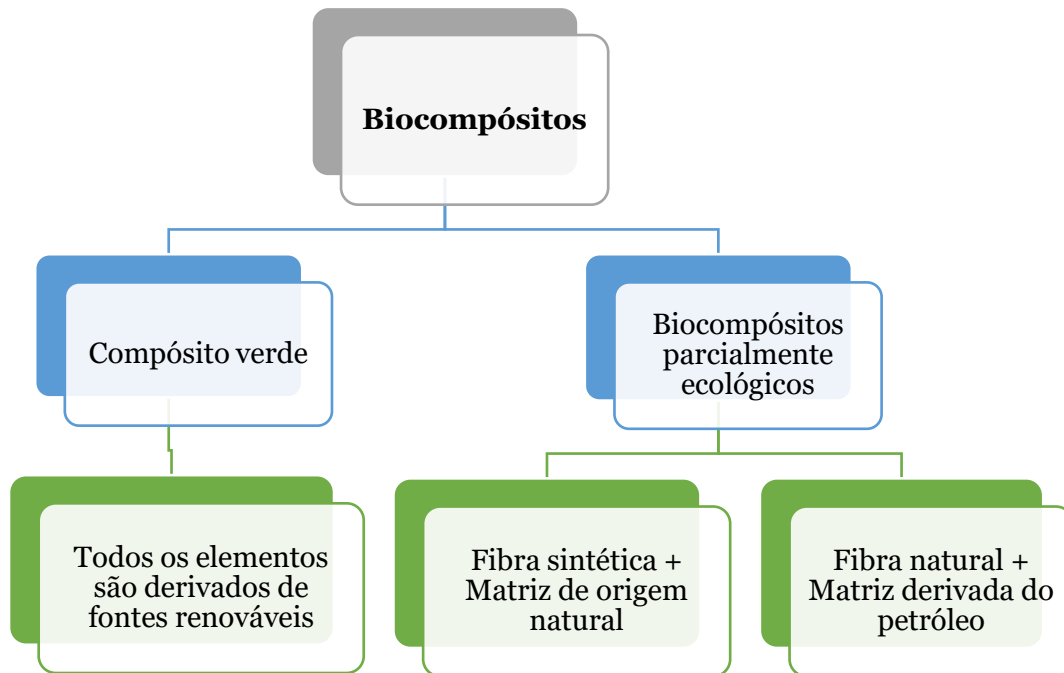


Figura 3: Classificação dos biocompósitos adaptado de (Peças et al., 2018)

2.2. Reforço

O reforço é o elemento adicionado à matriz com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas e físicas do compósito. Normalmente é um material mais forte que a matriz e contribui para a resistência, rigidez, durabilidade e outras características específicas do material compósito (Kerni et al., 2020; Pereira, 2017). O reforço é o componente responsável por suportar quase toda a carga aplicada no material, que é transferida através da matriz, sendo por isso necessário existir uma boa afinidade entre as duas fases (Pereira, 2017).

Consoante o tipo de reforço utilizado, os compósitos podem ser divididos em diferentes tipos (Figura 4). Podem ser reforçados com partículas ou com fibras, sendo os mais vulgares reforçados com fibras, pois apesar de as partículas serem mais baratas que as fibras, são também menos resistentes e menos rígidas e, por isso, são menos utilizadas como material de reforço (Ferreira, 2015; Zão, 2018).

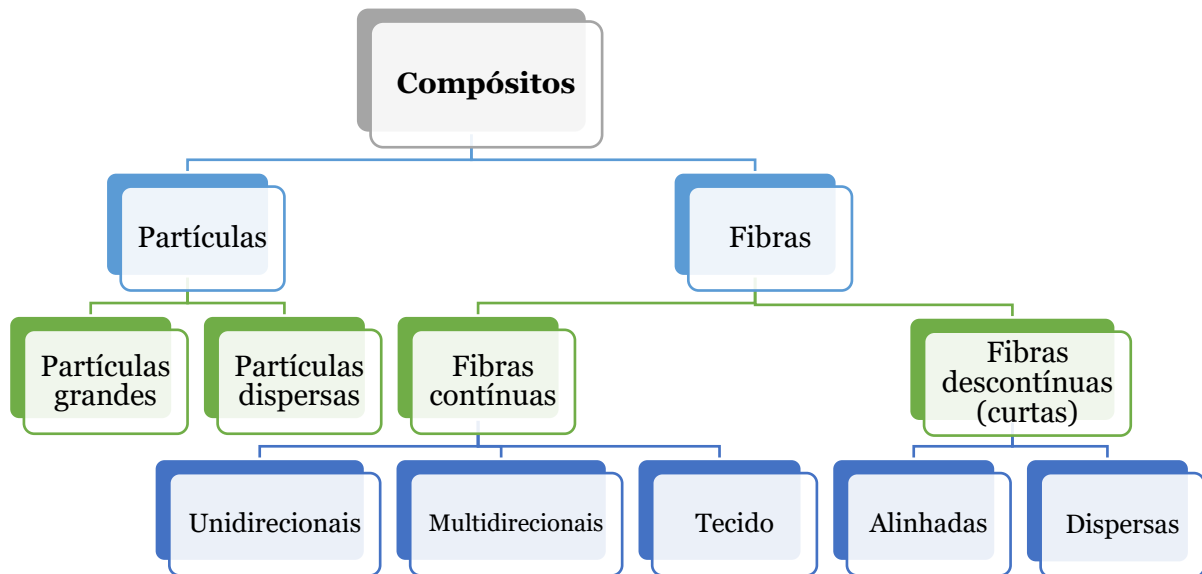


Figura 4: Classificação dos compósitos de acordo com o tipo de reforço utilizado adaptado de (Tomar, 2018)

Por outro lado, os reforços podem ser de origem natural (animal, vegetal e mineral) ou sintética. As configurações e frações volumétricas são determinadas de acordo com as aplicações pretendidas (Harris, 1999; Pereira, 2017).

2.2.1. Fibras sintéticas

As fibras sintéticas mais usadas no reforço de compósitos são as fibras de vidro, de carbono e de aramida. As fibras de vidro são as mais antigas e as mais utilizadas, devido ao seu baixo preço e elevada resistência, já as fibras de carbono e de aramida são usadas para aplicações mais avançadas (ex: aeronáutica ou desporto automobilístico) devido à sua elevada resistência mecânica, baixa densidade e elevada rigidez (Romão, 2003; Zão, 2018).

Na Tabela 1 estão indicadas as principais vantagens e desvantagens das fibras sintéticas mais usadas como reforço em materiais compósitos.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens das fibras sintéticas adaptado de (Pedroso, 2020)

	Vantagens	Desvantagens
Fibra de vidro	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo • Boa resistência à tração, ao impacto e à corrosão • Boa adesão a todas as matrizes • Fácil impregnação 	<ul style="list-style-type: none"> • Módulo de elasticidade moderado • Densidade elevada • Sensível à humidade
Fibra de carbono	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa densidade • Elevada resistência à tração e à flexão • Módulo de elasticidade elevado • Coeficiente de expansão negativo • Boa resistência térmica e estabilidade dimensional • Condutividade térmica e elétrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado • Sensível ao impacto • Suscetível à corrosão • Baixa resistência ao desgaste
Fibra de aramida	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa densidade (menor do que a da fibra de carbono) • Propriedades mecânicas excelentes • Elevada resistência ao impacto, ao desgaste e à corrosão por solventes 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado (superior ao custo das fibras de carbono) • Adesão baixa à maioria das matrizes • Difícil manuseamento • Baixa resistência à compressão e à corrosão por ácidos concentrados

2.2.2. Fibras naturais

As fibras naturais são fibras que podem ser encontradas na natureza. Podem ser de origem animal, vegetal ou mineral (Figura 5). As fibras de origem animal são fibras de natureza proteica, as fibras de origem vegetal são fibras que possuem na sua constituição celulose e as fibras de origem mineral são fibras provenientes de recursos naturais inorgânicos (Ferreira et al., 2018; Murillo et al., 2024; Wambua et al., 2003).

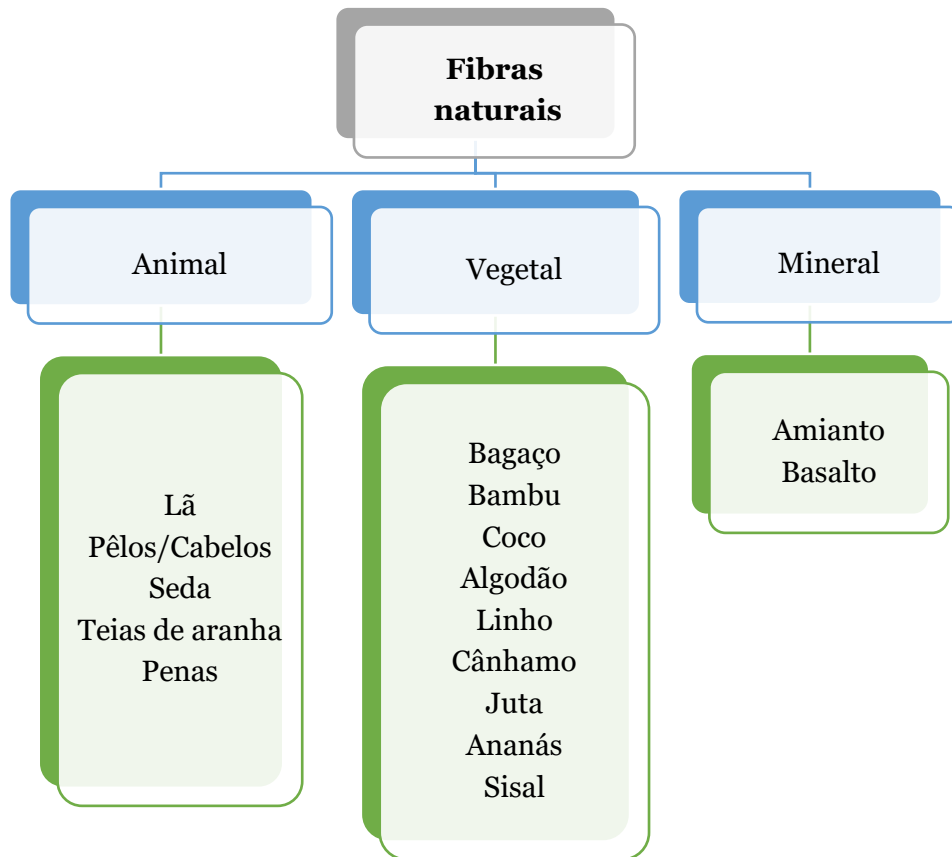


Figura 5: Fibras naturais adaptado de (Ares-Elejoste et al., 2023)

Na Tabela 2 estão indicadas as principais vantagens e desvantagens das fibras naturais.

Tabela 2: Vantagens e desvantagens das fibras naturais adaptado de (Almeida, 2012; Corrales et al., 2007; Ferreira et al., 2018; Moura et al., 2011; Peças et al., 2018; Sanjay et al., 2019; Väisänen et al., 2017; Wambua et al., 2003)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo • Elevada disponibilidade • Não são tóxicas, apresentam menos riscos para a saúde • Biodegradabilidade • Baixa pegada carbónica, menor emissão de gases com efeito de estufa • Reciclabilidade • Baixa densidade • Elevada resistência ao impacto • Elevada flexibilidade • Métodos de processamento simples e ecológicos • Menos abrasivas para os equipamentos • Boas propriedades mecânicas e que podem ser equiparadas às propriedades das fibras sintéticas 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa consistência das suas propriedades mecânicas e físicas • Elevada capacidade de absorção de humidade (higroscopia) • Inflamabilidade • Menor durabilidade (podem ser degradadas por microrganismos e pela luz solar, por exemplo) • As temperaturas usadas durante o seu processamento têm de ser menores

Através da observação da Tabela 3 é possível constatar as vantagens das fibras naturais em relação às fibras de vidro (e às fibras sintéticas, no geral).

Tabela 3: Comparação das fibras naturais e das fibras de vidro adaptado de (Wambua et al., 2003)

	Fibras naturais	Fibras de vidro
Densidade	Baixa	Dobro das fibras naturais
Custo	Baixo	Baixo, mas mais elevado que as fibras naturais
Renovabilidade	✓	X
Reciclagem	✓	X
Consumo de energia	Baixo	Elevado
Distribuição/abundância	Diversificada	Vasto
Neutralidade carbónica	✓	X
Abrasivas para as máquinas	X	✓
Riscos para a saúde humana	X	✓
Eliminação/descarte	Biodegradável	Não biodegradável

Legenda: ✓ - Sim; X – Não.

Na Tabela 4 estão indicadas as propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais e sintéticas.

Tabela 4: Propriedades de algumas fibras naturais e sintéticas adaptado de (Elfaleh et al., 2023; Mann et al., 2023; Pickering et al., 2016)

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Resistência específica à tração (MPa/g.cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Deformação de falha (%)
Rami	1,5	400-938	270-620	44-128	2,0-3,8
Linho	1,5	345-1830	230-1220	27-80	1,2-3,2
Cânhamo	1,5	550-1110	370-740	58-70	1,6
Juta	1,3-1,5	393-800	300-610	10-55	1,5-1,8
Sisal	1,3-1,5	507-855	362-610	9,4-28	2,0-2,5
Algodão	1,5-1,6	287-800	190-530	5,5-13	3,0-10
Coco	1,2	131-220	110-180	4-6	15-30
Seda	1,3	100-1500	100-1500	5-25	15-60
Penas	0,9	100-203	112-226	3-10	6,9
Lã	1,3	50-315	38-242	2,3-5	13,2-35
Vidro E	2,5	2000-3000	800-1400	70	0,5-3
Aramida	1,4	3000-3150	-	63-70	2,5-3,7
Carbono	1,4	4000	-	23-240	1,4-1,8
Kevlar	1,44	3000	-	18-25	2,5-3,7

2.2.2.1. Fibras animais

As fibras sintéticas e vegetais dominam as indústrias, mas as fibras animais têm ganho importância nos últimos anos. Estas fibras são biodegradáveis e amigas do ambiente, para além disso, o seu uso permite eliminar vários resíduos sólidos que iriam parar a aterros (Mann et al., 2023; Peças et al., 2018).

As fibras animais são constituídas por queratina. A queratina é uma proteína estrutural fibrosa rica em aminoácidos, que pode ser encontrada em várias partes do corpo dos animais (pêlos, cabelos, penas, unhas, bicos e chifres são alguns exemplos) (Mann et al., 2023). Devido à grande quantidade de grupos funcionais reativos presentes na sua estrutura (ex: di-sulfureto, amino, tiol, fenol e carboxílico), a queratina é uma ótima candidata para reagir e ligar-se a outros materiais (Thakur et al., 2017).

A queratina é bastante resistente à degradação devido à presença de polipeptídicos em cadeias super-enroladas que se encontram empacotados em hélice α e em folha β (Figura 6) (Mann et al., 2023; Thakur et al., 2017).

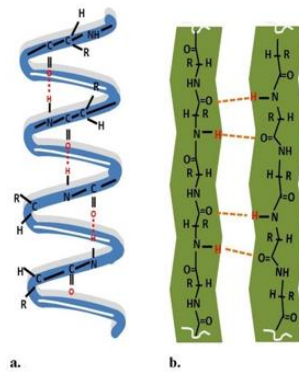


Figura 6: Estrutura química da queratina - **(a)** hélice α ; **(b)** folha β (Gahatraj et al., 2023)

Devido à sua capacidade de regeneração e de ser facilmente convertida em biomateriais, a queratina é alvo de vários estudos. Para além disso, é uma proteína com elevada disponibilidade, com baixo preço e peso, insolúvel em água, em solventes orgânicos e noutros solventes comuns, possui um comportamento hidrofóbico e uma boa capacidade de amortecer o som (Mann et al., 2023).

- **Fibras de lã de pêlo de cão**

Uma fibra animal com bastante potencial são as fibras de “*chiengora*” ou de lã de pêlo de cão. Tal como a maioria das fibras de origem animal são constituídas maioritariamente por queratina (aproximadamente 50%) e é umas das fibras de origem animal mais resistente, possui uma elevada tenacidade, bom alongamento e boas propriedades isolantes (Ramamoorthy et al., 2020).

A “*chiengora*” é fiada a partir do subpêlo de uma raça de cão com pêlo duplo. Esta fibra é extremamente macia, impermeável e é mais quente que a lã mas, é menos elástica que esta (Textile Value Chain, 2020).

Algumas das propriedades físicas das fibras da lã de pêlo de cão estão indicadas na Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades físicas da fibra de lã do pêlo do cão adaptado de (Murillo et al., 2024)

Propriedade física	Valor
Densidade (g/cm ³)	1,31-1,34
Comprimento (mm)	32
Diâmetro (μm)	30-60
Módulo de Young (GPa)	2-3
Alongamento (%)	43,7

A fibra da lã de pêlo de cão é composta por três camadas: a camada mais externa denominada cutícula, o córtex que é a camada intermédia e a medula que corresponde à camada central (Figura 7) (Mann et al., 2023).

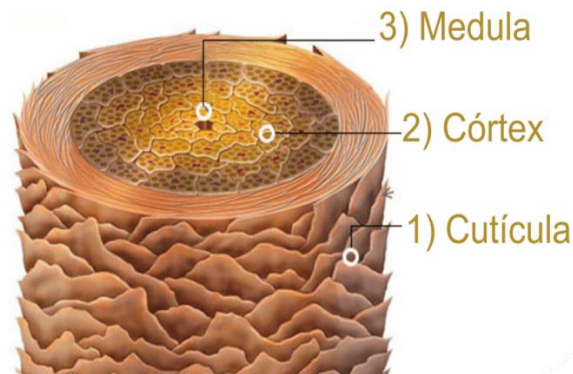


Figura 7: Estrutura da fibra da lã de pêlo de cão (Mattos, 2023)

Os cães da Serra da Estrela, tal como o nome indica, é uma raça originária da zona da Serra da Estrela e acredita-se que seja uma das mais antigas raças caninas da Península Ibérica. São cães fortes e atléticos, e por isso bastante usados na pastorícia. Pertencem ao grupo dos cães Molósside de tipo montanha, ou seja, são cães grandes e robustos (Clube Português de Canicultura; Zooplus Magazinee).

O seu pêlo é forte, abundante, ligeiramente grosseiro e com uma subtil aspereza, mas suaves ao toque. Estes cães possuem dois tipos de pêlo: o pêlo curto e o pêlo comprido. O pêlo curto é liso e possui o mesmo comprimento em todo o corpo, exceto na cabeça e nos membros, onde pode ser mais curto. Já o pêlo comprido pode ser liso ou ligeiramente ondulado e o seu comprimento varia de acordo com a zona do corpo em que se encontra (Clube Português de Canicultura; Zooplus Magazinee).

Para além do pêlo, possuem uma camada de subpêlo que os protege do frio/calor e do vento da serra. Os subpêlos são curtos, finos, abundantes e emaranhados e normalmente são mais claros do que os pêlos (Clube Português de Canicultura; Zooplus Magazinee).

- **Fibras de lã de ovelha**

A lã é uma fibra natural típica das ovelhas e de outros animais equiparados (ex: lamas, alpacas, cabras e coelhos), obtida por um processo denominado de tosquia. É uma fibra 100% natural, renovável, biodegradável, resistente e muito versátil (Antunes, 2022; Barragão, 2016). A lã pode ser bege, castanha ou preta, dependendo da raça do animal (Kiron, 2015).

A ovinocultura é uma exploração muito presente na cultura portuguesa. Durante muitos anos, a principal razão para a exploração ovina era a recolha da lã, mas devido ao aparecimento das fibras sintéticas isso mudou. Atualmente, a exploração ovina é essencialmente para a obtenção de carne e leite e a lã passou a ter um papel secundário. No entanto, a lã continua a ser produzida devido ao facto de ser necessário fazer uma tosquia anual aos animais (Antunes, 2022; Gonçalves, 2005). Estima-se que cada ovelha produza cerca de 2,3 a 3,6 Kg de lã que deve ser removida para a saúde do animal (Corcadden et al., 2014).

De acordo com a Organização para a Alimentação e a Agricultura (FAO), a produção mundial de lã em 2022 foi de aproximadamente 1,07 milhões de toneladas (Murillo et al., 2024).

A morfologia e a composição da lã são muito semelhantes à do cabelo humano. Tal como se pode ver pela Figura 8, a fibra da lã de ovelha é composta por várias camadas. As duas principais camadas são a cutícula e o córtex, mas algumas fibras podem ainda conter uma camada denominada de medula (a medula é mais comum nas lãs grossas e de menor qualidade, também denominada de lã churra) (Barragão, 2016).

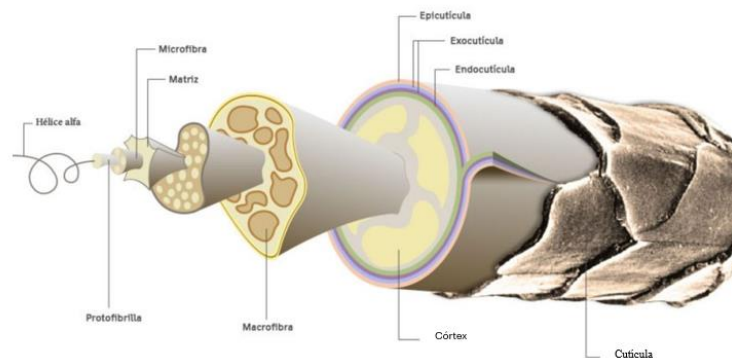


Figura 8: Estrutura da fibra da lã de ovelha adaptado de (Vielba, 2022)

A cutícula é a camada mais externa da fibra e é formada por escamas parcialmente sobrepostas umas sobre as outras (a sua sobreposição é semelhante às das telhas num telhado). As escamas podem variar de tamanho e de forma dependendo da raça da ovelha e de outros fatores genéticos. Estas escamas ajudam a proteger a fibra e a repelir a água e impurezas (Barragão, 2016; Science Learning Hub). A cutícula é constituída pela endocutícula e pela exocutícula e é revestida por uma camada bastante resistente a ataques químicos, a epicutícula (Barragão, 2016; Gonçalves, 2005; Science Learning Hub).

O córtex é a camada principal da fibra e representa a maior parte da sua estrutura (cerca de 90%), consiste em células de queratina dispostas em feixes helicoidais ao longo do eixo da fibra, esta estrutura fornece-lhe uma boa capacidade de compressão-extensão, tornando-a numa fibra resiliente e fácil de fiar. A maioria das propriedades da fibra depende desta camada (ex: resistência, elasticidade, flexibilidade, propriedades tintoriais) (Barragão, 2016; Science Learning Hub).

A medula não está presente em todas as fibras, mas quando está é uma estrutura central oca composta por células mortas. A sua presença depende da raça das ovelhas e de outros fatores genéticos (Barragão, 2016; Science Learning Hub).

Relativamente à sua composição química, a lã é composta essencialmente por uma proteína animal, a queratina (Barragão, 2016).

A lã possui propriedades químicas e físicas que a tornam numa matéria-prima muito valiosa, entre elas destacam-se (Barragão, 2016; Bharath et al., 2016; Kiron, 2015; Learn about wool; Rehman et al., 2015; Science Learning Hub; Woolmark):

- Higroscopicidade: Possui uma boa capacidade de absorver humidade, consegue absorver até 30% do seu peso em água sem se tornar húmida
- Elasticidade: É uma fibra com uma boa recuperação elástica, pode ser alongada até 30% do seu comprimento sem sofrer qualquer deformação permanente
- É uma fibra resistente, pode ser submetida a um elevado nível de tensão mecânica sem quebrar
- Isolante térmico: A lã é uma fibra ondulada, o que permite a existência de espaços entre as várias fibras, criando assim lacunas de ar que atuam como isolante térmico
- Resistência ao fogo: A lã é retardante de chamas, não derrete nem se cola à pele, e autoextingue-se quando a fonte de chama é removida. Para além disso, começa a arder a uma temperatura muito mais elevada do que o algodão ou outras fibras sintéticas. Esta propriedade torna-a ideal em ambientes que requerem materiais de elevada segurança como é o caso dos comboios, autocarros, aviões e também na roupa de bombeiros ou soldados
- Resistência aos ácidos e bases: É uma fibra resistente aos ácidos minerais, sejam eles fortes ou fracos, mesmo a elevadas temperaturas. No entanto, decompõe-se completamente quando entra em contacto com o ácido sulfúrico concentrado a altas temperaturas e oxida-se na presença de ácidos nítricos. Relativamente às substâncias alcalinas, devido à presença da queratina na sua composição, a lã é

bastante sensível a substâncias alcalinas fortes (as substâncias alcalinas fracas não têm quaisquer efeitos nas fibras)

- Não é afetada por solventes orgânicos
- É resistente à proliferação de fungos e bactérias, mas é vulnerável a insetos e a microrganismos (fica com bolor/mofo se permanecer molhada durante muito tempo)
- É hipoalergénica
- Afinidade com corantes: É uma fibra fácil de tingir, absorve vários tipos de corantes de forma profunda, sem ser necessária a utilização de outros produtos químicos
- Proteção contra a radiação UV: A lã protege muito melhor a pele contra a radiação UV do que a maioria das fibras sintéticas e até que o algodão

Na Tabela 6 estão indicadas algumas das propriedades físicas da lã.

Tabela 6: Propriedades físicas da fibra de lã de ovelha adaptado de (Antunes, 2022; Laitala et al., 2018)

Propriedade física	Valor
Densidade (g/cm³)	1,07-1,3
Comprimento (mm)	25-355
Diâmetro (µm)	15-40
Módulo de Young (GPa)	2-5
Alongamento (%)	25-50

2.2.3. Tecidos têxteis

Os tecidos têxteis são cada vez mais utilizados como reforço de compósitos (Hasan et al., 2021).

As fibras (naturais ou sintéticas) podem ser fiadas e posteriormente ser transformadas em estruturas têxteis através de diferentes métodos, como por exemplo a tecelagem, a tricotagem, o entrançamento e a feltragem (Hasan et al., 2021; Medeiros, 2013).

Os tecidos obtidos pela tecelagem são conhecidos por tecidos planos (Figura 9). Estes tecidos são obtidos através do cruzamento ortogonal de dois conjuntos de fios (os fios da teia e os fios da trama) e são assim designados, pois neste tipo de tecidos há apenas duas posições possíveis para os fios da trama: ou passam por baixo ou por cima dos fios da teia (Gommers et al., 1998; Hasan et al., 2021; Medeiros, 2013).

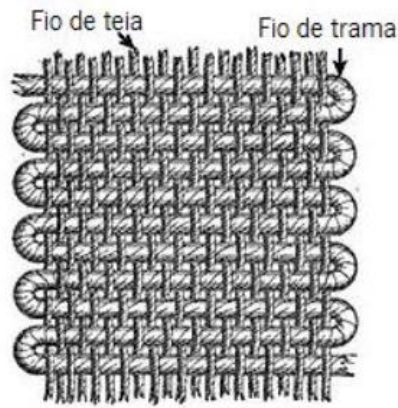


Figura 9: Esquema do tecido plano (Mendes, 2015)

Os tecidos planos são produzidos num tear, instrumento que mantém os fios da teia fixos enquanto os fios da trama passam através deles (The Craft Atlas).

Qualquer tecido produzido num tear, tem como base uma ou mais destas três formas básicas de cruzamento de fios (Figura 10) (Craftsmanship):

- Tafetá: É o padrão mais comum e mais simples e caracteriza-se pela passagem alternada do fio da trama por cima e por baixo do fio da teia. O tafetá dá origem a tecidos simétricos e com boa estabilidade dimensional, mas devido à elevada ondulação das fibras possuem propriedades mecânicas inferiores em comparação com outro tipo de padrões (Ramos, 2018)
- Sarja: O fio da trama passa por cima de dois fios da teia e por baixo dos dois fios seguintes
- Cetim: O fio da trama passa por cima de um fio da teia e por baixo dos quatro fios seguintes. O cetim dá origem a tecidos mais fluidos devido ao facto de existirem menos pontos onde os fios se cruzam

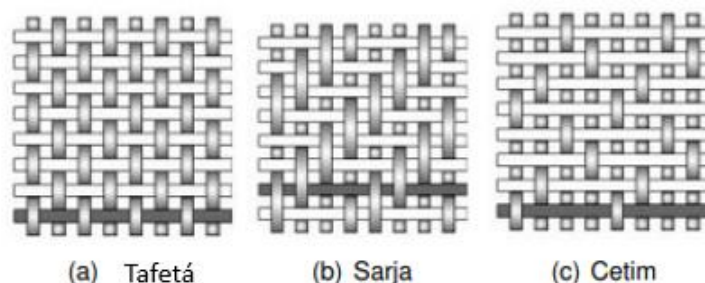


Figura 10: Diferentes tipos de padrões dos tecidos planos adaptado de (Ramos, 2018)

O tricô e o crochê criam os tecidos denominados por malhas, nestas técnicas ocorre o entrelaçamento dos fios e a formação de laçadas (Medeiros, 2013). As malhas

possuem uma maior elasticidade e maleabilidade do que os tecidos planos (Chowdhury & Summerscales, 2024; Rawal et al., 2023; Talabi et al., 2024).

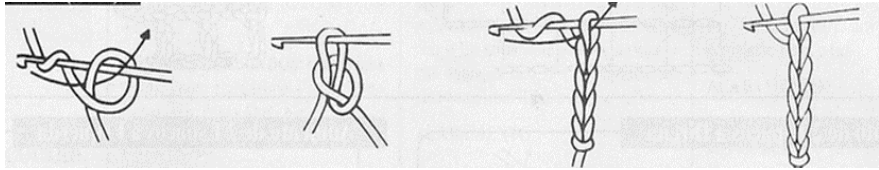
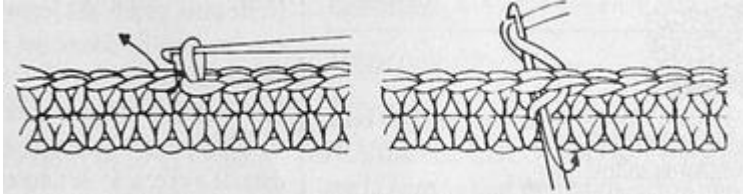
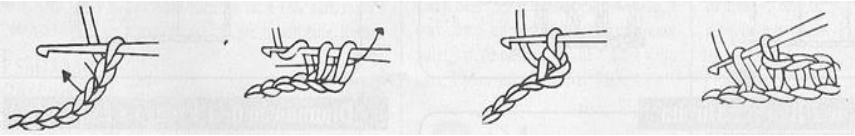
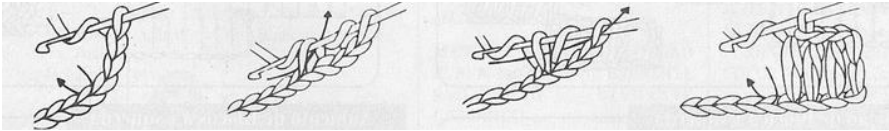

No crochê é usada apenas uma agulha, que possui um gancho na ponta. Já no tricô são utilizadas duas agulhas e o fio que se está a usar para produzir o tecido vai passando de uma agulha para a outra (Turner, 2022). Os tamanhos das agulhas são indicados por números, e quanto maior for o número da agulha, mais grossa ela é, menos apertados são os pontos, e conseqüentemente, mais flexíveis e elásticas são as estruturas dos tecidos produzidos (Stitch & Story a,b).

No crochê existem 5 pontos principais e a partir deles é possível criar qualquer tipo de tecido (Made by you; Turner, 2022):

- Corrente: É o ponto de partida de qualquer tecido feito em crochê
- Ponto baixíssimo: É um ponto bastante discreto e é utilizado para unir ou finalizar os tecidos
- Ponto baixo: É o ponto mais fechado e, por isso, é utilizado para criar tecidos mais densos e firmes/estáveis, como, por exemplo tapetes
- Ponto meio alto: É um ponto intermédio entre o ponto alto e o ponto baixo. É ligeiramente mais maleável que o ponto baixo, mas é bem estruturado
- Ponto alto: É o ponto mais aberto e, por isso, é utilizado quando se pretende fazer peças mais flexíveis. É provavelmente o ponto mais utilizado e existem vários pontos que podem ser feitos a partir dele (ex: ponto alto duplo, ponto alto triplo, ponto alto quadruplo) (só crochê).

Na Tabela 7 é possível visualizar os 5 pontos principais usados no crochê.

Tabela 7: Principais pontos do crochê adaptado de (Corte)

Corrente	
Ponto baixíssimo	
Ponto baixo	
Ponto meio alto	
Ponto alto	

No tricô, os tecidos são feitos a partir de 2 pontos: o ponto meia e o ponto tricô (Turner, 2022). Quando se utiliza o ponto tricô obtêm-se tecidos com uma textura irregular, com pequenas saliências, pois estes pontos assemelham-se a pequenos nós, enquanto que com o ponto meia obtêm-se tecidos com uma textura lisa e uniforme, e os pontos assemelham-se a um pequeno “v” (Stearns, 2022a, 2022b).

Na Figura 11 é possível observar os passos para a produção do ponto tricô e do ponto meia.

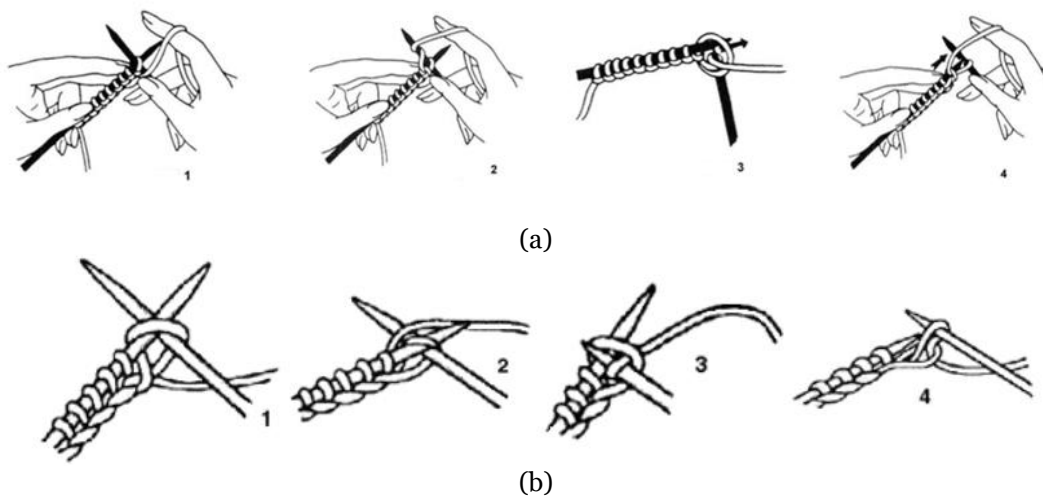


Figura 11: Pontos utilizados no tricô – **(a)** Ponto tricô; **(b)** Ponto meia, adaptado de (Craft Yarn Council a,b)

2.3. Matriz

A matriz, que é o componente em maior quantidade, envolve a fase dispersa (o reforço). Geralmente é um material com menor performance em termos de resistência e rigidez, mas apresenta elevada ductilidade. Por isso é responsável por manter a coesão das fibras, de dar forma e estabilidade ao compósito, de transferir a carga aplicada no compósito de forma equitativa por todo o material, de manter as fibras na direção pretendida e de as proteger de agressões externas. A matriz pode ser cerâmica, metálica ou polimérica (Figura 12) (Kerni et al., 2020).

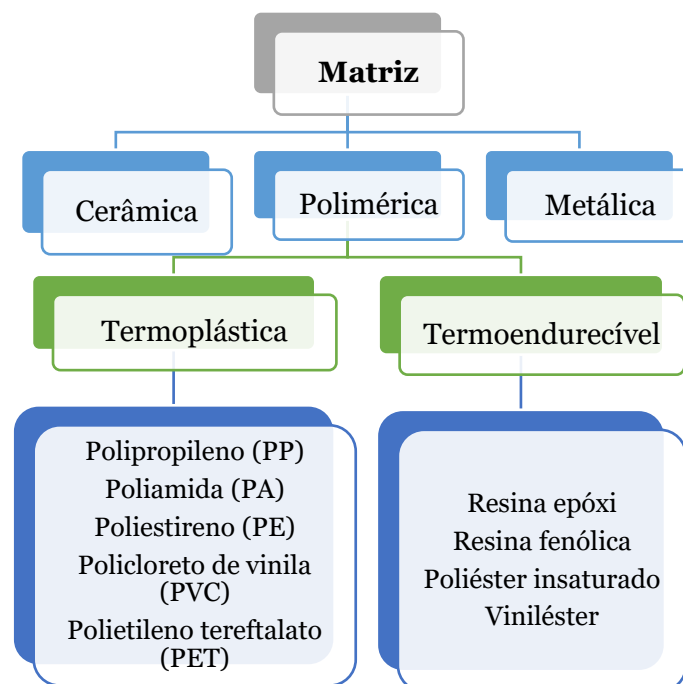


Figura 12: Diferentes tipos de matrizes usadas em compósitos adaptado de (Castro, 2013)

Na escolha da matriz a utilizar deve ter-se em conta as aplicações a que o material final se destina, as condições a que vai ser sujeito durante o seu processamento e durante o desempenho das suas funções. Para além disso é importante prestar atenção aos custos associados ao processamento do produto (Pereira, 2017).

Uma matriz de qualidade deverá possuir as seguintes propriedades (Moreira, 2008; Pereira, 2017):

- Baixo custo
- Cura rápida
- Elevada resistência à tração
- Boa resistência ao impacto, ao corte, a temperaturas extremas, à degradação em ambientes quimicamente agressivos
- Ser dúctil e tenaz
- Coeficiente de dilatação térmico próximo do da fibra
- Módulo de elasticidade elevado
- Baixa capacidade de absorção de humidade

2.3.1. Matrizes poliméricas

Existe uma grande variedade de matrizes poliméricas que podem ser utilizadas no fabrico de compósitos reforçados com fibras. Estas matrizes podem ser divididas em dois grupos: matrizes termoendurecíveis e matrizes termoplásticas. Na Figura 12 estão indicados os termoplásticos e os termoendurecíveis mais comuns (Almeida, 2012; Azevedo, 2017; Castro, 2013; Moura et al., 2011; Ngo, 2020).

Os termoplásticos são polímeros onde não existem quaisquer ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. As cadeias poliméricas estão ligadas entre si por forças intermoleculares fracas (forças de Van der Waals e ligações de hidrogénio). Quando se aquecem os termoplásticos, eles amolecem, pois essas ligações são temporariamente quebradas (Almeida, 2012; Azevedo, 2017; Castro, 2013).

Os termoendurecíveis são polímeros cujas diferentes cadeias poliméricas estão altamente ligadas entre si através de uma reação química – a cura. Após a cura, as moléculas formam uma estrutura tridimensional rígida devido à reticulação entre as várias cadeias moleculares, que não pode ser quebrada pelo calor. A mudança de estado do termoendurecível é irreversível, a exposição do material, após a solidificação, ao calor só fará com que ele se degrade, pois ele não derrete (Ngo, 2020).

Na Tabela 8 estão indicadas algumas das vantagens e desvantagens das matrizes poliméricas.

Tabela 8: Vantagens e desvantagens dos termoplásticos e termoendurecíveis adaptado de (Almeida, 2012; Azevedo, 2017; Castro, 2013; Moura et al., 2011; Pereira, 2011; Thomas et al., 2012; Zão, 2018)

	Vantagens	Desvantagens
Termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Processamento mais rápido que os termoendurecíveis • São fáceis de armazenar, pois não necessitam de refrigeração (ao contrário dos pré-impregnados dos termoendurecíveis) • Podem ser recomformados várias vezes e reciclados • Não ocorre nenhuma reação química durante o processamento • Mais tenazes e resistentes e menos higroscópicos que os termoendurecíveis • Elevada resistência química 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de serviço limitada • Tendência para formar ligações de adesão fracas • São mais frágeis e menos resistentes que os termoendurecíveis • Possuem uma viscosidade elevada, que torna a impregnação das fibras difícil • Devido à viscosidade elevada, o processamento é feito a elevadas pressões e temperaturas, o que se traduz num maior custo e numa maior probabilidade de danificar as fibras
Termoendurecíveis	<ul style="list-style-type: none"> • Quando estão no estado líquido, possuem uma viscosidade baixa, o que facilita a impregnação das fibras • Ligações químicas fortes e estáveis • Podem reagir com vários substratos e formar ligações fortes • Resistência à deformação e à tração elevada • Boa estabilidade térmica e dimensional • Boas propriedades mecânicas e de adesão • Conseguem suportar temperaturas mais elevadas que os termoplásticos • Elevada rigidez • São baratos e mais fáceis de processar que os termoplásticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Processamento requer um maior controlo • Fraturam com facilidade • Não são dúcteis • Cura longa • Não podem ser remodelados nem reciclados

Os termoendurecíveis possuem características superiores aos termoplásticos e, por isso, são usados em aplicações com maiores exigências mecânicas, térmicas e/ou anticorrosivas. No entanto, os termoplásticos são menos utilizados como matriz em compósitos reforçados com fibras devido às dificuldades que têm em impregná-las (Almeida, 2012; Moura et al., 2011; Pedroso, 2020).

2.3.1.1. Resina epóxi

A matriz mais utilizada nos compósitos poliméricos é a resina epóxi, é uma resina termoendurecível que apresenta boas propriedades mecânicas e químicas. Dependendo da estrutura química, dos agentes de cura utilizados e do seu teor, das condições durante o processo de cura e do tratamento pós-cura podem obter-se resinas epóxi com diferentes características (Silva, 2020).

Esta resina possui várias vantagens, como por exemplo, excelentes propriedades adesivas a vários materiais, elevada dureza, elevada resistência química, boas propriedades mecânicas à tração e à compressão, fácil processamento, alto potencial de reticulação, baixa contração durante o processo de cura, boa estabilidade dimensional e térmica, baixa toxicidade e não liberta produtos tóxicos durante a cura. No entanto, o seu uso é limitado devido ao seu elevado preço, à sua fragilidade, à cura lenta e baixa resistência à fratura (Duro, 2013; Ferreira, 2016; Mendonça, 2019; Ramos, 2018; Silva, 2020).

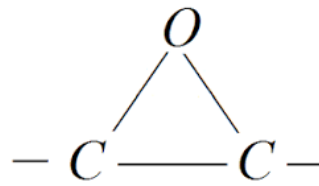
Em comparação com as outras resinas termoendurecíveis, as resinas epóxi destacam-se devido ao facto de possuírem propriedades mecânicas mais elevadas e uma maior resistência à degradação provocada pelo meio ambiente. Aplicam-se sobretudo nas indústrias em que são necessários materiais com elevado desempenho, como é o caso das indústrias aeroespacial ou aeronáutica, mas também podem ser utilizadas em adesivos, revestimentos, tintas e vernizes (Duro, 2013).

Na Tabela 9 encontram-se indicadas algumas das propriedades físicas da resina epóxi.

Tabela 9: Propriedades da resina epóxi adaptado de (Carvalho, 2015; Saw et al., 2013)

Propriedade	Valor
Densidade (Kg/m ³)	1200-1250
Viscosidade a 25°C (cps)	550
Resistência à tração (MPa)	55-130
Resistência à flexão (MPa)	100-150
Resistência ao corte (MPa)	30-50
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	2,75-4,10
Contração durante a cura (%)	1-5
Alongamento até à rotura (%)	2-5
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ C ⁻¹)	50-80

As resinas epóxi são caracterizadas pela presença de um ou vários anéis epóxi, denominados por grupo oxirano (Figura 13). O grupo oxirano pode ligar-se diretamente a grupos orgânicos ou a um carbono formando um grupo glicídico que, por sua vez, se liga a um grupo orgânico (Ramos, 2018).

**Figura 13:** Grupo oxirano (Coelho, 2018)

Existem várias variações da resina epóxi, no entanto, a maioria é produzida através da reação de condensação entre a epocloridrina e o bisfenol A, na presença de hidróxido de sódio, sendo o diglicidil éter de bisfenol A o produto dessa reação (Figura 14) (Costa, 2021; Pinto, 2023).

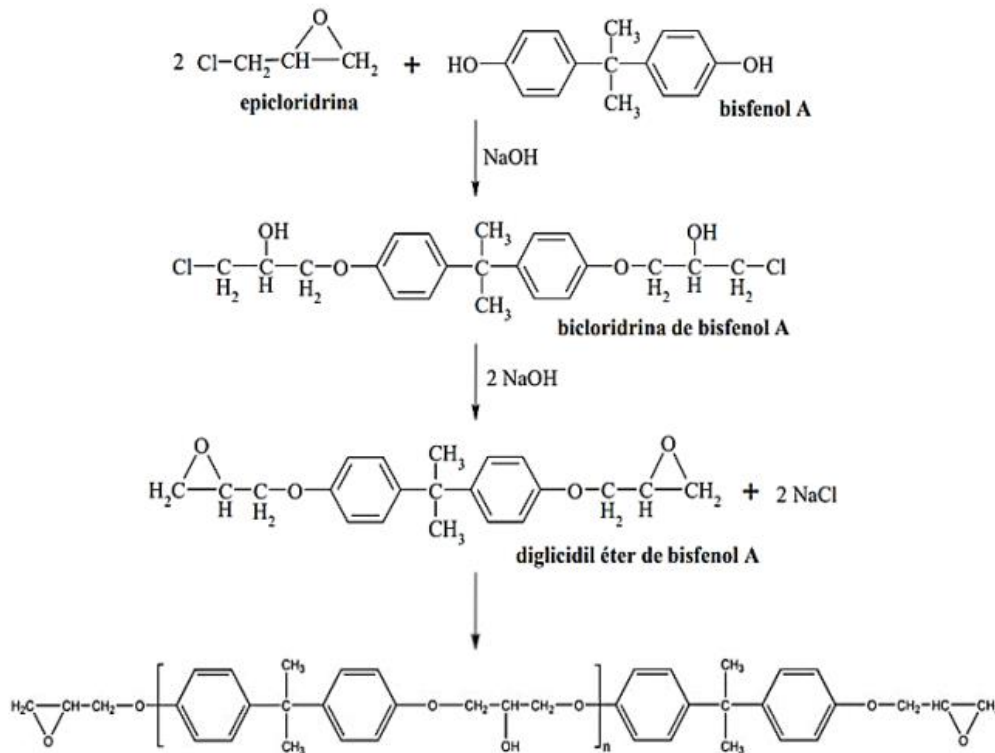


Figura 14: Reação da epicloridrina e o bisfenol A (Pinto, 2023)

O processo de cura da resina epóxi é complexo, tem por base a polimerização por abertura dos anéis da resina, que se encontram na maioria das vezes nas extremidades das cadeias poliméricas ou nas extremidades de cadeias laterais que constituem os pré-polímeros desta resina (Figura 15) (Ferreira, 2016; Ramos, 2018).

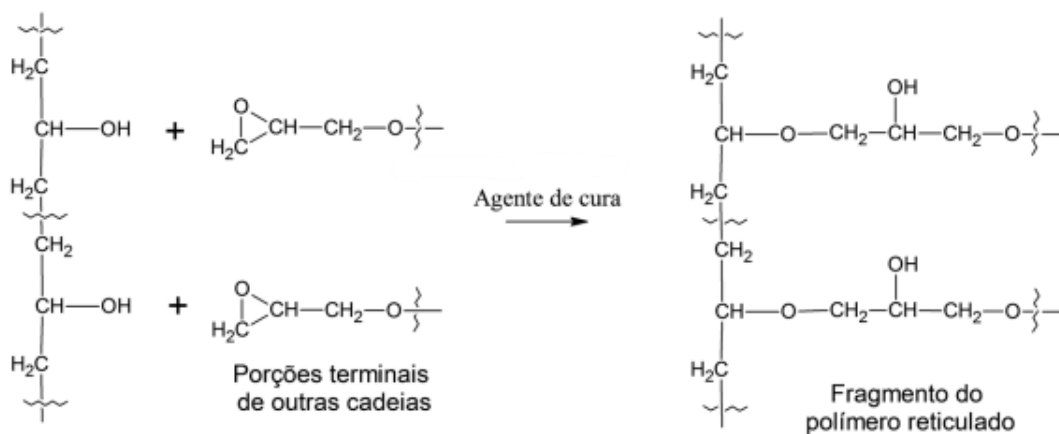


Figura 15: Processo de cura de uma resina epóxi adaptado de (Costa, 2021)

Durante o processo de cura, os anéis abrem, o que faz com que o pré-polímero reaja com o endurecedor. Os endurecedores, que são normalmente compostos químicos que possuem grupos amina (NH₂) nas suas extremidades, vão reagir com os anéis de

duas moléculas distintas do pré-polímero, formando assim uma rede tridimensional de resina epóxi, resultando numa solidificação irreversível. Durante esta reação ocorre a libertação de calor, pois trata-se de um processo exotérmico (Ramos, 2018).

Na 1ª etapa do processo de cura, a resina possui uma viscosidade baixa, o que lhe permite impregnar as fibras. Depois a viscosidade atinge um “mínimo”, devido ao calor produzido pelas próprias reações químicas. Posteriormente a resina começa a ficar semelhante a um gel, deixa de fluir tão facilmente, pois há um aumento das ramificações das cadeias e a velocidade das reações começa a diminuir significativamente. Depois que a resina gelifica totalmente não pode ser modificada (a sua forma não pode ser alterada) (Ferreira, 2016; Silva, 2020).

A etapa seguinte é a vitrificação. Nesta etapa, o movimento das cadeias moleculares cessa completamente. A resina considera-se totalmente curada no fim desta etapa (Ferreira, 2016).

Na Figura 16 estão representadas as várias fases da cura de uma resina termoendurecível.

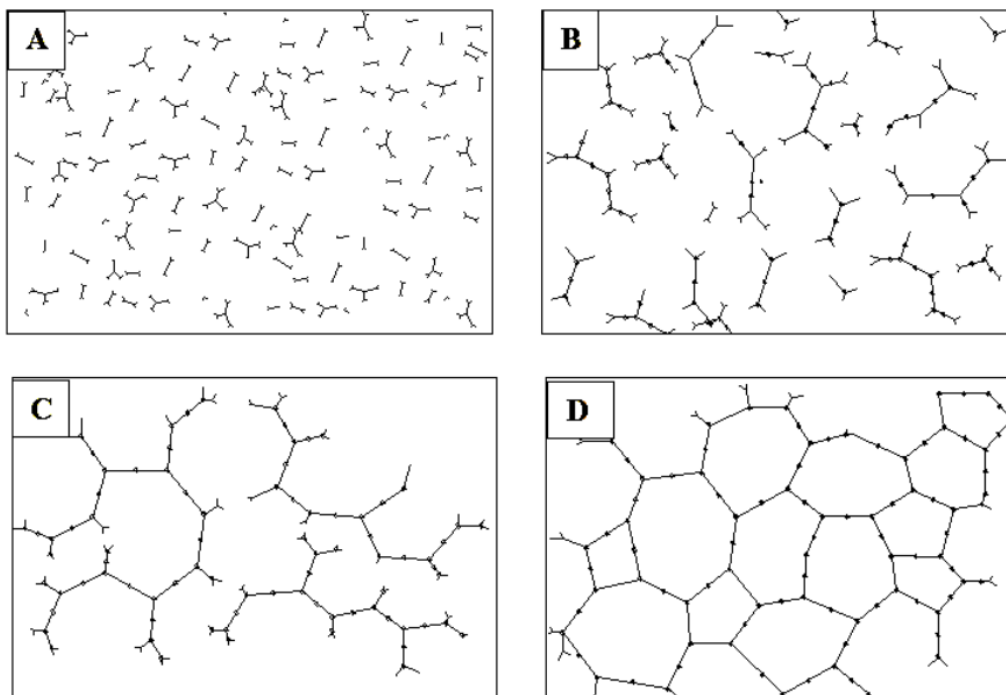


Figura 16: Fases da cura de uma resina termoendurecível – **(a)** resina e agente de cura antes da reação; **(b)** gelificação; **(c)** vitrificação; **(d)** cura completa (Silva, 2020)

Após ter ocorrido uma percentagem considerável do processo de cura (a resina já é dimensionalmente estável) é comum realizar-se uma pós-cura. Na pós-cura, a resina é

removida do molde e é colocada num forno, o que contribui para a melhoria das suas propriedades físicas e mecânicas (Ramos, 2018).

A estequiometria resina/endurecedor é um dos parâmetros que influencia a cura da resina, durante o processo de cura é importante utilizar as quantidades de endurecedor e de resina estipuladas no protocolo específico para o processo, pois alterar a quantidade recomendada desses elementos só prejudicará a qualidade final da resina. O tempo de cura é longo e depende de fatores externos, tais como a temperatura, humidade e pressão (Ferreira, 2016; Ramos, 2018).

2.3.2. Resinas poliméricas de base biológica

Devido à sua capacidade de formar uma rede reticulada após a cura, as resinas termoendurecíveis possuem excelentes propriedades mecânicas e químicas e uma excelente estabilidade, mas também são difíceis de reciclar, e por essa razão, nos últimos anos a procura por alternativas mais sustentáveis para reduzir o impacto ambiental provocado pela utilização destas resinas aumentou. Uma dessas alternativas são as resinas termoendurecíveis de base biológica (Akter et al., 2022; Ares-Elejoste et al., 2023).

As resinas poliméricas de base biológica podem ser produzidas a partir de fontes renováveis/da biomassa. A sacarose, a lenhina, a celulose, os ácidos gordos e os óleos vegetais são alguns exemplos de matérias-primas usadas na sua síntese (Akter et al., 2022).

As bio-resinas possuem várias vantagens, nomeadamente o facto de consumirem 65% menos de energia durante a sua produção (em comparação com as resinas à base de petróleo), são mais seguras, não são tóxicas, são biodegradáveis, recicláveis e amigas do ambiente (Akter et al., 2022). No entanto, a síntese destas resinas não é prática nem eficiente devido às estruturas complexas da biomassa. A biomassa, para ser utilizada, precisa de ser transformada em moléculas mais simples, os intermediários ou blocos de construção, mas o isolamento e a síntese desses monómeros não é fácil (Ares-Elejoste et al., 2023; Baroncini et al., 2016; Liu et al., 2021).

As resinas fenólicas de base biológica, as resinas epóxi de base biológica, o poliuretano de base biológica, o acetato de celulose, os poliésteres biológicos e poliolefinas biológicas são alguns exemplos de resinas de base biológica bastante populares (Akter et al., 2022).

2.3.2.1. Resina epóxi de base biológica

De entre todas as bio-resinas, a resina epóxi de base biológica é a que está mais desenvolvida (Ares-Elejoste et al., 2023).

A maioria das resinas epóxi, como referido anteriormente, são produzidas através de epícloridrina e bisfenol A, mas devido ao facto de o bisfenol A ser um composto prejudicial para a saúde e para o meio ambiente, vários investigadores têm-se dedicado à síntese desta resina a partir de produtos de origem natural (Ares-Elejoste et al., 2023).

Existe uma vasta gama de opções de base biológica que podem ser utilizadas para sintetizar a resina epóxi verde, sendo as mais utilizadas e investigadas os óleos vegetais, a lenhina, o ácido gálico e o cardanol (Ares-Elejoste et al., 2023).

- **Óleos vegetais**

Os óleos de soja, de linhaça, de cânhamo, entre outros podem ser usados na síntese das resinas epóxi de base biológica.

Os óleos vegetais são triglicéridos cuja composição depende do tipo de planta e das condições de crescimento. Um triglicérido consiste num glicerol ligado a três ácidos gordos. Os ácidos gordos presentes variam de acordo com o óleo e podem ainda ter outros grupos funcionais ligados a eles.

Devido às inúmeras ligações C=C, os óleos vegetais são uma opção muito popular para a síntese de resinas termoendurecíveis, pois as ligações duplas proporcionam ligações úteis para as polimerizações (Baroncini et al., 2016).

Os triglicéridos podem ser modificados por transesterificação, epoxidação e acrilção, no entanto, a epoxidação é a reação de funcionalização mais significativa (Kumar et al., 2018).

Na Figura 17 está esquematizada a reação de síntese do óleo de soja epoxidado, onde é possível observar que durante a sua epoxidação, as ligações duplas do óleo de soja insaturado são oxidadas dando origem a grupos oxirano (Kumar et al., 2018).

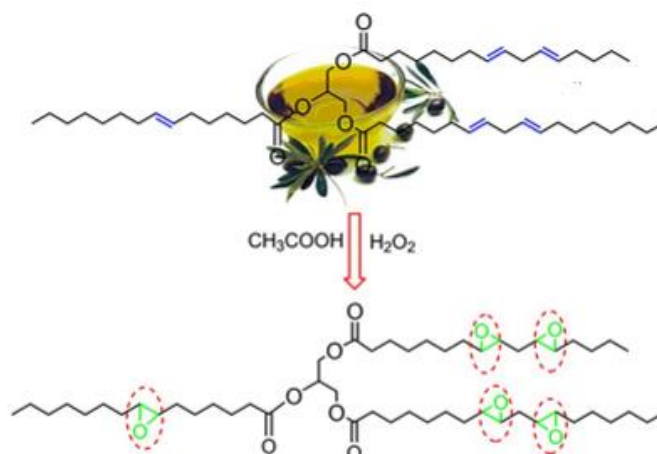


Figura 17: Síntese do óleo de soja epoxidado adaptado de (Kumar et al., 2018)

Devido à estrutura alifática dos óleos vegetais, as propriedades das resinas epóxi derivadas dos óleos não satisfazem muitas das propriedades mecânicas pretendidas e por isso o seu uso é limitado (Ares-Elejoste et al., 2023).

- **Cardanol**

O cardanol é uma molécula fenólica obtida através da destilação a vácuo do óleo extraído da casca dos cajus (Kumar et al., 2018; Ramon et al., 2018).

Relativamente à sua estrutura química, possui um anel aromático com um grupo OH e uma cadeia lateral alquil-fenólica (Figura 18), e por isso é um substituto promissor do bisfenol A. Devido à sua estrutura molecular possui propriedades físico-químicas interessantes e por isso pode ser utilizado em várias aplicações (Ares-Elejoste et al., 2023; Auvergne et al., 2014).

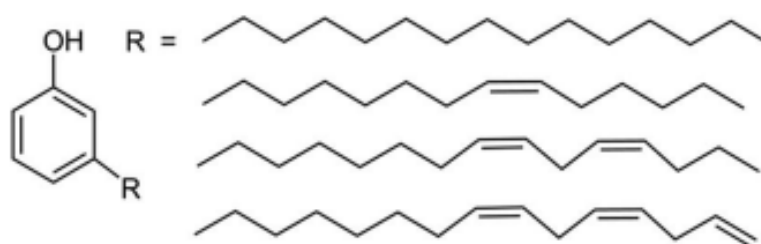


Figura 18: Estrutura química do cardanol adaptado de (Kumar et al., 2018)

Na Figura 19 está esquematizada a reação de epoxidação do cardanol.

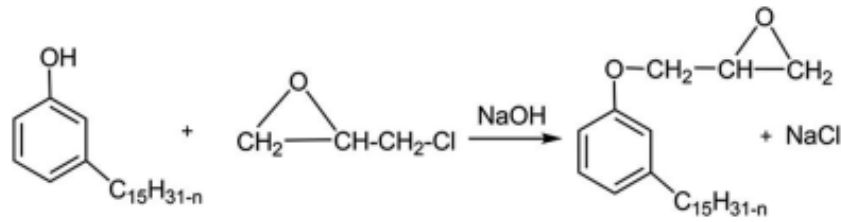


Figura 19: Reação de epoxidação do cardanol (Kumar et al., 2018)

- **Ácido gálico**

O ácido gálico, composto derivado dos taninos hidrolíticos, possui três grupos fenólicos e um grupo carboxílico que podem ser usados na síntese da resina epóxi de base biológica (Figura 20) (Ares-Elejoste et al., 2023; Liu et al., 2021). O ácido gálico e os seus derivados estão presentes nas uvas, no chá, nos legumes, no mel e em tecidos vegetais (Ramon et al., 2018).

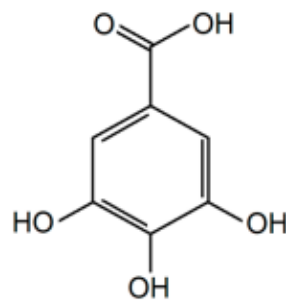


Figura 20: Estrutura química do ácido gálico (Ramon et al., 2018)

A reação de síntese da bio-resina epóxi através do ácido gálico está representada na Figura 21.

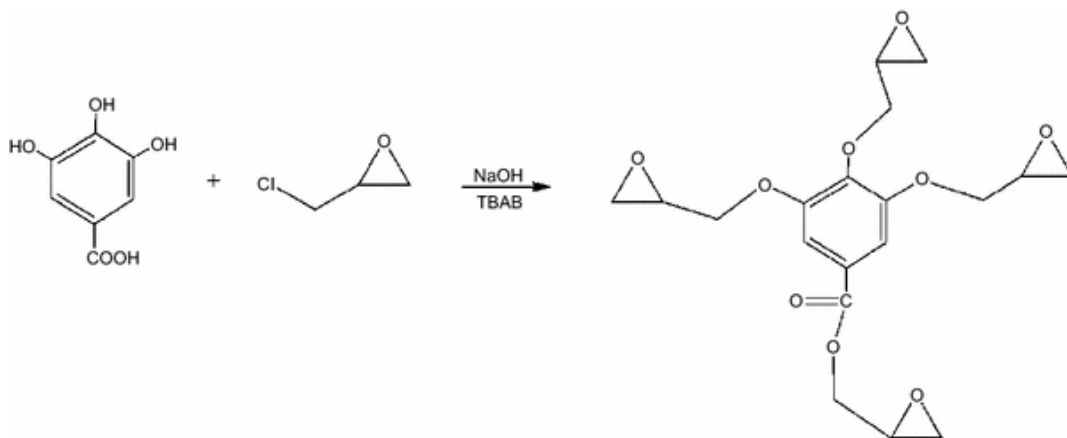


Figura 21: Reação de epoxidação do ácido gálico (Patil et al., 2017)

- **Lenhina**

A lenhina é o segundo polímero natural mais abundante, a seguir à celulose e possui um enorme potencial como matéria-prima verde (Ares-Elejoste et al., 2023; Ramon et al., 2018).

É uma das principais alternativas ao bisfenol A na síntese de resinas epoxídicas de base biológica, pois possui uma estrutura aromática que contém grupos hidroxilo, carboxílicos e fenólicos, que podem reagir muito facilmente com a epícloridrina para formar as bio-resinas epóxi (Kumar et al., 2018; Ramon et al., 2018).

Na Figura 22 está representada a reação de síntese da resina epóxi através da lenhina.

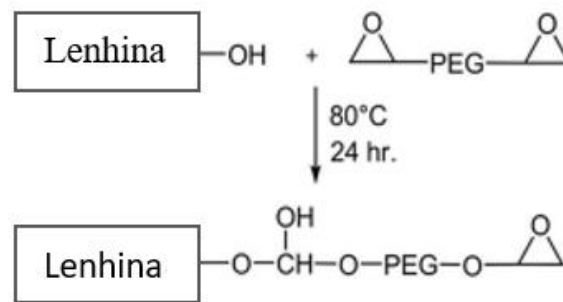


Figura 22: Reação de síntese da lenhina epoxidada adaptado de (Kumar et al., 2018)

2.4. Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais

Devido às novas regulamentações ambientais, há uma crescente preocupação com a sustentabilidade e o custo elevado dos recursos petrolíferos, o uso de recursos naturais tem aumentado, o que por sua vez levou as indústrias e investigadores a procurar e a desenvolver materiais alternativos mais sustentáveis. Um exemplo desses materiais são os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais (Kamarudin et al., 2022).

Tal como foi mencionado anteriormente, as fibras naturais possuem inúmeras vantagens em relação às fibras sintéticas (ex: menor emissão de gases com efeito de estufa, reciclabilidade, são mais simples de manusear, não são tóxicas). Para além disso, a quantidade de fibra utilizada nos compósitos de fibras naturais é muito mais elevada do que a usada nos compósitos reforçados com fibras sintéticas, o que conseqüentemente diminui o teor de polímero utilizado no fabrico do compósito, tornando-o assim mais seguro para o ambiente (Kamarudin et al., 2022; Kerni et al., 2020; Rohit & Dixit, 2016).

Apesar das suas inúmeras vantagens, as fibras naturais possuem alguns problemas que dificultam o desenvolvimento deste tipo de compósitos: a sua natureza hidrofílica e a fraca molhabilidade. Estas duas características enfraquecem a ligação entre a matriz e o reforço e leva à produção de compósitos com fracas propriedades mecânicas (Kerni et al., 2020; Ramachandran et al., 2022).

À medida que as fibras naturais absorvem água elas incham, o que provoca uma instabilidade dimensional no compósito, que poderá eventualmente provocar danos graves no mesmo. Além disso, à medida que o material compósito absorve água ele fica mais suscetível ao ataque de fungos, de insetos e de outros organismos prejudiciais (Ferreira et al., 2018; Ramachandran et al., 2022).

Para além dos problemas mencionados, as fibras naturais possuem uma menor estabilidade dimensional e térmica e têm tendência para formar agregados durante o processo de fabrico dos compósitos, o que limita o seu uso como material de reforço (Kerni et al., 2020).

Devido à sua limitada estabilidade térmica, a temperatura máxima de processamento é cerca de 200°C, o que reduz as opções de materiais que podem ser usados como matriz para plásticos com baixos pontos de fusão (ex: PP, PE, PVC e PS). E isto cria outro problema, pois a maioria destes plásticos possui uma performance baixa comparativamente a outros termoplásticos mais avançados (Väisänen et al., 2017; Wambua et al., 2003).

2.4.1. Comportamento mecânico

O comportamento mecânico dos materiais compósitos depende de vários fatores, nomeadamente dos componentes usados e da interação entre eles, do comprimento, da forma, do tamanho, da composição, da orientação e da distribuição das fibras, bem como da sua fração volumétrica, das propriedades mecânicas da resina e das técnicas de fabrico (Lopes, 2009; Ramos, 2007).

As fibras podem estar dispersas na matriz de forma alinhada ou aleatória. E a orientação das fibras pode ser unidirecional ou bidirecional (Figura 23). Se as cargas aplicadas ao compósito forem na direção das fibras, então o compósito terá características mecânicas e físicas superiores às dos compósitos cujas fibras estão orientadas transversalmente à tensão aplicada (Kerni et al., 2020; Lopes, 2009).

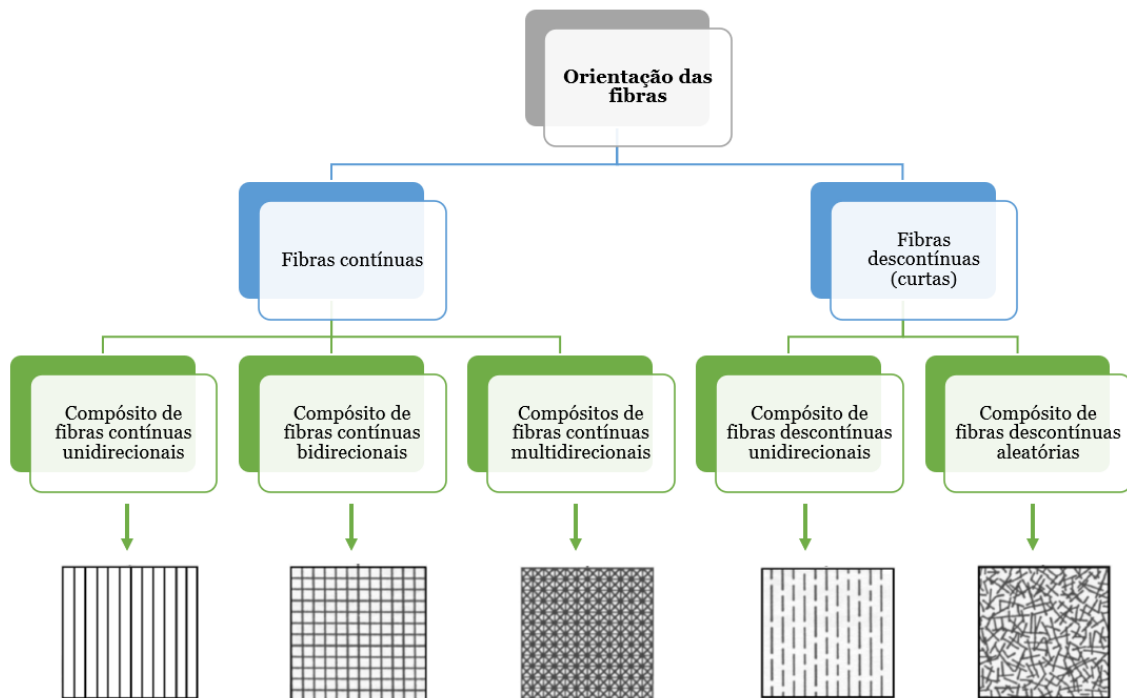


Figura 23: Orientação das fibras nos compósitos adaptado de (Elísio, 2013)

Quando a fração volumétrica das fibras é grande, as tensões que são aplicadas no compósito distribuem-se de forma uniforme pelas fibras. Isto traduz-se num material com características mecânicas superiores. No entanto, o aumento da quantidade das fibras não resulta necessariamente num aumento da resistência, pois a resistência tende a diminuir quando o equilíbrio entre as fibras e a resina é ultrapassado (Kerni et al., 2020; Lopes, 2009; Romão, 2003). Quando a fração volumétrica das fibras é baixa, o espaço existente entre as fibras pode ser significativo e pode ser possível observar-se na matriz deformações localizadas, que podem levar à rutura da ligação matriz-fibra (Fernandes, 2008; Kerni et al., 2020; Lopes, 2009).

Em relação ao comprimento das fibras, as fibras contínuas apresentam vantagens sobre as fibras descontínuas, tais como uma maior resistência ao impacto e maior estabilidade dimensional, mas por outro lado as fibras descontínuas possuem um preço mais baixo e são mais fáceis de processar (Kerni et al., 2020; Lopes, 2009).

Outra característica física de elevada importância para a qualidade dos compósitos é o coeficiente de expansão térmica, pois se durante a cura os valores dos coeficientes da fibra e da matriz não forem semelhantes, as sucessivas expansões e contrações dos componentes tendem a provocar cortes na zona da interface, que pode levar à falha prematura do material compósito (Pereira, 2017).

Para além dos fatores mencionados anteriormente, a escolha do tipo de matriz usada também é muito importante. A resina escolhida não deve ter uma viscosidade muito elevada, pois deve ser capaz de penetrar nas fibras e distribuir-se por cada uma delas. Mas também não deve ser muito baixa para não escorrer para fora do compósito antes do fim da cura (Keller, 2002; Pereira, 2011).

2.4.2. Interface

A interface entre as fibras e a matriz é crucial para se obter compósitos com boas propriedades mecânicas e representa um dos maiores problemas nos compósitos de fibras naturais, pois é muito difícil estabelecer uma forte ligação entre esses dois componentes. Esta dificuldade deve-se essencialmente à higroscopia das fibras, ou seja, à sua elevada capacidade de absorver humidade. A fraca resistência à humidade por parte das fibras naturais é incompatível com a elevada resistência à humidade dos polímeros, esta incompatibilidade resulta numa ligação fraca entre a matriz e as fibras (Cicala et al., 2010; Ferreira et al., 2018; Zão, 2018).

Sendo que a principal função da matriz é transferir as solicitações exteriores aplicadas no compósito às fibras é então necessária uma boa ligação entre os dois elementos, pois uma ligação interfacial deficiente resulta num compósito com fracas propriedades mecânicas e suscetíveis a ataques químicos e/ou físicos, o que resulta numa redução significativa do tempo de vida útil do material compósito (Cicala et al., 2010).

Para contornar esse problema, as fibras são submetidas a diversos tratamentos (Figura 24). Apesar dos efeitos positivos que estes tratamentos têm sobre os materiais compósitos, eles também podem provocar a sua degradação e aumentar consideravelmente os custos da sua produção (Acha et al., 2005; Väisänen et al., 2017; Wambua et al., 2003).

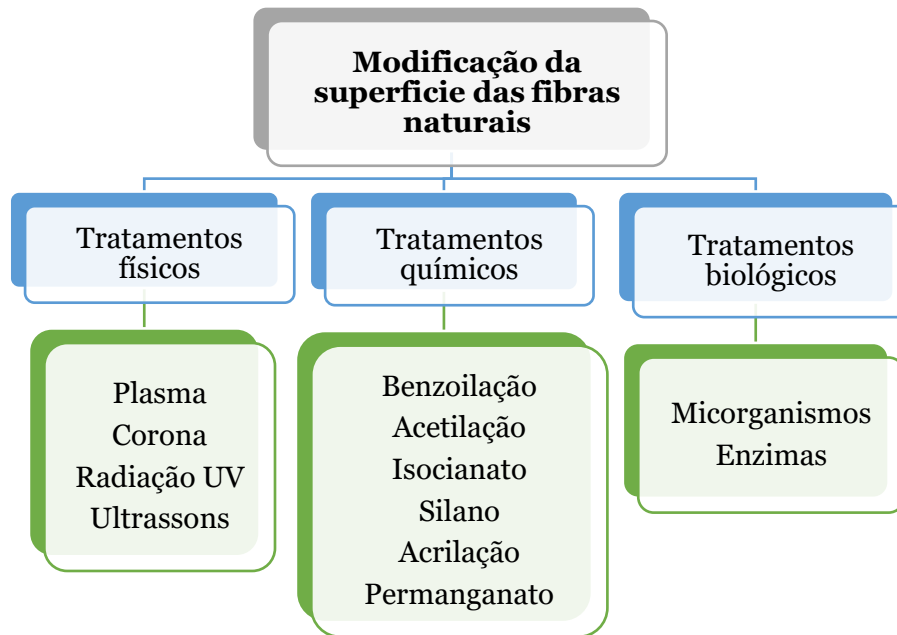


Figura 24: Tratamentos para modificação da superfície das fibras adaptado de (Ferreira et al., 2018; Kamarudin et al., 2022; Ramachandran et al., 2022)

Segundo Gomes (2023), os tratamentos químicos aplicados às fibras de lã de pêlo de cão ou danificaram as fibras (tratamento com álcool polivinílico), o que, conseqüentemente, diminuiu o desempenho mecânico dos compósitos, ou não tiveram qualquer efeito no seu desempenho (tratamento com hidróxido de sódio). Por essas razões, chegou-se a conclusão de que a melhor solução era utilizar as fibras sem que estas fossem submetidas a qualquer tipo de tratamento.

2.5. Processos de fabrico de compósitos

Existem vários processos para o fabrico de materiais compósitos dependendo do tipo de matriz e reforço utilizados (Kerni et al., 2020; Silva, 2011).

A pultrusão, a moldação manual, moldação manual sob vácuo, o enrolamento filamentar, a moldação por transferência de resina e a moldação à pistola são alguns exemplos de processos de fabrico de materiais compósitos reforçados com fibras (Zão, 2018).

No presente trabalho, os compósitos obtidos foram produzidos pelo processo de moldação manual sob vácuo.

Na moldação manual, as fibras são colocadas num molde que se encontra revestido por um filme antiaderente para facilitar a remoção da peça. Posteriormente a

resina é derramada sobre as fibras e é impregnada manualmente com o auxílio de rolos (Figura 25). O rolo é utilizado para forçar a resina a entrar nas fibras, de modo a garantir a total impregnação das fibras na resina e para diminuir os vazios e as bolhas de ar existentes no material. O laminado é deixado a curar nas condições atmosféricas normais, sem a aplicação de pressão, e após a sua cura é retirada do molde (Almeida, 2012; Chawla, 2012; Lopes, 2009; Rajak et al., 2019; Talreja & Manson, 2000).

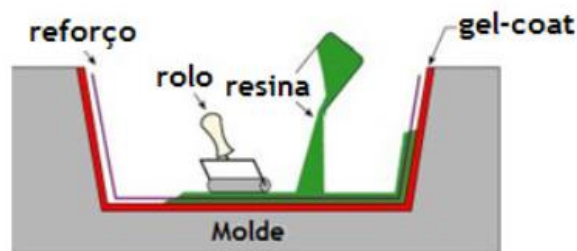


Figura 25: Moldação manual (Lopes, 2009)

Na moldação manual sob vácuo, que é uma extensão da moldação manual, é aplicado vácuo no laminado produzido por moldação manual para melhorar a sua consolidação e extrair o excesso de resina e ar nele incorporados (Figura 26) (Cavaleiro, 2018), aumentando assim a fração volúmica de reforço.

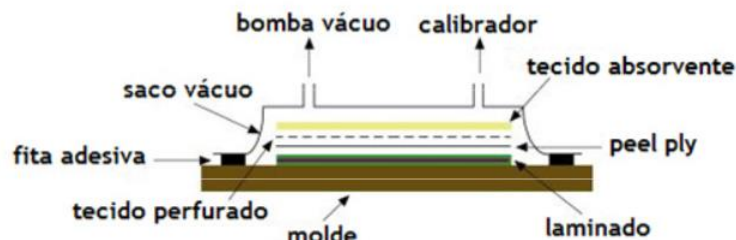


Figura 26: Moldação manual sob vácuo (Lopes, 2009)

No enrolamento filamentar, o reforço é impregnado com resina e é enrolado num mandril rotativo com a forma da peça que se pretende produzir (Lopes, 2009; Pereira, 2011). Este método normalmente é utilizado para fabricar tubos ou peças com estrutura cilíndrica (Rajak et al., 2019).

A pultrusão consiste em mergulhar as fibras na resina e, posteriormente, puxá-las através de uma fiação ou molde (Lopes, 2009), perfis de seção constante.

Na moldação à pistola, uma pistola de ar comprimido pulveriza a fibra já impregnada na resina sobre um molde. A fibra é cortada pela pistola conforme as dimensões pretendidas (Pereira, 2017; Rajak et al., 2019).

Na moldação por transferência de resina, o material de reforço é colocado entre dois moldes. Depois é injetada para o interior da cavidade existente entre esses dois moldes resina pré-aquecida sob pressão até que as fibras estejam totalmente impregnadas (Lopes, 2009; Rajak et al., 2019).

Na Tabela 10 estão indicadas algumas das vantagens e desvantagens dos diferentes métodos de fabrico mencionados.

Tabela 10: Vantagens e desvantagens dos processos de fabrico adaptado de (Almeida, 2012; Caetano, 2009; Lopes, 2009; Marinho, 2012; Moura et al., 2011; Pereira, 2011; Pereira, 2017; Rajak et al., 2019; Talreja & Manson, 2000; Zão, 2018)

Método de fabrico	Vantagens	Desvantagens
Moldação manual	<ul style="list-style-type: none"> • Método simples • Baixo custo dos equipamentos e dos materiais utilizados • Versatilidade na forma, tamanho e configuração dos laminados produzidos 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade elevada de mão-de-obra • Influência do operador na qualidade do produto • Baixa produtividade • Bom acabamento superficial apenas numa face • Teor de fibras heterogéneo • Inconsistência dimensional • As peças, após a sua produção, têm de ser sujeitas a um “tratamento” para melhorar o seu acabamento (eliminação de rebarbas)
Moldação manual sob vácuo	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa quantidade de vazios e de bolhas de ar • Grau de impregnação das fibras elevado • Menor desperdício e mão-de-obra que a moldação manual 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa produtividade (mas superior à moldação manual) • Necessidade de uma bomba de vácuo, que aumenta o custo do processo • Desperdício da maior parte dos consumíveis utilizados no processo
Enrolamento filamental	<ul style="list-style-type: none"> • Processo rápido e de baixo custo • Repetibilidade e exatidão na colocação das peças • Elevada fração volumétrica das fibras • Baixo desperdício de material • Produção de peças com boas propriedades mecânicas, pois as fibras podem ser colocadas num padrão complexo para conseguir suportar as cargas a que serão sujeitas 	<ul style="list-style-type: none"> • Os mandris podem ser materiais bastantes complexos e caros • A alteração da orientação das fibras é difícil • Limitado ao fabrico de peças com formas cilíndricas

<p>Moldação por transferência de resina</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Produção de laminados ricos em fibras, com poucos vazios e bom acabamento em ambas as faces • Produção de peças com elevada qualidade, resistência e complexidade • Controlo da quantidade de resina e fibras utilizadas (não há desperdício) • Elevada produtividade 	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento inicial de elevado custo • Dificuldade em prever o fluxo da resina (a velocidade de injeção depende da permeabilidade do reforço) • Limitações dimensionais
<p>Pultrusão</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada fração volumétrica das fibras • Elevada produtividade • Produção de peças com uma boa relação resistência/peso • Possibilidade de se fabricar peças complexas • Produção de peças com boa estabilidade dimensional • Não há desperdício 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitado à produção de peças com formas simples e seções transversais uniformes • O aquecimento das fibras tem um custo elevado
<p>Moldação à pistola</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo dos equipamentos e dos materiais utilizados • Excelente impregnação da resina nas fibras devido à combinação destas na pistola, reduzindo assim os vazios e as bolhas de ar nas peças produzidas • Maior produtividade que a moldação manual • Versatilidade na forma dos laminados 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade da peça dependente do operador • Peças com propriedades mecânicas baixas devido à utilização de fibras curtas e à dispersão e orientação aleatória destas • Elevado desperdício de matéria-prima

2.6. Aplicações dos compósitos poliméricos reforçados com fibras

A flexibilidade das propriedades mecânicas dos materiais compósitos torna-os ideais para uma enorme variedade de aplicações. Podem ser usados tanto no fabrico de utensílios domésticos como de materiais avançados com aplicações específicas (Kamarudin et al., 2022; Rohit & Dixit, 2016).

Uma das principais aplicações dos compósitos reforçados com fibras naturais é a indústria automóvel. Muitos fabricantes de automóveis passaram a utilizar este tipo de

compósitos no fabrico de peças estruturais, pois para além da sua elevada resistência e durabilidade, são mais leves, logo tornam o carro mais leve, conseqüentemente, o carro consome menos combustível e a emissão de gases poluentes é menor (Kamarudin et al., 2022; Rohit & Dixit, 2016).

Podem também ser usados na construção civil (ex: molduras das portas), no fabrico de equipamentos desportivo (ex: raquetes de ténis, tacos de golfe, pranchas de surf) e médico. Além disso, podem ser usados na produção de embalagens. A maioria das embalagens usadas atualmente são produzidas a partir de polímeros não biodegradáveis e quase indestrutíveis. A persistência destes materiais no meio ambiente cria grandes problemas de poluição e de descarte. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais podem amenizar os problemas associados aos materiais convencionais (Kamarudin et al., 2022; Rohit & Dixit, 2016).

Para além das aplicações mencionadas, os compósitos reforçados com fibras naturais podem ser utilizados para o fabrico de móveis e nas indústrias aeroespacial e energética. Esta diversidade de aplicações destaca a versatilidade e o enorme potencial destes materiais (Kamarudin et al., 2022; Rohit & Dixit, 2016).

2.6.1. Desafios e perspectivas futuras

O aprimoramento das propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais possui imensos desafios. Existe uma lacuna no conhecimento em relação à segurança, à durabilidade e à reciclabilidade destes compósitos.

A degradação das fibras e dos polímeros, o alto teor de humidade, a inflamabilidade, a variação na composição química das fibras, a fraca ligação entre as fibras hidrofílicas e os polímeros hidrofóbicos são os principais obstáculos na reciclagem e na aplicação destes materiais compósitos.

Apesar das limitações que lhe estão associados, o uso destes materiais tem vindo a aumentar de dia para dia, principalmente na indústria automóvel (Kamarudin et al., 2022).

3. Materiais e métodos

3.1. Materiais

3.1.1. Fibras

A lã do pêlo do cão da Serra da Estrela utilizada na produção dos compósitos foi obtida através da escovagem, na Primavera, de uma cadela da raça Serra da Estrela durante a mudança de pêlo do Inverno para o Verão e, os fios de lã de ovelha da Serra da Estrela foram obtidos da Burel Factory, sem a lã ter sido submetida a qualquer lavagem ou tratamento.

3.1.2. Resina

Na produção dos compósitos utilizou-se a resina SR GreenPoxy 56 e o endurecedor SD Surf Clear, ambos da marca Sicomin.

A ficha técnica da resina utilizada encontra-se no Anexo A.

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização das fibras

- **Difração de Raios-X (DR-X)**

Realizou-se a difração de Raios-X (DR-X) num difratómetro da marca Rigaku, modelo DMAX 111/C, com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,54\text{\AA}$), tensão de 40 kV e corrente de 30 mA, para caracterizar as fibras de lã de ovelha e de lã do pêlo de cão. Os ensaios foram realizados com um intervalo de $0,05^\circ$ e uma velocidade de $1,2^\circ/\text{min}$.

- **Testes de tração dos fios**

Adaptando a norma ASTM D3822-14, realizaram-se testes de tração para estudar o comportamento mecânico dos fios das fibras utilizadas no reforço dos compósitos produzidos. Os testes foram realizados numa máquina universal de ensaios mecânicos Twing-Albert com uma célula de carga de 0,5 kN, a uma velocidade de 10 mm/min. A distância entre garras foi de 100 mm.

As imagens ampliadas dos fios utilizados nos reforços encontram-se na Figura 27.



Figura 27: Fios das fibras usadas no reforço – **(a)** fio de lã de ovelha; **(b)** fio de lã de pêlo de cão

- **Microscópio Eletrônico de Varrimento (SEM)**

Foram obtidas imagens de alta resolução dos tecidos feitos em crochê a partir da lã de ovelha e dos compósitos produzidos após os ensaios de tração, utilizando um microscópio eletrônico de varrimento (SEM) da marca HITACHI, modelo S-3400N.

3.2.2. Cardação das fibras da lã de cão

Distribui-se pequenas quantidades do pêlo de cão no tambor rotativo. As fibras ficaram agarradas aos dentes do tambor e à medida que este ia girando ia penteando e alinhando as fibras na mesma direção (Figura 28).



Figura 28: Tambor rotativo

Depois retirou-se o pêlo do motor rotativo. Após a cardação, as fibras ficaram agrupadas numa espécie de manta pronta a ser fiada (Figura 29).



Figura 29: *Fibras da lã de cão após a cardação*

3.2.3. Fiação das fibras da lã de cão

Torceu-se manualmente uma pequena quantidade de lã de pêlo de cão da Serra da Estrela para se formar uma espécie de fio, que posteriormente foi introduzido na máquina de fiar para dar início ao processo de fiação.

Depois à medida que se ia pedalando, a lã de pêlo de cão ia sendo puxada pela máquina de fiar e as fibras foram esticadas e torcidas dando origem a um fio uniforme (Figura 30).



(a)



(b)



(c)

Figura 30: Processo da fiação manual das fibras de lã do cão da Serra da Estrela - **(a)** Início da alimentação do pêlo ao fuso; **(b)** Enrolamento do fio contínuo no mandril do fuso; **(c)** Mandril do fuso cheio de fio de lã de cão

Depois de a lã do pêlo de cão estar completamente fiada, removeu-se o fio do mandril (Figura 31).



Figura 31: Novelo de lã do pêlo do cão da Serra da Estrela após a fiação

3.2.4. Produção dos reforços

As malhas feitas por crochê foram produzidas através do ponto baixo e na sua produção foram usadas duas agulhas: a agulha 5 e a agulha 3. Na produção das malhas em tricô foi usada apenas a agulha 5 e o ponto utilizado foi o ponto meia. Nos tecidos planos, o padrão produzido foi o tafetá (Figura 32).

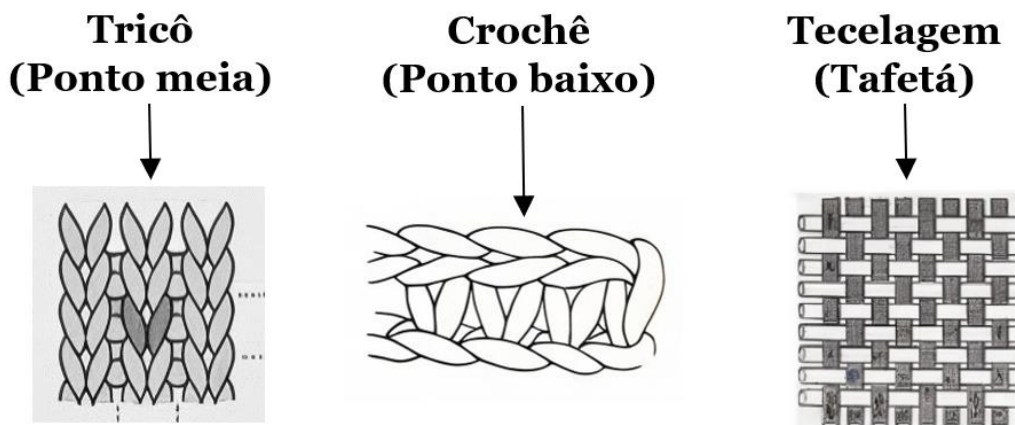



Figura 32: Esquema dos pontos e padrão utilizados na produção do reforço

Os provetes produzidos vão obedecer à seguinte nomenclatura: X_Y_W_Z, onde X se refere à origem do pêlo e toma as letras C (cão) e O (ovelha); Y refere-se ao tipo de estrutura têxtil e toma as letras C (crochê), T (tricô) e TT (tecelagem); W refere-se ao número de fios utilizados e toma os códigos 1F (1 fio), 2F (2 fios) e 3F (3 fios); finalmente Z refere-se ao número/tamanho da(s) agulha(s) usadas e toma os códigos A3 (agulha nº 3) e A5 (agulha nº 5).

Na Tabela 11 encontram-se algumas das estruturas têxtil produzidas com os fios de lã de ovelha e de cão, que posteriormente foram usadas como material de reforço dos compósitos produzidos.

Tabela 11: Alguns dos tecidos utilizados como reforço

		Tipo de lã	
		Ovelha	Cão
Tipo de estrutura têxtil	Crochê		
	Tricô		
	Tecelagem		

3.2.5. Produção dos compósitos

Os compósitos foram produzidos através do processo de moldação manual, seguido de um período de confinamento num saco de vácuo até ocorrer a sua cura. Tal como se pode ver na Figura 33, o primeiro passo na produção dos compósitos foi envolver as placas de alumínio com papel desmoldante, neste caso foram envolvidas com teflon.

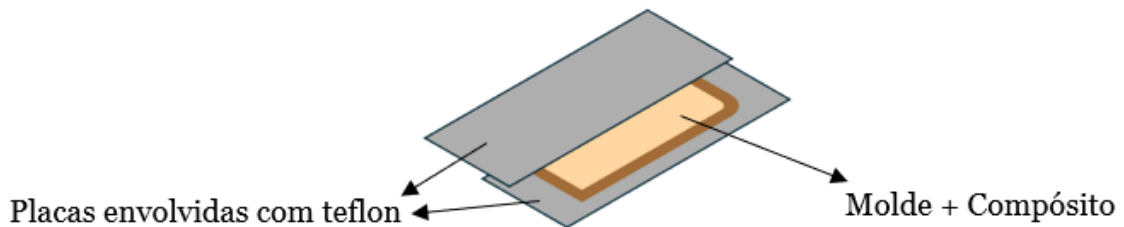


Figura 33: Esquema da produção dos compósitos

O passo seguinte é a preparação do molde. O molde utilizado tem as seguintes dimensões: 29 cm x 17 cm x 0,1 cm. Depois de o molde estar devidamente cortado, misturou-se a resina com o endurecedor numa proporção em peso de 73:27, e homogeneizou-se a mistura com o auxílio de um rotor.

Posteriormente colocaram-se as estruturas têxtil no molde e distribui-se a mistura resina + endurecedor pelo reforço com o auxílio de um cartão até este estar completamente embebido pela mistura (Figura 34).



Figura 34: Tecido plano produzido com o fio de lã de pêlo de cão embebido pela matriz

Posteriormente, colocou-se o compósito no interior de um saco de vácuo. Após ser selado aplicou-se, durante 4 horas, vácuo no seu interior (Figura 35).



Figura 35: *Compósito sob vácuo*

Decorridas as 4 horas retirou-se o vácuo, e a cura foi realizada à temperatura ambiente durante cerca de 24 horas.

Após o processo de cura, realizou-se a pós-cura onde se colocou o compósito numa estufa (teve-se o cuidado de colocar o compósito sob uma placa de vidro para este não empenar), a 40°C, durante 24 horas (Figura 36).



Figura 36: *Pós-cura do compósito*

Nas Figuras 37 e 38, encontram-se os diferentes compósitos produzidos, de onde, posteriormente, foram cortados os provetes necessários para a realização dos ensaios mecânicos.

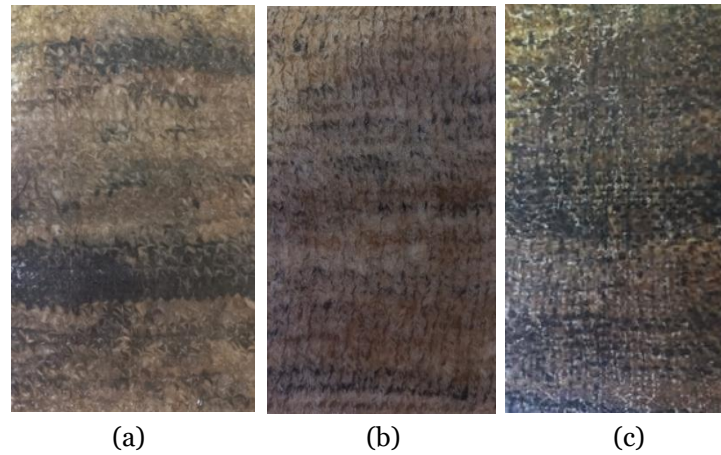


Figura 37: Compósitos reforçados com lã de pêlo de cão da Serra da Estrela - **(a)** C_C_1F_A5; **(b)** C_T_1F_A5; **(c)** C_TT_1F

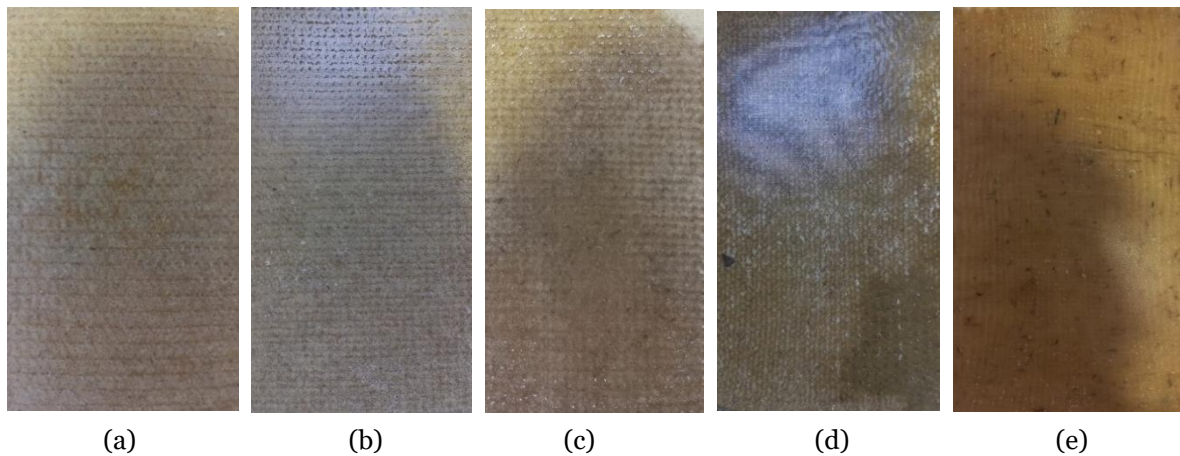


Figura 38: Compósitos reforçados com lã de ovelha da Serra da Estrela - **(a)** O_C_2F_A3; **(b)** O_C_2F_A5; **(c)** O_C_3F_A5; **(d)** O_T_3F_A5; **(e)** O_TT_3F

Os dados referentes à fração em peso das fibras nas placas de compósitos produzidos encontram-se na Tabela 12. Para garantir uma comparação fidedigna entre os vários compósitos, foi necessário assegurar a igualdade das massas entre os vários reforços produzidos, ou seja, foi necessário ajustar o número de fios usados na produção das estruturas têxteis. Nas estruturas feitas com fibras de lã de ovelha foram utilizados três fios e nas estruturas feitas a partir das fibras da lã de pêlo de cão foi usado um fio.

Tabela 12: Fração das fibras dos compósitos produzidos

Estrutura	Massa das fibras (g)	Massa do compósito (g)	Fração fibras (%)
O_C_2F_A3	42,48	121,68	34,91
O_C_2F_A5	41,48	142,20	29,17
O_C_3F_A5	61,20	172,23	35,53
C_C_1F_A5	62,96	165,89	37,95
O_T_3F_A5	33,16	157,12	21,10
C_T_1F_A5	37,04	140,74	26,31
O_TT_3F	24,12	102,47	23,54
C_TT_1F	35,69	110,68	32,25

3.2.6. Testes mecânicos dos compósitos

Foram realizados testes de flexão e de tração para avaliar o comportamento mecânico dos compósitos produzidos.

Os provetes utilizados nos diferentes testes mecânicos, foram obtidos das placas de compósitos produzidas, cortados numa máquina CNC por jato de água.

- **Testes de tração**

Os testes de tração foram realizados de acordo com as normas ISO 527-4:2023 e ISO 527-1:2019, numa máquina Shimadzu, equipada com uma célula de carga de 50 kN a uma velocidade de 2 mm/min. Durante os ensaios foi usado o software *ZEISS INSPECT Correlate*, fornecido pela ZEISS INSPECT (Figura 39) para determinar a deformação.

Ao mesmo tempo que se realizaram os testes de tração com a máquina Shimadzu, o *ZEISS INSPECT Correlate* obteve imagens dos provetes, sendo assim possível realizar uma análise mais detalhada do campo de deformações ao longo de toda a superfície do provete durante os testes.

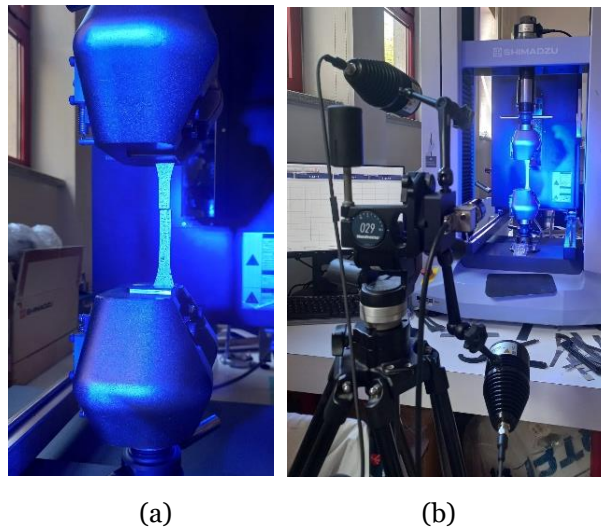


Figura 39: Ensaios de tração dos compósitos – **(a)** Provete a ser ensaiado; **(b)** Set-up do ensaio de tração com o sistema ZEISS INSPECT Correlate acoplado

As dimensões dos provetes utilizados podem ser observadas na Tabela 13. A distância entre as garras foi de 100 mm.

Tabela 13: Dimensões dos provetes dos ensaios de tração

	Espessura (mm)	Largura (mm)
O_C_2F_A3	3,15	10
O_C_2F_A5	4,35	
O_C_3F_A5	3,31	
C_C_1F_A5	3,22	
O_T_3F_A5	3,35	
C_T_1F_A5	4,23	
O_TT_3F	2,10	
C_TT_1F	2,10	

Na Figura 40 é possível observar alguns dos provetes utilizados nos ensaios de tração (antes da realização dos ensaios).



Figura 40: Provetes usados nos ensaios de tração

A tensão à tração pode ser obtida através da equação:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

e a deformação à tração calculada a partir da equação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$

Onde:

σ é a tensão à tração (MPa);

F corresponde à força aplicada (N) e medida pela célula de carga na máquina de tração;

A é a área do provete (mm^2);

ε corresponde à deformação à tração;

ΔL_0 é o comprimento útil do provete (mm), medido da distância entre as garras;

L_0 corresponde ao deslocamento da garra móvel, e corresponde ao comprimento que o provete esticou (mm). Na medição da deformação foi usada a técnica de Correlação Digital de Imagem (DIC), onde a deformação foi calculada em cada ponto da superfície dos provetes, usando o software *ZEISS INSPECT Correlate*, fornecido pela ZEISS INSPECT, para medir as variações das posições relativas dos pontos entre os vários *frames* obtidos durante o ensaio. A nuvem de pontos pintada na superfície dos provetes pode ser observada na Figura 40.

- **Testes de flexão**

Realizaram-se testes de flexão em três pontos conforme a norma ISO 178:2019 recorrendo à máquina de ensaios universal Shimadzu, modelo Autograph AGS-X com uma célula de carga de 10kN para determinar a resistência à flexão dos provetes (Figura 41).

Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 1,5 mm/min.



Figura 41: Máquina Shimadzu, modelo Autograph AGS-X

Na Tabela 14 encontram-se indicadas as dimensões dos vários provetes utilizados e a distância entre os apoios e na Figura 42 é possível observar alguns dos provetes utilizados (antes da realização dos ensaios).

Tabela 14: Dimensões dos provetes e distância entre apoios dos ensaios de flexão

	Espessura (mm)	Largura (mm)	Distância entre os apoios (mm)
O_C_2F_A3	3,08	10	49
O_C_2F_A5	4,00		64
O_C_3F_A5	3,25		52
C_C_1F_A5	3,42		55
O_T_3F_A5	3,60		*58
C_T_1F_A5	4,10		66
O_TT_3F	2,00		32
C_TT_1F	2,50		40

Nota: Nos ensaios realizados para o compósito O_T_3F_A5, a distância entre os apoios correta era aproximadamente 58 mm, mas devido a um lapso a distância utilizada foi de 52 mm (a mesma distância usada nos ensaios para o compósito O_C_3F_A5).



Figura 42: Provetes usados nos ensaios de flexão

A tensão à flexão dos provetes é calculada através da equação:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

e a deformação à flexão é obtida a partir da equação:

$$\varepsilon = \frac{6sh}{L^2}$$

Onde:

σ é a tensão à flexão (MPa);

F é a força aplicada (N) medida pela célula de carga e registada pela máquina de ensaios;

L é a distância entre os apoios (mm);

b é a largura do provete (mm);

h é a espessura do provete (mm);

ε é a deformação à flexão;

s corresponde à deflexão obtida (mm) no apoio central móvel, medida e registada pela máquina de ensaios.

4. Resultados e discussão

4.1. Caracterização das fibras

4.1.1. Difração de Raios – X (DR-X)

Na Figura 43 encontram-se representados os padrões DR-X obtidos para as fibras de lã de ovelha e de pêlo de cão da Serra da Estrela. Através da análise desta figura, é possível observar, em ambas as fibras, dois fortes picos de difração nos ângulos 2θ , um aproximadamente de 9° e outro de aproximadamente 20° , que correspondem às estruturas α -hélice e β -plissada da queratina, respetivamente. Para além disso, é possível verificar que o pico de difração no ângulo 2θ de aproximadamente 20° possui uma forma mais larga, o que pode ser atribuído à sobreposição das estruturas β -plissadas (Wang et al., 2018; Wu et al., 2017).

Comparando as duas fibras, podemos verificar que o pêlo de cão tem picos de difração menos intensos que a lã de ovelha, o que sugere que a fibra do pêlo de cão é menos cristalina que a fibra de lã de ovelha (Wu et al., 2017). As fibras de lã de ovelha e de pêlo de cão apresentam um grau de cristalinidade de 58,82% e 56,60%, respetivamente.

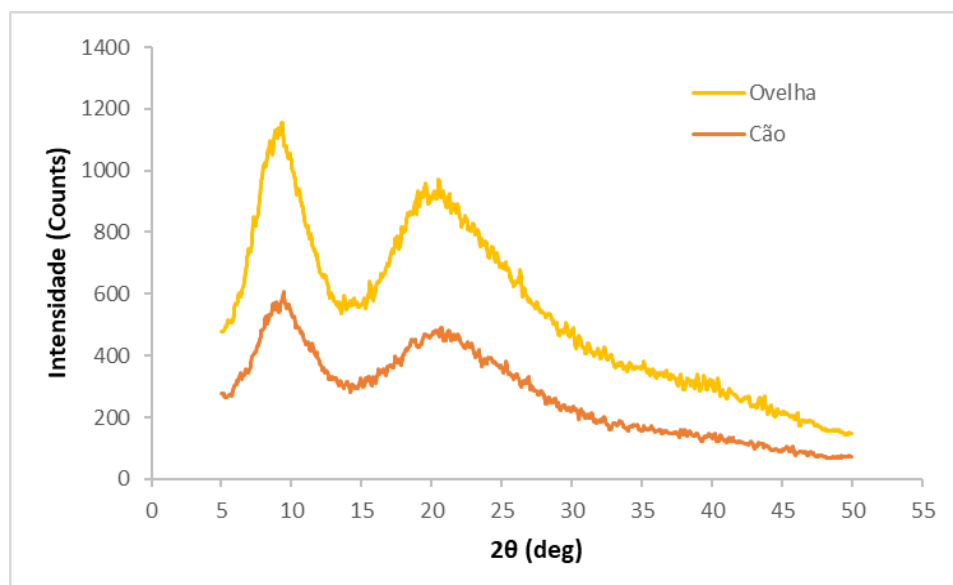


Figura 43: Padrões DR-X para as fibras de lã de ovelha e de pêlo de cão

4.1.2. Testes de tração dos fios

Analisando o gráfico da Figura 44, podemos observar que o fio de lã de pêlo de cão apresenta um valor médio de tensão à tração máximo superior ao apresentado pelo fio de lã de ovelha (22,80 MPa e 19,32 MPa, respetivamente). Podemos também observar que, após atingir o pico de tensão à tração, o fio de lã de pêlo de cão rompe imediatamente (queda súbita da tensão após atingir o valor máximo). Por outro lado, o fio de lã de ovelha não rompe após atingir o máximo de tensão. Na verdade, pela análise do gráfico, não podemos

afirmar que o fio parte completamente. O que se verifica é uma diminuição gradual da tensão, que sugere que as fibras estavam a partir-se uma a uma.

Os gráficos da tensão de tração em função da deformação para ambos os fios podem ser observados no Anexo B.

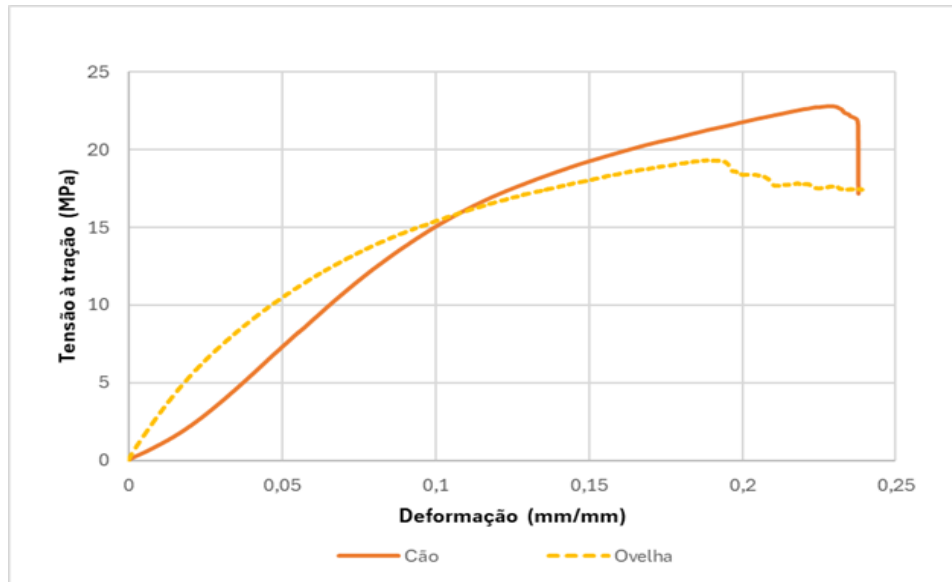


Figura 44: Gráfico de tensão à tração/deformação média dos fios

Analisando os resultados obtidos para a resistência à tração descritos na Figura 45, podemos verificar que o fio produzido a partir do pêlo de cão apresenta um valor médio superior ao apresentado pelo fio produzido a partir da lã de ovelha (23,47 MPa e 20,48 MPa, respetivamente).

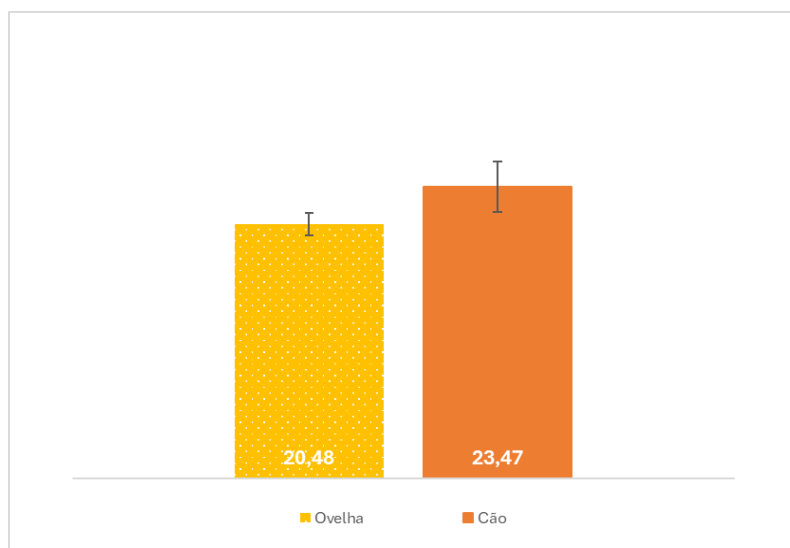


Figura 45: Resultados da resistência à tração dos fios (MPa)

A resistência diz respeito à tensão máxima que um material consegue aguentar até falhar e a resistência específica corresponde à relação entre a resistência de um material e a sua densidade, ou seja, a resistência específica mede a resistência de um material em relação à sua massa. Relativamente à resistência específica à tração (Figura 46), podemos verificar que o fio de lã do pêlo de cão apresenta um valor de resistência específica igual a 36,74 MPa/g.cm³ e o fio de lã de ovelha possui um valor igual a 28,07 MPa/g.cm³. Através destes valores é possível constatar que o fio do pêlo de cão possui uma resistência à tração específica superior à do fio de lã de ovelha.

De acordo com os dados das Figuras 45 e 46, podemos concluir que o fio de lã de pêlo de cão é mais resistente que o fio de lã de ovelha.

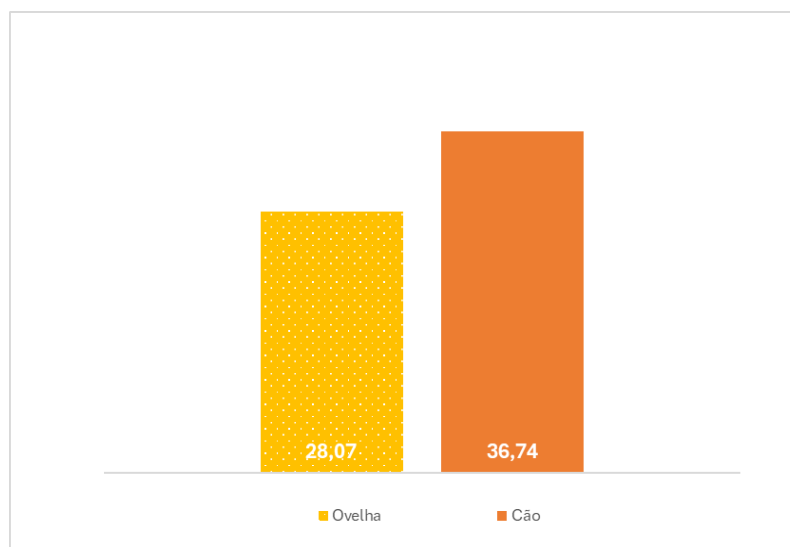


Figura 46: Resultados da resistência específica à tração dos fios (MPa/g.cm³)

O módulo de elasticidade é uma medida da rigidez do material. Quanto mais elevado for o módulo de elasticidade, mais rígido é o material e mais resistente é à deformação quando lhe é aplicada uma força. De acordo com a Figura 47, o fio de lã de ovelha apresenta um módulo de *Young* superior (0,27 GPa) em comparação com o do fio do pêlo de cão (0,19 GPa). Estes resultados eram os esperados, embora os valores obtidos sejam significativamente inferiores aos previstos (Tabelas 5 e 6). Com base nestes dados, podemos afirmar que a lã de ovelha é mais rígida que o pêlo de cão.

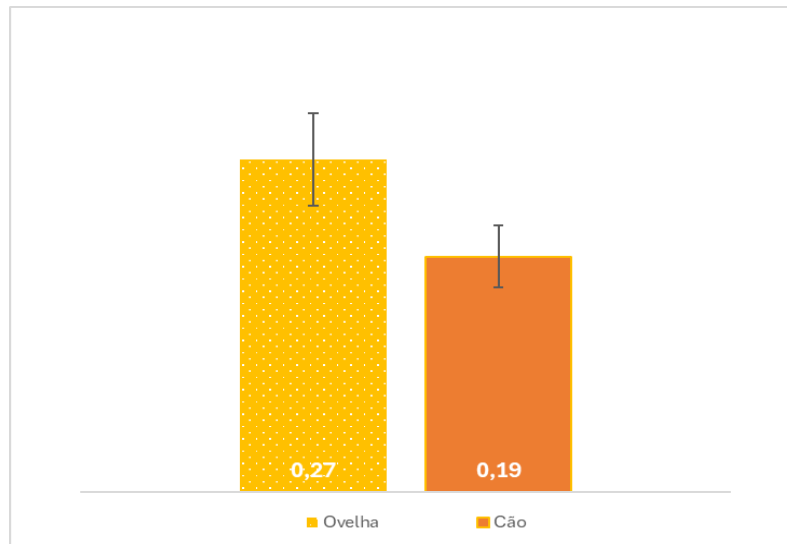


Figura 47: Resultados do módulo de Young dos fios (GPa)

Analisando a Figura 48, podemos verificar que o fio de lã de ovelha apresenta um valor de deformação à rutura superior (24,01 %) ao apresentado pelo fio de lã de pêlo de cão (23,74 %). Através destes valores, podemos afirmar que as fibras da lã de ovelha da Serra da Estrela conseguem deformar-se mais que as fibras do pêlo do cão da Serra da Estrela.

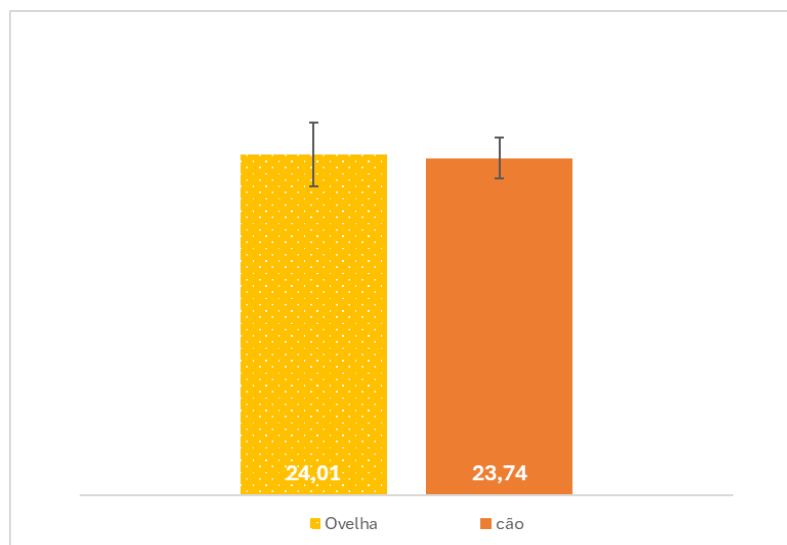


Figura 48: Resultados da deformação à rutura dos fios (%)

A tenacidade corresponde à capacidade de o material absorver energia de deformação até à rutura (ou à primeira falha) e é obtida a partir do integral da função tensão à tração em função de deformação, desde zero até à deformação na rutura (ou na primeira falha). Esse cálculo foi feito numericamente para cada curva tensão/deformação. A partir da Figura 49, podemos verificar que o fio de lã de pêlo de cão apresenta uma tenacidade superior à do fio de lã de ovelha (3,94 J/mm³ e 3,71 J/mm³, respetivamente). Estes

resultados sugerem que as fibras de lã de cão são mais tenazes e podem absorver mais energia antes de falharem do que as fibras de lã de ovelha.

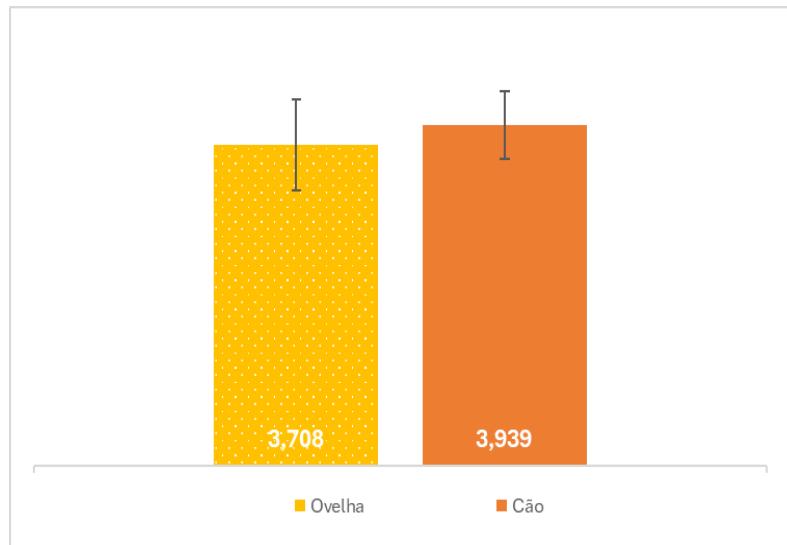


Figura 49: Resultados da tenacidade dos fios (J/mm³)

Os gráficos da tensão de tração versus deformação, onde a área sob as curvas da tensão/deformação até à rutura se encontra destacada, para os fios de lã de ovelha e de pêlo de cão encontram-se no Anexo B.

4.1.3. Microscópio Eletrónico de Varrimento (SEM) dos tecidos em crochê feitos a partir da lã de ovelha da Serra da Estrela

Na Figura 50 é possível observar as imagens SEM dos tecidos feitos em crochê e utilizados como reforço a partir dos fios da lã de ovelha. Nesta figura estão também indicados o diâmetro dos pontos produzidos pelas diferentes agulhas (agulha 3 e 5). Adicionalmente na Figura 51 é possível observar três tecidos diferentes feitos em crochê a partir dos fios da lã de ovelha com exatamente o mesmo número de pontos (10x10).

A partir da Figura 51a podemos verificar que os pontos produzidos pela agulha 3 são mais apertados, uma vez que a estrutura obtida tem menores dimensões. Analisando as Figuras 50a e 50b, podemos confirmar novamente esta afirmação, uma vez que a agulha 3 deu origem a pontos mais apertados (2,01 mm) do que a agulha 5 (2,98 mm).

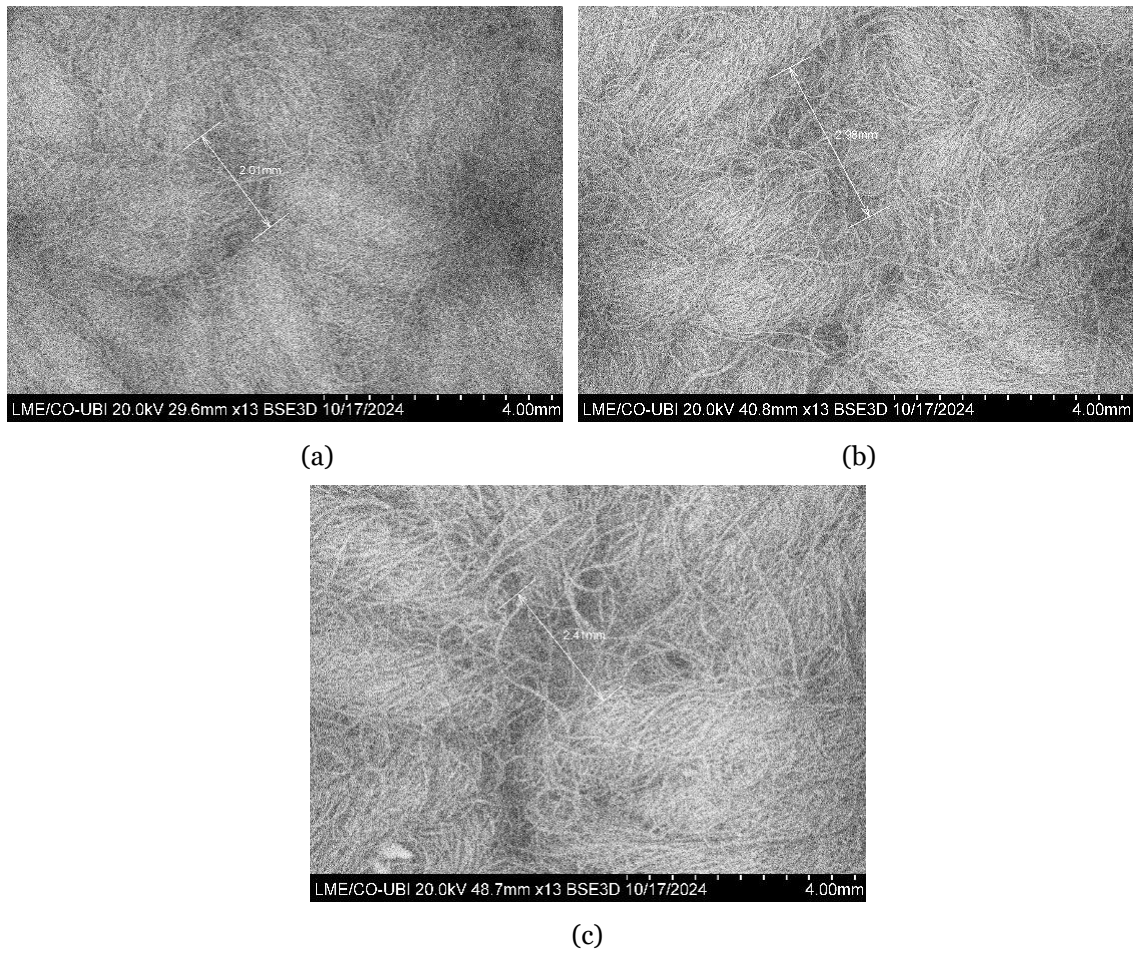
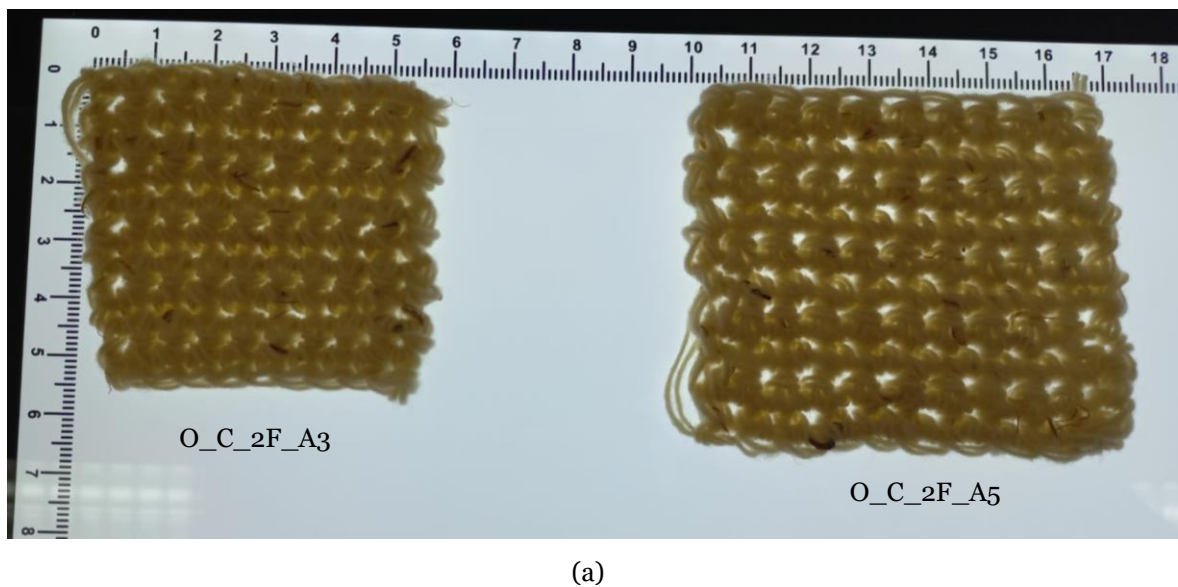
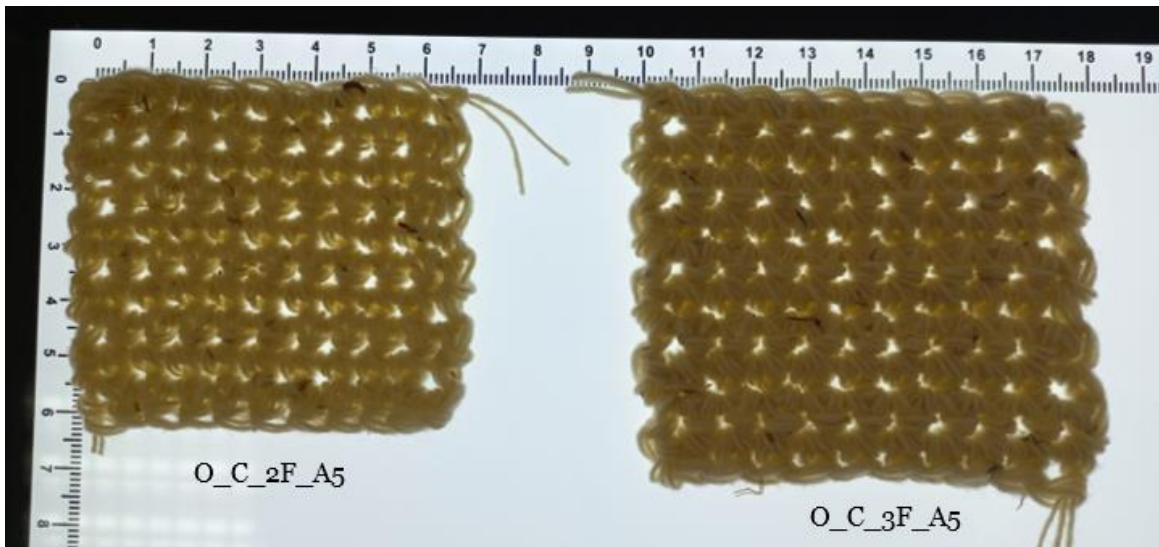


Figura 50: Imagens SEM dos tecidos feitos em crochê com lã de ovelha – (a) O_C_2F_A3; (b) O_C_2F_A5; (c) O_C_3F_A5





(b)

Figura 51: Tecidos em crochê produzidos com os fios de lã de ovelha e agulhas diferentes – (a) *O_C_2F_A3* versus *O_C_2F_A5*; (b) *O_C_2F_A5* versus *O_C_3F_A5*

4.2. Testes mecânicos dos compósitos

As Figuras 52-56 e 63-65 demonstram a influência que o número de fios e o diâmetro das agulhas utilizadas têm nas propriedades mecânicas dos compósitos e as Figuras 57-62 e 66-69 evidenciam o impacto que o tipo de fibra e o tipo de estrutura do tecido utilizado como reforço têm nas propriedades de tração e flexão dos compósitos.

4.2.1. Testes de tração

A partir do gráfico da Figura 52, podemos verificar que o compósito *O_C_3F_A5* tem o valor mais elevado de tensão à tração média de 20,77 MPa e o compósito *O_C_2F_A5* tem o valor mais baixo de 7,21 MPa.

Os gráficos da tensão à tração em função da deformação para cada um dos compósitos reforçados com tecidos feitos em crochê a partir da lã de ovelha podem ser consultados no Anexo C.

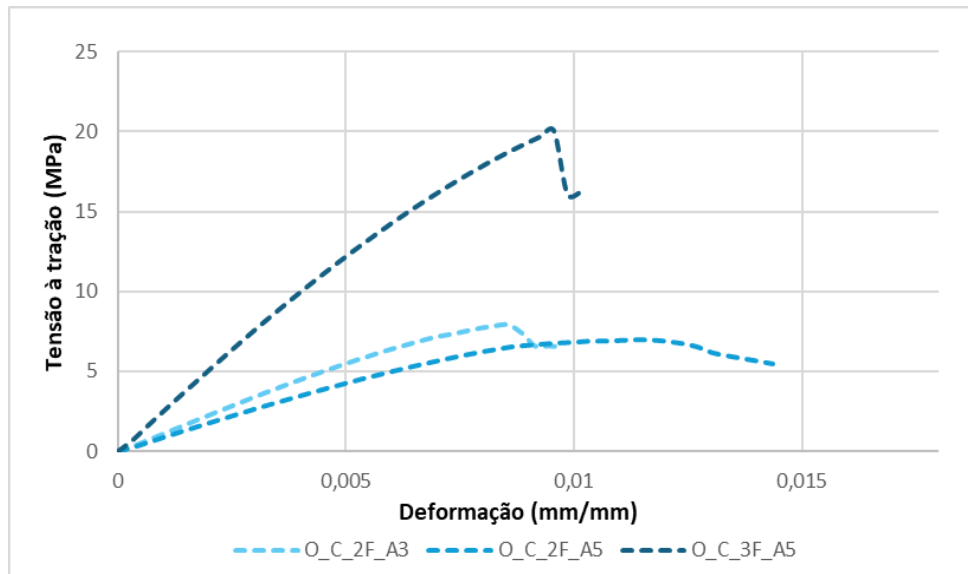


Figura 52: Gráfico de tensão/deformação média dos ensaios de tração dos compósitos reforçados com tecidos em crochê feitos a partir dos fios de lã de ovelha

De acordo com a Figura 53, o compósito O_C_3F_A5 apresenta o valor de resistência à tração mais elevado (20,77 MPa) de entre os compósitos analisados, e o compósito O_C_2F_A5 é o que apresenta o menor valor (7,21 MPa).

Analisando os compósitos O_C_2F_A5 e O_C_3F_A5 (Figura 53), é possível observar que a resistência à tração aumenta significativamente com o aumento do número de fios utilizados na produção das malhas. Relativamente à influência que o diâmetro da agulha tem na resistência à tração, podemos observar que o compósito O_C_2F_A3 apresenta uma resistência superior em comparação com o compósito O_C_2F_A5 (8,17 MPa e 7,21 MPa, respetivamente), o que seria de esperar uma vez que a agulha 3 tem um diâmetro menor do que a agulha 5. Uma agulha com menor diâmetro faz pontos mais apertados, logo as malhas produzidas são menos flexíveis e menos elásticas, o que consequentemente aumenta a resistência apresentada pelo compósito.

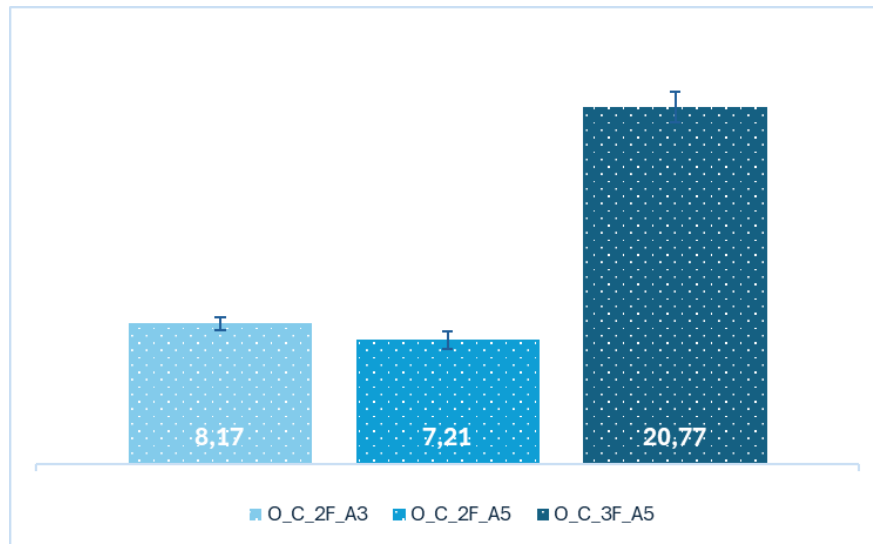


Figura 53: Resultados da resistência à tração (MPa)

Em relação aos resultados do módulo de *Young* (Figura 54), podemos verificar que o compósito com o valor mais elevado é o compósito O_C_3F_A5 (2,39 GPa), e o compósito O_C_2F_A5 tem o valor mais baixo (0,85 GPa). A Figura 54 indica que tanto o aumento do número de fios do reforço quanto a diminuição do diâmetro das agulhas utilizadas (mantendo o número de fios usados constante) aumenta a rigidez do material compósito.

O compósito O_C_2F_A5 apresenta os valores mais baixos de resistência à tração e de módulo de *Young* (Figuras 53 e 54) devido à utilização de um menor número de fios e ao uso da agulha 5 (agulha com maior diâmetro), o que faz com que as malhas produzidas sejam mais flexíveis e, conseqüentemente, o compósito produzido seja menos resistente e menos rígido. Por outro lado, o compósito O_C_3F_A5 possui o módulo de elasticidade e a resistência à tração mais elevados dos três compósitos, porque, apesar de ser reforçado com um tecido mais flexível, possui um maior número de fios que compensa essa flexibilidade.

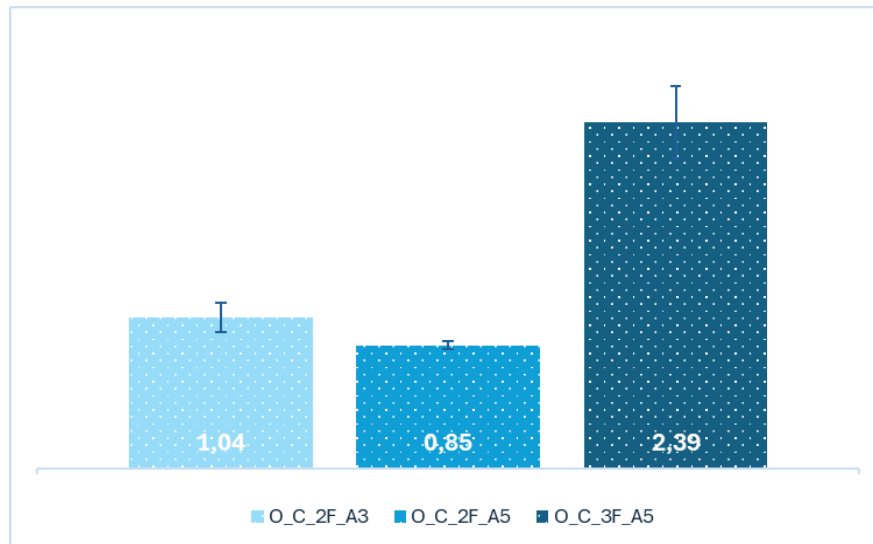


Figura 54: Resultados do módulo de Young (GPa)

A lei das misturas permite calcular os valores limite para o módulo de elasticidade global do material compósito. Considerando as condições de isotensão e de isodeformação de um compósito, em que a carga é paralela ou transversal às fibras, respetivamente, os valores limite para o módulo de *Young* do compósito podem ser respetivamente calculados pelas seguintes equações:

$$E_{C,T} = \frac{E_m \cdot E_f}{V_m \cdot E_f + V_f \cdot E_m}$$

$$E_{C,L} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f$$

Onde:

$E_{C,T}$ é o módulo de *Young* obtido considerando a condição de isotensão;

$E_{C,L}$ é o módulo de *Young* obtido considerando a condição de isodeformação;

E_m é o módulo de *Young* da matriz (N/mm²);

E_f é o módulo de *Young* da fibra (N/mm²);

V_m é a fração volúmica da matriz;

V_f é a fração volúmica da fibra.

As frações volúmicas da matriz e das fibras dos compósitos produzidos e da rigidez da matriz e das fibras utilizadas na lei das misturas, obtidas a partir da pesagem dos reforços e do compósito final, estão indicadas na Tabela 15.

Tabela 15: Frações volúmicas e módulos de Young da matriz e das fibras utilizados na lei das misturas

	V_m	V_f	E_m (GPa)	E_f (GPa)
O_C_2F_A3	0,3427	0,6573	3,3	0,27
O_C_2F_A5	0,2859	0,7141		0,27
O_C_3F_A5	0,3489	0,6511		0,27
C_C_1F_A5	0,3472	0,6528		0,19
O_T_3F_A5	0,2064	0,7936		0,27
C_T_1F_A5	0,2370	0,7630		0,19
O_TT_3F	0,2304	0,7696		0,27
C_TT_1F	0,2927	0,7073		0,19

Na Tabela 16 estão indicados os valores dos módulos de elasticidade obtidos experimentalmente e considerando as condições de isotensão e de isodeformação. Através da análise desta tabela é possível verificar que os resultados do módulo de *Young* obtidos experimentalmente estão dentro dos limites previstos pelos modelos teóricos da lei das misturas, considerando as condições de isotensão e isodeformação, exceto no caso do compósito C_T_1F_A5, em que o módulo de elasticidade obtido experimentalmente é igual ao módulo considerando a condição de isotensão.

Através destes resultados, é possível concluir que os compósitos produzidos têm uma rigidez intermédia entre a rigidez das fibras e a da matriz. Como as fibras possuem uma rigidez muito baixa, quando comparada com a rigidez da resina, a resina não será reforçada em termos de rigidez.

Tabela 16: Resultados dos módulos de Young obtidos experimentalmente e estimados considerando as condições de isotensão e isodeformação

	Condição de isotensão (GPa)	Condição de isodeformação (GPa)	Obtido experimentalmente (GPa)
O_C_2F_A3	0,68	22,62	1,04
O_C_2F_A5	0,78	24,34	0,85
O_C_3F_A5	0,67	22,43	2,39
C_C_1F_A5	0,49	22,20	1,40
O_T_3F_A5	1,00	26,75	1,96
C_T_1F_A5	0,68	25,63	0,68
O_TT_3F	0,92	26,02	2,15
C_TT_1F	0,57	23,90	1,83

Analisando a Figura 55, podemos observar que o compósito O_C_2F_A5 apresenta a maior deformação à rutura/1ª falha com um valor de 1,13 %, enquanto o compósito O_C_2F_A3 apresenta o valor mais baixo (0,93 %). O facto de o compósito O_C_2F_A5 ser o que apresenta a deformação à rutura/1ª falha mais elevada pode ser explicada pelo uso de um menor número de fios na produção do reforço e pela utilização de uma agulha com maior espessura, o que torna o tecido menos resistente e mais flexível. Para além disso, este compósito apresenta o módulo de *Young* mais baixo de entre os três compósitos estudados (Figura 54), ou seja, é o menos rígido dos três, o que pode indicar que possui alguma ductilidade e, por isso, é capaz de suportar uma maior deformação antes de atingir o seu ponto de rutura.

Comparando os compósitos O_C_3F_A5 e O_C_2F_A5 (Figura 55), podemos ver que o primeiro tem um valor mais baixo para a deformação à rutura/1ª falha (1,03 % e 1,13 %, respetivamente). Estes valores podem ser atribuídos ao facto de na produção do compósito O_C_3F_A5 ter sido usado um maior número de fios, o que aumenta a sua resistência e rigidez. A maior rigidez pode significar que o material é menos dúctil, ou seja, a deformação que pode suportar antes de falhar é menor, podendo mesmo fraturar de forma abrupta, o que se traduz numa menor percentagem de deformação. Analisando os compósitos O_C_2F_A3 e O_C_2F_A5, observamos que o compósito O_C_2F_A5 tem um valor mais elevado para a deformação à rutura/1ª falha (1,13 %) em comparação com o compósito O_C_2F_A3 (0,93 %). O valor mais elevado do compósito O_C_2F_A5, pode ser justificado pela utilização de uma agulha com um diâmetro maior na produção do reforço, que produz um tecido mais flexível que leva à produção de um compósito menos rígido. Logo, o material compósito irá deformar-se mais antes de atingir o seu ponto de rutura.

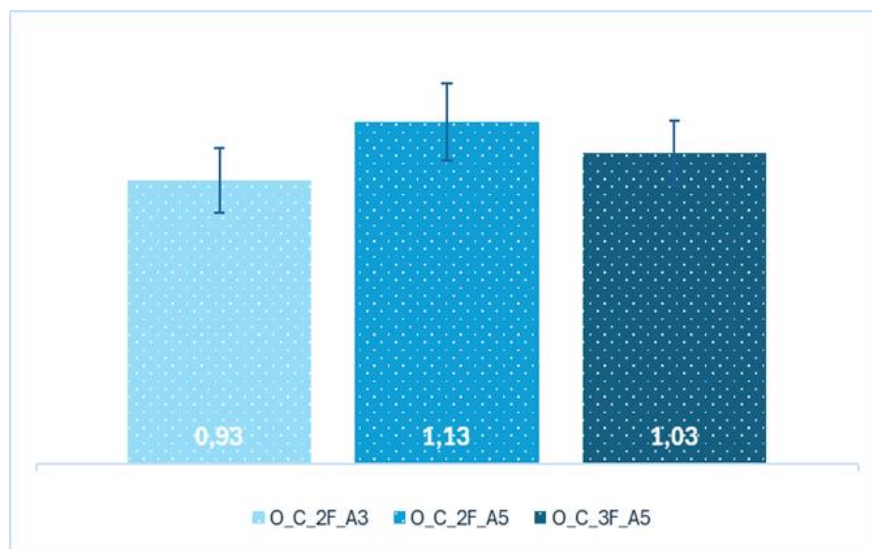


Figura 55: Resultados da deformação à rutura/1ª falha (%)

De acordo com a Figura 56, o compósito O_C_3F_A5 é o que apresenta o valor de tenacidade mais elevado com um valor igual a $0,123 \text{ J/mm}^3$, e o compósito O_C_2F_A3 o menor valor igual a $0,046 \text{ J/mm}^3$. Comparando os compósitos O_C_3F_A5 e O_C_2F_A5, é possível observar que o primeiro possui uma tenacidade superior ($0,123 \text{ J/mm}^3$ e $0,051 \text{ J/mm}^3$, respetivamente), ou seja, o compósito O_C_3F_A5 consegue absorver mais energia antes de fraturar do que o compósito O_C_2F_A5. Estes valores podem ser explicados pelo uso de um maior número de fios na produção do reforço.

Relativamente aos compósitos O_C_2F_A3 e O_C_2F_A5, podemos verificar que o primeiro apresenta uma tenacidade inferior ($0,046 \text{ J/mm}^3$ e $0,051 \text{ J/mm}^3$, respetivamente). Tendo em conta que entre estes dois compósitos, o O_C_2F_A3 é o que apresenta uma maior resistência à tração e rigidez (Figuras 53 e 54), podemos afirmar que estes resultados não estão de acordo com o esperado. Na produção do compósito O_C_2F_A3 foi utilizada a agulha com menor diâmetro, logo as malhas produzidas são menos elásticas e menos flexíveis, e os pontos feitos são mais fechados do que produzidos pela agulha 5. Por essas razões previa-se que o compósito O_C_2F_A3 fosse capaz de absorver uma maior quantidade de energia até atingir o seu ponto de rutura do que o compósito O_C_2F_A5 (Figura 56).

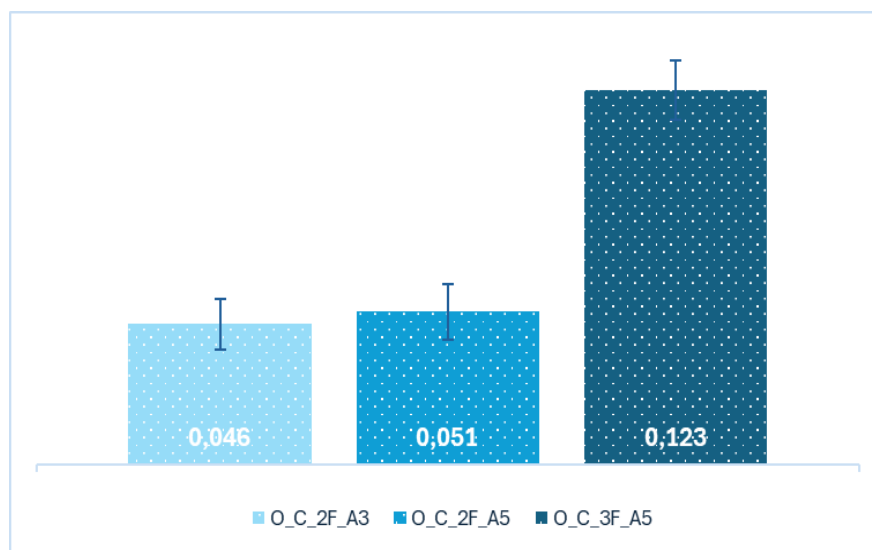


Figura 56: Resultados da tenacidade (J/mm^3)

A partir do gráfico da Figura 57, é possível observar que o compósito O_C_3F_A5 tem o valor de tensão à tração mais elevado ($20,77 \text{ MPa}$) e o compósito C_T_1F_A5 tem o valor mais baixo ($4,54 \text{ MPa}$).

Os gráficos da tensão à tração em função da deformação para cada um destes compósitos podem ser vistos no Anexo D.

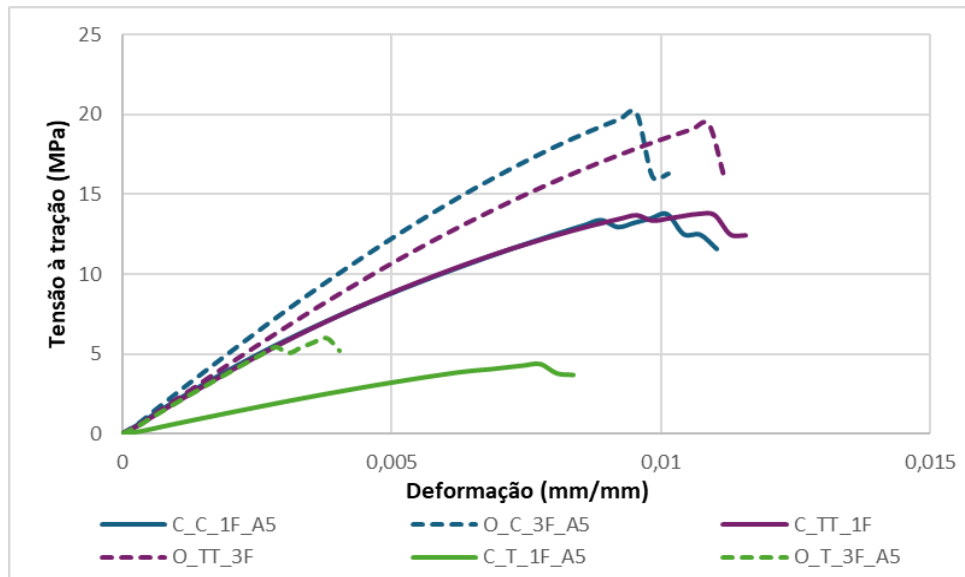


Figura 57: Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de tração

Analisando os resultados da resistência à tração da Figura 58, é possível observar que o compósito O_C_3F_A5 possui o valor de resistência à tração mais elevado de 20,77 MPa, enquanto o compósito C_T_1F_A5 possui o valor mais baixo (4,54 MPa). É possível também observar que o compósito O_TT_3F possui um valor muito semelhante ao do compósito O_C_3F_A5. O valor mais elevado da resistência à tração do compósito O_C_3F_A5 pode ser explicado pelo maior número de fios utilizados e pelo maior teor de fibras presentes (Tabela 12), já o valor mais baixo do compósito C_T_1F_A5 pode ser devido à elevada flexibilidade do tecido do reforço e ao menor número de fios utilizados.

Quando se compara os reforços produzidos pela mesma técnica, é evidente que os compósitos reforçados com lã de ovelha são mais resistentes que os reforçados com lã de pêlo de cão, o que era expectável devido ao maior número de fios utilizados. O reforço é o componente responsável por suportar quase toda a carga aplicada no compósito, logo uma maior quantidade de fios conduz a uma maior resistência (Figura 58).

Em relação à influência das diferentes técnicas de produção dos tecidos do reforço (Figura 58), os compósitos reforçados com as estruturas em crochê apresentam os valores de resistência à tração mais elevados, seguidos dos reforçados com tecidos planos (tecidos produzidos por tecelagem), enquanto os reforçados com estruturas em tricô apresentam os valores mais baixos. As malhas são mais flexíveis e elásticas que os tecidos planos (nos tecidos produzidos pela tecelagem, os fios estão interlaçados num padrão regular, são tecidos simétricos e possuem uma boa estabilidade dimensional, o que contribui para a maior resistência e rigidez dos compósitos reforçados com este tipo de tecidos) (Chowdhury & Summerscales, 2024; Rawal et al., 2023; Talabi et al., 2024), por isso teoricamente os

compósitos reforçados com tecidos feitos por tricô e por crochê teriam valores de resistência mais baixos que os compósitos reforçados com as estruturas em tafetá, no entanto, isso não se verifica para os compósitos reforçados com tecidos feitos por crochê. A maior resistência dos compósitos reforçados com tecidos em crochê pode ser explicada pela elevada quantidade de fibras presentes (Tabela 12), que compensa a maior flexibilidade e menor estabilidade dimensional das estruturas em crochê. Por outro lado, a baixa resistência dos compósitos reforçados com tecidos feitos em tricô pode ser devido à elevada elasticidade do reforço (maior elasticidade que os tecidos em crochê (Rawal et al., 2023)) e à baixa quantidade de fibras presentes nos compósitos. No crochê cada ponto é completado antes de se iniciar outro, criando uma estrutura de laços fechados, com menos espaço entre eles, o que se traduz numa estrutura menos elástica e mais densa que o tricô, onde os laços estão interligados entre si. Para além disso, o crochê gasta mais fio que o tricô, o que significa que na produção de uma estrutura com as mesmas dimensões, a quantidade de fibras presentes no tecido em crochê é maior do que no tecido em tricô (Turner, 2022).

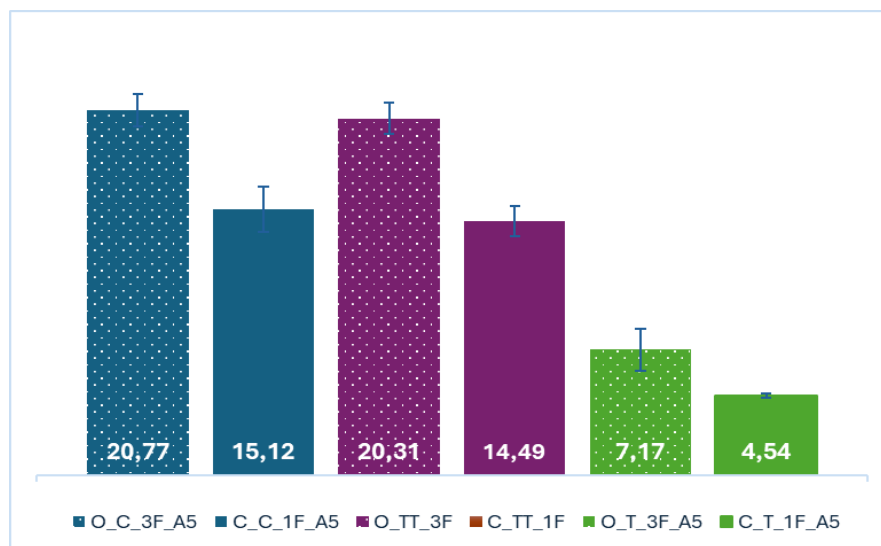


Figura 58: Resultados da resistência à tração (MPa)

De acordo com a Figura 59, podemos ver que o compósito com o valor mais elevado de resistência específica à tração é o O_TT_3F, com um valor de 20,52 MPa/g.cm³, seguido do O_C_3F_A5 com um valor de 19,68 MPa/g.cm³. O compósito com o valor mais baixo de resistência específica à tração é o C_T_1F_A5 (6,73 MPa/g.cm³). O facto de o compósito O_TT_3F apresentar a resistência específica à tração mais elevada pode ser explicada pelo maior número de fios utilizados e pela maior estabilidade dimensional do reforço. Já o valor mais baixo do compósito C_T_1F_A5 pode ser atribuído à combinação da elevada flexibilidade do reforço, do menor teor de fibras presentes (Tabela 12) e do menor número de fios utilizados no fabrico do reforço.

Quando se comparam as fibras utilizadas, os compósitos reforçados com fibras de lã de ovelha apresentam um valor mais elevado de resistência específica à tração que os reforçados com fibras de lã de pêlo de cão. Estes valores eram os esperados tendo em conta o maior número de fios utilizados nos compósitos reforçados com os fios de lã de ovelha. Relativamente à influência do tipo de estrutura têxtil utilizada como reforço nesta propriedade mecânica, é possível observar que os compósitos reforçados com tecidos feitos por tecelagem e crochê possuem os valores de resistência específica mais elevado e os reforçados com tecidos feitos em tricô são os que apresentam os valores mais baixos. Estes valores podem ser explicados pela arquitetura do reforço e pela quantidade de fibras presentes (Figura 59).

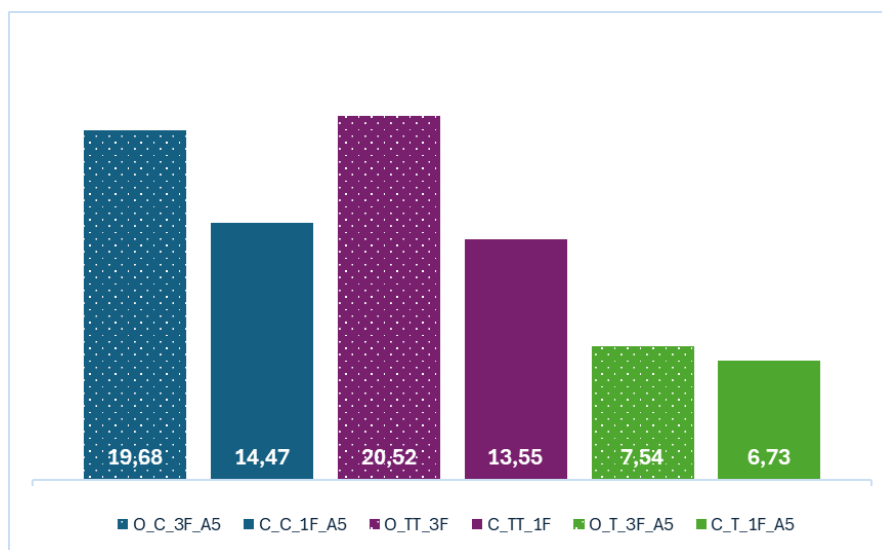


Figura 59: Resultados da resistência específica à tração (MPa/g.cm³)

Analisando os resultados do módulo de elasticidade da Figura 60, podemos observar que o compósito O_C_3F_A5 tem o valor mais elevado de 2,39 GPa, e o C_T_1F_A5 o valor mais baixo (0,66 GPa). O facto de o compósito O_C_3F_A5 apresentar o módulo de *Young* mais elevado pode ser explicado pelo maior número de fios usados na produção do reforço, pela maior rigidez das fibras (Tabelas 5 e 6 e Figura 47) e pelo alto teor de fibras presentes (Tabela 12). Já a menor rigidez do compósito C_T_1F_A5 pode ser explicada devido à menor rigidez das fibras (Figura 47), à maior elasticidade do reforço e ao menor número de fios usados durante a sua produção

Comparando os dois tipos de fibras utilizadas no reforço (Figura 60), podemos observar que os compósitos reforçados com fibras de lã de ovelha têm módulos de elasticidade mais elevados do que os reforçados com fibras de lã de pêlo de cão. Estes valores mais elevados devem-se ao facto de os compósitos produzidos com a lã de ovelha serem

reforçados com um maior número de fios e ao facto de a lã de ovelha ser mais rígida que o pêlo do cão (Tabelas 5 e 6 e Figura 47).

Relativamente à influência da arquitetura do reforço no módulo de elasticidade, verifica-se que nos compósitos onde se utilizou a lã de pêlo de cão da Serra da Estrela, os que foram reforçados com tecidos planos possuem o módulo de *Young* mais elevado. Isto pode ser explicado pelo facto de a tecelagem produzir tecidos com elevada estabilidade dimensional e pela considerável quantidade de fibras presentes (Tabela 12). Nos compósitos onde se utilizou a lã de ovelha da Serra da Estrela, os que foram reforçados com os tecidos feitos por crochê são os compósitos mais rígidos. Este resultado pode ser atribuído à elevada fração de fibras presentes nestes compósitos, que acaba por compensar a maior estabilidade dos tecidos produzidos por tecelagem. Os compósitos reforçados com tecidos tricotados, tanto nos que se utilizou a lã de ovelha como o pêlo do cão, são os menos rígidos. Este resultado pode ser atribuído ao facto de o tricô dar origem a tecidos mais elásticos, que consequentemente, diminui a rigidez do material compósito e devido ao menor teor de fibras presentes nestes materiais compósitos (Figura 60).

Quando se compara os resultados obtidos para a resistência à tração e para o módulo de *Young* para os compósitos produzidos a partir do fio de pêlo de cão (Figuras 58 e 60) com os obtidos por Gomes (2023) para os compósitos de matriz epóxi verde SR GreenPoxy 56 reforçada com pêlo de cão sem nenhum tratamento, é possível observar que o facto de se ter fiado e tecido o pêlo de cão melhorou tanto a resistência à tração como a rigidez dos compósitos, exceto no caso do compósito C_T_1F_A5, onde o valor obtido para a resistência à tração é inferior ao obtido por Gomes (4,54 MPa e 11,0 MPa, respetivamente). Estes resultados eram expectáveis, pois a distribuição aleatória das fibras nos compósitos produzidos por Gomes, não permite uma distribuição tão eficiente da carga aplicada nos compósitos, o que por sua vez se traduz em menores propriedades mecânicas.

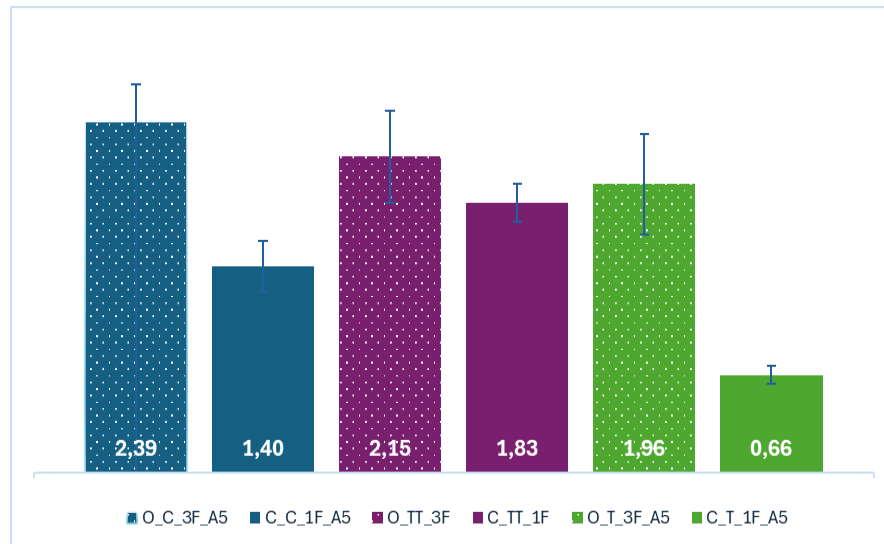


Figura 60: Resultados do módulo de Young (GPa)

Através da análise da Figura 61, podemos observar que os compósitos O_C_3F_A5, C_C_1F_A5, O_TT_3F e C_TT_1F têm valores muito próximos e que o compósito O_TT_3F tem o valor mais elevado de deformação à ruptura/1ª falha (1,18 %), enquanto o compósito O_T_3F_A5 possui o valor mais baixo (0,41 %). O compósito O_T_3F_A5 é o que possui uma menor quantidade de fibras (Tabela 12), para além disso, é reforçado com um tecido tricotado, o tecido que de entre os estudados é o que possui a maior flexibilidade. Devido às razões apresentadas, este compósito terá uma resistência e rigidez baixas, e apresentará um comportamento elástico, sendo a carga aplicada suportada maioritariamente pela matriz polimérica. Relativamente ao compósito O_TT_3F, devido à geometria do tecido do reforço, este compósito possui uma resistência e rigidez elevadas, logo deveria apresentar um valor de deformação mais baixo. A elevada deformação deste compósito poderá ser justificada pela baixa fração das fibras presentes, ou seja, a carga aplicada é na sua maioria suportada pela matriz polimérica que é menos forte e rígida que o reforço.

Comparando as fibras utilizadas no reforço (Figura 61), os compósitos reforçados com a lã de ovelha apresentam valores mais elevados de deformação se o reforço tiver sido feito por tecelagem, mas se o reforço tiver sido feito por crochê ou tricô, são os compósitos reforçados com o pêlo de cão que apresentam os valores mais elevados. Devido à maior resistência e rigidez dos compósitos reforçados com lã de ovelha (Figuras 58, 59 e 60), estes deviam apresentar valores de deformação à ruptura/1ª falha mais baixos do que os reforçados com o pêlo de cão, independente do tipo de reforço usado. Isso verifica-se exceto nos compósitos reforçados com os tecidos em tafetá (Figura 61). Relativamente à influência que o tipo de estrutura têxtil utilizada como reforço tem na deformação à ruptura/1ª falha, é

possível observar que os compósitos reforçados com tecidos feitos por tecelagem possuem valores de deformação mais elevados, seguidos dos compósitos reforçados com tecidos feitos por crochê. Os compósitos reforçados com estruturas tricotadas são os que apresentam os valores mais baixos. Os resultados obtidos não estão de acordo com os resultados esperados, visto que devido à elevada estabilidade dimensional dos tecidos de tafetá e à resistência e rigidez dos compósitos reforçados com estas estruturas, a percentagem de deformação à rutura/1ª falha devia ser menos elevada. Na verdade, esperava-se que apresentasse o valor mais baixo de todos os compósitos analisados. Nos compósitos reforçados com tecidos planos, as cargas aplicadas aos compósitos são distribuídas em duas direções (ao longo da direção dos fios da trama e da teia), já nos compósitos reforçados com malhas, as cargas aplicadas podem ser distribuídas em várias direções, o que se traduz num compósito com menor rigidez (Chowdhury & Summerscales, 2024).

Observando os valores de deformação à rutura/1ª falha obtidos para os compósitos reforçados com lã de pêlo de cão, é possível verificar que são inferiores ao obtido por Gomes (2023) (3,57 % - compósito reforçado com pêlo de cão que não foi submetido a nenhum tratamento). Este resultado era o esperado, pois devido à dispersão aleatória das fibras de pêlo de cão na matriz, os compósitos produzidos por Gomes conseguem-se deformar mais antes de ocorrer a sua rutura.

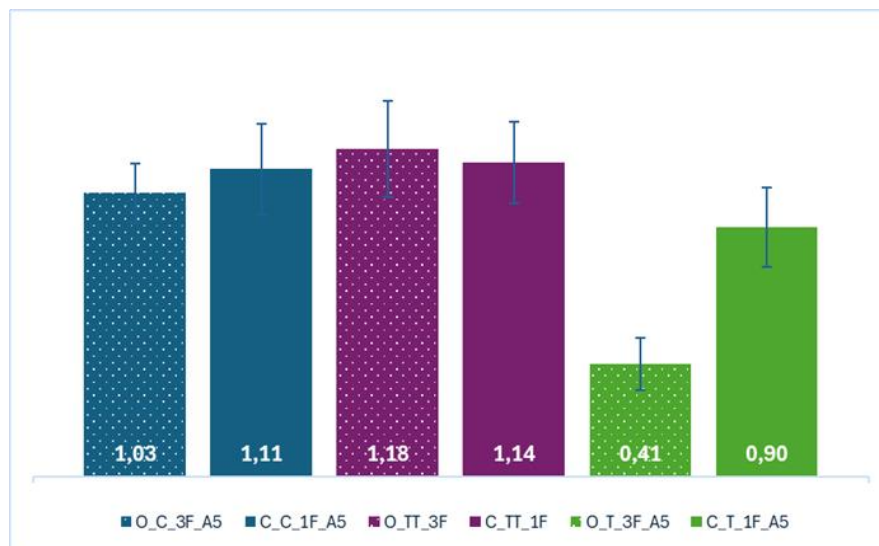


Figura 61: Resultados da deformação à rutura/1ª falha (%)

De acordo com a Figura 62, o compósito O_TT_3F é o compósito com o valor da tenacidade mais elevado de entre os compósitos indicados, com um valor igual a 0,145 J/mm³, e o compósito O_T_3F_A5 é o que possui o valor mais baixo (0,017 J/mm³). O valor mais elevado do compósito O_TT_3F pode ser explicado pelo maior número de fios

utilizado, pela maior rigidez das fibras e pela estabilidade dimensional do reforço, enquanto o valor mais baixo do compósito O_T_3F_A5 pode ser explicado pela elevada flexibilidade do reforço e pela baixa quantidade de fibras presentes (Tabela 12). Da análise desta figura, é possível verificar que os compósitos reforçados com lã de ovelha apresentam valores de tenacidade superiores em relação aos reforçados com lã de pêlo de cão, exceto nos compósitos em que o reforço foi feito por tricotagem. Estes valores eram os esperados, uma vez que os compósitos reforçados com fibras de lã de ovelha têm maior resistência à tração e rigidez do que os reforçados com pêlo de cão, sendo por isso capazes de absorver mais energia até ocorrer a sua rutura (Figuras 58, 59 e 60). O facto de o compósito O_T_3F_A5 ser menos tenaz que o compósito C_T_1F_A5 pode dever-se ao menor teor de fibras presente no primeiro compósito (Tabela 12).

Comparando as diferentes técnicas de produção de fabrico do reforço, os compósitos reforçados com os tecidos planos são os que absorvem mais energia antes de falharem, seguidos dos compósitos reforçados com tecidos feitos por crochê. Os compósitos reforçados com tecidos feitos por tricotagem são os que apresentam os valores de tenacidade mais baixos. Os valores mais elevados dos compósitos reforçados com tecidos feitos por tecelagem podem ser explicados pela grande estabilidade desses tecidos, enquanto os valores mais baixos dos compósitos reforçados com tecidos feitos em tricô podem ser explicados pela elevada flexibilidade das malhas e pela reduzida quantidade de fibras presentes nestes compósitos (Figura 62).

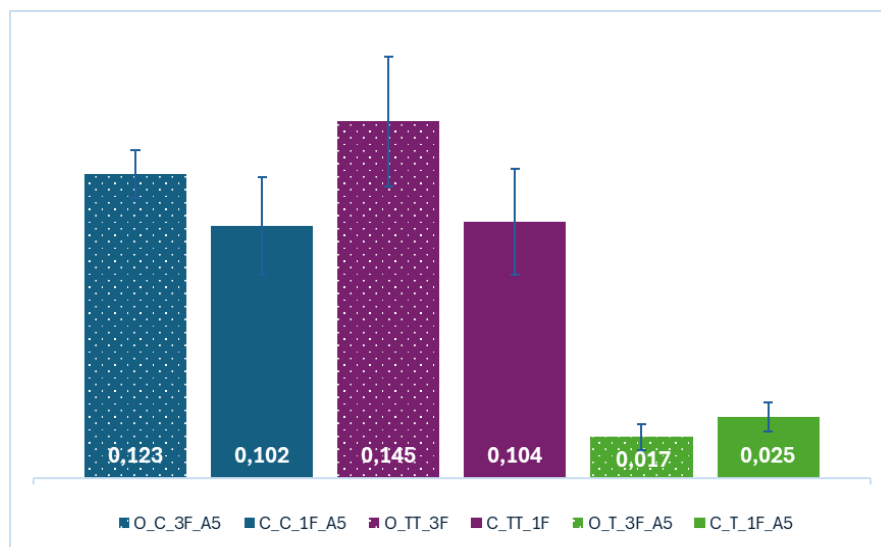


Figura 62: Resultados da tenacidade (J/mm^3)

Os valores de deformação apresentados foram obtidos em contextos distintos: deformação à primeira falha e deformação até a rutura completa dos compósitos. Por isso, é importante assinalar que nos resultados apresentados não houve uma distinção entre os

provetes que partiram totalmente e os que no final do ensaio de tração ainda tinham fibras intactas e, isto pode afetar os resultados obtidos e levar à obtenção de resultados que não traduzem o comportamento real dos compósitos.

4.2.2. Testes de flexão

Analisando o gráfico da Figura 63, podemos verificar que os valores de resistência à flexão dos compósitos reforçados com tecidos em crochê feitos a partir dos fios de lã de ovelha variam entre 64,33 MPa e 14,65 MPa. Além disso, podemos ver que o compósito O_C_3F_A5 tem o valor de resistência à flexão mais elevado e o compósito O_C_2F_A5 tem o valor mais baixo.

Os gráficos da tensão à flexão em função da deformação para cada um destes compósitos podem ser vistos no Anexo E.

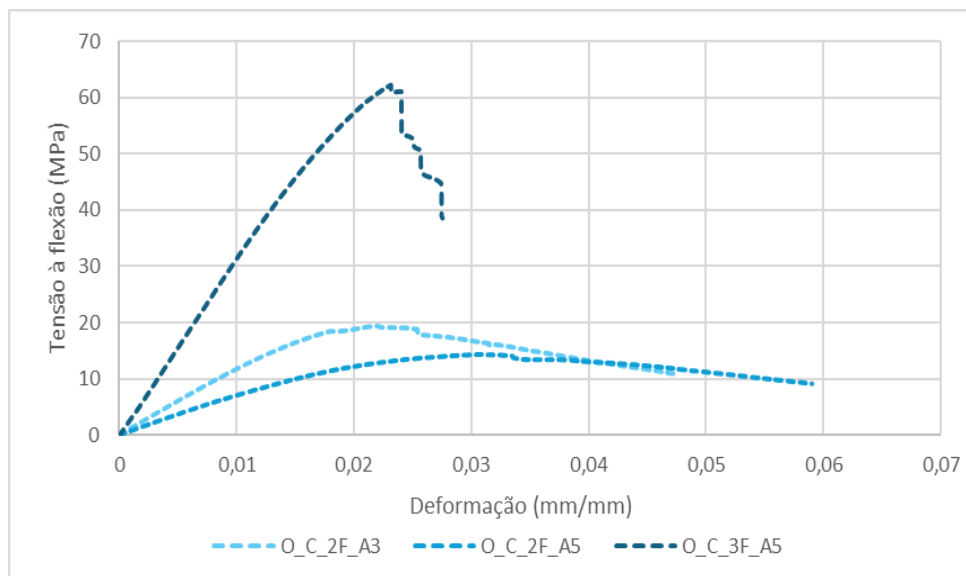


Figura 63: Gráfico de tensão/deformação médios dos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com tecidos em crochê feitos a partir dos fios de lã de ovelha

De acordo com a Figura 64, o compósito O_C_3F_A5 é o que possui o valor de resistência à flexão mais elevado (64,33 MPa) de entre os três compósitos analisados e o compósito O_C_2F_A5, com um valor de 14,65 MPa, tem o valor mais baixo. Comparando os materiais compósitos O_C_2F_A5 e O_C_3F_A5, é possível observar que o aumento do número de fios utilizados na produção do reforço leva ao aumento significativo da resistência à flexão, uma vez que o compósito O_C_3F_A5 apresenta um valor significativamente superior.

No que diz respeito à influência do diâmetro das agulhas nesta propriedade mecânica (Figura 64), podemos observar que o compósito O_C_2F_A3 possui uma resistência à flexão superior à do O_C_2F_A5 (19,07 MPa e 14,65 MPa, respetivamente), o que seria de esperar uma vez que a agulha 3 tem um diâmetro inferior à agulha 5. Uma agulha com menor diâmetro faz pontos mais fechados e apertados, logo as malhas produzidas são menos flexíveis e menos elásticas, o que aumenta a resistência e rigidez global do compósito.

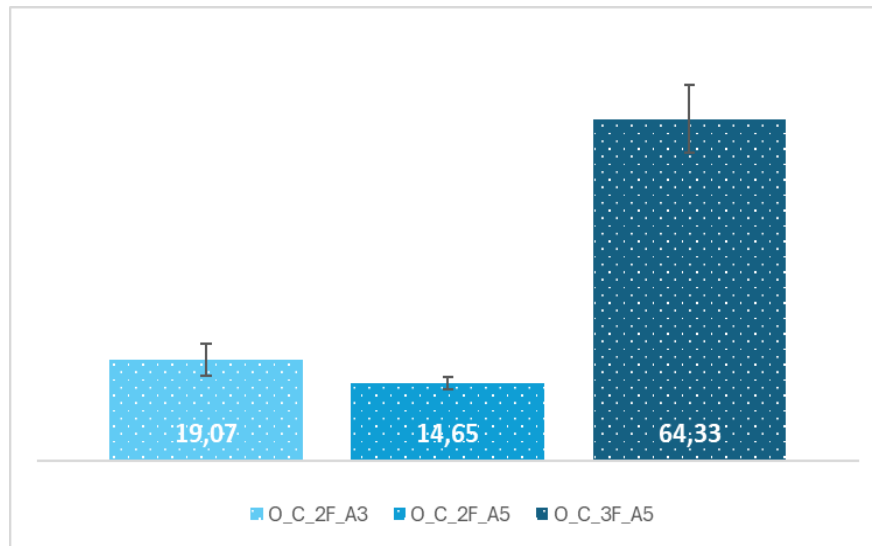


Figura 64: Resultados da resistência à flexão (MPa)

Relativamente ao módulo de *Young* (Figura 65), é possível verificar que o compósito com o valor mais elevado é o O_C_3F_A5 (3,21 GPa), e o compósito O_C_2F_A5 tem o valor mais baixo (0,70 GPa). A partir da análise desta figura, é possível concluir que o aumento do número de fios utilizados aumenta substancialmente a rigidez do compósito. Além disso, a redução do diâmetro da agulha utilizada, mantendo o número de fios constante, melhora a rigidez dos compósitos.

Os valores mais elevados da resistência à flexão e do módulo de *Young* (Figuras 64 e 65) obtidos para o compósito O_C_3F_A5 podem ser atribuídos ao uso de um maior número de fios, apesar da utilização da agulha 5. Isto sugere que a utilização de um maior número de fios compensa a flexibilidade superior resultante do uso de uma agulha com maior diâmetro. O compósito O_C_2F_A5 apresenta os valores mais baixos devido ao uso da agulha 5 (agulha com maior diâmetro) e ao menor número de fios presentes na estrutura têxtil utilizada como reforço.

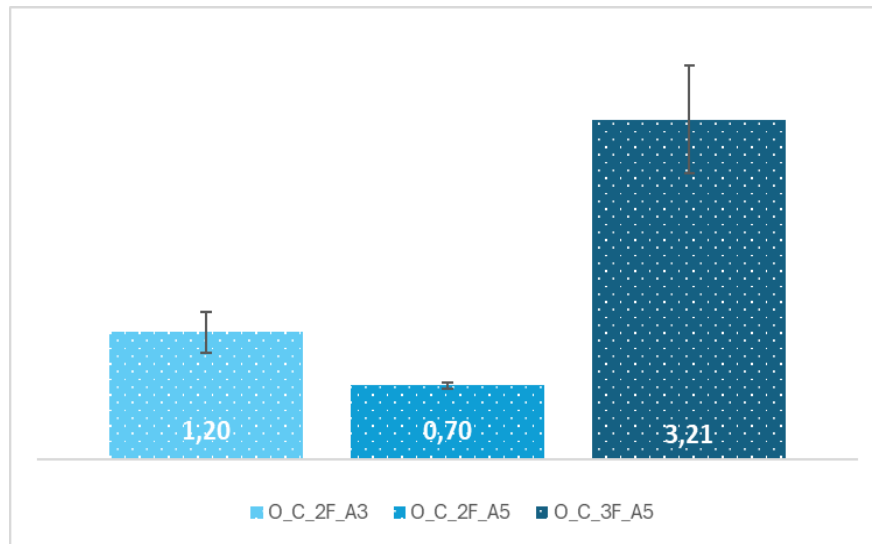


Figura 65: Resultados do módulo de Young (GPa)

Através da análise do gráfico da Figura 66, é possível verificar que o compósito O_C_3F_A5 é o que apresenta o valor de resistência à flexão mais elevado (64,33 MPa) e o compósito C_T_1F_A5 é o que apresenta o valor mais baixo (15,06 MPa).

Os gráficos da tensão à flexão em função da deformação para cada um destes compósitos podem ser visto no Anexo F.

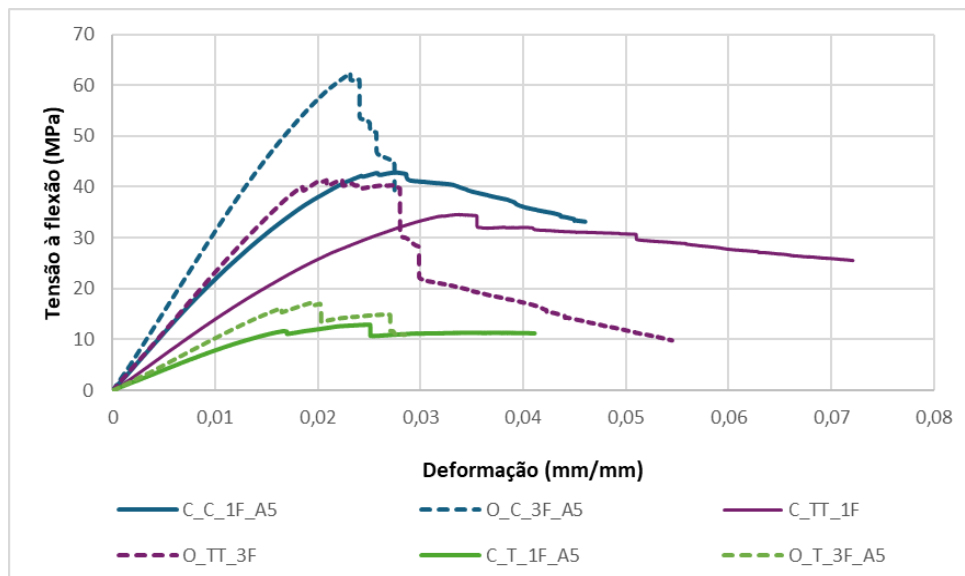


Figura 66: Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de flexão

Analisando a Figura 67 é possível observar que o compósito O_C_3F_A5 é o que possui o valor de resistência à flexão mais elevado (64,33 MPa) e o compósito C_T_1F_A5 é o que possui o valor mais baixo (15,06 MPa). É também possível constatar que os compósitos reforçados com lã de ovelha possuem valores de resistência à flexão mais

elevados do que os reforçados com lã de pêlo de cão (comparação entre a mesma técnica de produção de tecido), o que era expectável devido ao maior número de fios utilizados.

Comparando as diferentes técnicas de produção de tecidos (Figura 67), os compósitos reforçados com malhas feitas em crochê apresentam os valores de resistência à flexão mais elevados, enquanto os reforçados com estruturas feitas em tricô possuem os valores mais baixos. A tecelagem, devido à orientação dos fios, forma estruturas com maior estabilidade dimensional do que o crochê e o tricô (Chowdhury & Summerscales, 2024; Rawal et al., 2023; Talabi et al., 2024), por isso, previa-se que, de entre todos os materiais compósitos, os reforçados com tecidos planos fossem os que apresentassem a maior resistência à flexão. O valor mais elevado dos compósitos reforçados com tecidos em crochê pode ser justificado pelo elevado teor de fibras presentes (Tabela 12), já o valor mais baixo dos compósitos reforçados com tecidos feitos por tricotagem pode ser explicado pela elevada flexibilidade destes tecidos e pelo baixo teor de fibras presentes.

O compósito O_C_3F_A5 possui o valor de resistência à flexão mais elevado devido à combinação da elevada fração de fibras presentes e da utilização de um maior número de fios. Por outro lado, o compósito C_T_1F_A5 é o que possui o valor de resistência à flexão mais baixo devido ao menor número de fios utilizados e à maior flexibilidade do tecido utilizado como reforço do material compósito (Figura 67).

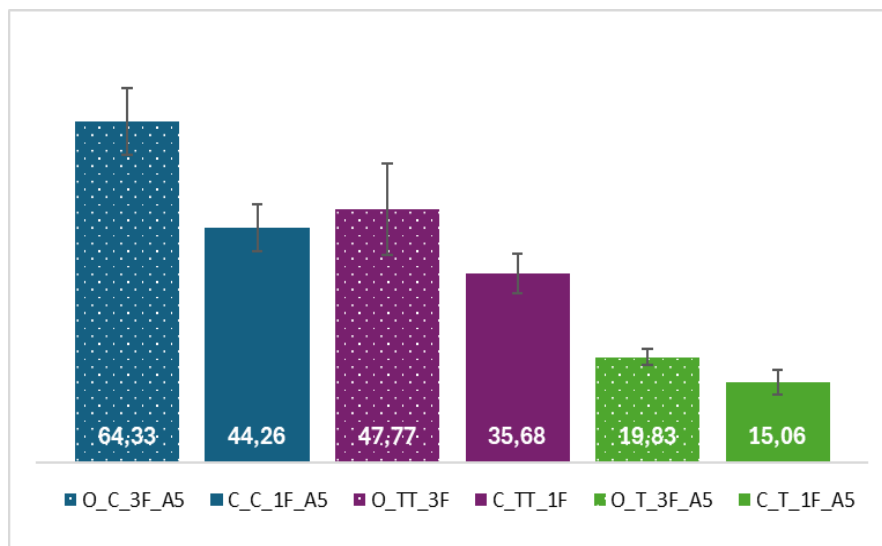


Figura 67: Resultados da resistência à flexão (MPa)

Através da análise das Figuras 67 e 68 é possível observar que não existem diferenças muito significativas entre si. O compósito O_C_3F_A5 é o compósito com a resistência específica à flexão mais elevada (59,85 MPa.cm³/g) e o compósito C_T_1F_A5 é o que

possui o valor mais baixo (21,63 MPa.cm³/g), no entanto, possui um valor bastante parecido ao do compósito O_T_3F_A5 (22,40 MPa.cm³/g) (Figura 68).

Comparando o tipo de fibras utilizadas na produção do reforço (Figura 68), os compósitos reforçados com lã de ovelha possuem valores de resistência específica à flexão mais elevados do que os reforçados com o pêlo de cão, o que era espectável devido ao maior número de fios usados nos compósitos reforçados com lã de ovelha. Relativamente à influência que o tipo de tecido utilizado como material de reforço possui nesta propriedade mecânica, é possível constatar que os compósitos reforçados com tecidos feitos em crochê possuem os valores de resistência específica à flexão mais elevados, sendo seguidos dos reforçados pelos tecidos planos. Os compósitos reforçados com tecidos feitos em tricô são os que possuem os valores de resistência específica à flexão mais baixos. A menor resistência específica dos compósitos reforçados com malhas em tricô pode ser justificada pela elevada elasticidade dos tecidos tricotados e pelo baixo teor de fibras presentes nestes compósitos (Tabela 12), já o elevado valor obtido para os compósitos reforçados com as malhas de crochê pode ser atribuído ao elevado teor de fibras presentes.

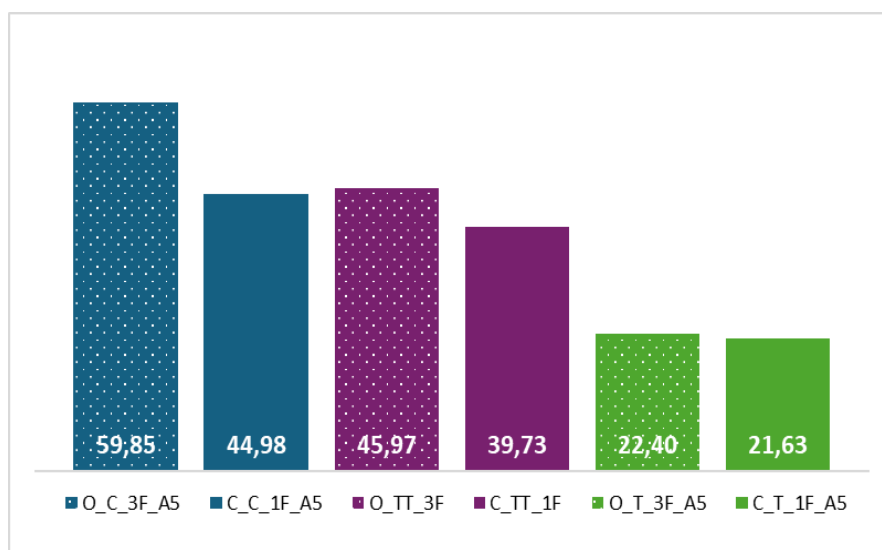


Figura 68: Resultados da resistência específica à flexão (MPa/g.cm³)

Através da análise da Figura 69, podemos observar que o compósito O_C_3F_A5 é o que possui o módulo de elasticidade mais elevado (3,21 GPa) e o compósito C_T_1F_A5 é o que possui o valor mais baixo (0,78 GPa). Também é possível observar que os compósitos reforçados com lã de ovelha possuem módulos de elasticidade mais elevados do que os reforçados com pêlo de cão (comparação feita entre os compósitos reforçados com o mesmo tipo de estrutura). Isto deve-se ao maior número de fios utilizados durante a produção dos tecidos e ao facto de a lã de ovelha ser mais rígida que o pêlo de cão (Tabelas 5 e 6 e Figura 47).

Comparando as diferentes técnicas de produção de tecidos utilizadas, os compósitos reforçados com malhas feitas em crochê apresentam valores de módulo de *Young* mais elevados e os reforçados com estruturas feitas em tricô possuem valores mais baixos. A menor rigidez dos compósitos reforçados com tecidos feitos em tricô pode ser justificada pela elevada flexibilidade dos tecidos tricotados e pela menor quantidade de fibras presentes (Tabela 12). Por outro lado, os elevados valores do módulo de *Young* obtidos para os compósitos reforçados com tecidos feitos em crochê podem ser justificados pela elevada quantidade de fibras presentes nesses compósitos (Figura 69).

O compósito O_C_3F_A5, de entre todos os compósitos indicados na Figura 69, é o que possui o módulo de elasticidade mais elevado, mesmo sendo reforçado com um tecido que apresenta alguma elasticidade, devido à combinação da maior rigidez das fibras de lã de ovelha, da utilização de um maior número de fios no reforço e da elevada quantidade de fibras presentes. Já o compósito C_T_1F_A5 é o compósito menos rígido, devido à elevada flexibilidade do tecido do reforço e ao uso de um menor número de fios.

Comparando os resultados obtidos para a resistência à flexão e o módulo de *Young* para os compósitos produzidos a partir do fio de pêlo de cão da Serra da Estrela (Figuras 67 e 69) com os resultados obtidos por Gomes (2023) para os compósitos de matriz epóxi verde reforçada com pêlo de cão sem nenhum tratamento, é possível verificar que o facto de se ter fiado e tecido a lã do pêlo de cão melhorou ambas as propriedades mecânicas, à exceção do compósito C_T_1F_A5, onde tanto o valor da resistência à flexão como o módulo de *Young* são inferiores ao valor obtido para os compósitos produzidos por Gomes. Esta melhoria tanto da resistência à flexão como do módulo de *Young* era expectável, pois a distribuição aleatória das fibras nos compósitos produzidos por Gomes, não permite uma distribuição tão eficiente da carga aplicada nos compósitos, o que se traduz numa diminuição das propriedades mecânicas.

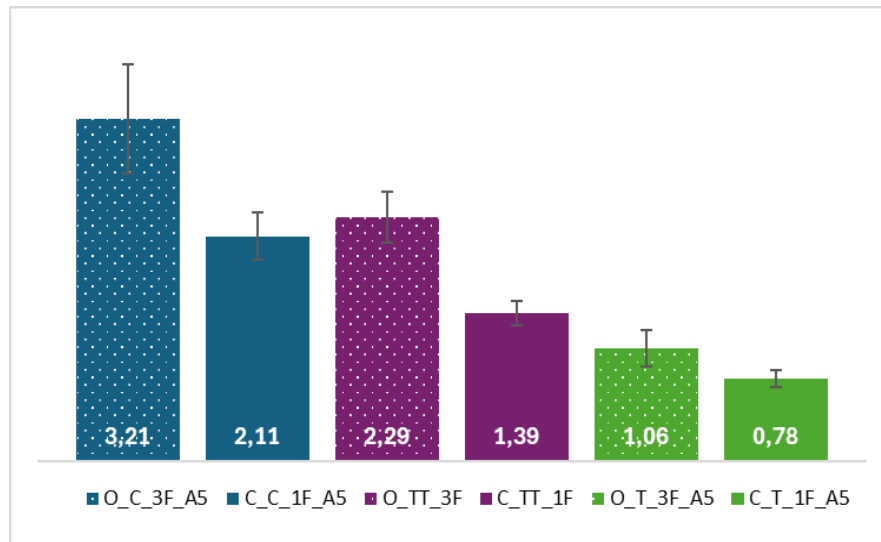


Figura 69: Resultados do módulo de Young (GPa)

A baixa quantidade de fibras presentes em alguns compósitos, a não impregnação da resina no reforço, a existência de defeitos/vazios podem explicar os elevados valores do desvio-padrão obtidos para alguns compósitos.

4.3. Microscópico Eletrônico de Varrimento (SEM) dos compósitos após os testes de tração

Nas Figuras 70 e 71 é possível analisar alguns dos mecanismos de falha que ocorreram durante os ensaios de tração.

Comparando os diferentes tipos de estruturas utilizadas como reforço é possível verificar que os compósitos reforçados com tecidos feitos em crochê (Figuras 70a, 70b, 70c e 71a) possuem menos buracos na resina, o que indica que não houve uma grande ocorrência de “pull-out” das fibras, ou seja, poucas fibras foram arrancadas da matriz. Também é possível observar que nestes compósitos o principal mecanismo de falha foi a fratura das fibras. Já nos compósitos reforçados com tecidos tricotados (Figuras 70d e 71b) e tecidos planos (Figuras 70e e 71c) é possível observar um número considerável de buracos na matriz (sendo este número maior nos compósitos reforçados com tecidos feitos em tricô), o que indicia que houve fibras que foram arrancadas da matriz.

Estes resultados sugerem que a interação interfacial entre as fibras e a matriz é maior nos compósitos reforçados com tecidos feitos em crochê do que nos compósitos reforçados com tecidos feitos por tecelagem e por tricô. Quanto maior for a interação entre os dois

componentes, maior será o desempenho mecânico do material compósito, o que foi demonstrado nos ensaios mecânicos realizados.

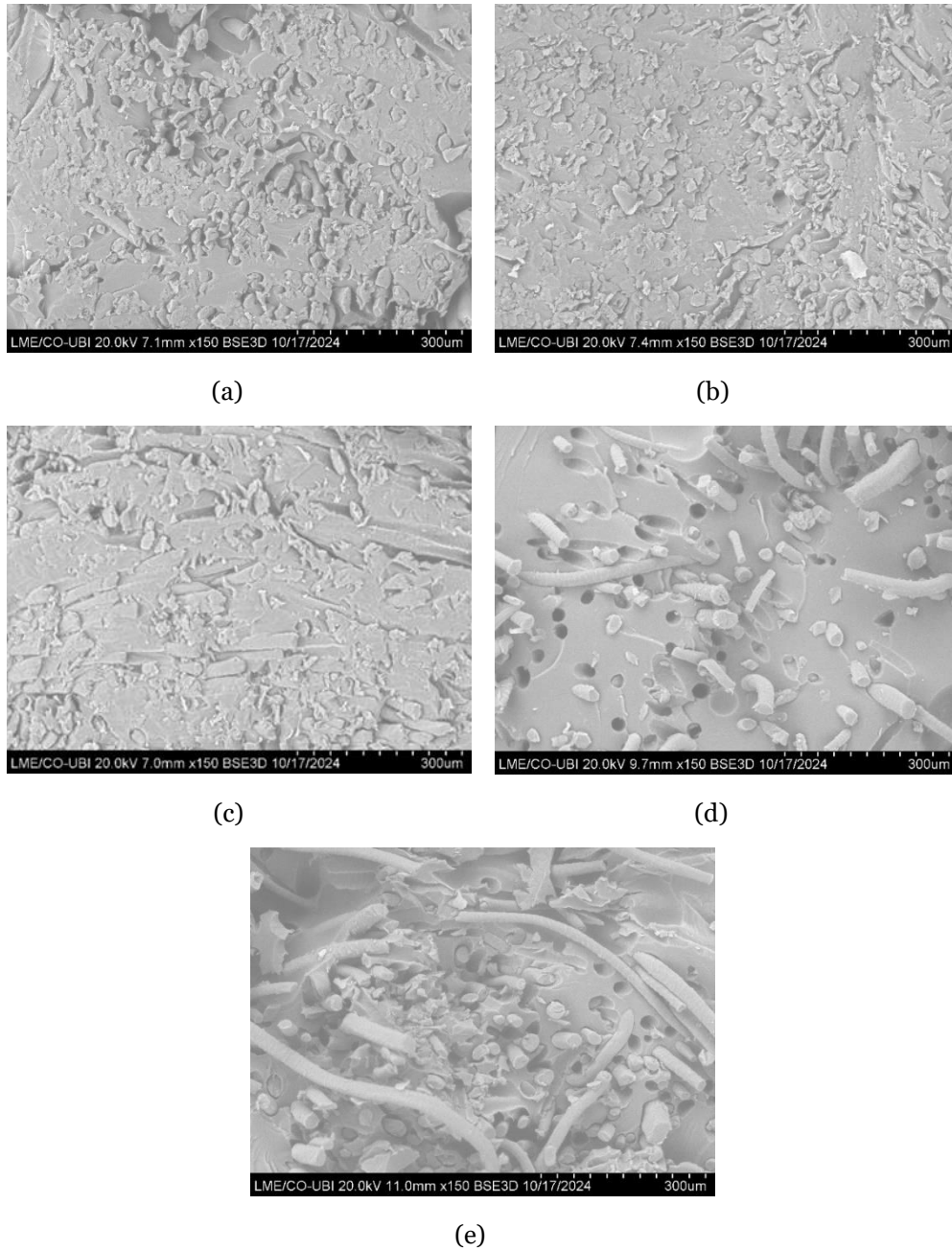


Figura 70: *Imagens SEM dos compósitos reforçados com lã de ovelha - (a) O_C_2F_A3; (b) O_C_2F_A5; (c) O_C_3F_A5; (d) O_T_3F_A5; (e) O_TT_3F*

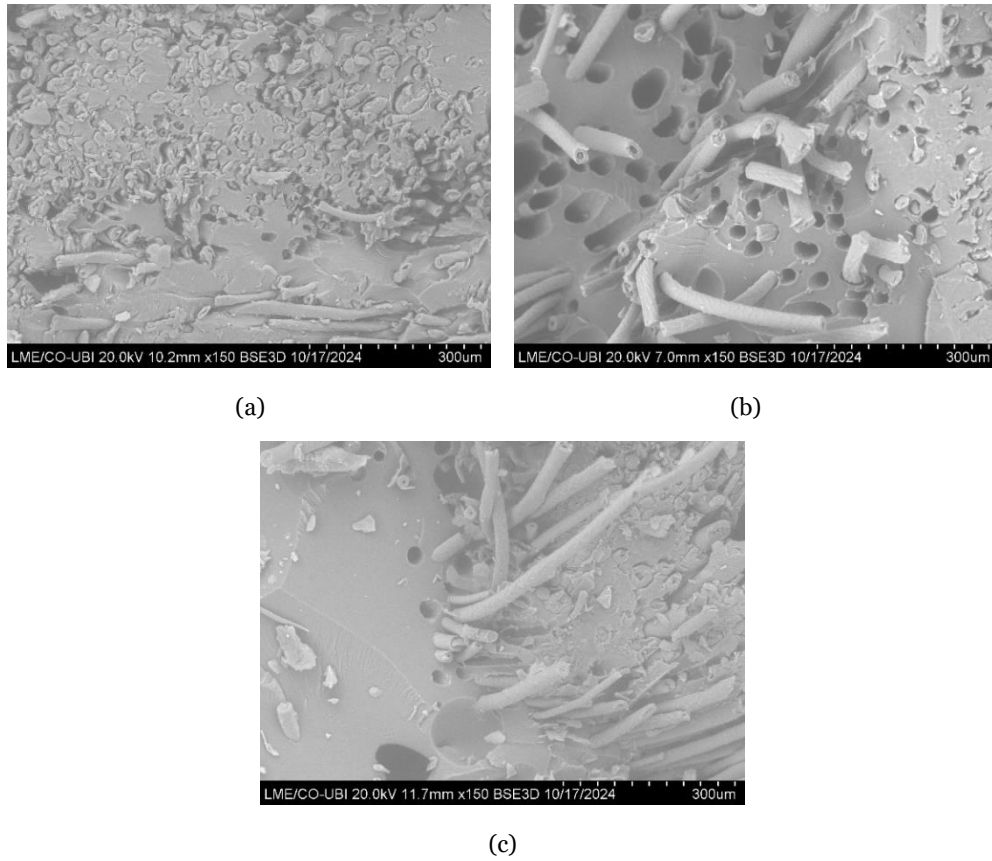


Figura 71: Imagens SEM dos compósitos reforçados com pêlo de cão - **(a)** C_C_1F_A5; **(b)** C_T_1F_A5; **(c)** C_TT_1F

5. Conclusões

5.1 Apresentação dos resultados

Neste trabalho foram produzidos oito compósitos verdes reforçados com fios feitos a partir de fibras de lã de ovelha e de lã de pêlo de cão, ambos da Serra da Estrela, com o objetivo de estudar o seu comportamento à tração e flexão.

A análise dos principais resultados obtidos pode ser dividida em duas partes. A primeira parte diz respeito à influência que o diâmetro da agulha e número de fios usados na produção do reforço têm na tração e flexão dos compósitos produzidos. A segunda parte diz respeito à influência que o tipo de fibra e o tipo de arquitetura do tecido têm nessas duas propriedades mecânicas.

Relativamente à primeira parte, em que foram apenas analisados os três compósitos reforçados com estruturas feitas em crochê a partir da lã de ovelha da Serra da Estrela, é possível constatar que o aumento do número de fios utilizados na produção do reforço aumenta de forma significativa a resistência à tração, o módulo de *Young* e a tenacidade (aumento de 188,07%, 181,18% e 141,18%, respetivamente) e que quanto menor for o diâmetro da agulha utilizada mais elevados são o módulo de elasticidade e a resistência à tração (aumento de 22,35% e 13,31%, respetivamente).

Em termos de deformação à rutura/1ª falha, comparando os compósitos O_C_3F_A5 e O_C_2F_A5, observou-se que o primeiro possui um valor mais baixo. Esse valor pode ser atribuído ao facto de o compósito O_C_3F_A5 ser reforçado com um maior número de fios, que aumentam a sua resistência e rigidez. A maior rigidez diminui a ductilidade do material compósito, o que significa que a quantidade de carga que é capaz de suportar antes de atingir o seu ponto de rutura é menor, o que se traduz numa menor percentagem de deformação. Relativamente à influência da espessura da agulha, comparando os compósitos O_C_2F_A5 e O_C_2F_A3, é possível constatar que o primeiro possui um valor mais elevado de deformação à rutura/1ª falha. Este valor pode ser justificado pela utilização de uma agulha com um maior diâmetro, que produz tecidos mais flexíveis que permitem que o material compósito se deforme mais antes de atingir o seu ponto de rutura.

Nos testes de flexão verificou-se o mesmo comportamento que nos ensaios de tração. Comparando os três compósitos reforçados com tecidos feitos em crochê a partir da lã de ovelha é possível verificar que o aumento do número de fios do reforço e a diminuição do diâmetro das agulhas utilizadas (mantendo o número de fios usados constante) aumentam a resistência à flexão e a rigidez do material compósito.

Na segunda parte, nos testes de tração observou-se que os compósitos reforçados com lã de ovelha possuem valores de resistência específica à tração mais elevados dos que os reforçados com a lã de pêlo de cão, com uma melhoria de 33,16% (comparação entre a mesma técnica de produção de tecidos). Isto era expectável devido ao maior número de fios utilizados. Relativamente à influência do tipo de estrutura têxtil utilizada como reforço nesta propriedade mecânica, é possível observar que os compósitos reforçados com tecidos feitos por tecelagem e crochê possuem os valores de resistência específica mais elevado e os reforçados com tecidos feitos em tricô são os que apresentam os valores mais baixos. Este resultado pode ser justificado pela arquitetura do reforço e pela quantidade de fibras presentes.

Em relação ao módulo de elasticidade e comparando os dois tipos de fibras utilizadas no reforço, podemos ver que os compósitos reforçados com lã de ovelha têm módulos de *Young* mais elevados do que os reforçados com o pêlo de cão (aumento médio de 95,06%). Estes valores mais elevados devem-se ao facto de os compósitos produzidos com a lã de ovelha serem reforçados com um maior número de fios e ao facto de a lã de ovelha ser mais rígida que o pêlo do cão. No que diz respeito à influência do tipo de reforço utilizado nesta propriedade mecânica, é possível verificar que nos compósitos onde se utilizaram as fibras de lã de pêlo de cão, os que foram reforçados com tecidos planos possuem o módulo de *Young* mais elevado. Este valor pode ser explicado pela elevada estabilidade dimensional dos tecidos e pela considerável quantidade de fibras presentes. Por sua vez, os compósitos reforçados com tecidos feitos por crochê a partir das fibras de lã de ovelha são os compósitos mais rígidos devido à elevada percentagem de fibras presentes, que acaba por compensar a menor estabilidade das malhas feitas por crochê (em comparação com a estabilidade dos tecidos produzidos por tecelagem). Nos compósitos reforçados com tecidos tricotados, tanto nos que se utilizou a lã de ovelha como o pêlo do cão, são os menos rígidos. Este valor pode ser atribuído à menor quantidade de fibras presentes e ao facto de o tricô dar origem a tecidos mais elásticos, que consequentemente diminui a rigidez do material compósito.

Relativamente à deformação à rutura/1ª falha, os compósitos reforçados com fibras de lã de ovelha apresentam valores mais elevados de deformação se o reforço tiver sido feito por tecelagem, mas se o reforço tiver sido feito por crochê ou tricô, são os compósitos reforçados com fibras de lã de pêlo de cão que apresentam os valores mais elevados. Devido à maior rigidez e à maior resistência dos compósitos reforçados com lã de ovelha, estes deviam apresentar valores de deformação à rutura/1ª falha mais baixos do que os reforçados com pêlo de cão, independente do tipo de reforço usado. No que diz respeito à influência do tipo de estrutura têxtil utilizada como reforço na deformação à rutura/1ª falha, é possível observar que os compósitos reforçados com tecidos feitos por tecelagem possuem

valores de deformação mais elevados, seguidos dos compósitos reforçados com tecidos feitos por crochê. Os compósitos reforçados com estruturas feitas por tricô são os que apresentam os valores mais baixos. Os resultados obtidos não estão de acordo com os resultados esperados, pois devido à elevada estabilidade dimensional dos tecidos planos e à elevada rigidez dos compósitos reforçados com estas estruturas, a percentagem de deformação à rutura/1ª falha devia ser menos elevada.

No que diz respeito à tenacidade, os compósitos reforçados com lã de ovelha possuem valores mais elevados do que os compósitos reforçados com pêlo de cão, exceto nos compósitos em que o reforço foi feito por tricô. Estes resultados podem ser atribuídos à maior resistência e rigidez das fibras de lã de ovelha, que são capazes de absorver mais energia até ocorrer a sua rutura. Relativamente aos diferentes tipos de reforço utilizados, os compósitos reforçados com tecidos planos são os que absorvem mais energia antes de falharem (aumento médio de 9,93% em comparação com os compósitos reforçados com tecidos em crochê e aumento médio de 534,47% em relação aos compósitos reforçados com tecidos tricotados). A elevada tenacidade destes compósitos pode ser explicada pela estabilidade dimensional do material de reforço.

Em relação aos ensaios de flexão, os compósitos reforçados com lã de ovelha possuem valores de resistência específica à flexão mais elevados do que os reforçados com lã de pêlo de cão (aumento médio de 17,44%), o que era expectável devido ao maior número de fios utilizados. Comparando o tipo de tecido utilizado como material de reforço, podemos observar que os compósitos reforçados com tecidos feitos em crochê possuem os valores de resistência específica à flexão mais elevados, enquanto os reforçados com tecidos feitos em tricô são os que possuem os valores mais baixos. O menor valor dos compósitos reforçados com tecidos tricotados pode ser justificado pela elevada elasticidade desses tecidos e pelo baixo teor de fibras presentes nestes compósitos, já o elevado valor dos compósitos reforçados com os tecidos em crochê pode ser atribuído ao elevado teor de fibras presentes.

Os compósitos reforçados com lã de ovelha possuem módulos de *Young* mais elevados do que os reforçados com pêlo de cão, com uma melhoria de 50,93% (comparação entre os compósitos reforçados com o mesmo tipo de estrutura). Isto deve-se ao facto de se ter utilizado um maior número de fios durante a produção dos tecidos e à maior rigidez das fibras da lã de ovelha. Comparando as diferentes técnicas de produção de tecidos utilizadas, os compósitos reforçados com tecidos feitos em crochê apresentam valores de módulo de elasticidade mais elevados e os reforçados com estruturas feitas em tricô possuem os valores mais baixos. A menor rigidez dos compósitos reforçados com tecidos tricotados pode ser justificada pela elevada flexibilidade destes tecidos e pela menor quantidade de fibras

presentes. Por outro lado, os elevados valores de módulo de *Young* obtidos para os compósitos reforçados com tecidos feitos em crochê pode ser justificado pela elevada quantidade de fibras presentes.

Além disso, a partir dos ensaios de tração dos fios de lã de ovelha e de lã do pêlo de cão, é possível verificar que a lã de ovelha é 42,11% mais rígida e pode suportar mais 1,14% de carga antes de quebrar do que a lã de pêlo de cão. No entanto, a lã de pêlo de cão é mais resistente e é capaz de absorver mais energia antes de partir.

5.2. Trabalhos futuros

Os fios produzidos a partir das fibras da lã do pêlo do cão foram fiados manualmente. Um ponto interessante de ser explorado futuramente seria fiar os fios recorrendo a máquinas. Acredito que isto pode ser um ponto importante de ser avaliado, pois a fiação e torção mecânicas podem alterar as características físico-mecânicas dos compósitos e, consequentemente, diminuir as diferenças existentes entre essas características.

Além disso, seria também interessante estudar as fibras de outras raças de ovelhas e de cães, o que permitiria uma análise mais abrangente das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras naturais de origem animal.

Referências bibliográficas

- Acha, B. A., Marcovich, N. E., & Reboredo, M. M. (2005). Physical and mechanical characterization of jute fabric composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 98(2), 639-650.
<https://doi.org/10.1002/app.22083>
- Ahmad, H., Chhipi-Shrestha, G., Hewage, K., & Sadiq, R. (2022). A comprehensive review on construction applications and life cycle sustainability of natural fiber biocomposites. *Sustainability*, 14(23), 15905.
<https://doi.org/10.3390/su142315905>
- Akter, M., Uddin, M. H., & Tania, I. S. (2022). Biocomposites based on natural fibers and polymers: A review on properties and potential applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 41(17-18), 705-742.
<https://doi.org/10.1177/07316844211070609>
- Almeida, N. M. B. (2012). *Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Antunes, H. H. V. (2022). *Desenvolvimento de misturas para painéis de revestimento à base de argila e fibras de lã de ovelha* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil]. Universidade do Minho.
- Ares-Elejoste, P., Seoane-Rivero, R., Gandarias, I., Iturmendi, A., & Gondra, K. (2023). Sustainable alternatives for the development of thermoset composites with low environmental impact. *Polymers*, 15(13), 2939.
<https://doi.org/10.3390/polym15132939>
- ASTM D3822-14 (2020); Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. ASTM International: West Conshohocken, United States.
- Auvergne, R., Caillol, S., David, G., Boutevin, B., & Pascault, J. P. (2014). Biobased thermosetting epoxy: Present and future. *Chemical Reviews*, 114(2), 1082-1115.
<https://doi.org/10.1021/cr3001274>
- Azevedo, A. L. M. (2017). *Caracterização e comparação de materiais compósitos* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Química]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Baroncini, E. A., Kumar Yadav, S., Palmese, G. R., & Stanzione, J. F. (2016). Recent advances in bio-based epoxy resins and bio-based epoxy curing agents. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(45), 44103.
<https://doi.org/10.1002/app.44103>
- Barragão, V. A. N. (2016). *Lã artesanal* [Dissertação de Mestrado em Design de Moda]. Universidade de Lisboa.
- Bharath, K. N., Pasha, M., & Nizamuddin, B. A. (2016). Characterization of natural fiber (sheep wool)-reinforced polymer-matrix composites at different operating conditions. *Journal of Industrial Textiles*, 45(5), 730-751.
<https://doi.org/10.1177/1528083714540698>
- Caetano, N. (2009). *Análise da viabilidade económico-financeira de uma unidade de resíduos industriais não perigosos em Portugal* [Dissertação de Mestrado em Gestão]. Instituto Universitário de Lisboa.
- Carvalho, R. R. M. B. (2015). *Degradação mecânica em compósitos de vidro/epóxico sujeitos a soluções cimentícias* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica]. Universidade de Coimbra.
- Castro, B. F. M. de. (2013). *Estudo e caracterização mecânica de compósitos reforçados com fibras naturais* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica]. Instituto Politécnico do Porto.
- Cavaleiro, J. M. H. (2018). *Fabrico e maquinaria de compósitos de matriz polimérica com fibras curtas de carbono* [Dissertação de Mestrado em Engenharia de Conceção e Desenvolvimento de Produto]. Instituto Politécnico de Leiria.
- Chawla, K.K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering* (3ª Edição). Springer.
- Chowdhury, I. R., & Summerscales, J. (2024). Woven fabrics for composite reinforcement: A review. *Journal of Composites Science*, 8(7), 280.
<https://doi.org/10.3390/jcs8070280>

- Cicala, G., Cristaldi, G., Recca, G., & Latteri, A. (2010). *Composites based on natural fibre fabrics*. *Woven Fabric Engineering*, 317-339. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/10465>
- Clube Português de Canicultura. (s.d.). *Cão da Serra da Estrela*.
<https://www.cpc.pt/racas/racas-portuguesas/cao-serra-estrela/> (Consultado em 24/01/2024).
- Coelho, P. (2018). *Resina Epóxi – História, Processo de Produção, Propriedades e Usos*. ENGQUIMICASANTOSSP.
<https://www.engquimicasantosp.com.br/2018/08/resina-epoxi-historia-processo-producao-usos.html> (Consultado em 17/01/2024).
- CompositesLab. (2015, 21 de Setembro). *What are composites?*.
<https://compositeslab.com/composites-101/what-are-composites/> (Consultado em 17/10/2023).
- Corrales, F., Vilaseca, F., Llop, M., Gironès, J., Méndez, J. A., & Mutjè, P. (2007). Chemical modification of jute fibers for the production of green-composites. *Journal of Hazardous Materials*, 144(3), 730-735.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.103>
- Corscadden, K. W., Biggs, J. N., & Stiles, D. K. (2014). Sheep's wool insulation: A sustainable alternative use for a renewable resource?. *Resources, Conservation and Recycling*, 86, 9-15.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.01.004>
- Corte, T. (s.d.). Como fazer os pontos básicos em croche passo a passo. Como fazer croche passo a passo.
<https://comofazercroche.blogspot.com/2010/11/como-fazer-os-pontos-basicos-em-croche.html> (Consultado em 05/05/2024).
- Costa, J. C. da C. C. (2021). *Desenvolvimento de resinas poliméricas eco-sustentáveis: Estudo do efeito de processamento e pós-processamento no seu desempenho* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Química]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Craftsmanship*. (s.d.). *A arte da tecelagem*.
https://training.craftsmanshipplus.eu/images/pdfs/Craftsmanship_PT_Loom_PORTUGAL.pdf (Consultado em 30/04/2024)
- Craft Yarn Council. (s.d. a). *Purl Stitch*.
https://www.craftyarncouncil.com/mar06_purl.html (Consultado em 18/05/2024)
- Craft Yarn Council. (s.d. b). *Knit Stitch*.
https://www.craftyarncouncil.com/instructions_kn.php3 (Consultado em 18/05/2024).
- Direção-Geral da Educação. (s.d.). *Objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS)*.
<https://www.dge.mec.pt/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods> (Consultado em 07/12/2024).
- Duro, A. C. F. M. (2013). *Desenvolvimento e caracterização de compósitos reforçados com fibras de linho e sisal* [Dissertação de Mestrado em Engenharia de Polímeros]. Universidade do Minho.
- Ekbatani, S., Wang, Y., Huo, S., Papageorgiou, D., & Zhang, H. (2024). Nano-engineered hierarchical natural fibre composites with localized cellulose nanocrystals and tailored interphase for improved mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 255, 110719.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2024.110719>
- Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Garnier, C. (2023). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, 19, 101271.
<https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.101271>
- Elísio, G. N. N. (2013). *Estudo da degradação das propriedades mecânicas de materiais compósitos pelo efeito da esterilização por autoclave* [Dissertação de Mestrado em Ciências Biomédicas]. Universidade da Beira Interior.

- Fernandes, T. F. (2008). *Preparação e caracterização de novos materiais compósitos baseados em fibras de celulose* [Dissertação de Mestrado em Materiais Derivados de Recursos Renováveis]. Universidade de Aveiro.
- Ferreira, D. (2016). *Projeto e desenvolvimento de peça em compósito obtida em moldagem por transferência de resina para aplicação em telescópios* [Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais]. Universidade Federal de Itajubá.
- Ferreira, D. P., Cruz, J., & Fangueiro, R. (2018). *Surface modification of natural fibers in polymer composites*. *Green Composites for Automotive Applications*, 3-41. Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102177-4.00001-X>
- Ferreira, F. G. (2015). *Estudo da delaminação em compósitos de epóxido reforçado com borracha e fibras naturais* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica]. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Gahatraj, I., Borah, A., Pandey, P., Bhattacharya, A., Mazumdar, S., Singh, B., & Kumar, S. (2023). Current progress and biotechnological applications of microbial keratinases. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 17(2), 732-748.
<https://doi.org/10.22207/JPAM.17.2.50>
- Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2020). A review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science*, 55, 829-892.
<https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- Gomes, A.S.C. (2023). *Estudo da viabilidade do pêlo do cão Serra da Estrela para a produção de compósitos verdes* [Dissertação de Mestrado em Química Industrial]. Universidade da Beira Interior.
- Gommers, B., Verpoest, I., & Van Houtte, P. (1998). The Mori–Tanaka method applied to textile composite materials. *Acta Materialia*, 46(6), 2223–2235.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(97\)00296-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(97)00296-6)
- Gonçalves, S. G. P. (2005). *Produção artesanal nos lanifícios—Uma proposta de inovação* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Gowtham, S., Jeevanantham, T., Emelda, J., & Edric, J. (2024). Investigation on effect of fibre orientation on mechanical behaviour of polymer matrix natural fibre reinforced composite material. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2024.04.022>
- Harris, B. (1999). *Engineering Composite Materials*. The institute of Materials.
- Hasan, K. M. F., Horváth, P. G., & Alpár, T. (2021). Potential fabric-reinforced composites: A comprehensive review. *Journal of Materials Science*, 56, 14381-14415.
<https://doi.org/10.1007/s10853-021-06177-6>
- ISO 178 (2019); *Plastics-Determination of Flexural Properties*. International Standard Organization: Geneva, Switzerland, 2019.
- ISO 527-1 (2019); *Plastics-Determination of Tensile Properties-Part 1: General Principles*. International Standard Organization: Geneva, Switzerland, 2019.
- ISO 527-4 (2023); *Plastics-Determination of Tensile Properties-Part 4: Test Conditions for Isotropic and Orthotropic Fibre-Reinforced Plastic Composites*. International Standard Organization: Geneva, Switzerland, 2023.
- Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S., Norizan, M. N., Osman, S., Sarifuddin, N., Desa, M. S. Z. M., Abdullah, U. H., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Abdullah, L. C. (2022). A review on natural fiber reinforced polymer composites (NFRPC) for sustainable industrial applications. *Polymers*, 14(17), 3698.
<https://doi.org/10.3390/polym14173698>
- Karthik, K., Rajamanikkam, R., Venkatesan, E. P., Bishwakarma, S., Krishnaiah, R., Saleel, C. A., Soudagar, M. E. M., Kalam, M. A., Mahmood Ali, M., & Bashir, M. N. (2024). State of the art: Natural fibre-reinforced composites in advanced development and their physical/chemical/mechanical properties. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 52(7), 100415.

- <https://doi.org/10.1016/J.CJAC.2024.100415>
- Keller, T. (2002). Overview of fibre-reinforced polymers in bridge construction. *Structural Engineering International*, 12(2), 66-70.
<https://doi.org/10.2749/101686602777965595>
- Kerni, L., Singh, S., Patnaik, A., & Kumar, N. (2020). A review on natural fiber reinforced composites. *Materials Today: Proceedings*, 28(3), 1616–1621.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.04.851>
- Kiron, M. I. (2015, 29 de Dezembro). *Physical and chemical properties of wool fiber*. Textile Learner.
<https://textilelearner.net/physical-and-chemical-properties-of-wool-fiber/>
(Consultado em 10/04/2024)
- Kumar, S., Samal, S. K., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2018). Recent development of biobased epoxy resins: A review. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 57(3), 133-155.
<https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1253742>
- Laitala, K., Klepp, I. G., & Henry, B. (2018). Does use matter? Comparison of environmental impacts of clothing based on fiber type. *Sustainability*, 10(7), 2524.
<https://doi.org/10.3390/su10072524>
- Learn about wool. (s.d.). *The properties of wool*.
https://www.learnaboutwool.com/globalassets/law/resources/factsheets/secondary/gd3270-secondary-fact-sheet_2019_j.pdf (Consultado em 07/04/2024)
- Liu, J., Zhang, L., Shun, W., Dai, J., Peng, Y., & Liu, X. (2021). Recent development on bio-based thermosetting resins. *Journal of Polymer Science*, 59(14), 1474-1490.
<https://doi.org/10.1002/pol.20210328>
- Lopes, I. A. F. (2009). *Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos: Produção de tampa de bagageira para autocarro* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Made by you. (2023, 14 de Abril). *Quais os pontos mais usados no crochê*.
<https://www.madebyyousestore.com/pontos-mais-usados-croche> (Consultado em 20/04/2024)
- Mann, G. S., Azum, N., Khan, A., Rub, M. A., Hassan, M. I., Fatima, K., & Asiri, A. M. (2023). Green composites based on animal fiber and their applications for a sustainable future. *Polymers*, 15(3), 601.
<https://doi.org/10.3390/polym15030601>
- Marinho, A. M. (2012). *Durabilidade de ligações coladas com adesivo epoxídico entre perfis de GRFP utilizados em reabilitação* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil]. Instituto Superior Técnico.
- Mattos, L. (2023, 8 de Julho). *Sistema tegumentar*. Anatomia papel e caneta.
<https://anatomia-papel-e-caneta.com/sistema-tegumentar/>
- Medeiros, J. I. (2013). *Estudo do comportamento de estruturas fibrosas com base em materiais com memória de forma e elastômeros* [Dissertação de Doutorado em Engenharia Têxtil]. Universidade do Minho.
- Mendes, T. M. S. (2015). *Melhoria do desempenho no processo de tecelagem* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial]. Universidade do Minho.
- Mendonça, V. C. de S. M. (2019). *Caracterização das propriedades mecânicas de uma resina epoxy reforçadas com nanotubos de carbono e ferro* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica]. Instituto Politécnico de Leiria.
- Moreira, A. M. (2008). *Materiais Compósitos—Materiais de Construção I*
http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932__Compositos_MC1.pdf
- Moura, M. F. S. F., Morais, A. B., & Magalhães, A. G. (2011). *Materiais Compósitos—Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Publindústrias.

- Murillo, M., Sánchez, A., Gil, A., Araya-Letelier, G., Burbano-Garcia, C., & Silva, Y. F. (2024). Use of animal fiber-reinforcement in construction materials: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02812. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02812>
- Ngo, T.-D. (2020). *Introduction to Composite Materials. Composite and Nanocomposite Materials - From Knowledge to Industrial Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91285>
- ODS Portugal. (s.d.). *Objetivos de desenvolvimento sustentável*. <https://ods.pt/ods/> (Consultado em 07/12/2024).
- Patil, D. M., Phalak, G. A., & Mhaske, S. T. (2017). Synthesis of bio-based epoxy resin from gallic acid with various epoxy equivalent weights and its effects on coating properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(2), 355-365. <https://doi.org/10.1007/s11998-016-9853-x>
- Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., & Leite, M. (2018). Natural fibre composites and their applications: A review. *Journal of Composites Science*, 2(4), 66. <https://doi.org/10.3390/jcs2040066>
- Pedroso, L. D. F. (2020). *Compósitos avançados para produtos desportivos* [Dissertação de Mestrado em Engenharia de Polímeros]. Universidade do Minho.
- Pereira, J. M. da C. R. (2017). *Desenvolvimento e fabrico de compósito de matriz polimérica com fibras naturais* [Dissertação de Mestrado em Engenharia de Conceção e Desenvolvimento de Produto]. Instituto Politécnico de Leiria.
- Pereira, N. M. C. (2011). *Desenvolvimento de reservatórios em materiais compósitos* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98–112. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2015.08.038>
- Pinto, M. F. S. (2023). *Compósitos híbridos de fibras e nanotubos de carbono em resina epóxido* [Dissertação de Mestrado em Engenharia de Polímeros]. Universidade do Minho.
- Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Linul, E. (2019). Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. *Polymers*, 11(10), 1667. <https://doi.org/10.3390/polym11101667>
- Rajeshkumar, G., Arvinth Seshadri, S., Devnani, G. L., Sanjay, M. R., Siengchin, S., Prakash Maran, J., Al-Dhabi, N. A., Karuppiyah, P., Mariadhas, V. A., Sivarajasekar, N., & Ronaldo Anuf, A. (2021). Environment friendly, renewable and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites – A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127483. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127483>
- Ramachandran, A. R., Mavinkere Rangappa, S., Kushvaha, V., Khan, A., Seingchin, S., & Dhakal, H. N. (2022). Modification of fibers and matrices in natural fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review. *Macromolecular Rapid Communications*, 43(17), 2100862. <https://doi.org/10.1002/marc.202100862>
- Ramamoorthy, S., Ramadoss, M., Ramasamy, R., & Thangavel, K. (2020). Analysis of physical and thermal properties of chiengora fibers. *Journal of Natural Fibers*, 17(2), 246-257. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1479996>
- Ramon, E., Sguazzo, C., & Moreira, P. M. G. P. (2018). A review of recent research on bio-based epoxy systems for engineering applications and potentialities in the aviation sector. *Aerospace*, 5(4), 110. <https://doi.org/10.3390/aerospace5040110>
- Ramos, C. A. X. (2007). *Materiais compósitos inteligentes* [Dissertação de Doutoramento em Ciências da Engenharia]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Ramos, M. I. T. (2018). *Produção e caracterização de materiais compósitos à base de aglomerado de cortiça* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeroespacial]. Instituto Superior Técnico.
- Rawal, A., Majumdar, A., & Kumar, V. (2023). Textile architecture for composite materials: back to basics. *Oxford Open Materials Science*, 3(1), itado17. <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itado17>
- Rehman, R., Islam, A., Habib, M. A., Mahmud, S., & Huiyu, J. (2015). *Effective method development on wool dyeing by using FI based cotton-reactive dyes*. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(6), 505–511. https://www.researchgate.net/publication/283538759_Effective_Method_Development_on_Wool_Dyeing_by_Using_FI_Based_Cotton-reactive_Dyes
- Rohit, K., & Dixit, S. (2016). A review - Future aspect of natural fiber reinforced composite. *Polymers from Renewable Resources*, 7(2), 43-59. <https://doi.org/10.1177/204124791600700202>
- Romão, C. M. N. (2003). *Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Sanjay, M. R., Siengchin, S., Parameswaranpillai, J., Jawaid, M., Pruncu, C. I., & Khan, A. (2019). A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 207, 108–121. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.11.083>
- Saw, S. K., Purwar, R., Nandy, S., Ghose, J., & Sarkhel, G. (2013). Fabrication, characterization, and evaluation of *Luffa cylindrica* fiber reinforced epoxy composites. *BioResources*, 8(4), 4805-4826. <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.4805-4826>
- Science Learning Hub. (2010, 30 de Maio). *Wool fibre structure and properties*. https://www.sciencelearn.org.nz/image_maps/61-wool-fibre-structure-and-properties (Consultado em 07/04/2024).
- Sicomín (2023). *GreenPoxy*. <https://greenpoxy.org/>
- Silva, L. J. da. (2011). *Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica]. Universidade Federal de São João del-Rei.
- Silva, S. O. (2020). *Controle de qualidade e desempenho de pré-impregnados fibra natural/epóxi para a produção de compósitos* [Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas]. Universidade de Brasília.
- só crochê. (s.d.). *Pontos básicos de crochê para iniciantes!*. <https://socroche.home.blog/2019/01/31/pontos-basicos-de-croche-para-iniciantes/> (Consultado em 16/04/2024).
- Stearns, S. (2022a, 16 de Maio). *How to Knit the Knit Stitch (k) for Beginners*. Sarahmaker. <https://sarahmaker.com/knit-stitch/> (Consultado em 18/05/2024).
- Stearns, S. (2022b, 17 de Maio). *How to Knit the Purl Stitch (p) for Beginners*. Sarahmaker. <https://sarahmaker.com/purl-stitch> (Consultado em 18/05/2024).
- Stitch & Story. (s.d.a). *Understanding Knitting Needle Sizes & Yarn Weights*. <https://www.stitchandstory.us/blogs/knitting-tips/understanding-knitting-needle-sizes-and-yarn-weights> (Consultado em 19/05/2024).
- Stitch & Story. (s.d.b). *Understanding Crochet Hook Sizes & Yarn Weights*. <https://www.stitchandstory.us/blogs/crochet-tips/understanding-crochet-hook-sizes-and-yarn-weights> (Consultado em 19/05/2024).
- Suriani, M. J., Zainudin, H. A., Ilyas, R. A., Petrú, M., Sapuan, S. M., Ruzaidi, C. M., & Mustapha, R. (2021). Kenaf fiber/pet yarn reinforced epoxy hybrid polymer composites: Morphological, tensile, and flammability properties. *Polymers*, 13(9), 1532. <https://doi.org/10.3390/polym13091532>

- Talabi, S. I., Ismail, S. O., Akpan, E. I., & Hassen, A. A. (2024). Quest for environmentally sustainable materials: A case for animal-based fillers and fibers in polymeric biocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 183, 108216.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2024.108216>
- Talreja, R., & Manson, J. A. E. (2000). *Comprehensive Composite Materials*. Elsevier.
- Textile Value Chain. (2020, 10 de Novembro). *Clothing from chiengora (dog) fibres*.
<https://textilevaluechain.in/news-insights/clothing-from-chiengora-dog-fibres/>
 (Consultado em 21/01/2024)
- Thakur, V. K., Thakur, M. K., & Kessler, M. R. (2017). *Handbook of composites from renewable materials. Materials* (Vol. 6). John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1002/9781119441632>
- The Craft Atlas. (s.d.). *Technique: Weaving*.
<https://craftatlas.co/crafts/technique/weaving> (Consultado em 19/04/2024).
- Thomas, S., Joseph, K., Malhotra, S. K., Goda, K., & Sreekala, M. S. (2012). *Polymer Composites. Macro- and Microcomposites* (Vol. 1). John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1002/9783527645213>
- Tomar, S. de M. (2018). *Comportamento mecânico de materiais compósitos de origem natural* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica]. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Turner, E. (2022, 22 de Março). *Crochê versus tricô: Qual a diferença e quando escolher cada um e por quê*. Skillshare.
<https://www.skillshare.com/pt/blog/croche-versus-trico-qual-a-diferenca-e-quando-escolher-cada-um-e-por-que/> (Consultado em 15/08/2024).
- United Nations. (s.d.). *Sustainable development goals*.
<https://sdgs.un.org/goals> (Consultado em 07/12/2024).
- Väisänen, T., Das, O., & Tomppo, L. (2017). A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites. *Journal of Cleaner Production*, 149, 582-596.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.132>
- Vielba, M. (2022, 30 de Janeiro). *Anatomy of wool fiber*. Pirilana.
<https://pirilana.com/en/anatomy-of-wool-fibre/>
- Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259-1264.
[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00096-4)
- Wang, D., Yang, X. H., Tang, R. C., & Yao, F. (2018). Extraction of keratin from rabbit hair by a deep eutectic solvent and its characterization. *Polymers*, 10(9), 993.
<https://doi.org/10.3390/polym10090993>
- Woolmark. (s.d.). *Wool fibre facts & benefits*.
<https://www.woolmark.com/fibre/> (Consultado em 07/04/2024).
- Wu, M., Shen, S., Yang, X., & Tang, R. (2017). Preparation and study on the structure of keratin/PVA membrane containing wool fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 254(4), 042030.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/4/042030>
- Zão, T. N. B. A. (2018). *Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polímeros bio-derivados reforçados com fibras para aplicações estruturais* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Militar]. Instituto Superior Técnico.
- Zooplus Magazine. (2020, 26 de Novembro). *Cão Serra da Estrela*.
<https://www.zooplus.pt/magazine/caes/racas-de-caes/cao-serra-da-estrela#aspeto> (Consultado em 24/01/2024).

Anexos

Anexo A – Ficha técnica da resina SR GreenPoxy 56



GREENPOXY 56
ED 1372.4
Page 1 / 6
Version 08/12/2015

SR GreenPoxy 56 Clear epoxy resin

High bio-based content

SR GreenPoxy 56 resin is out coming from the latest innovations in bio-based chemistry.

SR GreenPoxy 56 resin is produce with a high content of carbon from plant origin. The bio-based Carbon content of our system is certified by an independent laboratory using Carbon 14 measurements (ASTM D6866 or XP CEN/TS 16640)

This is a significant technological advance on the following points:
Clarity, color, performances and guarantees of industrial tonnages availability.

SR GreenPoxy 56 is an epoxy resin which has up to 56% of its molecular structure coming from plant origin.

This percentage is function of the carbon origin contained in the epoxy molecule. The final rate of the mix bio-based carbon content will depend on the hardener choice.

SR GreenPoxy 56 resin is available with multiple hardeners to match your exact needs.




Sicomin, 31 avenue de la Lardière, 13220 Châteauneuf les Martigues, France
T: +33 (0)4 42 42 30 20 / F: +33 (0)4 42 81 29 29 / E: info@sicomin.com / www.sicomin.com

Applications

- Hand lamination for tooling or industrial parts
- RTM processes (infusion, injection...)
- Filament winding
- Hot or cold press
- Casting
- Bonding


Resin SR GreenPoxy 56:

Aspect / colour		Clear liquid
Storage		2 years, crystallisation free
Viscosity (mPa.s \pm 20 %)	@ 15 °C	2500
	@ 20 °C	1400
	@ 25 °C	800
	@ 30 °C	500
	@ 40 °C	250
 % bio-based Carbon content		50 - 58
Color (Gardner)		2 max
Density \pm 0.005	@ 20 °C	1.198
Refractive index \pm 0.5 %	@ 25 °C	1.5350

SR GreenPoxy 56 / SD Surf Clear hardener mix example:**Hardener SD Surf Clear**

Aspect / colour		Liquid / clear
Typical reactivity		Standard
Viscosity (mPa.s \pm 20 %)	@ 15 °C	80
	@ 20 °C	60
	@ 25 °C	40
	@ 30 °C	30
% bio-based carbon content		0
Color (Gardner)		1 max
Density \pm 0.005	@ 20 °C	0.958

SR GreenPoxy 56 / SD Surf Clear mix properties

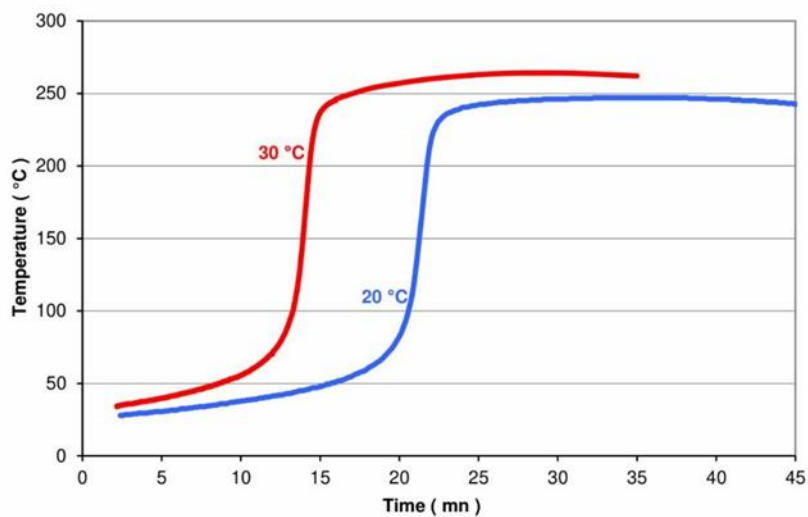
Weight ratio	100 / 37 g
Volume ratio	100 / 47 ml
 % mix bio-based carbon content	35-41
Mix viscosity (mPa.s \pm 20 %)	
@ 20 °C	900
@ 30 °C	330
@ 40 °C	200

Reactivity – mass exotherm

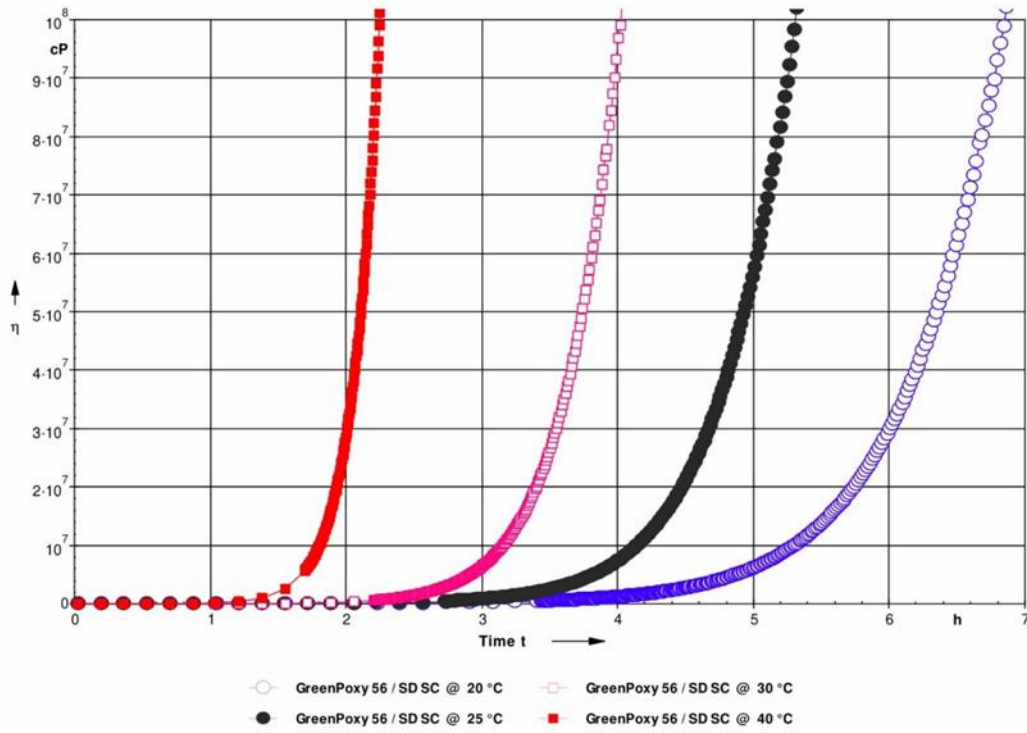
Exothermic peak on 500 g mix :	
@ 20 °C	250 °C
@ 30 °C	265 °C
Time to reach exothermic peak on 500 g mix :	
@ 20 °C	32'
@ 30 °C	28'
Time to reach 50 °C on 500 g mix :	
@ 20 °C	15'
@ 30 °C	8'

Exotherms on 500 g mix @ 20 and 30 °C:

NB: Large casting develop very exotherm temperature and high smokes densities


 Sicomin, 31 avenue de la Lardière, 13220 Châteauneuf les Martigues, France
 T: +33 (0)4 42 42 30 20 / F: +33 (0)4 42 81 29 29 / E: info@sicomin.com / www.sicomin.com

Reactivity – 1 mm film viscosity evolution



Gel time on 1 mm thickness:

@ 20 °C	4 h
@ 25 °C	3 h 10'
@ 30 °C	2 h 25'
@ 40 °C	1 h 25'

Mechanical properties on pure casted resin

		<i>SR GreenPoxy 56</i> <i>/ SD Surf Clear</i>	<i>SR GreenPoxy 56</i> <i>/ SD Surf Clear</i>	<i>SR GreenPoxy 56</i> <i>/ SD Surf Clear</i>
Curing cycle		7 days @ 23 °C	24 hrs @ 23 °C + 24 hrs @ 40 °C	24 hrs @ 23 °C + 4 hrs @ 40 °C + 8 hrs 60 °C
Tension				
Modulus of elasticity	N/mm ²	3 200	3 300	3 300
Maximum resistance	N/mm ²	50	49	51
Resistance at break	N/mm ²	49	48	51
Elongation at max. load	%	1.6	1.6	1.7
Elongation at break	%	1.6	1.6	1.7
Flexion				
Modulus of elasticity	N/mm ²	3 300	3 400	3 300
Maximum resistance	N/mm ²	114	114	123
Elongation at max. load	%	4,5	4,2	5,5
Elongation at break	%	4,7	5,5	6,4
Charpy impact strength				
Resilience	kJ/m ²	20	16	16
Glass transition				
Tg1 onset	°C	53	65	78 / 78
Tg1 onset maximum	°C	-	-	85

Tests carried out on samples of pure cast resin, without prior degassing, between steel plates.

Measures undertaken according to the following norms:

Tension: Iso 527 - 2

Flexion: Iso 178

Charpy impact strength: NF T 51-035

Shear Strength ASTM D 732 - 93

Compressive NFT51-101

Water absorption: Internal. Polymerisation according to cycle, machining, weighing, time spent in distilled water at 70 °C / 48 hours, weighing 1 hour after emerging.

Glass transition DSC : ISO 11357-2 : 1999 -5°C to 180°C under nitrogen gaz

Tg1 or Onset : 1st point at 20 °C/mn Tg1 maximum or Onset : second passage

Glass transition by DMTA 2 °C/mn, 4 mm thickness, air

Physical tests according standard ::

Gardner color: NF EN ISO 4630 Visual method

Refractive index : NF ISO 280


Viscosity: NF EN ISO 3219 Rheometer 50 mm, shear 10s⁻¹

Density: NF EN ISO 2811-1 Pyknometer

Gel time : Cross G' G'' / rheometer CP50 - Shear rate 10 s⁻¹

GreenCarbon content: ASTM D6866 or XP CEN/TS 16640 Avril 2014

Other hardeners mix possibilities with SR GreenPoxy 56 resin

	Mixing By weight	 % mix bio-based content + 10 %	Tg 1 maximum or Onset (°C)	Best use
SR GreenPoxy 56 / SD Glass One	100 / 42	36	69	Clear laminates
SR GreenPoxy 56 / SD 1213	100 / 50	34	43	Large clear casting
SR GreenPoxy 56 / SD 280x	100 / 37	37	2806 : 66 2803 : 72 2801 : 80	Multipurpose
SR GreenPoxy 56 / SD 477x	100 / 29	40	4775: 80 4771: 74	Multipurpose
SR GreenPoxy 56 / SD 550x	100 / 37	37	5505 : 78 5503 : 85 5502 : 84	Multipurpose
SR GreenPoxy 56 / SD 597.20	100 / 21	42	100	Very large casting
SR GreenPoxy 56 / SD 720x	100 / 37	37	7206 : 84 7203 : 82 7201 : 80	Multipurpose
SR GreenPoxy 56 / SD 860x	100 / 37	37	8605 : 67 8601 : 56	Multipurpose
SR GreenPoxy 56 / SD 882x	8824 100 / 21 8822 100 / 31	42 39	8824 : 90 8822 : 71	Infusion
SR GreenPoxy 56 / SZ 8525	100 / 24	41	120	Hot process

Anexo B – Gráficos de tensão à tração versus deformação dos fios das fibras utilizados no reforço

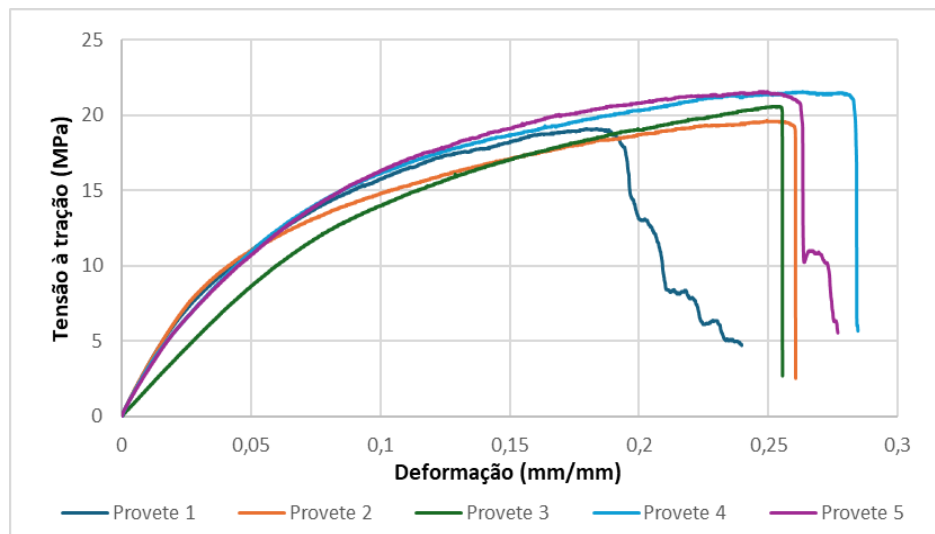


Figura B1: Gráfico de tensão à tração/deformação dos fios de lã de ovelha

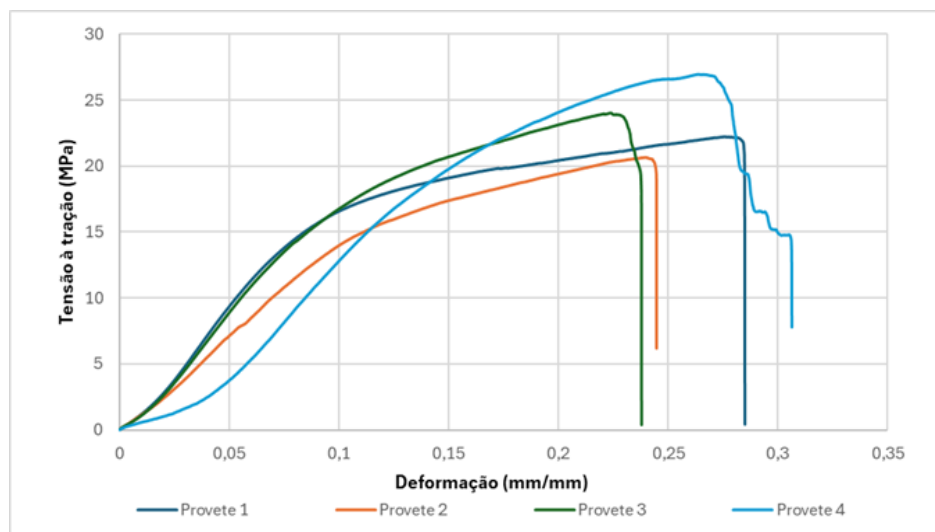


Figura B2: Gráfico de tensão à tração/deformação dos fios de pêlo de cão

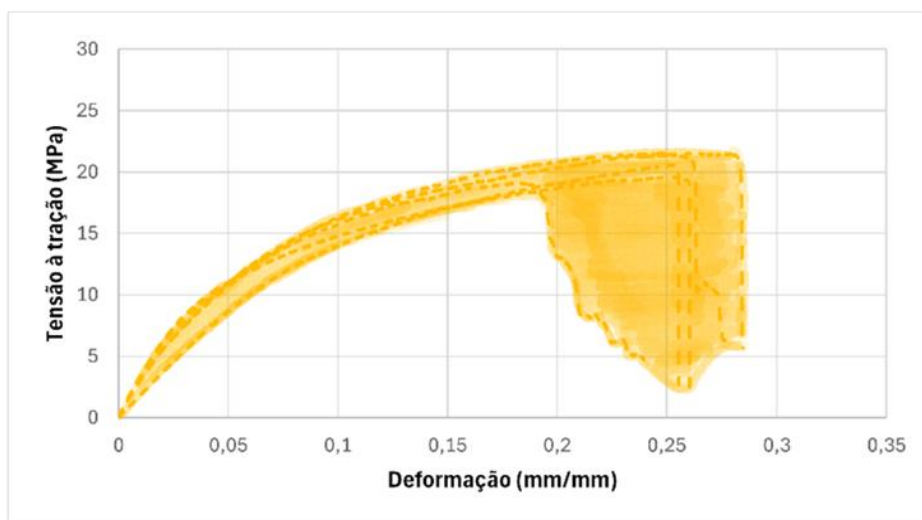


Figura B3: Gráfico de tensão à tração/deformação dos fios de lã de ovelha, com a área sob as curvas tensão/deformação destacada

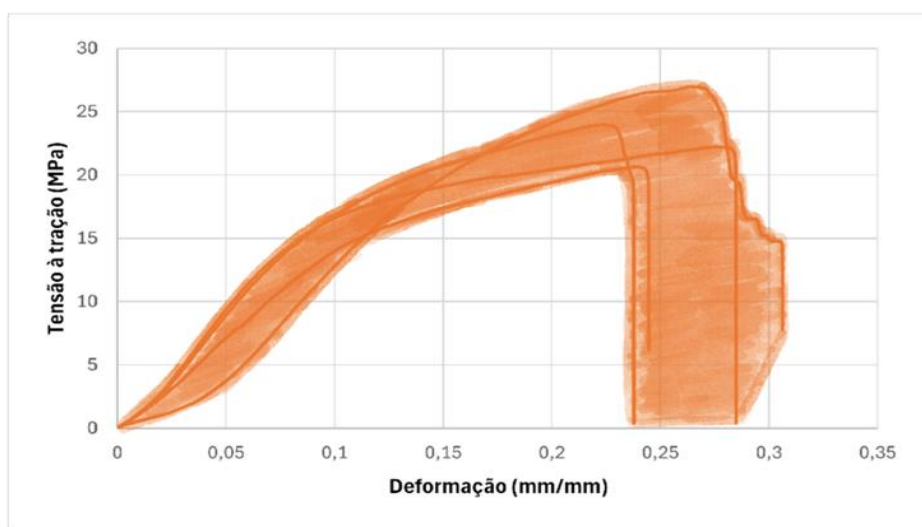


Figura B4: Gráfico de tensão à tração/deformação dos fios de pêlo de cão, com a área sob as curvas tensão/deformação destacada

Anexo C – Gráficos de tensão à tração versus deformação dos compósitos reforçados com tecidos em crochê produzidos a partir dos fios de lã de ovelha

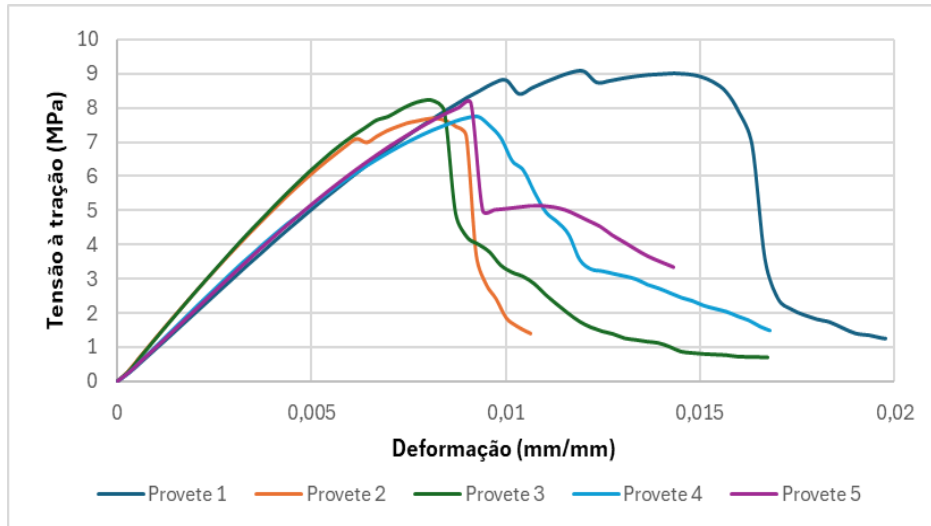


Figura C1: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_C_2F_A3

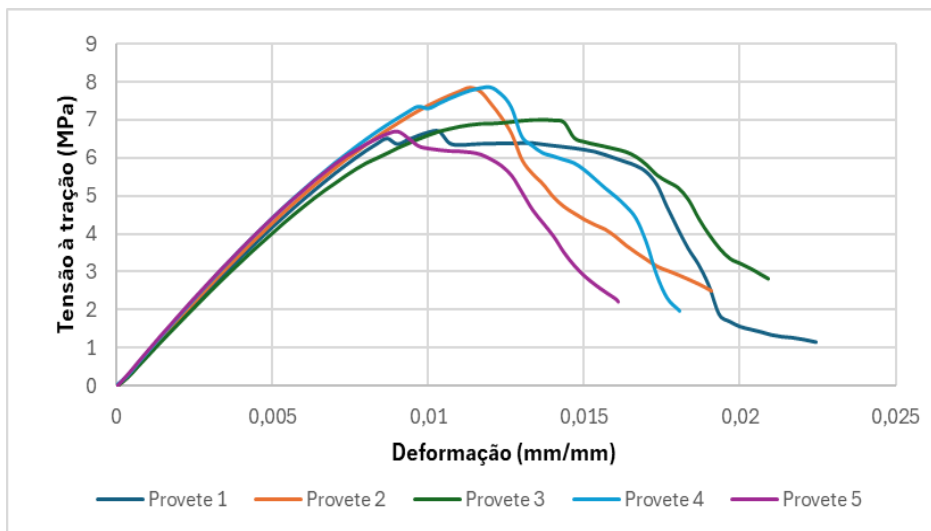


Figura C2: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_C_2F_A5

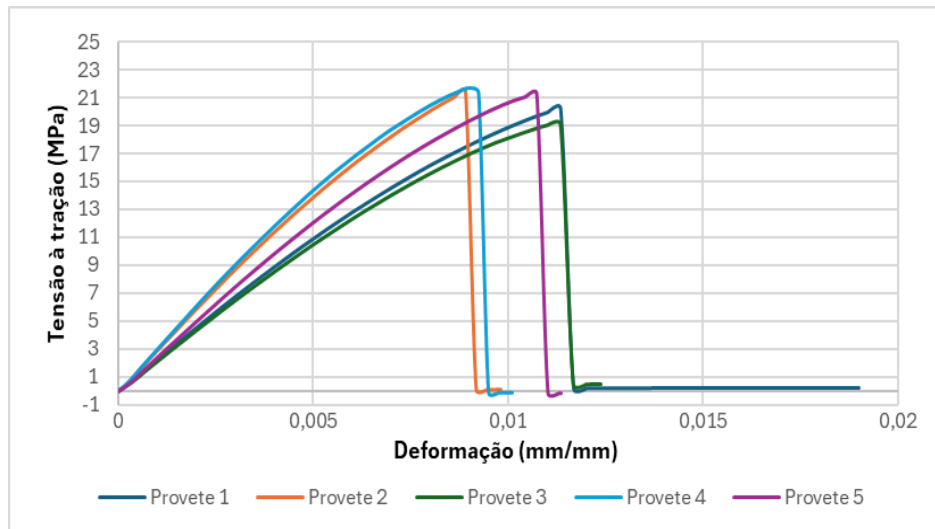


Figura C3: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_C_3F_A5

Anexo D – Gráficos de tensão à tração versus deformação dos compósitos reforçados com os diferentes tecidos produzidos a partir das duas fibras

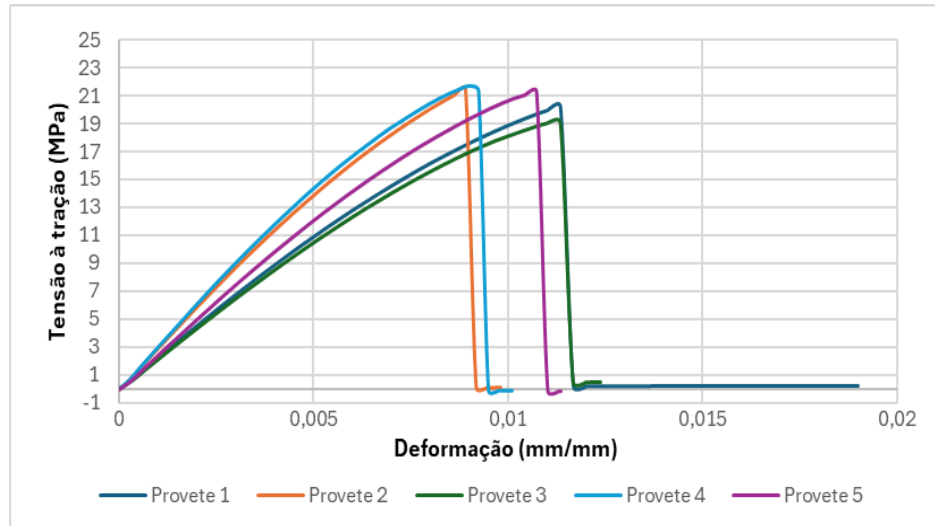


Figura D1: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_C_3F_A5

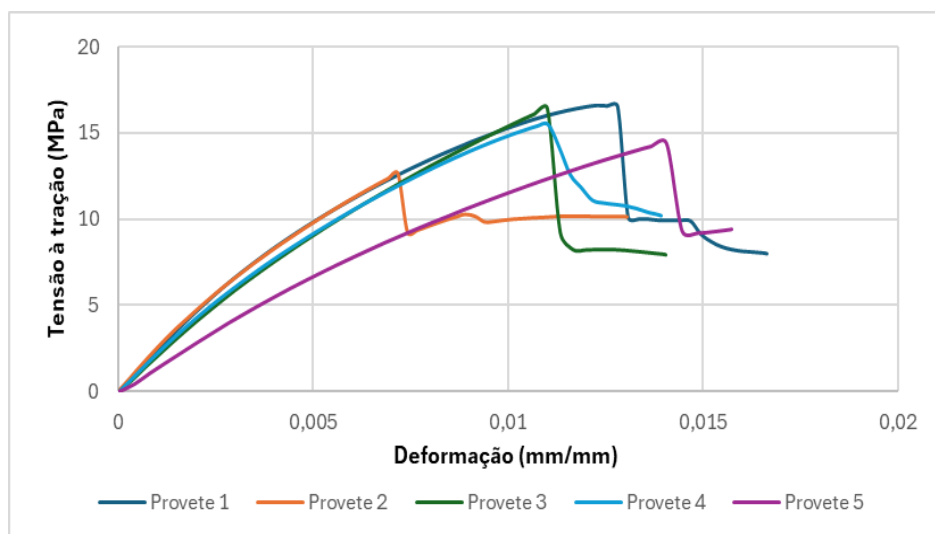


Figura D2: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito C_C_1F_A5

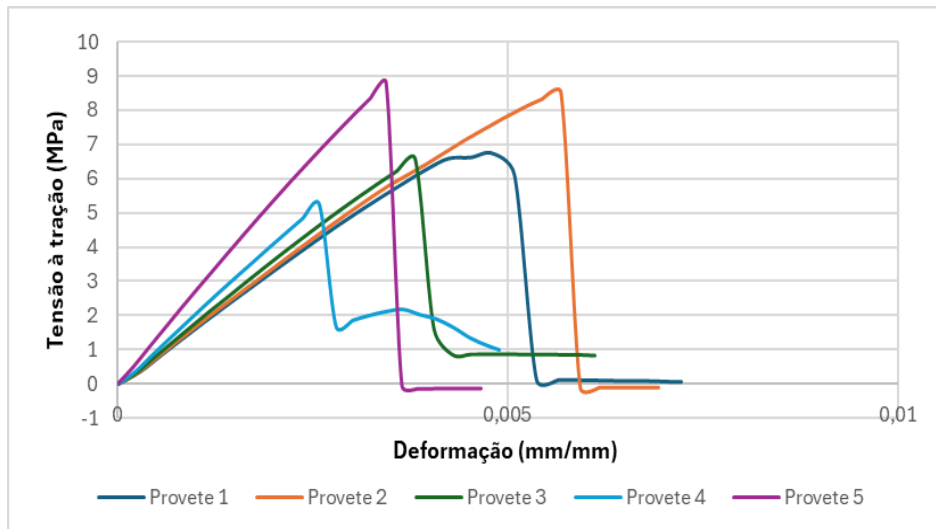


Figura D3: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_T_3F_A5

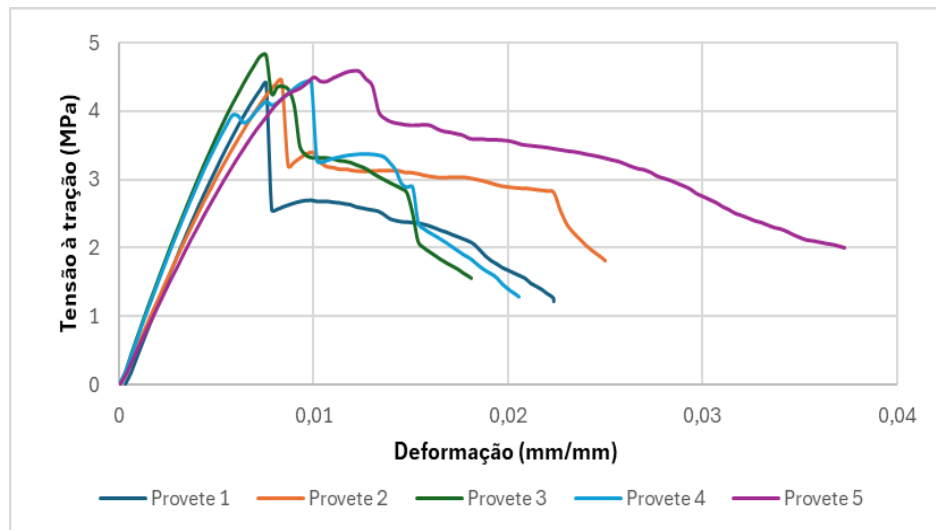


Figura D4: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito C_T_1F_A5

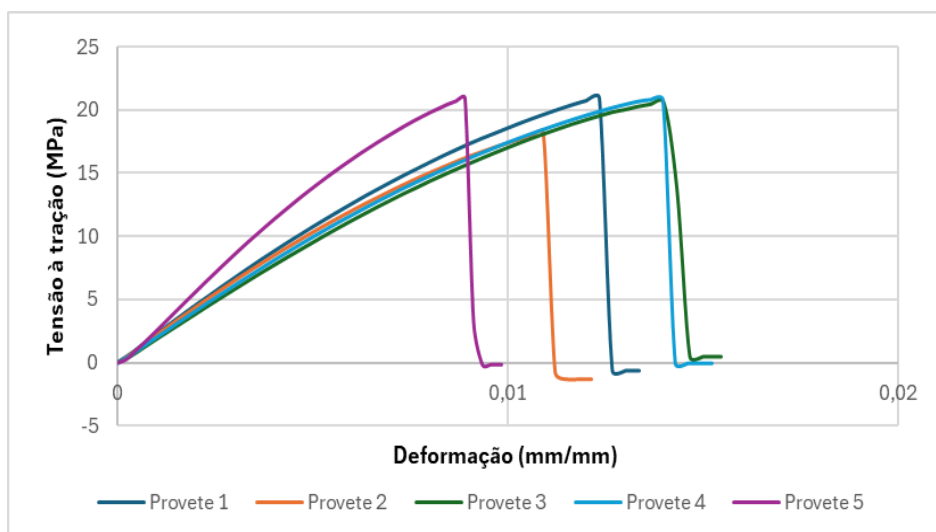


Figura D5: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito O_TT_3F

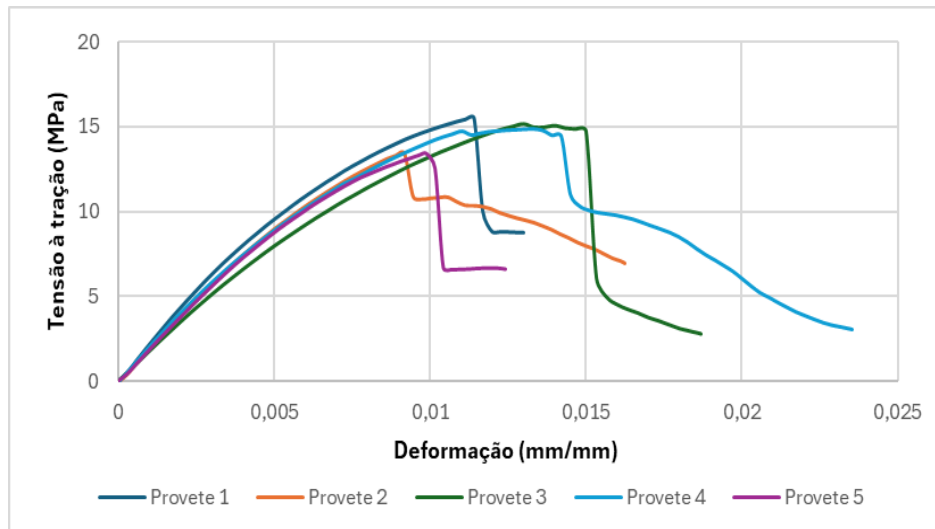


Figura D6: Gráfico de tensão à tração/deformação do compósito C_TT_1F

Anexo E – Gráficos de tensão à flexão versus deformação dos compósitos reforçados com tecidos em crochê produzidos a partir dos fios de lã de ovelha

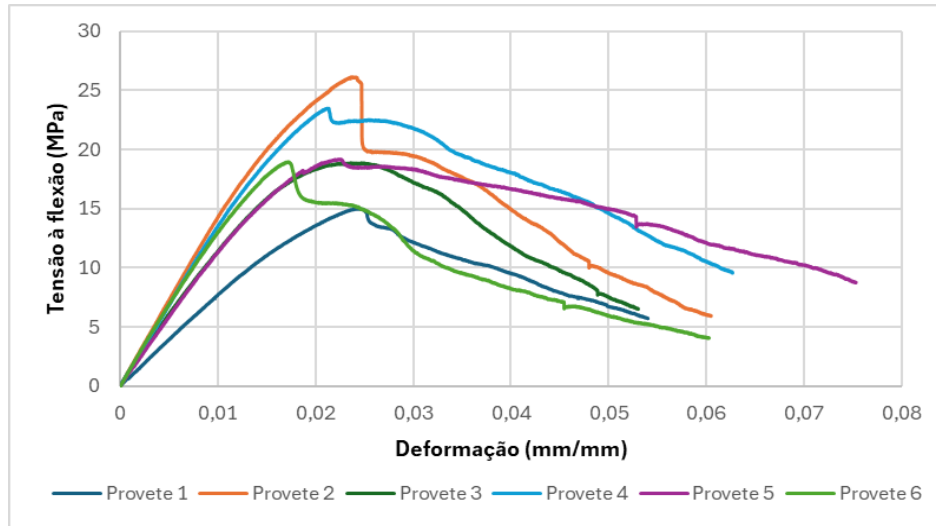


Figura E1: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_C_2F_A3

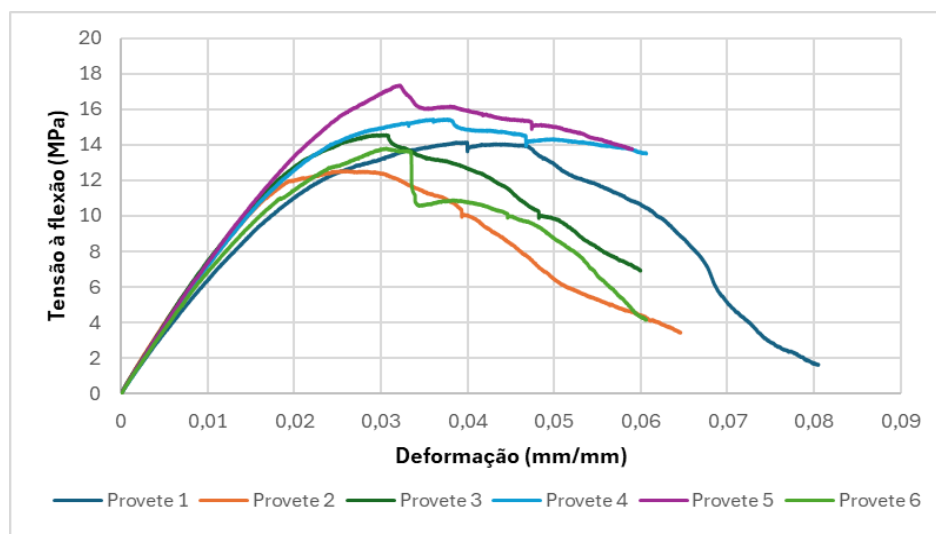


Figura E2: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_C_2F_A5

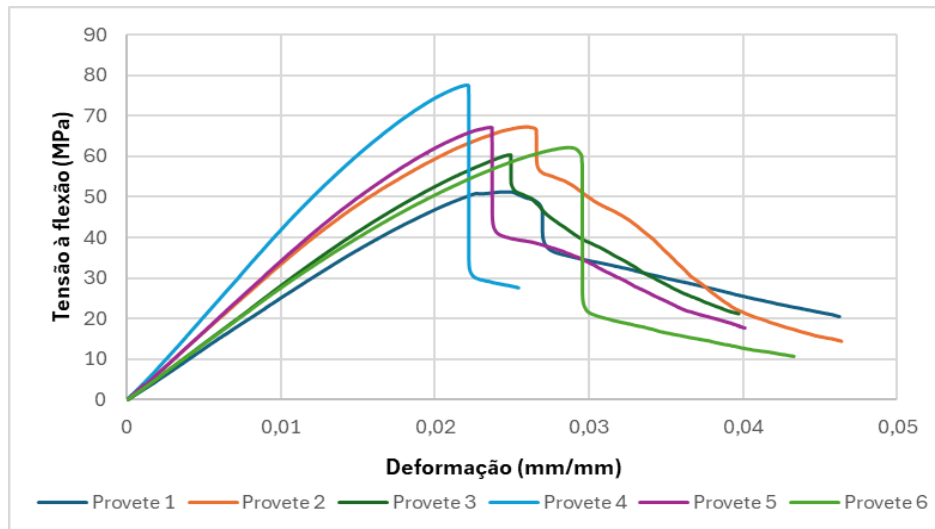


Figura E3: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_C_3F_A5

Anexo F - Gráficos de tensão à flexão versus deformação dos compósitos reforçados com os diferentes tecidos produzidos a partir das duas fibras

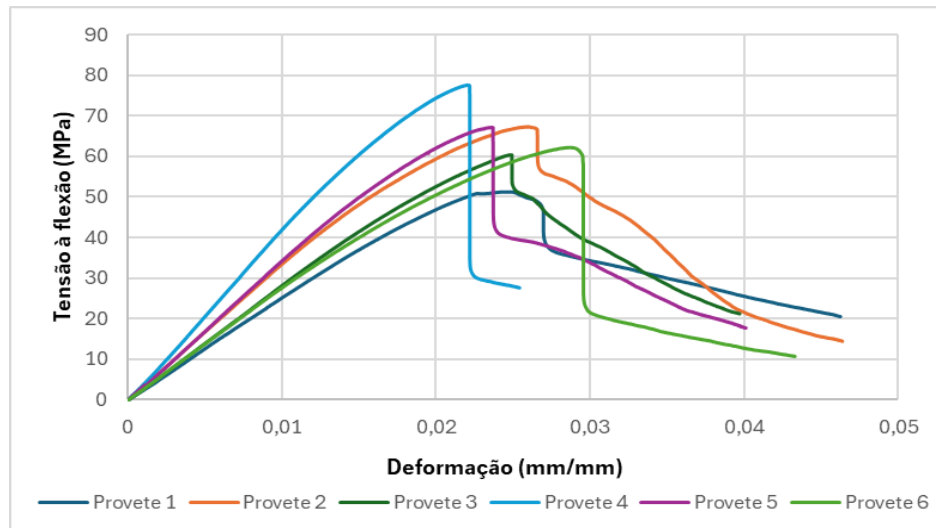


Figura F1: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_C_3F_A5

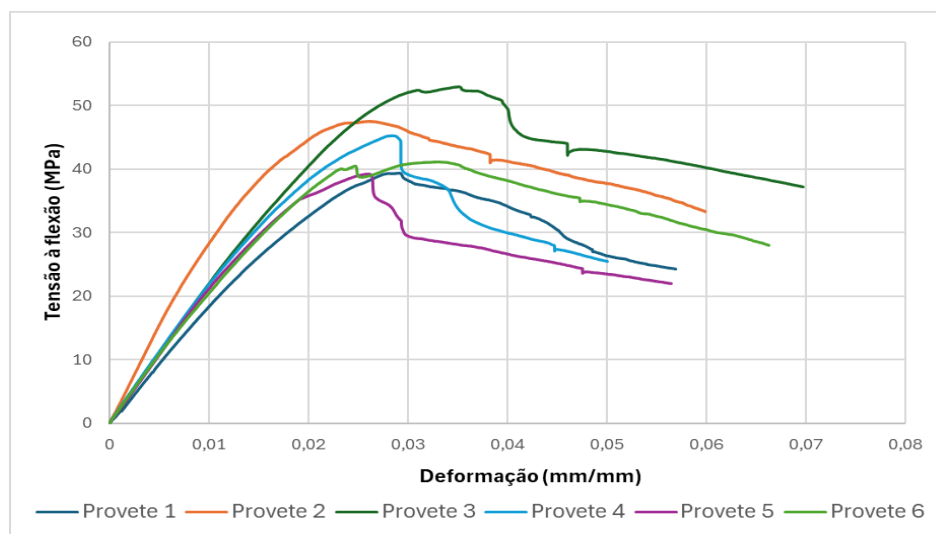


Figura F2: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito C_C_1F_A5

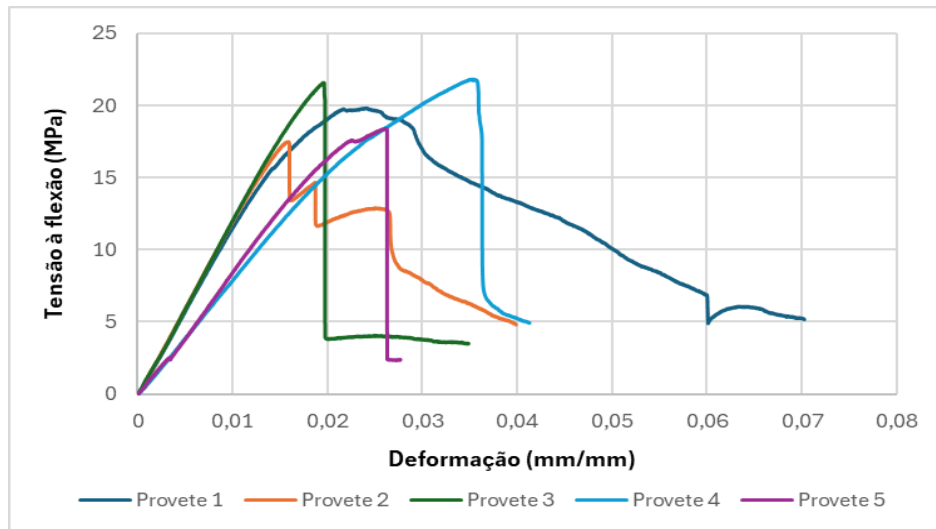


Figura F3: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_T_3F_A5

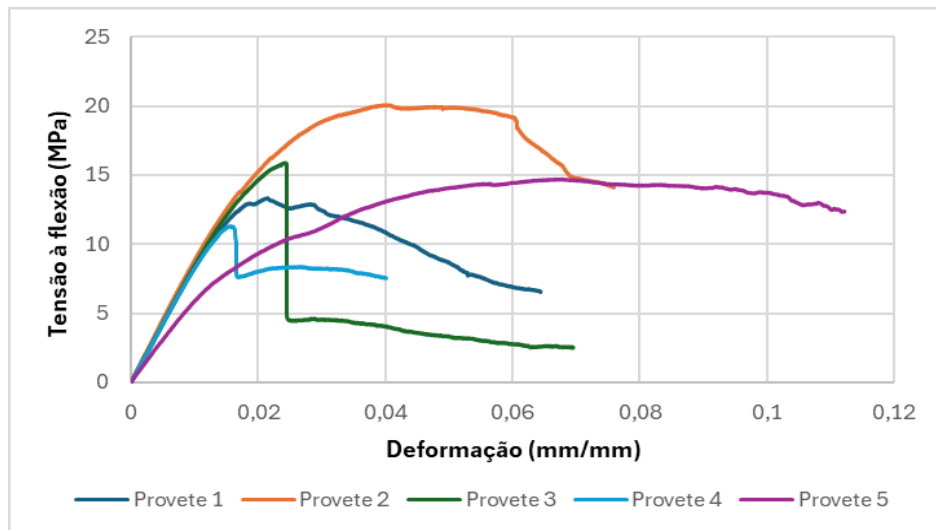


Figura F4: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito C_T_1F_A5

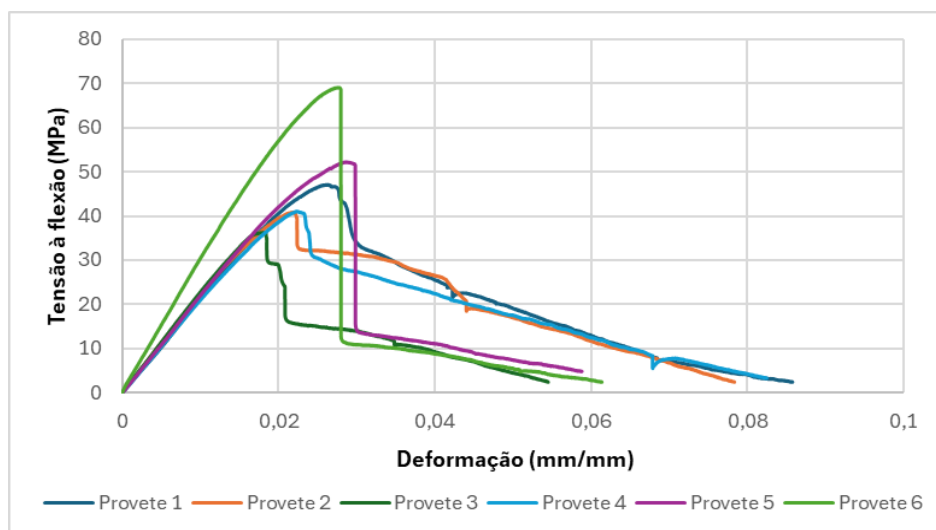


Figura F5: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito O_TT_3F

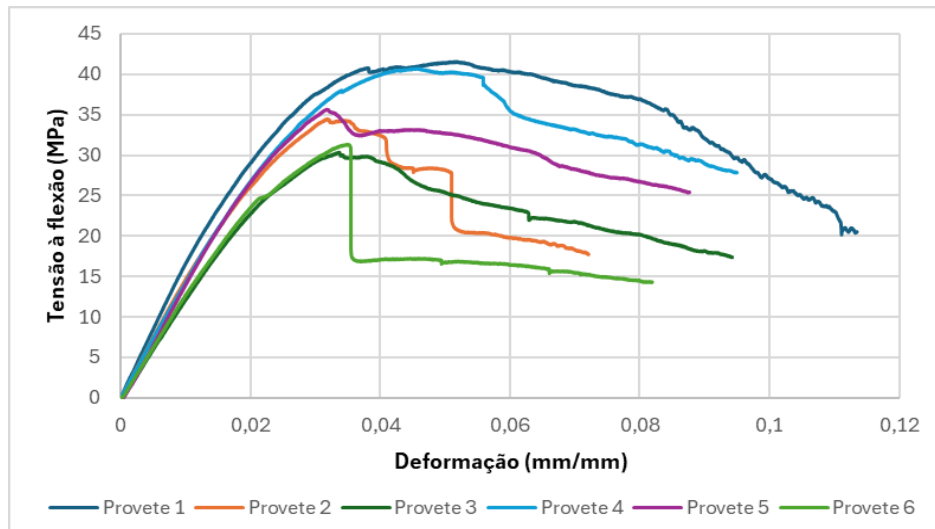


Figura F6: Gráfico de tensão à flexão/deformação do compósito C_TT_1F

Anexo G – Poster científico “Estudo das propriedades mecânicas de compósitos verdes reforçados com lã de ovelha e pêlo de cão da Serra da Estrela”

Cláudia Antunes

Estudo das propriedades mecânicas de compósitos verdes reforçados com lã de ovelha e pêlo de cão da Serra da Estrela

24 DIA INTERNACIONAL jun 24 3ª MULHER NA ENGENHARIA FACULDADE DE ENGENHARIA ANFITEATRO 8.1 14H30



Resumo

A crescente preocupação com o meio ambiente, o esgotamento dos recursos derivados do petróleo, os elevados custos e os problemas ambientais que lhe estão associados impulsionaram o interesse no desenvolvimento de materiais mais sustentáveis¹. Os compósitos verdes são materiais cujos constituintes são todos provenientes de recursos renováveis, reduzindo assim a dependência dos combustíveis fósseis e as emissões de CO₂². Foram produzidos compósitos verdes reforçados com lã de ovelha e com pêlo de cão, ambos da Serra da Estrela, com o objetivo de estudar a influência que diferentes tipos de fibras naturais animais e diferentes técnicas de produção de tecidos têm nas propriedades mecânicas dos compósitos. Antes da produção dos compósitos, caracterizou-se as fibras por difração de raios-X (DR-X) e, para se estudar as propriedades mecânicas realizaram-se ensaios de flexão. Os compósitos reforçados com lã de ovelha possuem valores mais elevados de resistência à flexão e de módulo de elasticidade do que os reforçados com o pêlo de cão. O número de fios e o diâmetro das agulhas utilizados durante a produção do reforço influenciam de forma significativa as propriedades mecânicas dos compósitos.

Introdução

A limitação dos recursos petrolíferos e os problemas ambientais adversos traduzem-se num grande interesse em desenvolver materiais com menor impacto ambiental³. Os compósitos reforçados com fibras naturais têm ganho destaque nos últimos anos, pois oferecem uma solução económica e ecológica. As fibras naturais são biodegradáveis, possuem uma elevada disponibilidade, têm baixo custo e apresentam propriedades mecânicas que podem ser equiparadas às das fibras sintéticas. Para além disso, o seu uso permite a eliminação de vários resíduos sólidos que iriam para aterros⁴. A orientação, o comprimento e a quantidade das fibras presentes nos compósitos influenciam as suas propriedades físico-mecânicas⁵.

Metodologia

- O DR-X foi realizado com um varrimento no intervalo entre 5 e 50 graus.
- Os compósitos (Fig. 1) foram produzidos por moldação manual sob vácuo.
- As estruturas têxteis foram impregnadas com a resina SR GreenPoxy 56.
- Nos testes de flexão em 3 pontos foi utilizada uma célula de carga 10 kN com velocidade constante de 1,5 mm/min.

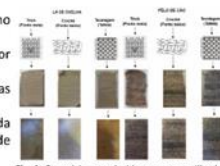


Fig. 1: Composites produced and points used

Resultados

DR-X das fibras

No padrão DR-X obtido para ambas as fibras é evidenciado na Figura 2^{3,4}:

- Dois fortes picos de difração nos ângulos 2θ, um cerca dos 9º e outro dos 20º, correspondentes às estruturas α-hélice e β-plissada da queratina, respetivamente.
- O pico de difração no ângulo 2θ de cerca dos 20º possui uma forma mais larga, devido ao empilhamento das estruturas β-plissadas.

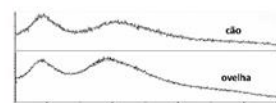


Fig. 2: Padrões de DR-X do pêlo do cão e da lã de ovelha^{3,4}.

Testes de flexão

Figuras 3 e 4 mostram a influência que o nº de fios e o diâmetro das agulhas têm.

- 3F_A5:** Resistência e módulo de Young mais elevados (64,33 MPa e 3,21 GPa).
- 3F_A5 > 2F_A5:** Aumento do nº de fios utilizados aumenta de forma significativa ambas as propriedades.
- 2F_A3 > 2F_A5:** Agulha 3 tem menor diâmetro, logo as malhas são menos flexíveis, o que aumenta a sua resistência à flexão e rigidez.

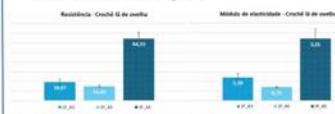


Fig. 3 e Fig. 4: Resistência à flexão (MPa) e módulo de Young (GPa) dos compósitos reforçados com tecidos em crochê feitos com lã de ovelha.
Legenda - 2F_A3: 2 fios, agulha 3; 2F_A5: 2 fios, agulha 5; 3F_A5: 3 fios, agulha 5.

Figuras 5 e 6 demonstram a influência que o tipo de tecido utilizado como reforço possui (Nota: Nos compósitos de lã foi usada a agulha 5 (crochê/tricô) e 3 fios, nos compósitos de pêlo de cão foi usada a agulha 5 (crochê/tricô) e 1 fio).

- O_C:** Resistência e módulo de Young mais elevados (64,33 MPa e 3,21 GPa), devido ao maior nº de fios, estrutura menos flexível e fibras mais rígidas.
- C_T:** Resistência e módulo de Young mais baixos (15,06 MPa e 0,78 GPa), devido ao menor nº de fios, menor rigidez das fibras e à maior flexibilidade do tecido.



Fig. 5 e Fig. 6: Resistência à flexão (MPa) e módulo de Young (GPa).
Legenda - O_C: ovelha, crochê; C_C: cão, crochê; O_TT: ovelha, tecelagem; C_TT: cão, tecelagem; O_T: ovelha, tricô; C_T: cão, tricô.

Conclusões

- Comparando os 3 compósitos reforçados com estruturas feitas em crochê (lã de ovelha) é possível constatar que o aumento do nº de fios utilizados aumenta de forma considerável o módulo de Young e a resistência à flexão e que quanto menor for o diâmetro da agulha utilizada mais elevadas são essas propriedades mecânicas (Fig. 3 e Fig. 4).
- Os compósitos reforçados com lã de ovelha possuem valores de resistência à flexão e módulo de Young mais elevados que os reforçados com pêlo de cão (comparação entre a mesma técnica de produção de tecido). Isto era expectável devido ao maior nº de fios utilizados e à maior rigidez das fibras de lã de ovelha (Fig. 5 e Fig. 6).
- Comparando as diferentes técnicas de produção de tecidos, os compósitos reforçados com malhas feitas em crochê apresentam valores de resistência à flexão e módulo de Young mais elevados, enquanto que os reforçados com estruturas feitas em tricô são os que possuem valores mais baixos. O crochê e a tecelagem criam tecidos menos flexíveis que o tricô e por isso dão origem a compósitos mais rígidos e mais resistentes à flexão (Fig. 5 e Fig. 6).

Bibliografia

- Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S., Norizan, M. N., Osman, S., Sarifuddin, N., Desa, M. S. Z. M., Abdullah, U. H., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Abdullah, L. C. (2022). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 17).
- Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., & Leite, M. (2018). Natural fibre composites and their applications: A review. *Journal of Composites Science*, 2(4).
- Gomes, A. S. C. (2023). *Estudo da viabilidade do pêlo do cão Serra da Estrela para a produção de compósitos verdes* [Dissertação de Mestrado]. Universidade da Beira Interior.
- Wu, M., Shen, S., Yang, X., & Tang, R. (2017). Preparation and study on the structure of keratin/ PVA membrane containing wool fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 254(4).



Anexo H - Artigo científico “Study of the mechanical properties of green composites reinforced with sheep and dog wool from Serra da Estrela”



Article

Mechanical Behaviour of Green Epoxy Composites Reinforced with Sheep and Dog Wool from Serra Da Estrela

Cláudia Antunes ¹, Ana Paula Costa ¹, André Costa Vieira ² and Joana Costa Vieira ^{1,*}

¹ Fiber Materials and Environmental Technologies Research Unit (FibEnTech-UBI), University of Beira Interior, Rua Marquês D'Ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal; claudia.sb.antunes@ubi.pt (C.A.); anacosta@ubi.pt (A.P.C.)

² Center for Mechanical and Aerospace Science and Technologies (C-MAST-UBI), University of Beira Interior, Rua Marquês D'Ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal; andre.costa.vieira@ubi.pt

* Correspondence: joana.costa.vieira@ubi.pt

Abstract: Environmental awareness has led industries and consumers to replace products derived from oil resources with products derived from natural sources. In the case of the composite materials industry, the replacement of synthetic fibres with natural fibres has increased in recent years. To study the influence that different types of natural fibres and different textile manufacturing techniques have on the mechanical properties of composites, bio-based epoxy matrix composites reinforced with different natural animal fibres were produced, some reinforced with sheep's wool and others with dog wool, which were later subjected to bending and tensile tests. From the authors' knowledge, there are few studies of composites produced with animal fibres, and even fewer with dog hair. The textile structures used as reinforcement were created using crochet, knitting, and weaving techniques. Prior to the composites production, the fibres were characterized by X-ray Diffraction (X-RD), and the yarns produced from these fibres were subjected to tensile tests. The results obtained suggest that the number of yarns and the diameter of the needles used during the production of the reinforcement have a significant impact on the mechanical properties of the composites. The green epoxy resin composites reinforced with sheep's wool exhibit higher values of flexural strength, tensile strength, and Young's modulus than those reinforced with dog wool, with average increases of 36.97%, 45.16%, and 72.99%, respectively. It was also possible to verify that the composites reinforced with woven fabrics and crocheted fabrics exhibit the highest values of tensile strength, flexural strength, and Young's modulus. Additionally, the composites reinforced with woven fabrics exhibit the highest values of deformation at first failure/break and toughness.

Keywords: animal fibres; dog wool fibre; sheep wool fibre; green composites; mechanical properties



Citation: Antunes, C.; Costa, A.P.; Vieira, A.C.; Vieira, J.C. Mechanical Behaviour of Green Epoxy Composites Reinforced with Sheep and Dog Wool from Serra Da Estrela. *Polymers* **2024**, *16*, 3115. <https://doi.org/10.3390/polym16223115>

Academic Editor: Francesco Mollica

Received: 1 October 2024

Revised: 29 October 2024

Accepted: 5 November 2024

Published: 7 November 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Due to new environmental regulations and the depletion of oil resources, along with their high costs and adverse environmental impacts, the use of natural resources has increased, which has led industries and researchers to search for and develop more sustainable materials. An example of such materials is the polymer composites reinforced with natural fibres [1–3].

Natural fibres can be classified into three types [4,5]:

- Vegetal fibres, which are obtained from various parts of plants (e.g., Ramie, Flax, Hemp, cotton)
- Animal fibres, which are derived from animal hair and secretions (e.g., wool, feathers, silk)
- Mineral fibres, which come from inorganic natural resources (e.g., asbestos)

Natural fibres are low cost, highly available, and environmentally friendly, with relatively low density, high impact resistance, and high flexibility. Additionally, their

processing methods are simple, environmentally friendly, and less abrasive for equipment. They also have good mechanical properties compared to those of synthetic fibres [3,6–11].

However, natural fibres have some downsides. For instance, their mechanical and physical properties exhibit low consistency, and they have a high moisture absorption capacity (hygroscopicity). Additionally, they are flammable, susceptible to degradation by microorganisms and sunlight, and require lower processing temperatures [3,12].

Table 1 highlights the properties of some natural and synthetic fibres [4,13,14].

Table 1. Properties of natural and synthetic fibres (adapted from [4,13,14]).

Fibre	Diameter (μm)	Length (mm)	Density (g/cm^3)	Tensile Strength (MPa)	Specific Tensile Strength ($\text{MPa}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Young's Modulus (GPa)	Specific Young's Modulus ($\text{GPa}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Failure Strain (%)
Ramie	20	900–1200	1.5	400–938	270–620	44–128	29–85	2.0–3.8
Flax	12–16	5–900	1.5	345–1830	230–1220	27–80	18–53	1.2–3.2
Hemp	16–50	5–55	1.5	550–1110	370–740	58–70	39–47	1.6
Jute	17–20	1.5–120	1.3–1.5	393–800	300–610	10–55	7.1–39	1.5–1.8
Sisal	200–400	900	1.3–1.5	507–855	362–610	9.4–28	6.7–20	2.0–2.5
Alfa	-	350	1.4	188–308	134–220	18–25	13–18	1.5–2.4
Cotton	11–20	10–60	1.5–1.6	287–800	190–530	5.5–13	3.7–8.4	3.0–10
Coir	10–20	20–150	1.2	131–220	110–180	4–6	3.3–5	15–30
Silk	-	Continuous	1.3	100–1500	100–1500	5–25	4–20	15–60
Feather	-	10–30	0.9	100–203	112–226	3–10	3.3–11	6.9
Wool	16–40	38–152	1.3	50–315	38–242	2.3–5	1.8–3.8	13.2–35
E-Glass	-	Continuous	2.5	2000–3000	800–1400	70	29	0.5–3
S-Glass	-	-	2.5	4570	-	86	-	2.8
Aramid	-	-	1.4	3000–3150	-	63–70	-	2.5–3.7
Carbon	-	-	1.4	4000	-	23–240	-	1.4–1.8
Kevlar	-	-	1.44	3000	-	18–25	-	2.5–3.7

In the field of natural fibres, vegetal fibres have dominated the industry. However, the use of animal fibres has grown significantly in recent years. Besides the previously mentioned advantages, their use helps reduce solid waste that would otherwise end up in landfills [13].

Animal fibres are made up of keratin. Keratin is a fibrous structural protein rich in amino acids that can be found in various parts of animal's bodies (e.g., hair, fur, feathers, nails, beaks, and horns). Due to the large number of reactive functional groups present in its structure, keratin is an excellent candidate for reacting and binding to other materials [13,15].

Keratin has regenerative capacities and can be integrated into biomaterials. It is lightweight, highly available, low cost, ecologically friendly, and insoluble in water, organic solvents, and other common solvents. Additionally, it exhibits good hydrophobic behaviour and has the ability to dampen sound [13].

Wool is a natural fibre commonly found in sheep and other similar animals such as camels, goats, and rabbits, which is obtained through a process known as shearing. This fibre is eco-friendly, sustainable, resistant to bacteria attack, lightweight, recyclable, and has good flame resistance. These qualities make it a valuable raw material [16].

Another fibre with a lot of potential is chiengora or dog wool. Chiengora is spun from the undercoat of a double-coated dog breed, and is extremely soft, waterproof, and warmer than wool, yet less elastic [17]. This fibre is one of the strongest animal fibres, and exhibits high tenacity, good elongation, and good insulating properties [18].

On the other hand, the "green" epoxy resin can be obtained from several natural sources, such as lignin, gallic acid, cardanol, and vegetable oils [19]. Vegetable oils are the most suitable raw materials to synthesize this type of resin. Since they contain unsaturated double bonds, they become a better option for promoting epoxidation reactions [20]. Other

“green” resins, such as the biodegradable polyurethane derived from castor oil, have been used to produce composites with cotton fibres [21]. However, not all bio-based resins are biodegradable. The “green” epoxy used in this work is an example of a non-degradable bio-based resin. There is a trend and growing demand in the market for sustainable bio-based materials with an emphasis on their performance, reliability, and strength rather than their biodegradability [22].

Natural fibre-reinforced composites are widely used in the automotive industry. Many car manufacturers have started to use this type of composite in the manufacture of structural parts, because in addition to their strength and durability, they are lightweight, which leads to lower fuel consumption and reduced emissions.

In the end of its life cycle, the component/structure made by these biocomposites can close the carbon loop cycle, if it is disposed by incineration or composting, since the carbon retained during the growth of origin plants is returned to the atmosphere in its disposal.

These materials are also used in construction (e.g., door frames), in electronics, in the manufacture of sports equipment (e.g., tennis rackets, golf clubs, surfboards, bicycles), medical devices, and other industries like aerospace and energy. This diversity of applications highlights the versatility and enormous potential of these materials in reducing environmental impact [1,23,24].

The mechanical behaviour of composite materials is influenced by several factors, including the components selected for reinforcement (the quantity, length, shape, size, composition, orientation, and distribution of the fibres or powders) and the biopolymeric matrix and their interaction, as well as their volume fraction, the mechanical properties of the resin, and the manufacturing techniques used [3]. Because of that, this study was developed with the aim of analysing the influence that different types of natural animal fibres and different fabric production techniques (used as reinforcement) have on the mechanical properties of green composites. From the authors’ knowledge, there are few studies of composites produced with animal fibres, and even fewer with dog hair.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

2.1.1. Fibres

- Serra da Estrela sheep wool

The sheep’s wool yarn used in the production of the composite was obtained commercially from the Burel Factory, without any washing or treatment of the wool. In Table 2 are summarized the properties of sheep’s wool.

Table 2. Properties of sheep’s wool (adapted from [14,25]).

Property	Value
Density (g/cm ³)	1.07–1.3
Length (mm)	25–355
Diameter (µm)	15–40
Young’s modulus (GPa)	2–5
Stretching (%)	25–50

- Serra da Estrela dog wool

The dog wool used to produce the green composite was obtained from brushing in the spring, during a Serra da Estrela dog’s change from winter to summer fur. Then, the dog wool was carded and spun to obtain the yarn to produce the reinforcement. The properties of dog wool are indicated in Table 3.

Table 3. Properties of dog wool (adapted from [5]).

Property	Value
Density (g/cm ³)	1.31–1.34
Length (mm)	32
Diameter (μm)	30–60
Young's modulus (GPa)	2–3
Stretching (%)	43.7

2.1.2. Green Epoxy Resin

The SR GreenPoxy 56 resin, obtained from vegetable oils, was mixed with the SD Surf Clear hardener, both from Sicomin, to create the green composites. The properties of the green resin are summarized in Table 4.

Table 4. SR GreenPoxy 56 resin properties (adapted from [26]).

Property	Tensile	Flexural
Young's modulus (GPa)	3.3	3.4
Maximum strength (MPa)	49	-
Strength (MPa)	48	114
Strain at max. load (%)	1.6	4.2
Failure strain (%)	1.6	5.5

2.2. Methods

2.2.1. Fibre Characterization

- X-Ray Diffraction (X-RD)

The X-RD was performed on a Rigaku diffractometer, model DMAX 111/C using CuK α radiation ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) with a voltage of 40 kV and a current of 30 mA. The tests were conducted with a step size of 0.05° and at a rate of 1.2° per minute.

- Tensile tests of the fibre yarns

The tensile strength of the fibre yarns used was studied, by adapting the ASTM D3822-14 procedure [27]. A Twing-Albert universal mechanical testing machine was used with a 0.5 kN load cell, at a displacement rate of 10 mm/min. The distance between grips was 100 mm and five samples were used to perform the tests. Figure 1 shows the zoomed images of those yarns.

**Figure 1.** Yarns of the fibres used on the composites—(a) Sheep's wool yarn; (b) Dog wool yarn.

- Scanning Electron Microscope (SEM)

High resolution images of the crocheted fabrics used as reinforcement and the composites produced after the tensile tests were acquired by using a HITACHI model S-3400N scanning electron microscope (SEM).

2.2.2. Production of the Textile Structures

In the production of the crocheted fabrics, two different needles were used (needle 3 and needle 5) and the stitch used was the single crochet. The knitted fabrics were produced

using the knit stitch and only one needle (needle 5). The woven fabrics were created in a taffeta pattern. Figures 2 and 3 show some of the zoomed images of the fabrics produced using both yarns made of dog or sheep wool.

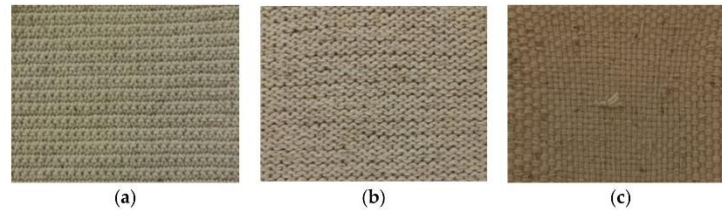


Figure 2. Fabrics produced using sheep's wool yarns—(a) Crocheted fabric; (b) Knitted fabric; (c) Woven fabric.

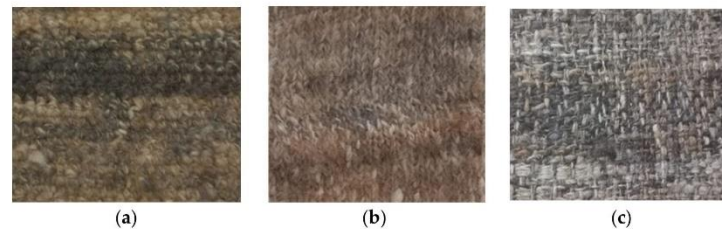


Figure 3. Fabrics produced using dog wool yarns—(a) Crocheted fabric; (b) Knitted fabric; (c) Woven fabric.

2.2.3. Production of the Composites

The composites were produced using the hand lay-up moulding process, followed by a confinement in a vacuum bag until its final curing. As can be seen in Figure 4, the first steps in the production of the composites were to wrap the aluminium plates with Teflon and to prepare the mould frame with the following dimensions: 29 cm × 17 cm × 0.1 cm.

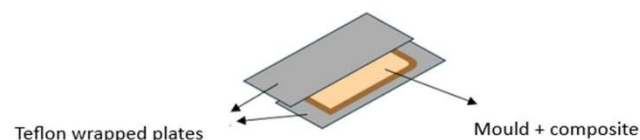


Figure 4. Composite production scheme.

After the mould had been properly cut, the resin was mixed with the hardener. Then, the fibres were placed in the mould and the resin was poured over the textile structure until it was completely soaked. Then, the composites were placed under vacuum for 4 h, and curing took place at room temperature after around 24 h. The composites were then post-cured in an oven at 40 °C for 24 h.

The samples produced comply with the following nomenclature: X_V_R_Z, where X refers to the origin of the hair and takes the letters D (dog) and C (sheep); V refers to the type of textile structure and takes the letters C (crochet), K (knitting), and W (weaving); R refers to the number of yarns used and takes the codes 1Y (1 Yarn), 2Y (2 Yarns), and 3Y (3 Yarns); finally, Z refers to the number/size of needle used and takes the codes N3 (needle no. 3) and N5 (needle no. 5).

The different composites produced, from which the specimens needed to carry out the mechanical tests were subsequently cut, are shown in Figures 5 and 6.

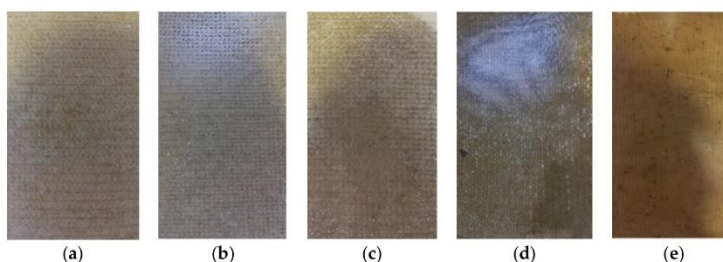


Figure 5. Sheep wool-reinforced composites produced—(a) S_C_2Y_N3; (b) S_C_2Y_N5; (c) S_C_3Y_N5; (d) S_K_3Y_N5; (e) S_W_3Y.

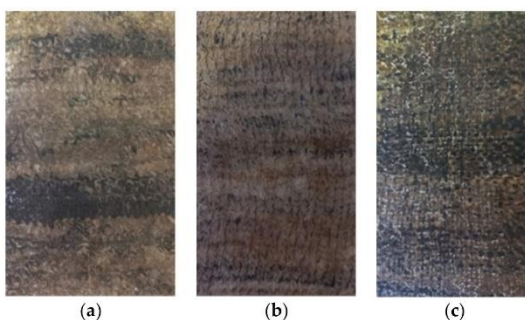


Figure 6. Dog wool-reinforced composites produced—(a) D_C_1Y_N5; (b) D_K_1Y_N5; (c) D_W_1Y.

The weight fraction of fibres in the composite's plates can be found in Table 5. To ensure equal mass between the different fibres used, and therefore guarantee a reliable comparison of the composite's properties, it was necessary to adjust the number of yarns used in the production of the reinforcement. Therefore, three yarns were used in the structure made from sheep wool fibres, while only one yarn was used during the production of the structure made with dog wool fibres.

Table 5. Fibre fraction of the composites produced.

Sample ID	Fibre Weight (g)	Composite Weight (g)	Fibre Fraction (%)
S_C_2Y_N3	42.48	121.68	34.91
S_C_2Y_N5	41.48	142.20	29.17
S_C_3Y_N5	61.20	172.23	35.53
D_C_1Y_N5	62.96	165.89	37.95
S_K_3Y_N5	33.16	157.12	21.10
D_K_1Y_N5	37.04	140.74	26.31
S_W_3Y	24.12	102.47	23.54
D_W_1Y	35.69	110.68	32.25

2.2.4. Mechanical Tests of the Composites

Flexural and tensile tests were carried out to assess the mechanical behaviour of the composites produced. The specimens used in the different tests were cut on a CNC water jet machine. For each type of mechanical test, 5 composite specimens were used.

- Flexural tests

The three-point bending tests were carried out according to the ISO 178:2019 [28], on a Shimadzu universal mechanical test machine, model Autograph AGS-X (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) with a 10 kN load cell to determine the flexural strength of the specimens. The tests were conducted at a displacement rate of 1.5 mm/min. The span length used in the different tests was carried out according to the standard mentioned above, and the distance between the supports used during the flexural tests is described in Table 6.

Table 6. Distance between supports during the flexural tests.

Sample ID	Distance Between Supports (mm)
S_C_2Y_N3	49
S_C_2Y_N5	64
S_C_3Y_N5	52
D_C_1Y_N5	55
S_K_3Y_N5	58
D_K_1Y_N5	66
S_W_3Y	32
D_W_1Y	40

- Tensile tests

The tensile tests were carried out in accordance with the ISO 527-1 [29] and ISO 527-4 [30] using a Shimadzu universal mechanical test machine (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) with a 50 kN load cell, at a displacement rate of 2 mm/min. The distance between grips was 100 mm. Strain measurements of tensile tests were obtained using Digital Image Correlation (GOM system), as the test setup presented in Figure 7.



Figure 7. Tensile test and Digital Image Correlation setup.

3. Results

3.1. Fibre Characterization

3.1.1. X-Ray Diffraction (X-RD)

The X-RD patterns obtained for both fibres are shown in Figure 8.

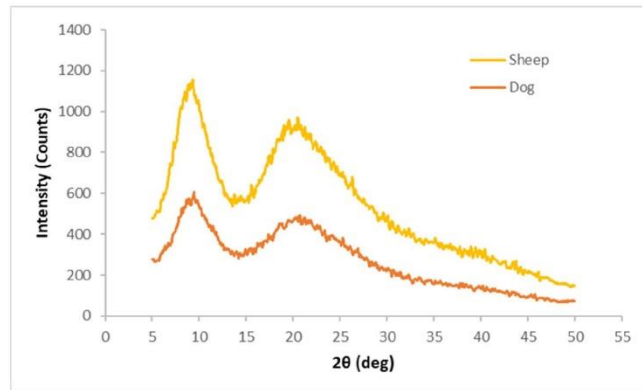
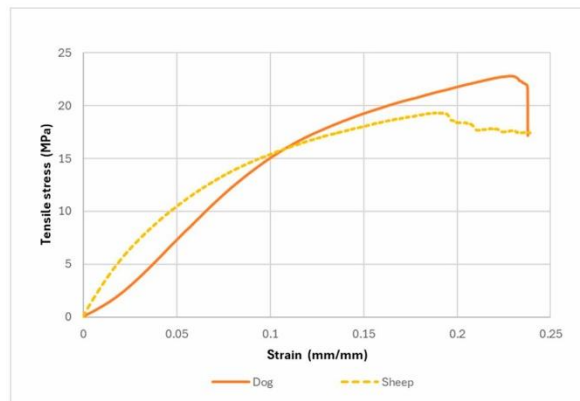


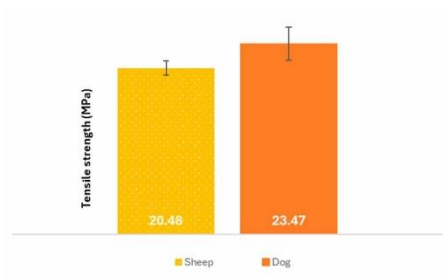
Figure 8. X-RD patterns for Serra da Estrela dog and sheep wool fibres.

3.1.2. Tensile Tests of the Fibres Yarns

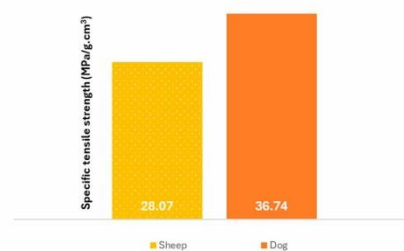
The graphs of the average tensile stress/strain curves, the tensile strength results, the specific tensile strength results, the tensile Young’s modulus values, the failure strain values, the evolute of tensile stress/strain curves, and the toughness of the yarns used to produce the reinforcements are shown in Figure 9.



(a)



(b)



(c)

Figure 9. Cont.

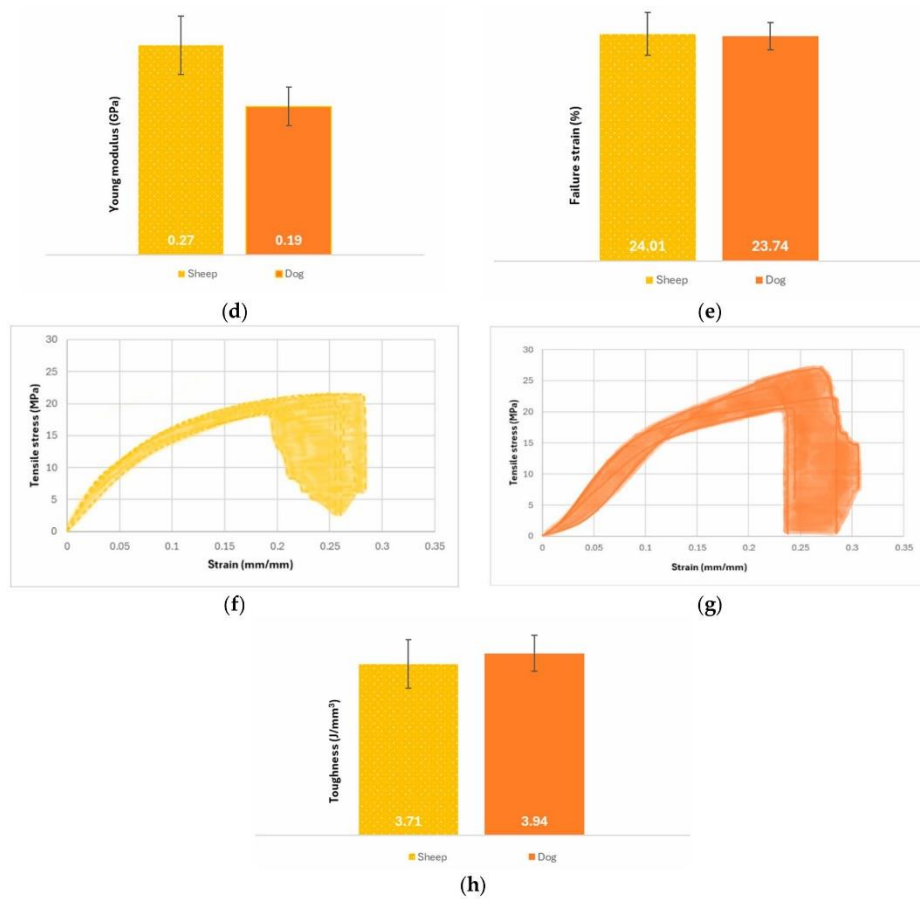


Figure 9. Results of the tensile tests of the yarns—(a) Average tensile stress/strain graph; (b) Tensile strength results (MPa); (c) Specific tensile strength results ($MPa/g \cdot cm^3$); (d) Tensile Young's modulus (GPa); (e) Failure strain results (%); (f) Evolute of tensile stress/strain curves for sheep wool yarn; (g) Evolute of tensile stress/strain curves for dog wool yarn; (h) Toughness or deformation energy accumulated until the first failure (J/mm^3).

3.1.3. Scanning Electron Microscope (SEM) of the Crocheted Fabrics

The high-resolution images obtained of the crocheted fabrics used as reinforcement are shown in Figure 10. Also, in this figure are indicated the diameters of the stitches produced by the different needles.

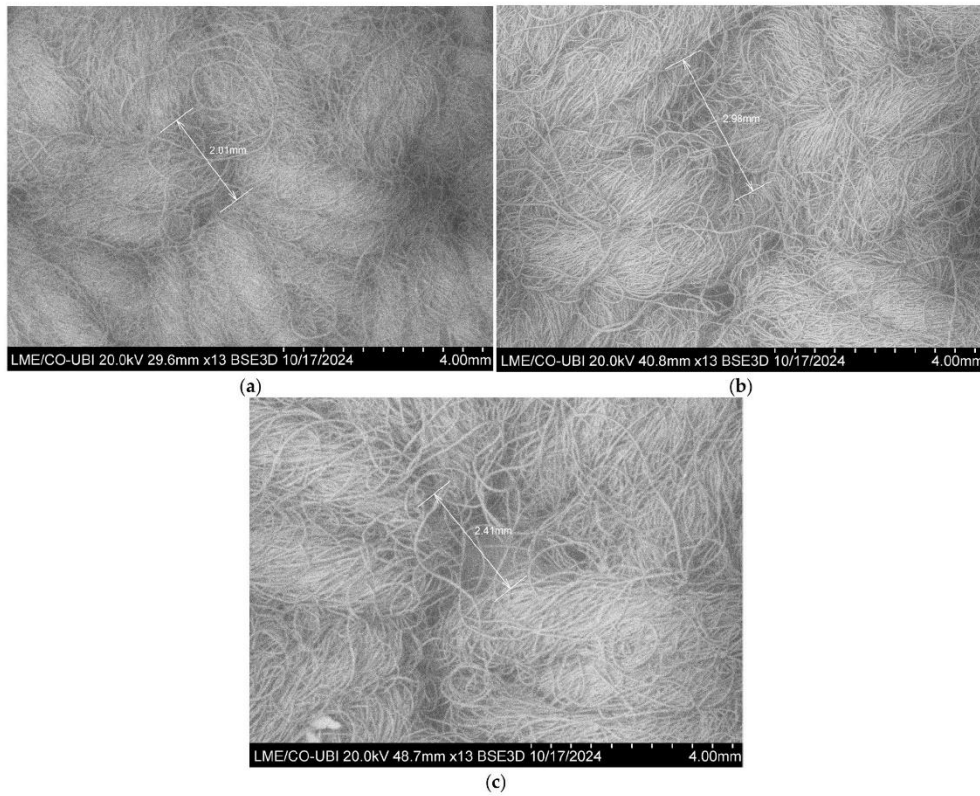


Figure 10. SEM images of the crocheted fabrics used as reinforcement of the composites—(a) 2Y_N3; (b) 2Y_N5; (c) 3Y_N5.

3.2. Mechanical Tests of the Composites

3.2.1. Flexural Tests

The flexural strength results, and the flexural Young’s modulus values for the composites reinforced with fabrics crocheted from sheep’s wool are shown in Figure 11.

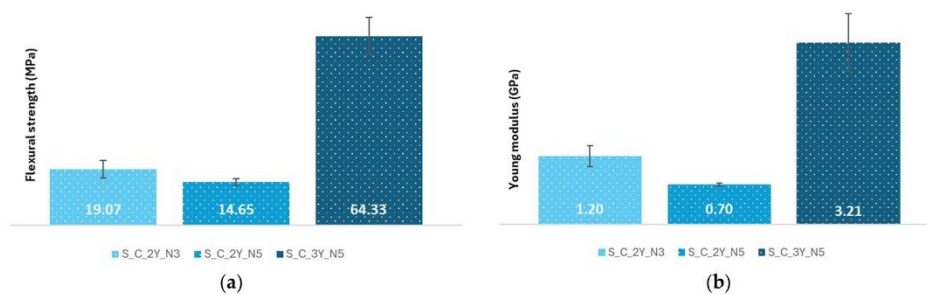


Figure 11. Results of the flexural tests of the composites reinforced with crocheted fabrics made from sheep wool—(a) Flexural strength results (MPa); (b) Young’s modulus results (GPa).

The flexural strength results, the specific tensile strength results, and the flexural Young's modulus values for the composites reinforced with different types of textile structures are shown in Figure 12.

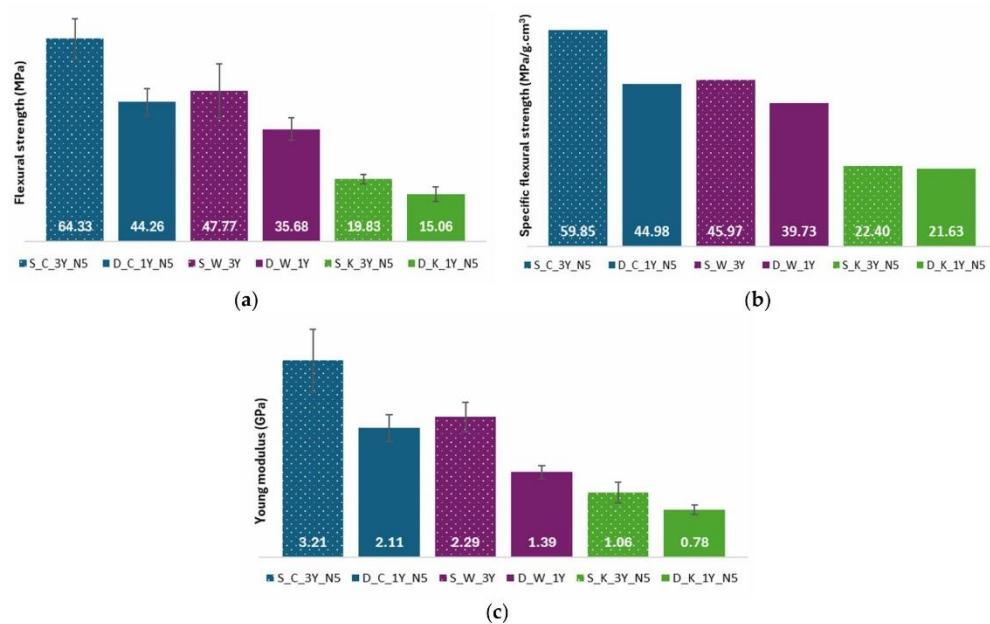


Figure 12. Results of the flexural tests of the composites reinforced with different types of textile structures—(a) Flexural strength results (MPa); (b) Specific flexural strength results (MPa/g·cm³); (c) Young's modulus results (GPa).

3.2.2. Tensile Tests

The results for tensile strength, the values of tensile Young's modulus, the first failure/failure strain values, and the toughness of the composites reinforced with fabrics crocheted from sheep's wool are shown in Figure 13.

The tensile strength results, the results for specific tensile strength, the values of tensile Young's modulus, the first failure/failure strain results, and the toughness of the composites reinforced with different types of textile structures are illustrated in Figure 14.

The rule of mixtures enables us to calculate the limit values for the global modulus of elasticity of the composite. Considering the isostress and isostrain conditions of a composite, where the load is parallel or transverse to the fibres, respectively, the limit values for the elastic modulus of the composite are obtained by Equations (1) and (2), respectively.

$$E_{C,T} = \frac{E_m \cdot E_f}{V_m \cdot E_f + V_f \cdot E_m} \quad (1)$$

where $E_{C,T}$ is the elastic modulus, obtained considering the isostress condition, E_m and E_f are the elastic modulus of the matrix and fibre, respectively, in N/mm², and V_m and V_f are the volume fractions of the matrix and fibre, respectively.

$$E_{C,L} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \quad (2)$$

where $E_{C,L}$ is the elastic modulus, obtained considering the isostrain condition, E_m and E_f are the elastic modulus of the matrix and fibre, respectively, in N/mm^2 , and V_m and V_f are the volume fractions of the matrix and fibre, respectively. The values of composite volume fractions of matrix and fibres, and stiffness of matrix and fibres used in the rule of mixtures, obtained from measuring the reinforcement and the final laminate weights, are presented in Tables 7 and 8 show the elastic modulus obtained considering the isostress and the isostrain conditions, as well as the experimentally obtained values.

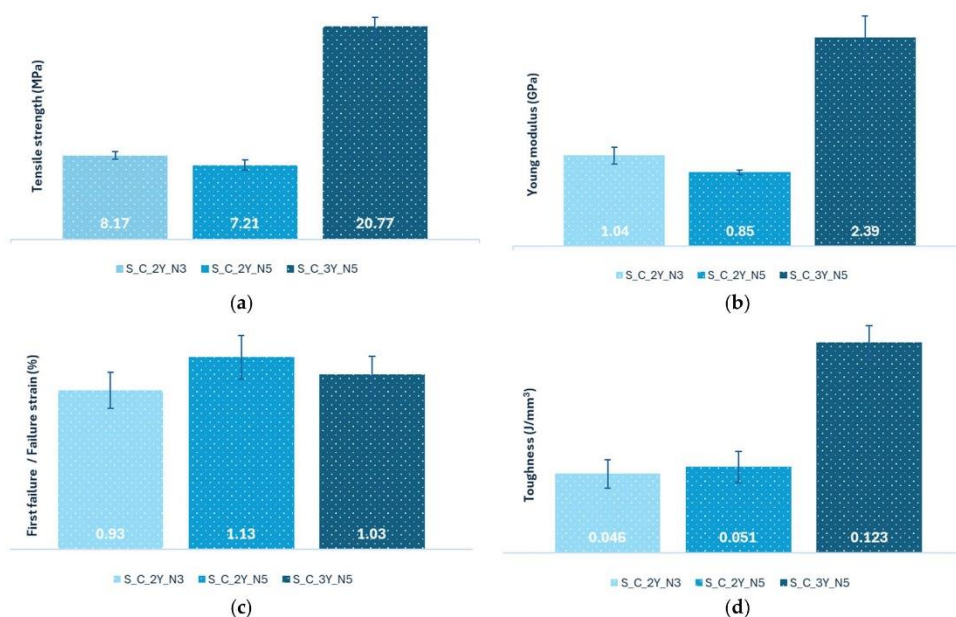


Figure 13. Results of the tensile tests of the composites reinforced with crocheted fabrics made from sheep's wool—(a) Tensile strength results (MPa); (b) Young's modulus results (GPa); (c) First failure/Failure strain results (%); (d) Toughness results (J/mm^3).

Table 7. Composite volume fractions of matrix and fibres, and stiffness of matrix and fibres used in the rule of mixtures.

Sample ID	V_m	V_f	E_m (GPa)	E_f (GPa)
S_C_2Y_N3	0.3427	0.6573	3.3	0.27
S_C_2Y_N5	0.2859	0.7141	3.3	0.27
S_C_3Y_N5	0.3489	0.6511	3.3	0.27
D_C_1Y_N5	0.3472	0.6528	3.3	0.19
S_K_3Y_N5	0.2064	0.7936	3.3	0.27
D_K_1Y_N5	0.2370	0.7630	3.3	0.19
S_W_3Y	0.2304	0.7696	3.3	0.27
D_W_1Y	0.2927	0.7073	3.3	0.19

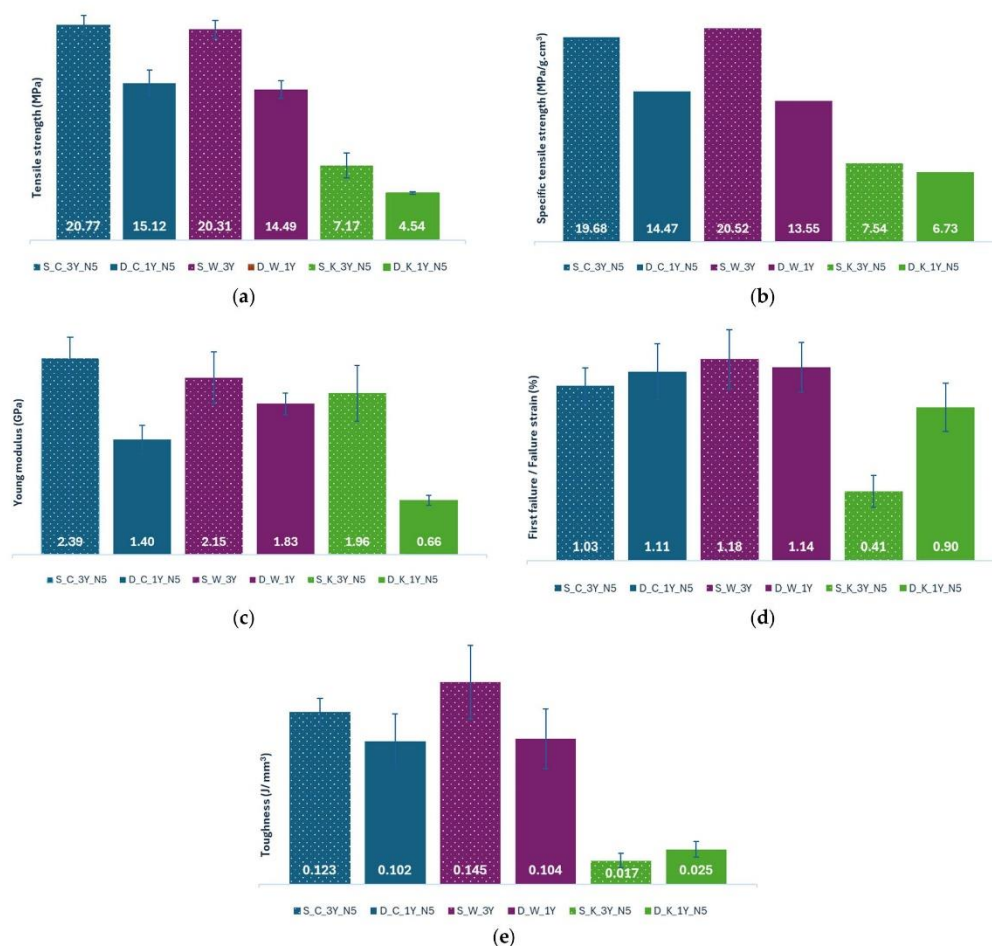


Figure 14. Results of the tensile tests of the composites reinforced with crocheted fabrics made from sheep's wool—(a) Tensile strength results (MPa); (b) Specific tensile strength results (MPa/g·cm³); (c) Young's modulus results (GPa); (d) First failure/Failure strain results (%); (e) Toughness results (J/mm³).

Table 8. Young's modulus results obtained experimentally and estimated considering the isostress and isostrain conditions.

Sample ID	Isostress Condition (GPa)	Isostrain Condition (GPa)	Experimentally Obtained (GPa)
S_C_2Y_N3	0.68	22.62	1.04
S_C_2Y_N5	0.78	24.34	0.85
S_C_3Y_N5	0.67	22.43	2.39
D_C_1Y_N5	0.49	22.20	1.40
S_K_3Y_N5	1.00	26.75	1.96
D_K_1Y_N5	0.68	25.63	0.68
S_W_3Y	0.92	26.02	2.15
D_W_1Y	0.57	23.90	1.83

3.3. Scanning Electron Microscope (SEM) of the Composites

The high-resolution images of the composites produced are shown in Figures 15 and 16.

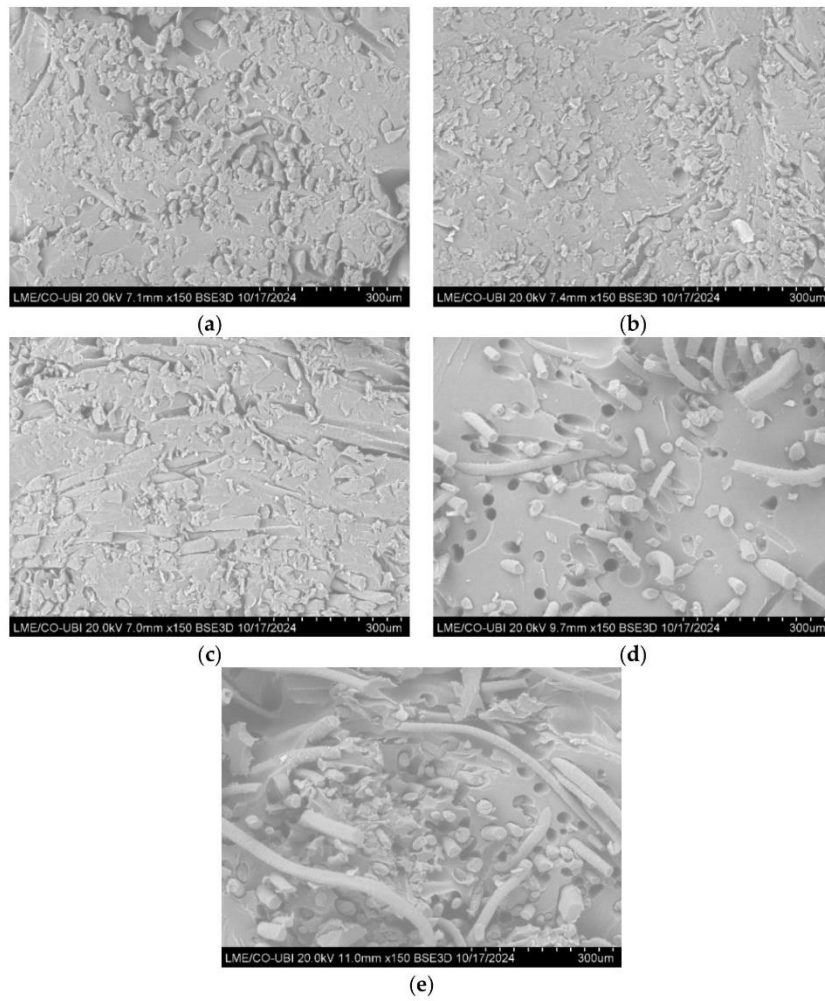


Figure 15. SEM images of the composites reinforced with sheep wool—(a) C_2Y_N3; (b) C_2Y_N5; (c) C_3Y_N5; (d) K_3Y_N5; (e) W_3Y.

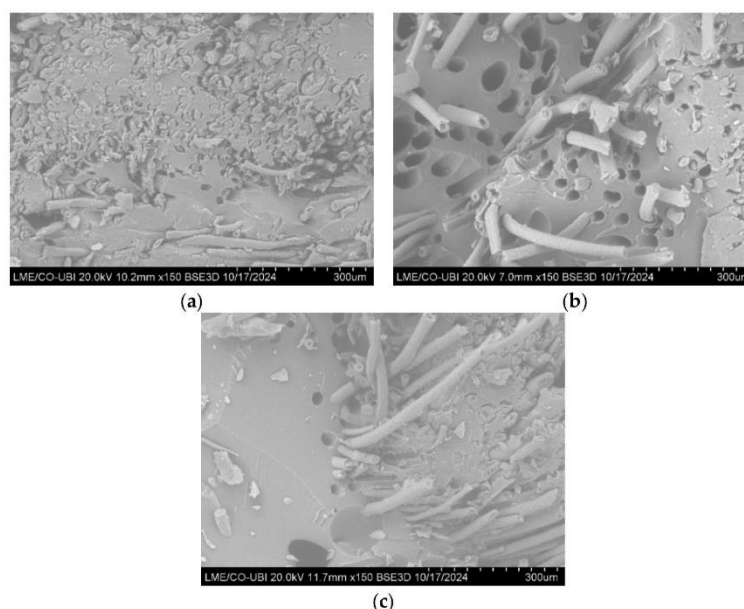


Figure 16. SEM images of the composites reinforced with dog wool—(a) C_1Y_N5; (b) K_1Y_N5; (c) W_1Y.

4. Discussion

4.1. Fibre Characterization

4.1.1. X-Ray Diffraction (X-RD)

By analysing the X-RD patterns obtained for the sheep's wool and dog wool (Figure 8), one can observe, in both fibres, two strong diffraction peaks at the 2θ angles at around 9° and around 20° , corresponding to the α -helix and β -sheet structures of keratin, respectively. One can also see that the diffraction peak at the 2θ angle around 20° has a broader shape, which might be caused by the overlap of the β -sheet structures [21,31,32].

When one compares both fibres, one can see that the dog wool fibre has a lower diffraction intensity in both peaks, which suggests that dog wool is less crystalline than sheep's wool [32]. Sheep wool fibre has a degree of crystallinity of 58.82% and dog wool fibre has 56.60%.

4.1.2. Tensile Tests of the Yarns

From the graph of Figure 9a, one can see that both yarns have similar maximum tensile stress values, with overlapping evolutes (see Figure 9f,g). Also, it was observed, during the tensile tests, that after reaching the peak tensile stress, the dog wool breaks immediately (sudden drop in tensile stress after reaching the maximum value). Meanwhile, the sheep's wool yarn does not break after reaching the maximum tension. In fact, one cannot affirm, from analysing the graph, that the yarn breaks completely. What one sees is a gradual decrease in the tensile stress value, which suggests that the fibres within the yarn are breaking one by one, as they slide between them.

Analysing the results obtained for the tensile strength of the yarns shown in Figure 9b, it is possible to observe that the yarn made from dog wool has a higher average value than the yarn produced from sheep's wool (23.47 MPa and 20.48 MPa, respectively).

Regarding the specific tensile strength (Figure 9c), dog wool yarn has a value of 36.74 MPa/g·cm³ and sheep's wool yarn has a value of 28.07 MPa/g·cm³. According to

the data shown in Figure 9b,c, one can see that dog wool yarn is more resistant than sheep's wool yarn.

According to Figure 9d, the sheep's wool yarn has a higher Young's modulus (0.27 GPa) than dog wool yarn (0.19 GPa). These results were expected, although the values obtained are significantly lower than anticipated (Tables 2 and 3). Based on these results, one can conclude that sheep's wool is stiffer than dog wool.

From Figure 9e, one can observe that the sheep's wool yarn has a higher value of the strain at failure (24.01%) than dog wool yarn (23.74%). Based on these values, one can say that sheep wool fibres are able to deform more and are able to sustain a greater load before breaking than dog wool fibres.

From Figure 9h, one can observe that the deformation energy accumulated until the first failure, or the first drop in stress, was higher for the dog wool yarn with a value of 3.94 J/mm^3 . These results suggest that dog wool fibres are more tenacious and can absorb more energy before fracturing than sheep wool fibres.

4.2. Mechanical Tests of the Composites

Figures 11 and 13 demonstrate the influence that the number of yarns and the diameter of the needle used have on the mechanical properties of the composites, and Figures 12 and 14 demonstrate the impact that the type of fibre and the type of fabric structure used as reinforcement have in the tensile and flexural properties of the composites.

4.2.1. Flexural Tests

According to Figure 11a, the S_C_3Y_N5 composite has the highest flexural strength value (64.33 MPa) and the S_C_2Y_N5, with a value of 14.65 MPa, has the lowest one. Comparing the S_C_2Y_N5 and S_C_3Y_N5 composites, it is possible to observe that increasing the number of yarns used in the production of the fabrics leads to a significant increase in the flexural strength, since the S_C_3Y_N5 composite has a significantly higher average value than the S_C_2Y_N5 composite (64.33 MPa and 14.65 MPa, respectively).

Regarding the influence of the needle diameter on this mechanical property (Figure 11a), one can see that the S_C_2Y_N3 composite exhibits a higher flexural strength than that of the S_C_2Y_N5 composite (19.07 MPa and 14.65 MPa, respectively), which would be expected, since needle 3 has a smaller diameter than needle 5. A needle with a smaller diameter makes a more closed microstructure of the reinforcement, and tighter stitches, so the meshes produced are less flexible and less elastic, which increases the overall strength and stiffness of the composite (Figures 10a,b and 17).

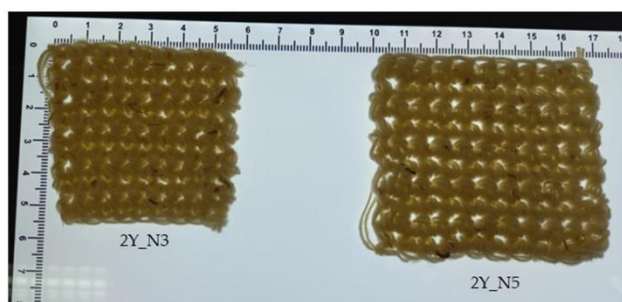


Figure 17. Crocheted fabrics produced using the yarns made of sheep's wool and different needles.

Figure 17 shows two crocheted fabrics made from sheep's wool with the exact same number of stitches present (10×10). From this figure, one can see that the stitches produced by needle 3 are tighter, since the structure obtained is more closed and smaller in size. By

analysing Figure 10a,b, one can again confirm that claim, since needle 3 produced stitches with a diameter of 2.01 mm and needle 5 produced stitches with a diameter of 2.98 mm.

As for the Young's modulus (Figure 11b), it can be noticed that the composite with the highest value is the S_C_3Y_N5 composite (3.21 GPa), and the composite S_C_2Y_N5 has the lowest value (0.7 GPa). From this figure, one can conclude that increasing the number of yarns used leads to a significant increase in the stiffness of the composite material. Additionally, reducing the needle diameter, while keeping the number of the yarns used the same, positively affects the toughness of the composites.

The highest average value for the flexural strength and Young's modulus obtained for the composite S_C_3Y_N5 can be explained due to the use of a larger number of yarns, even though needle 5 was used. This suggests that the higher number of yarns used in the reinforcement compensates for the flexibility caused by the use of needles having a bigger diameter. The S_C_2Y_N5 composite has the lowest value due the fact that needle 5 and a smaller number of yarns were used to produce the reinforcement (Figure 11a,b).

From Figure 12a, one can see that the composite S_C_3Y_N5 exhibits the highest flexural strength average value (64.33 MPa) and the D_K_1Y_N5 composite has the lowest value (15.06 MPa). Analyzing the results of the flexural strength in this figure, one can see that the composites reinforced with sheep's wool have higher flexural strength average values than those reinforced with dog wool (comparison between the same fabric production technique), which was expected due the higher number of yarns used. And comparing the different fabric production techniques, the composites reinforced with crocheted structures have the highest flexural strength values, while the ones reinforced with knitted fabrics have the lowest. Weaving, due to the orientation of the yarns, is a structure with more dimensional stability than crochet and knitting [33], so it was expected that of all the composites, those reinforced with weaving fabrics would be the ones with the highest bending strength, but this is not the case. This can be explained due to the high fibre fraction of the composites reinforced with crocheted meshes (Table 5). The low flexural strength of the composites reinforced with knitted fabrics can be justified, considering the high flexibility of these fabrics and the low fibre fraction of the composites reinforced with these fabrics (Table 5).

Comparing Figure 12a,b, one can see that there are no significant differences between them. The S_C_3Y_N5 composite has the highest specific flexural strength (59.85 MPa/g·cm³) and the D_K_1Y_N5 composite has the lowest average value (21.63 MPa/g·cm³), although it is very similar to the value for the S_K_3Y_N5 composite (22.40 MPa/g·cm³).

Comparing the types of fibres used to produce the reinforcement, composites reinforced with sheep wool fibres have higher specific flexural strength values than those reinforced with dog wool fibres. As for the influence of the type of fabric used as reinforcement material on this mechanical property, one can see that the composites reinforced with crocheted fabrics have the highest specific flexural strength values, followed by those reinforced with fabrics made from weaving, and the composites reinforced with knitted fabrics have the lowest specific flexural strength values (Figure 12b).

According to Figure 12c, the S_C_3Y_N5 composite has the highest Young's modulus (3.21 GPa) and the D_K_1Y_N5 composite has the lowest (0.78 GPa). Also, one can see that the composites reinforced with sheep's wool have higher Young's modulus values than those reinforced with dog wool (comparison made between composites reinforced with the same type of textile structure). This can be explained due to the higher number of yarns used in the production of the fabrics reinforced with sheep's wool and to the fact that sheep's wool is stiffer than dog wool (Figure 9d and Tables 2 and 3). Comparing the different techniques used in the production of the reinforcement, composites reinforced with crocheted fabrics have the highest Young's modulus values and those reinforced with knitted structures have the lowest values. These results can be attributed to the higher fibre content present in the composites reinforced with the crocheted fabrics and to the high flexibility of the knitted meshes, combined with the lower fibre percentage in the composites reinforced with the knitted meshes.

The highest value for the tensile strength, specific tensile strength, and Young's modulus obtained for the S_C_3Y_N5 composite can be explained by the use of a greater number of yarns and to the higher fibre content (Table 5). The composite D_K_1Y_N5 has the lowest values due to the high flexibility of the knitted fabrics and to the lower number of yarns used (Figure 12a–c).

Comparing the results obtained for the flexural strength and Young's modulus (Figure 12a,c) for the composites reinforced with dog wool with the results obtained by Gomes et al. [19] for the composites made with green epoxy matrix reinforced with dog wool without any treatment, one can see that the transformation of the fibres in yarns, and subsequently in fabrics, improved both mechanical properties, with the exception of the composite D_K_1Y_N5. This improvement was expected, because the random distribution of the fibres in the composites produced by Gomes et al. does not allow for the load applied to the composites to be distributed in the most efficient way, which results in a reduction in the mechanical properties of the composite materials.

4.2.2. Tensile Tests

Analyzing Figure 13a,b, one can see that the composites maintain the same behaviour as in the flexural tests. According to Figure 13a, the composite S_C_3Y_N5 exhibits the highest tensile strength value (20.77 MPa), and the S_C_2Y_N5 composite exhibits the lowest one, with a value of 7.21 MPa. Analyzing the composites S_C_2Y_N5 and S_C_3Y_N5, it is possible to observe that the tensile strength increases significantly with the increase in number of yarns used to produce the reinforcement. As to the influence of the needle diameter on this mechanical property, one can see that the S_C_2Y_N3 composite exhibits a higher tensile strength compared to the S_C_2Y_N5 composite (8.17 MPa and 7.21 MPa, respectively). This outcome was expected, given that needle 3 has a smaller diameter than needle 5, and a needle with a smaller diameter creates tighter stitches, so the meshes produced are less flexible and less elastic (Figures 10a,b and 17), which consequently increases the resistance of the composite. However, this composite presented a more fragile behaviour, being less tough (0.046 J/mm³ and 0.051 J/mm³, respectively) (Figure 13d).

Regarding the Young's modulus results (Figure 13b), one can see that the composite with the highest value is the S_C_3Y_N5 composite, with a value of 2.39 GPa, and the composite S_C_2Y_N5 has the lowest value (0.85 GPa). This figure suggests that increasing the number of yarns used in the reinforcement and decreasing the diameter of the needle used, while maintaining the number of yarns used constant, increases the stiffness of the composite material.

The S_C_2Y_N5 composite has the lowest tensile strength and Young's modulus values (Figure 13a,b) because, in addition to the lowest number of yarns used, the needle used was needle 5 (the one with the largest diameter), so the meshes produced are more flexible, and therefore the composite produced is less resistant and less stiff. On the other hand, the S_C_3Y_N5 composite has the highest tensile modulus and tensile strength of the three composites because, during the production of the reinforcement, a greater number of yarns was used.

Analyzing Figure 13c, one can observe that the composite S_C_2Y_N5 has the highest strain at first failure/at break, with a value of 1.13%, while the S_C_2Y_N3 has the lowest value (0.93%). The fact that the S_C_2Y_N5 composite is the one with the highest deformation value at first failure/at break can be explained due to the fact that it uses less yarns in the reinforcement and uses a needle with a larger diameter, which makes the fabric less resistant and more flexible. In addition, this composite has the lowest Young's modulus of the three composites analyzed (Figure 13b); in other words, it is the least stiff of the three, which might indicate that it has some ductility and therefore is able to withstand a larger amount of deformation before reaching its breaking point.

Comparing the composites S_C_3Y_N5 and S_C_2Y_N5, one can see that the first one has a lower first failure/break strain value (1.03% and 1.13%, respectively). These values can be explained by the fact that the S_C_3Y_N5 composite was produced having a

higher number of yarns, which increases the composite's stiffness and strength, but reduces the strain at failure. A higher stiffness might indicate that the material is less ductile, and therefore it might even crack abruptly, which translates into a lower percentage of deformation. Analyzing the composites S_C_2Y_N3 and S_C_2Y_N5, one can observe that the S_C_2Y_N5 composite has a higher value for the strain at break/first failure (1.13%) in comparison with the composite S_C_2Y_N3 (0.93%). The higher value of the S_C_2Y_N5 composite can be explained by the use of a needle with a larger diameter in the production of the reinforcement, which produces a more flexible fabric that leads to the production of less stiff composites. Hence, the material will deform more before breaking (Figure 13c).

According to Figure 13d, one can observe that the composite S_C_3Y_N5 exhibits the highest toughness, with a value of 0.0123 J/mm^3 , and the composite S_C_2Y_N3 exhibits the lowest one (0.0046 J/mm^3). Comparing the composites S_C_3Y_N5 and S_C_2Y_N5, it is possible to see that the first one has a higher toughness value (0.0123 J/mm^3 and 0.0051 J/mm^3 , respectively); in other words, the composite S_C_3Y_N5 can absorb more energy before rupturing than the S_C_2Y_N5 composite. These values can be explained by the use of a greater number of yarns in the production of the reinforcement.

Regarding the composites S_C_2Y_N3 and S_C_2Y_N5, one can verify that the first one has a lower toughness (0.0046 J/mm^3 and 0.0051 J/mm^3 , respectively). Given the fact that between these two composites, the S_C_2Y_N3 is the one with the higher tensile strength and rigidity, these results do not align with what was expected. The production of the S_C_2Y_N3 composite used the needle with the smaller diameter; therefore, the meshes produced are less flexible and less elastic, and the stitches made by this needle are tighter than those produced by needle 5, so it was anticipated that the composite S_C_2Y_N3 would be capable of absorbing a larger amount of energy up to its breaking point than the composite S_C_2Y_N5 (Figure 13d).

Analyzing the tensile strength results in Figure 14a, one can observe that the S_C_3Y_N5 composite has the highest tensile strength value of 20.77 MPa, while the composite D_K_1Y_N5 has the lowest value (4.54 MPa). Also, the S_W_3Y composite has a value (20.31 MPa) very similar to the S_C_3Y_N5 composite. The higher tensile strength value of the S_C_3Y_N5 composite can be explained by the number of yarns used and by the higher fibre content present (Table 5), while the lower value of the D_K_1Y_N5 composite can be explained by the high flexibility of the reinforcement and by the lower number of yarns used.

From the analysis of Figure 14a, it is evident that the composites reinforced with sheep's wool are more resistant than the ones reinforced with dog wool, which was expected due to the higher number of yarns used. Comparing the different reinforcement manufacturing techniques, one can see that the composites reinforced with crocheted structures have the highest tensile strength values, followed by those reinforced with woven fabrics, while the ones reinforced with knitted meshes have the lowest values. Knitted and crochet fabrics are more flexible and elastic than woven fabrics [16,33], so theoretically, composites reinforced with these fabrics should have lower strength and stiffness values than the composites reinforced with the fabrics made by weaving, but this is not the case. The highest strength of the composites reinforced with crocheted fabrics can be explained by the high quantity of fibres present (Table 5), even though these structures have more flexibility and less dimensional stability than woven fabrics. On the other hand, the low strength of the composites reinforced with the knitted fabrics can be explained by the high elasticity of the reinforcement (more elastic than crocheted fabric [33]) and by the low amount of fibres present in the composite materials (Table 5).

According to Figure 14b, one can see that the composite with the highest specific tensile strength value is S_W_3Y, with a value of $20.52 \text{ MPa/g}\cdot\text{cm}^3$, followed by S_C_3Y_N5 with a value of $19.68 \text{ MPa/g}\cdot\text{cm}^3$. And the composite with the lowest specific tensile strength value is D_K_1Y_N5 ($6.73 \text{ MPa/g}\cdot\text{cm}^3$), with a value very similar to the S_K_3Y_N5 composite ($7.54 \text{ MPa/g}\cdot\text{cm}^3$). The fact that the composite S_W_3Y has the highest specific tensile strength can be explained by the higher number of yarns used and the more dimensional

stable fabrics used as reinforcement. In contrast, the lower value of the D_K_1Y_N5 composite can be attributed to the combination of the high flexibility of the reinforcement, the low fibre content (Table 5), and the lower number of yarns used in the manufacture of the reinforcement.

When comparing the fibres used in the reinforcement, the composites reinforced with sheep wool fibres exhibit a higher specific tensile strength value than those reinforced with dog wool fibres. These results were expected, considering the higher number of yarns used in the composites reinforced with sheep's wool. Regarding the impact of the textile structure used as reinforcement on the composite mechanical properties (Figure 14b), one can observe that composites reinforced with crocheted and woven fabrics have the highest specific tensile strength values and those reinforced with knitting fabrics have the lowest values. These results can be explained by the architecture of the reinforcement and by the amount of fibres present.

Analyzing the Young's modulus results from Figure 14c, one can notice that the S_C_3Y_N5 composite has the highest value of 2.39 GPa, and the D_K_1Y_N5 has the lowest (0.66 GPa). The fact that the S_C_3Y_N5 composite has the highest value can be explained by the higher number of yarns used, the higher stiffness of the fibres (Figure 9d and Tables 2 and 3), and the high fibre content present (Table 5). The lowest stiffness of the D_K_1Y_N5 composite can be attributed to the lower stiffness of the fibres, the greater elasticity of the reinforcement, and the lower number of yarns used during its production. Comparing the two types of fibres used in the reinforcement, one can observe that the composites reinforced with sheep wool fibres have a higher Young's modulus than those reinforced with dog wool fibres. These higher values could be due to the fact that the composites produced with sheep's wool are reinforced with a bigger number of yarns and to the fact that sheep's wool is stiffer than dog wool.

Regarding the influence of the architecture of the reinforcement on the modulus of elasticity (Figure 14c), one can see that in the composites where dog wool was used, the ones reinforced with woven fabrics have the highest Young's modulus. This can be explained by the fact that weaving produces fabrics' dimensional stability by the considerable amount of fibres present (Table 5). In the composites where sheep's wool was used, those reinforced with crocheted fabrics are the stiffest composites. This result can be attributed to the high fibre fractions present in the composites reinforced with crocheted meshes, which compensates for the higher stability of the woven fabrics. For both types of fibres, the composites reinforced with the knitted fabrics are less rigid. This can be attributed to the fact that knitting produces more elastic fabrics, which consequently reduces the stiffness of the composite material, and due to the lower fibre content present in these composites.

Comparing the results obtained for the tensile strength and Young's modulus (Figure 14a,c) for the composites reinforced with dog wool with the results obtained by Gomes et al. [19] for the composites made with green epoxy matrix reinforced with dog wool without any treatment, it is possible to observe that the transformation of the fibres in yarns, and subsequently in fabrics, improved both mechanical properties, with the exception of the composite D_K_1Y_N5. This improvement was expected, because the random distribution of the fibres in the composites produced by Gomes et al. does not allow for the load applied to the composites to be distributed in the most efficient way, which results in a reduction in the mechanical properties of the composite materials.

Analysing Figure 14d, one can observe that the composites S_C_3Y_N5, D_C_1Y_N5, S_W_3Y, and D_W_1Y have very close values and S_W_3Y has the highest strain at first failure/break value (1.18%), while the composite S_K_3Y_N5 has the lowest value (0.41%). The S_K_3Y_N5 composite has the lowest quantity of fibres (Table 5) of all the composites and is also reinforced with a knitted fabric, the fabric with the highest flexibility of all the fabrics studied. For those reasons, this composite will have a low strength and stiffness, and the composite will exhibit an elastic behaviour, with the applied load being mostly supported by the polymeric matrix. Regarding the composite O_W_3Y, due to the geometry of the reinforcement fabric, this composite has a high strength and stiffness, so it should

have a lower deformation value. The high value for the deformation at first failure/break obtained for this composite could be explained by the low fraction of fibres present; in other words, the load applied is mostly sustained by the polymeric matrix, which is less strong and stiff than the reinforcement.

Comparing the fibres used in the reinforcement, composites reinforced with sheep's wool exhibit higher strain at first failure/break values if the reinforcement was made by weaving, but if the reinforcement was made by crochet or knitting, the composites reinforced with dog wool exhibit the highest values. Due to the superior strength and stiffness of the composites reinforced with sheep's wool, they should display lower deformation values at first failure/break than those reinforced with dog wool, no matter which type of reinforcement is used. This applies except for the composites reinforced with woven fabrics, where the composites reinforced with dog wool fibres have higher strain at first failure/break values than those reinforced with sheep wool fibres (Figure 14d).

Regarding the impact of the type of textile structure used as reinforcement on the deformation at first failure/break, one can see that the composites reinforced with woven fabrics have the highest deformation values, followed by the composites reinforced with crocheted fabrics, and the composites reinforced with knitted structures have the lowest values. The results obtained are not in accordance with the expected results, since due to the high dimensional stability of the woven fabrics and to the high strength and stiffness of the composites reinforced with these structures, the percentage of deformation at first failure/break should be lower. It was expected, in fact, to show the lowest value of all the composites analysed. In composites reinforced with woven structures, the loads applied are distributed in two directions (along the direction of the weft and warp yarns) [34], while in composites reinforced with meshes, the loads applied can be distributed in several directions, which leads to less stiff behaviour.

According to Figure 14e, one can verify that the composite S_W_3Y has the highest toughness value (0.145 J/mm^3), and S_K_3Y_N5 has the lowest value (0.017 J/mm^3). The highest value of the S_W_3Y composite can be explained by the higher number of yarns used, the higher rigidity of the fibres, and to the dimensional stability of the reinforcement, while the lowest value of the composite S_K_N5 can be explained by the high flexibility of the reinforcement, and by the low quantity of fibres present (Table 5). From the analysis of this figure, it is possible to verify that the composites reinforced with sheep's wool have higher toughness values than those reinforced with dog wool, except when the reinforcement was made by knitting. These values were expected, since the composites reinforced with sheep wool fibres have higher tensile strength and stiffness than the ones reinforced with dog wool fibres, and therefore are able to absorb more energy until breaking (Figure 14a–c). The fact that the composite S_K_3Y_N5 is less tenacious than the D_K_1Y_N5 composite may be due to the lower fibre content present in the first one (Table 5).

Comparing the different reinforcement manufacturing techniques, the composites reinforced with woven fabrics are the ones that absorb more energy before breaking, followed by the composites reinforced with crocheted fabrics. The composites reinforced with knitted meshes are the ones with the lowest toughness values. The highest values of the composites reinforced with the woven fabrics can be explained by the great stability of these fabrics, while the lowest values of the composites reinforced with the knitted fabrics can be explained by the high flexibility of the meshes and to the low quantity of the fibres present in those composites (Figure 14e).

It is important to emphasize that the strain values presented were obtained in different contexts: deformation at first failure and deformation until complete rupture of the composites. Also, it is important to note that in the analysis of the results obtained (Figures 13c and 14d), there was no distinction between the specimens that broke completely and those that at the end of the tensile test still had intact fibres.

Analyzing the results from Table 8, one can verify that the Young's modulus results obtained experimentally for the different composites are in between the limits predicted by

the theoretical models of the rule of mixtures, considering isostress and isostrain conditions, except the composite D_K_1Y_N5, where the elastic modulus obtained experimentally is equal to the modulus considering the isostress condition. Considering these results, one can conclude that the composites have a stiffness intermediately between the stiffness of the fibres and the matrix. Since the fibres' stiffness is very low, compared to the resin matrix stiffness, the resin will not be reinforced in terms of stiffness.

4.3. SEM of the Composites

By analyzing Figures 15 and 16, it is possible to identify some of the failure mechanisms that occurred during the tensile tests.

Comparing the different types of structures used as reinforcement, one can see that in the composites reinforced with crocheted fabrics (Figures 15a–c and 16a), there are less holes present in the resin, which indicates that there was a low occurrence of fibre pull-out. One can also see that the main failure mechanism in this type of composite is the fibre fracture. In contrast, in the composites reinforced with woven and knitted fabrics (Figures 15d,e and 16b,c), it is possible to see a considerable number of holes in the matrix (higher number of holes present in the composites reinforced with knitted fabrics), which indicates the occurrence of fibre pull-out.

These results suggest that the interfacial interaction between the fibres and the matrix of composites reinforced with crocheted fabrics is greater than the interaction between composites reinforced with woven and knitted fabrics. The higher the interaction between the two components, the greater the mechanical performance of the composite material, a claim that was demonstrated in the mechanical tests carried out.

5. Conclusions

In this work, eight green composites reinforced with sheep and dog wool fibres, both from Serra da Estrela, were produced in order to study their flexural and tensile behaviours.

The main results obtained can be divided into two parts. The first part, where only the mechanical test results of the composites reinforced with crocheted fabrics made with sheep's wool were studied, concerns the influence that the diameter of the needle and the number of yarns used in the production of the reinforcement have on the tensile and flexural properties of the composites produced. The second part focuses on the influence that the type of fibre and the fabric architecture have on these two mechanical properties.

1. Influence of the needle diameter and number of yarns used
 - Increasing the number of yarns used increases the flexural strength (by 339.11%), the tensile strength (188.07%), and stiffness of the composites;
 - Reducing the diameter of the needle used in the reinforcement increases the flexural strength (by 30.17%), the tensile strength (13.31%), and stiffness of the composites;
 - Increasing the number of yarns used in the reinforcement increases the composite's stiffness, which might reduce the ductility of the composite material, and therefore allow the material to endure a lower deformation before breaking (decrease of 9.71%);
 - The use of a needle with a larger diameter produces more flexible fabrics, which decreases the stiffness of the composites and allows the material to deform more before breaking (increase of 21.51%);
 - Increasing the number of yarns used in the reinforcement increases significantly the toughness of the composites by 141.18% and the reduction in the diameter of the needle used decreases the tenacity by 10.87%.
2. Influence of the type of fibre and type of fabric used in the reinforcement
 - Flexural tests

- The composites reinforced with sheep's wool have a higher specific flexural strength and higher Young's modulus than the ones reinforced with dog wool, with an average improvement of 17.44% and 50.93%, respectively;
- The composites reinforced with crocheted fabrics have the highest specific flexural strength and Young's modulus values, with average values of 21.71% and 45.99%, respectively, compared to composites reinforced with woven fabrics, and average values of 137.57% and 186.68%, respectively, compared to composites reinforced with knitted fabrics.
- Tensile tests
 - Composites reinforced with sheep's wool have a higher specific tensile strength and higher Young's modulus than the ones reinforced with dog wool, with an average improvement of 33.16% and 95.06%, respectively;
 - If the reinforcement is made of dog wool, the composites reinforced with crocheted fabrics have the highest specific tensile strength, but if the reinforcement is made of sheep's wool, the composites reinforced with woven fabrics are the ones with the highest specific tensile strength;
 - Composites reinforced with woven fabrics made from dog wool have the highest modulus, but in the composites where sheep's wool was used, the ones reinforced with crocheted fabrics were the ones with the highest Young's modulus values;
 - Composites reinforced with sheep wool fibres exhibit higher strain at first failure/break values if the reinforcement is made by weaving, but if reinforcement is made by crochet or knitting, the composites reinforced with dog wool fibres exhibit the highest values;
 - Composites reinforced with woven fabrics have the highest deformation at first break/failure values, with an average increase of 14.56% and 187.80% compared to composites reinforced with crocheted and knitted fabrics, respectively;
 - Composites reinforced by woven fabrics are the ones with the highest toughness, with an average increase of 17.89% and 752.94% compared to composites reinforced with crocheted and knitted fabrics, respectively;
 - If the reinforcement is made by weaving and crochet, the composites reinforced with sheep wool fibres have higher toughness values than those reinforced with dog wool fibres;

Additionally, from the tensile tests carried out on sheep's and dog wool yarns, one can conclude that sheep's wool is stiffer and can withstand more strain before breaking, while dog wool has higher strength and is able to absorb more energy before breaking.

Composites reinforced with natural fibres are gaining attraction across various sectors due to the environmental benefits and to the reduction in the manufacturing costs. Even though the biocomposites produced in this work cannot be used in structural applications, they can be used to produce interior and exterior vehicle components, such as door panels or seat pads. Also, they can be used in the automobile industry to reduce the overall weight and the production costs, and to improve fuel efficiency. In the construction industry, these composites can be used to manufacture windows, windows frames, doors, roof tiles, and ceilings [35,36].

To optimize the mechanical properties, it is suggested that in future works the yarns made from the dog wool be spun mechanically. This could be an important point to evaluate, as the mechanical spinning and twisting of the yarns can affect the mechanical characteristics of the composites. Another interesting point to study is the use of fibres from different breeds of sheep and dogs, which would allow a more extensive analysis of the mechanical properties of the composites reinforced with animal fibres.

Author Contributions: C.A. composites production, data acquisition and curation, investigation, writing—original draft, and writing—review and editing; A.P.C. textile structures production, materials acquisition, writing—review and editing; A.C.V. mechanical tests support, supervisor, writing—original draft, and writing—review and editing; J.C.V. conceptualization, materials supply, supervisor and writing—review and editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors are very grateful for the support granted by the Research Unit of Fiber Materials and Environmental Technologies (FibEnTech-UBI), through the Project reference UIDB/00195/2020, funded by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP/MCTES through national funds (PIDDAC), and DOI: 10.54499/UIDB/00195/2020, and by the Center for Mechanical and Aerospace Science and Technologies (C-MAST-UBI), through the Project reference UIDB/00151/2020, funded by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP/MCTES through national funds (PIDDAC), and DOI: 10.54499/UIDB/00151/2020.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Acknowledgments: The authors acknowledge the materials, access to equipment, and installations, as well as all the general support given by the Department of Chemistry, and Composite Laboratory of the Universidade da Beira Interior. The authors would also like to thank Ângela for her availability to manually spin the wool fibres from the Serra da Estrela dog and Francisco for creating the loom with the required dimensions and weaving the fabrics there.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of this study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Kamarudin, S.H.; Mohd Basri, M.S.; Rayung, M.; Abu, F.; Ahmad, S.; Norizan, M.N.; Osman, S.; Sarifuddin, N.; Desa, M.S.Z.M.; Abdullah, U.H.; et al. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. *Polymers* **2022**, *14*, 3698. [CrossRef] [PubMed]
2. Naik, V.; Kumar, M.; Kaup, V. A Review on Natural Fiber Composite Material in Automotive Applications. *Eng. Sci.* **2021**, *18*, 1–10. [CrossRef]
3. Peças, P.; Carvalho, H.; Salman, H.; Leite, M. Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review. *J. Compos. Sci.* **2018**, *2*, 66. [CrossRef]
4. Elfaleh, I.; Abbassi, F.; Habibi, M.; Ahmad, F.; Guedri, M.; Nasri, M.; Garnier, C. A Comprehensive Review of Natural Fibers and Their Composites: An Eco-Friendly Alternative to Conventional Materials. *Results Eng.* **2023**, *19*, 101271. [CrossRef]
5. Murillo, M.; Sánchez, A.; Gil, A.; Araya-Letelier, G.; Burbano-García, C.; Silva, Y.F. Use of Animal Fiber-Reinforcement in Construction Materials: A Review. *Case Stud. Constr. Mater.* **2024**, *20*, e02812. [CrossRef]
6. Ekbatani, S.; Wang, Y.; Huo, S.; Papageorgiou, D.; Zhang, H. Nano-Engineered Hierarchical Natural Fibre Composites with Localised Cellulose Nanocrystals and Tailored Interphase for Improved Mechanical Properties. *Compos. Sci. Technol.* **2024**, *255*, 110719. [CrossRef]
7. Ferreira, D.P.; Cruz, J.; Figueiro, R. Surface Modification of Natural Fibers in Polymer Composites. In *Green Composites for Automotive Applications*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 3–41, ISBN 978-0-08-102177-4.
8. Gowtham, S.; Jeevanantham, T.; Emelda, J.; Edric, J. Investigation on Effect of Fibre Orientation on Mechanical Behaviour of Polymer Matrix Natural Fibre Reinforced Composite Material. *Mater. Today Proc.* **2024**, S2214785324002104. [CrossRef]
9. Sanjay, M.R.; Siengchin, S.; Parameswaranpillai, J.; Jawaid, M.; Pruncu, C.I.; Khan, A. A Comprehensive Review of Techniques for Natural Fibers as Reinforcement in Composites: Preparation, Processing and Characterization. *Carbohydr. Polym.* **2019**, *207*, 108–121. [CrossRef]
10. Väisänen, T.; Das, O.; Tomppo, L. A Review on New Bio-Based Constituents for Natural Fiber-Polymer Composites. *J. Clean. Prod.* **2017**, *149*, 582–596. [CrossRef]
11. Wambua, P.; Ivens, J.; Verpoest, I. Natural Fibres: Can They Replace Glass in Fibre Reinforced Plastics? *Compos. Sci. Technol.* **2003**, *63*, 1259–1264. [CrossRef]
12. Corrales, F.; Vilaseca, F.; Llop, M.; Gironès, J.; Méndez, J.A.; Mutjè, P. Chemical Modification of Jute Fibers for the Production of Green-Composites. *J. Hazard. Mater.* **2007**, *144*, 730–735. [CrossRef] [PubMed]
13. Mann, G.S.; Azum, N.; Khan, A.; Rub, M.A.; Hassan, M.I.; Fatima, K.; Asiri, A.M. Green Composites Based on Animal Fiber and Their Applications for a Sustainable Future. *Polymers* **2023**, *15*, 601. [CrossRef]
14. Pickering, K.L.; Efendy, M.G.A.; Le, T.M. A Review of Recent Developments in Natural Fibre Composites and Their Mechanical Performance. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **2016**, *83*, 98–112. [CrossRef]

15. Thakur, V.K.; Thakur, M.K.; Kessler, M.R. *Handbook of Composites from Renewable Materials*, 1st ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2017; ISBN 978-1-119-22436-5.
16. Talabi, S.I.; Ismail, S.O.; Akpan, E.I.; Hassen, A.A. Quest for Environmentally Sustainable Materials: A Case for Animal-Based Fillers and Fibers in Polymeric Biocomposites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **2024**, *183*, 108216. [CrossRef]
17. Clothing from Chiengora (Dog) Fibers. Available online: <https://textilevaluechain.in/in-depth-analysis/articles/clothing-from-chiengora-dog-fibres> (accessed on 21 January 2024).
18. Ramamoorthy, S.; Ramadoss, M.; Ramasamy, R.; Thangavel, K. Analysis of Physical and Thermal Properties of Chiengora Fibers. *J. Nat. Fibers* **2020**, *17*, 246–257. [CrossRef]
19. Gomes, A.S.; Fiadeiro, P.T.; Vieira, A.C.; Vieira, J.C. Viability Study of Serra Da Estrela Dog Wool to Produce Green Composites. *Polymers* **2024**, *16*, 718. [CrossRef]
20. Ares-Elejoste, P.; Seoane-Rivero, R.; Gandarias, I.; Iturmendi, A.; Gondra, K. Sustainable Alternatives for the Development of Thermoset Composites with Low Environmental Impact. *Polymers* **2023**, *15*, 2939. [CrossRef]
21. Da Costa, R.R.; Sato, E.S.; Ribeiro, M.L.; Medeiros, R.D.; Vieira, A.F.; Guedes, R.M.; Tita, V. Polyurethane Derived from Castor Oil Reinforced with Long Cotton Fibers: Static and Dynamic Testing of a Novel Eco-Friendly Composite Material. *J. Compos. Mater.* **2020**, *54*, 3125–3142. [CrossRef]
22. Auvergne, R.; Caillol, S.; David, G.; Boutevin, B.; Pascault, J.-P. Biobased Thermosetting Epoxy: Present and Future. *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 1082–1115. [CrossRef]
23. Kerni, L.; Singh, S.; Patnaik, A.; Kumar, N. A Review on Natural Fiber Reinforced Composites. *Mater. Today Proc.* **2020**, *28*, 1616–1621. [CrossRef]
24. Rohit, K.; Dixit, S. A Review—Future Aspect of Natural Fiber Reinforced Composite. *Polym. Renew. Resour.* **2016**, *7*, 43–59. [CrossRef]
25. Laitala, K.; Klepp, I.; Henry, B. Does Use Matter? Comparison of Environmental Impacts of Clothing Based on Fiber Type. *Sustainability* **2018**, *10*, 2524. [CrossRef]
26. GreenPoxy. Available online: <https://greenpoxy.org/> (accessed on 23 January 2024).
27. ASTM D3822-14; Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020.
28. ISO 178 (2019); Plastics-Determination of Flexural Properties. International Standard Organization: Geneva, Switzerland, 2019.
29. ISO 527-1 (2019); Plastics-Determination of Tensile Properties-Part 1: General Principles. International Standard Organization: Geneva, Switzerland, 2019.
30. ISO 527-4 (2023); Plastics-Determination of Tensile Properties-Part 4: Test Conditions for Isotropic and Orthotropic Fibre-Reinforced Plastic Composites. International Standard Organization: Geneva, Switzerland, 2023.
31. Wang, D.; Yang, X.-H.; Tang, R.-C.; Yao, F. Extraction of Keratin from Rabbit Hair by a Deep Eutectic Solvent and Its Characterization. *Polymers* **2018**, *10*, 993. [CrossRef] [PubMed]
32. Wu, M.; Shen, S.; Yang, X.; Tang, R. Preparation and Study on the Structure of Keratin/PVA Membrane Containing Wool Fibers. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2017**, *254*, 042030. [CrossRef]
33. Rawal, A.; Majumdar, A.; Kumar, V. Textile Architecture for Composite Materials: Back to Basics. *Oxf. Open Mater. Sci.* **2023**, *3*, itad017. [CrossRef]
34. Chowdhury, I.R.; Summerscales, J. Woven Fabrics for Composite Reinforcement: A Review. *J. Compos. Sci.* **2024**, *8*, 280. [CrossRef]
35. Zwawi, M. A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications. *Molecules* **2021**, *26*, 404. [CrossRef]
36. Mishra, R.; Wiener, J.; Miltky, J.; Petru, M.; Tomkova, B.; Novotna, J. Bio-Composites Reinforced with Natural Fibers: Comparative Analysis of Thermal, Static and Dynamic-Mechanical Properties. *Fibers Polym.* **2020**, *21*, 619–627. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.