



DAVID MANUEL
COELHO DE
ANDRADE

**EFEITO DE *FILLERS* DE CARBONO
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE COMPÓSITOS DE MATRIZ
POLIÉSTER 580 REFORÇADA COM
FIBRA DE CARBONO**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia de Produção

ORIENTADOR

Professor Doutor Ricardo Miguel Gomes Simões
Baptista

Dezembro, 2022

DAVID MANUEL **EFEITO DE *FILLERS* DE CARBONO**
COELHO DE **NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**
ANDRADE **DE COMPÓSITOS DE MATRIZ**
POLIÉSTER 580 REFORÇADA COM
FIBRA DE CARBONO

JÚRI

Presidente: Professor Doutor Pedro Filipe do Carmo
Cunha, EST-IPS

Orientador: Professor Doutor Ricardo Miguel Gomes
Simões Baptista, EST-IPS

Vogal: Professora Doutora Ana Mafalda Saldanha
Guedes, EST-IPS

Dezembro, 2022

*Esta dissertação é dedicada a todos aqueles que
acreditaram em mim e nunca me deixaram desistir, um
obrigado a todos!*

“A persistência é o caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

Agradecimentos

O término desta dissertação é, mais uma jornada da minha vida concluída, fruto de muito trabalho e dedicação. Queria deixar um agradecimento a todas as pessoas que me apoiaram e ajudaram ao longo deste percurso.

Desde já, agradecer à Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, do Instituto Politécnico de Setúbal, por todos os ensinamentos que me proporcionou ao longo deste percurso. Agradecer pelo facto de me ter disponibilizado todos os materiais e equipamentos necessários à realização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Ricardo Miguel Gomes Simões Baptista, por toda a orientação, disponibilidade e brio que apresentou quer na fase prática, quer na elaboração da presente dissertação. As suas críticas construtivas, foram muito importantes para alcançar o sucesso.

À Professora Doutora Ana Mafalda Saldanha Guedes, por se disponibilizar no desenvolvimento das micrografias da presente dissertação.

Um agradecimento especial aos meus pais e irmão, que são o meu pilar, que me incentivaram sempre a terminar esta dissertação, demonstrando que tudo é possível, basta sermos resilientes.

À minha namorada Rita, por acreditar sempre em mim e dando-me toda a motivação para a conclusão deste objetivo pessoal.

Resumo

Num material compósito, a escolha de reforço e matriz deve ter em conta a aplicação final, ou seja, as solicitações mecânicas, térmicas e químicas a que o material vai estar sujeito em serviço. Assim, este trabalho estuda o efeito da adição de fillers de alótropos de carbono – nanotubos de carbono - nas propriedades mecânicas de um compósito de matriz poliéster reforçada com fibras de carbono, em particular na sua resistência à tração. Foram preparadas 3 matrizes, onde uma consistia apenas em resina poliéster ATLAC 580, e nas duas restantes à resina foi adicionada 0.5% e 1% de nanotubos de carbono respetivamente. Pretende-se ficar a conhecer o efeito que pormenores de construção, como furações, têm sobre o comportamento de materiais compósitos, com e sem partículas de reforço. A adição de nanotubos de carbono apresenta melhorias notórias no módulo de elasticidade nomeadamente para provetes com furo. Para provetes onde não há furação, quanto maior for a quantidade de nanotubos de carbono existentes de matriz menor é o módulo de elasticidade e maior é o número de aglomerados.

Palavras-chave: Fibras de Carbono; Resina Poliéster Reforçada com Fibras de Carbono; Nanotubos de Carbono; Propriedades Mecânicas; Ensaio de Tração.

Abstract

In a composite material, the choice of reinforcement and matrix should take into account the final application, i.e., the mechanical, thermal and chemical demands to which the material will be subjected in service. Thus, this work studies the effect of adding carbon allotrope fillers - carbon nanotubes - on the mechanical properties of a polyester matrix composite reinforced with carbon fibers, in particular on its tensile strength. Three matrices were prepared, where one consisted only of polyester resin ATLAC 580, and in the other two, 0.5% and 1% of carbon nanotubes respectively were added to the resin. The aim is to find out the effect that construction details, such as perforations, have on the behavior of composite materials, with and without reinforcement particles. The addition of carbon nanotubes shows remarkable improvements in the modulus of elasticity, especially for specimens with holes. For specimens without holes, the greater the amount of carbon nanotubes in the matrix, the lower the modulus of elasticity and the greater the number of clusters.

Keywords: Carbon fibers; Carbon Fiber Polyester Resin; Carbon Nanotubes; Mechanical properties; Tensile Tests.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Siglas e Acrónimos	xiii
Lista de Símbolos	xiv
Capítulo 1	1
Introdução	1
Capítulo 2	3
Revisão Bibliográfica	3
2.1 Compósitos e fibras de carbono	4
2.2 Processos de fabrico das fibras de carbono	5
2.3 Evolução dos materiais reforçados com fibra de carbono	7
2.4 Propriedades dos compósitos de fibras de carbono	8
2.5 Comportamento mecânico dos compósitos de fibras de carbono	11
2.6 Outros reforços de Carbono	15
2.6.1 Grafite	15
2.6.2 Grafeno	16
2.6.3 Nanotubos de Carbono	17
2.6.3.1 Produção Nanotubos de Carbono	17
2.6.3.2 Propriedades Mecânicas CNT	23
2.6.3.3 Estrutura Molecular dos CNT	24
2.6.3.4 Compósitos com a adição de CNT nas matrizes	27
2.7 Corte de fibras de carbono	29
Capítulo 3	31
Materiais e Métodos	31
3.1 Materiais	32
3.2 Preparação dos materiais e fibras	33
3.3 Preparação da Resina	35
3.3.1 Resina Compósito 580- CF	35

3.3.2 Resina Compósitos 580-CF-CNT-0.5 e 580-CF-CNT-1	36
3.4 Fabrico do Compósito.....	39
3.5 Preparação Moldes Resina.....	41
3.5.1 Resina 580-CF	41
3.5.2 Resina 580-CF-CNT-0.5 e 580-CF-CNT-1	42
3.6 Vácuo e Cura	43
3.7 Corte e Acabamento.....	45
3.7.1 Corte Placas Compósitos	45
3.7.2 Acabamento dos Provetes de Resina	46
3.8 Furação Provetes Compósito	47
3.9 Ensaio de tração	48
3.10 Macrografias	51
3.11 Determinação da percentagem de materiais de reforço	51
3.12 Microscopia Eletrónica de Varrimento	53
Capítulo 4.....	54
Resultados	54
4.1 Estrutura dos CNT	55
4.2 Massa dos Compósitos.....	55
4.3 Fração de materiais de reforço.....	55
4.4 Propriedades Mecânicas Compósitos	56
4.5 Propriedades mecânicas resinas.....	60
4.6 Macrografias Compósitos	63
4.7 Macrografias Resinas.....	67
4.8 Micrografias Resinas	69
Capítulo 5.....	72
Discussão dos Resultados	72
5.1 Interpretação dos resultados obtidos para compósitos.....	73
5.2 Comparação dos resultados obtidos para resinas.....	76
5.3 Comparação dos resultados obtidos para compósitos.....	77
5.4 Modelo de Hirsch's.....	81
5.5 Fator de Concentração de Tensão	84
Capítulo 6.....	86
Conclusões e Proposta de Trabalhos Futuros	86
6.1 Conclusões	87
6.2 Propostas de Trabalhos futuros.....	88
Bibliografia.....	89

Lista de Figuras

Figura 1 – Compósito de matriz polimérica reforçado com fibras de carbono	4
Figura 2 - Processo de produção das CF a partir do PAN	6
Figura 3 - a) delaminação severa a 30% da vida de fadiga; b) fratura e delaminação severa a 60% da vida de fadiga	13
Figura 4 - Provetes testados sob cargas biaxiais	14
Figura 5 - a) Superfície da resina pura; b) superfície da resina após a adição de grafite	16
Figura 6 - Alótropos do carbono: a) 2-D grafeno, b) 0-D fullereno, c) 1-D nanotubo carbono, d) 3-D grafite	17
Figura 7 -Método de Produção CVD.....	19
Figura 8 - Processo de crescimento dos CNT a) crescimento dos filamentos de carbono e b) crescimento dos CNT	20
Figura 9 - Diversos CNT: a) CNT's agrupados em feixes; b) Microscopia de um conjunto de milhares de grupos de CNT; c) Fibras CNT contínuas produzidas por CVD e densificadas com acetona; d) Tecido CNT em macroescala produzido com milhares de fibras CNT	20
Figura 10 - Processo EPD a) Preparação do processo e b) Tipos de EPD	21
Figura 11 - Processo ESD	22
Figura 12 - Comparação das propriedades mecânicas de diferentes métodos de produção de CNT	23
Figura 13 - Exemplos de estruturas moleculares:a) polietileno; b)nylon 6; c) meta-aramida (Nomex);d)para-aramida (Kevlar); e) poliéster (Vectran); f) Zylon; g) CNT de parede simples	24
Figura 14 - Formação estrutural dos CNT.....	25
Figura 15 - a) CNT parede simples b) CNT de parede múltipla	25
Figura 16 - Nó CNT	26
Figura 17 - Fissura compósito revestido com CNT`s.....	29
Figura 18 – Preparação para o corte das fibras de carbono	33
Figura 19 – Peel Ply - a) Preparação para o corte e b) Corte	34
Figura 20 – Preparação e corte do Filme sangrador	34
Figura 21 – Manta de Absorção – a) Preparação e b) Corte.....	35
Figura 22 – Preparação Resina – a) Resina utilizada e b) Pesagem resina	35
Figura 23 – Nanotubos de Carbono.....	37
Figura 24 - Pesagem CNT`s	38
Figura 25 – Tratamento ultrassons	38
Figura 26 – Preparação da matriz	39
Figura 27 – Tratamento ultrassons da matriz	39
Figura 28 – Pesagem fibras	40
Figura 29 – Compósito terminado	40
Figura 30 – Sequência de montagem dos elementos de produção do compósito	41
Figura 31 - Provetes Resina 580-CF	42
Figura 32 - Provetes Resina 580-CF-CNT-1.....	42
Figura 33 – Saco de Vácuo.....	43

Figura 34 - Vácuo	43
Figura 35 - Fim da cura	44
Figura 36 – Compósito 580-CF	44
Figura 37 – Provetes Resina 580-CF-CNT-1– a) Moldados e b) Desmoldados	44
Figura 38 - Dimensionamento Provetes Compósitos	45
Figura 39 – Preparação para o Corte dos Compósitos.....	45
Figura 40 – Corte Compósitos.....	46
Figura 41 – Provete Final	46
Figura 42 – Acabamento Provetes Resina	46
Figura 43 – Provetes Resina 580-CF-CNT-1- a) Antes do acabamento e b) Após o acabamento	47
Figura 44 - Esquematização Provetes com 1 furo	47
Figura 45 - Esquematização Provetes com 2 furos.....	48
Figura 46 – Furação provetes	48
Figura 47 – Preparação Ensaio de tração.....	49
Figura 48 – Ensaio de Tração- a) início do ensaio e b) fim do ensaio	49
Figura 49 – Curva tensão- deformação.....	50
Figura 50 – Lei de Hooke	50
Figura 51 - Lupa de observação 30x <i>Leica Zoom 2000</i>	51
Figura 52 – Pesagem cadinho	51
Figura 53 - Pesagem cadinho + compósito.....	52
Figura 54 – Colocação cadinhos no forno	52
Figura 55 – Pesagem cadinho + compósito após forno	52
Figura 56 - Quorum Q150 ES	53
Figura 57 - Microscópio eletrônico: painel de instrumentos	53
Figura 58 - Estrutura CNT's.....	55
Figura 59 - Curva Ensaio de Tração	57
Figura 60 – Curva Módulo de <i>Young</i> Provete 580-CF Sem Furo (7)	57
Figura 61 - Curva Módulo de <i>Young</i> Provete 580-CF-CNT-0.5 Um furo (5)	58
Figura 62 - Curva Módulo de <i>Young</i> Provete 580-CF-CNT-1 Dois Furos (2)	59
Figura 63 - Curva Módulo de <i>Young</i> Provete Resina 580 (1)	61
Figura 64 - Curva Módulo de <i>Young</i> Provete Resina 580-CNT-0.5 (3)	62
Figura 65 - Curva Módulo de <i>Young</i> Provete Resina 580-CNT-1 (2)	63
Figura 66 - Macrografias Compósitos 580-CF Sem Furo: a) zona de fratura traseira; b) zona de fratura frontal e c) delaminação	64
Figura 67 - Macrografias Compósitos 580-CF Um Furo: a) zona de fratura frontal; b) face com menor delaminação e c) face com maior delaminação	64
Figura 68 - Macrografias Compósitos 580-CF Dois Furos: a) zona de fratura frontal; b) face com menor delaminação e c) face com maior delaminação	64
Figura 69 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-0.5 Sem Furo: a) zona de fratura frontal; b) face com menor delaminação e c) face com maior delaminação	65
Figura 70 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-0.5 Um Furo: a) zona de fratura frontal; b) zona de fratura traseira e c) delaminação	65
Figura 71 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-0.5 Dois Furos: a) zona de fratura frontal; b) face com maior delaminação e c) face com menor delaminação	65
Figura 72 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-1 Sem Furo: a) zona de fratura frontal; b) delaminação e c) zona de fratura traseira	66
Figura 73 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-1 Um Furo: a) zona de fratura frontal; b) zona de fratura traseira e c) delaminação	66

Figura 74 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-1 Dois Furos: a) face com menor delaminação; b) zona de fratura frontal e c) face com maior delaminação	67
Figura 75 - Macrografias Resina 580-CF: a) superfície de fratura e b) fissuras existentes	67
Figura 76 - Macrografias Resina 580-CF-CNT-0.5: a) fissuras existentes; b) aglomerados de CNT e c) lascas provocadas pelo ensaio de tração	68
Figura 77 - Macrografias Resina 580-CF-CNT-1: a) aglomerado de CNT`s e b) aglomerados de CNT`s e fissuras	68
Figura 78 - Micrografias 580: a) Micrografia com ampliação, b) Micrografia com ampliação e c) Micrografia com ampliação.....	69
Figura 79 - Micrografias 580-CNT-0.5: a) Micrografia com ampliação 105x, b) Micrografia com ampliação 110x e c) Micrografia com ampliação 2500x.....	70
Figura 80 -Micrografias 580-CNT-1: a) Micrografia com ampliação 1000x, b) Micrografia com ampliação 500x e c) Micrografia com ampliação 500x.....	71
Figura 81 - Compósitos 580-CF	73
Figura 82 - Compósitos 580-CF-CNT-0.5	74
Figura 83 - Compósitos 580-CF-CNT-1	75
Figura 84 - Comparação Resinas.....	77
Figura 85 - Comparação Compósitos Sem Furo	78
Figura 86 - Comparação Compósitos Um Furo	79
Figura 87 - Comparação Compósitos Dois Furos	79
Figura 88 - Mistura em Paralelo	81
Figura 89 - Mistura em Série	82

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades mecânicas de diferentes CF's	7
Tabela 2 - Composições (wt) das placas compósitos	32
Tabela 3 - Propriedades fibra de carbono	34
Tabela 4 - Propriedades Resina Vinilester Pre-Acelerada ATLAC 580 [40].....	36
Tabela 5 - Propriedades CNT's	37
Tabela 6 – Tipologia dos provetes compósitos	47
Tabela 7 - Massa dos compósitos após a cura	55
Tabela 8 – Dados Estatísticos das frações mássicas dos materiais de reforço	55
Tabela 9 - Teor de Carbono	56
Tabela 10 - Dados Compósitos 580-CF	58
Tabela 11 - Dados Compósitos 580-CF-CNT-0.5	59
Tabela 12 - Dados Compósitos 580-CF-CNT-1	60
Tabela 13 - Dados Resina 580	60
Tabela 14 - Dados Resina 580-CNT-0.5	61
Tabela 15 - Dados Resina 580-CNT-1	62
Tabela 16 - Dados Estatísticos Compósitos 580-CF	73
Tabela 17 - Dados Estatísticos 580-CF-CNT-0.5	74
Tabela 18 - Dados Estatísticos 580-CF-CNT-1	75
Tabela 19 - Dados Estatísticos Resinas	76
Tabela 20 - Módulos de Elasticidade Teóricos	82
Tabela 21 - Valores Compósito 580-CF	82
Tabela 22 - Valores Compósito CNT 580-CF-0.5	82
Tabela 23 - Valores Compósito 580-CF-CNT-1	83
Tabela 24 - Valores Regra das Misturas	83
Tabela 25 – Regra de Hirsch's	84
Tabela 26 - Fator de Concentração, compósitos 580-CF	84
Tabela 27 - Fator de Concentração, compósitos 580-CF-CNT-0.5	85
Tabela 28 - Fator de Concentração, compósitos 580-CF-CNT-1	85

Lista de Siglas e Acrónimos

AC	<i>Carvão Ativado</i>
CB	<i>Carvão negro de fumo</i>
CF	<i>Fibra de Carbono</i>
CNT	<i>Nanotubos de carbono</i>
CVD	<i>Deposição química em fase de vapor</i>
EPD	<i>Deposição eletroforética</i>
ESD	<i>Eletropulverização</i>
PAN	<i>Poliacrilonitrilo</i>
SEM	<i>Microscopia eletrônica de varrimento</i>

Lista de Símbolos

sp^2	Átomos hibridizados
A	Área transversal da secção do provete
F	Força
$\hat{C}_h$	Combinação linear dos vetores
l_0	Comprimento inicial do provete
ε	Extensão Nominal
K_t	Fator de concentração
$\frac{v}{V}$	Fração Volúmica
n	Índice quiral
m	Índice quiral
E	Módulo de elasticidade
σ	Tensão
Δl	Variação do comprimento do provete

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo tem como objetivo fazer o enquadramento do tema da presente dissertação, “Efeito de *fillers* de carbono nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçada com fibra de carbono”, bem como apresentar os objetivos de trabalho.

1.1 Introdução e âmbito do trabalho

A presente dissertação tem como principal objetivo promover e desenvolver o conhecimento sobre o efeito de *fillers* de carbono nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçada com fibra de carbono. Se por um lado, o comportamento de materiais compósitos baseados em matriz polimérica reforçada por fibra de carbono é um tópico bastante desenvolvido, o efeito que partículas de reforço possuem sobre estes, é um tópico pouco desenvolvido, mas de importância fundamental. Com este trabalho pretende-se também ficar a conhecer o efeito que pormenores de construção, como furações, têm sobre o comportamento de materiais compósitos, com e sem partículas de reforço. Tendo por base uma pesquisa bibliográfica científica e objetiva, numa fase inicial é feita uma revisão bibliográfica, capítulo 2, ao tema onde são demonstradas as várias características das fibras de carbono (CF), bem como da adição de outros derivados de carbono na estrutura composta. Numa fase final desta dissertação vai ser apresentado todo o trabalho realizado ao longo do tempo, que vai incluir todo o material necessário para a realização dos ensaios, e as respetivas máquinas utilizadas necessárias para a execução dos ensaios.

Por fim, são apresentadas todas as análises e conclusões retiradas deste estudo e são apresentadas todas as referências bibliográficas necessárias à execução do mesmo.

1.2 Objetivos

Com este trabalho pretende-se realizar um estudo sobre o efeito da adição de *fillers* de carbono nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçada com fibra de carbono. De modo que este estudo seja feito corretamente vão ser realizados diversos ensaios e testes, para posterior análise da forma como atuam os *fillers* de carbono quando introduzidos da matriz polimérica.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

O presente capítulo é composto por uma revisão bibliográfica, onde são analisados todos os artigos científicos escolhidos para tratar o tema desta dissertação, “Efeito de *fillers* de carbono nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçada com fibra de carbono”. Foram selecionados artigos mais antigos como forma de obter algum conteúdo histórico sobre o tema em questão, até se chegar a artigos mais recentes onde são apresentadas novas metodologias, que posteriormente são apresentadas no capítulo 3.

2.1 Compósitos e fibras de carbono

O carbono é um elemento versátil e único, que é capaz de formar uma variedade e diversidade enorme de designs em nano escala. As características/propriedades do carbono levam a que várias áreas queiram adotar este material aos seus componentes e forma a evoluírem também os seus produtos [1].

A utilização das CF começou em meados da década de 1950, onde existiram diversos esforços para desenvolver um novo material derivado do carbono que possuísse propriedades físicas únicas e que apresentasse atributos têxteis característicos de um precursor celulósico (por exemplo, fibra, fio, tecido) [2].

Em 1964 foi desenvolvido um processo pra fabricar uma fibra macroscópica contínua, uma vez que em 1959 tinham sido produzidas CF à base de *rayon* e a resistência à tração estava abaixo dos 77 MPa, com as melhorias feitas em 1964 a resistência à tração passou para os 276 MPa. A partir desta década vários estudos e melhorias fora surgindo até aos dias de hoje [2].

Existem dois tipos de produtos à base de carbono ou materiais carbonáceos: (1) materiais de carbono clássicos como carvão negro de fumo (CB) e o carvão ativado (AC) e (2) carbonos nanoestruturados como o grafeno, grafite, fulerenos e os nanotubos de carbono (CNT) [1].

Face à grande área superficial específica, alta condutividade, alta resistência mecânica e boa estabilidade térmica, vários materiais à base de carbono têm vindo a ser investigados e utilizados em materiais compósitos [1].

Os materiais compósitos compreendem dois ou mais constituintes ou fases, que são diferentes na sua forma e composição química, sendo insolúveis um no outro. A grande maioria dos materiais compósitos contêm apenas duas fases, a fase contínua que é designada matriz, sendo envolvida pelo reforço, a fase dispersa [3].

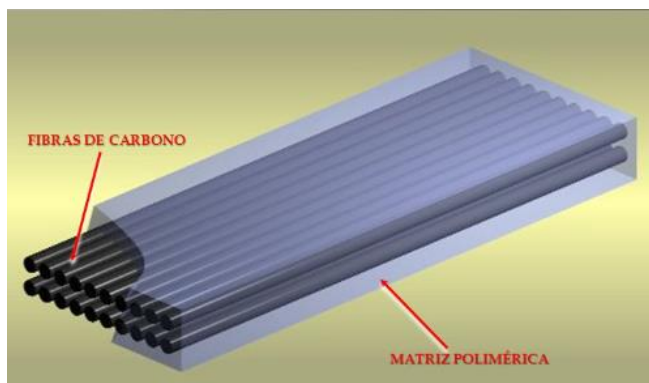


Figura 1 – Compósito de matriz polimérica reforçado com fibras de carbono [4]

As CF, são materiais de alta resistência, produzidas a partir de zonas grafíticas e cristalinas. Estas fibras possuem um elevado módulo de resistência específica, sendo ainda capazes de conservar a resistência à tração a altas temperaturas, são ainda independentes da humidade, apresentam elevada condutividade elétrica e térmica, coeficientes de expansão térmica baixos, e são quimicamente inertes [5].

As propriedades das CF podem variar muito se a oxidação que ocorreu no processo fabríco foi eficaz ou não. Um tempo de oxidação insuficiente durante o fabríco das CF resulta em propriedades mecânicas mais baixas [6].

As CF podem ser agrupadas em dois grupos: as CF típicas, onde a percentagem de carbono varia entre os 80-95% e, as fibras de grafite em que a percentagem de carbono é 99%. As CF têm no sentido longitudinal um coeficiente de dilatação negativo ou praticamente nulo, se forem ligadas a algum tipo de material com coeficiente de dilatação positivo ficam sujeitas ao aparecimento de tensões prejudiciais na interface, contudo se for conseguida uma ligação criteriosa entre a matriz e a fibra é possível obter um material compósito com um coeficiente de dilatação nulo [7].

O poliacrilonitrilo (PAN) é um dos polímeros mais utilizados para a produção de fibra de carbono, este polímero faz aumentar a resistência à tração, bem como o módulo de elasticidade. Tendo em conta a temperatura final de cura, podem ser obtidos diferentes tipos de compósitos de CF, que vão desde fibras de alta tenacidade, fibras de módulo intermediário, fibras de alto módulo e fibras de ultra-alto módulo. As CF podem ser processadas diretamente como produto acabado ou como pré-produto [5].

2.2 Processos de fabríco das fibras de carbono

O processo de fabríco das CF introduz defeitos na sua microestrutura. Como as CF são consideradas materiais frágeis, a resistência à tração é diretamente influenciada pela presença destes defeitos. Devido a estes defeitos a resistência à tração não pode ser caracterizada na sua totalidade por um valor médio, mas deve ser caracterizada por uma distribuição de probabilidade. A distribuição que é mais frequente ser utilizada para caracterizar a resistência das CF designa-se por distribuição de Weibull [8].

A distribuição de Weibull é caracterizada por dois parâmetros, pelo parâmetro da escala e pelo módulo de Weibull. O parâmetro da escala de Weibull está relacionado com a posição do pico de distribuição, e depende do comprimento da fibra devido à maior probabilidade de encontrar um defeito crítico numa fibra mais longa. O módulo de Weibull regula a largura da distribuição, ou seja, descreve a variação da resistência ao longo de um feixe de fibras [8].

Os autores Watson e Smith propuseram um parâmetro de escala de comprimento que descreve uma menor variação da resistência ao longo do comprimento da fibra do que através do feixe de fibras, este efeito é mais significativo para alguns tipos de CF [8].

Uma das tecnologias usadas para o fabrico de CF concentra-se na decomposição térmica de precursores orgânicos, sendo a maior parte deles à base de celulose, o que posteriormente origina o PAN, o alcatrão “*Pitch*” e “*Rayon Fibers*”. Estes precursores devem conter alguns atributos característicos: (1) resistência adequada, de modo que as fibras permaneçam unidas e compactas durante todo o processo da sua transformação em carbono; (2) não fundir durante todo o processo, para tal deve-se utilizar um precursor não-fusível; (3) não vaporizar aquando da pirólise [7].

Assim, este processo de produção de fibras de carbono a partir do PAN, contempla as seguintes etapas: (1) oxidação – aquecimento das fibras até aos 300°C numa atmosfera rica em oxigénio, o que conduz ao aparecimento de uma estrutura reticular da cadeia molecular, de modo que o ponto de fusão das fibras fique anulado; (2) carbonização – aquecimento da cadeia molecular lentamente até aos 1100°C, na presença de uma atmosfera neutra, o que faz com que no final se encontrem só os átomos de carbono. As fibras adquiridas após esta etapa estão prontas a ser usadas sem serem submetidas a qualquer tratamento de superfície, pois já apresentam boas propriedades mecânicas; (3) grafitação – numa atmosfera neutra é realizada a pirólise das fibras, onde se alcança um elevado grau orientação da estrutura, esta etapa é realizada quando se quer que as fibras apresentem um elevado módulo de elasticidade; (4) tratamento superficial – as superfícies das fibras são alteradas com recurso a uma atmosfera de ácido nítrico ou ácido sulfúrico de modo que, a adesão entre as fibras e as resinas empregues seja elevada. Na figura 2, é representado o processo de produção das CF [7].

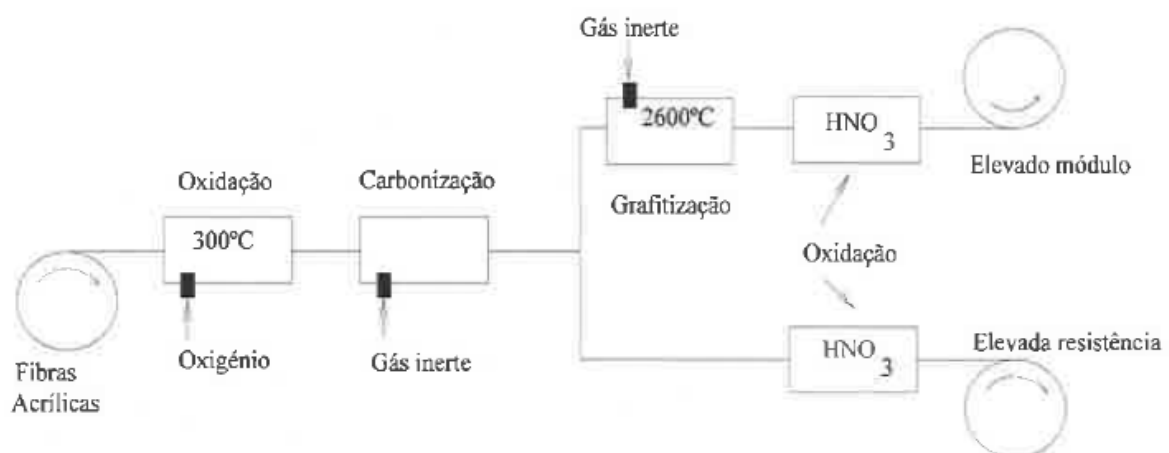


Figura 2 - Processo de produção das CF a partir do PAN [7]

Os precursores utilizados para o fabrico das CF, fazem com que existam fibras com propriedades mecânicas diferentes. Quando o fabrico das fibras é feito com recurso ao precursor da celulose, no final as fibras apresentam propriedades mecânicas razoáveis, após este método ter sido melhorado, ainda assim é um processo muito dispendioso [7].

Quando o fabrico é realizado com recurso ao precursor de alcatrão, as fibras conferem propriedades mecânicas inferiores às do precursor de celulose. Na tabela 1, é possível observar as propriedades obtidas, tendo em conta os diferentes precursores utilizados [7].

Tabela 1 - Propriedades mecânicas de diferentes CF's [7]

Propriedade	PAN	Alcatrão " <i>Pitch</i> "	" <i>Rayon fibers</i> "
Densidade (g/cm ³)	1.8	2.0	1.7
Módulo de Young	200-400	300-700	415-680
Tensão de rotura (MPa)	2480-5600	1900-2200	2070-2760
Deformação na rotura	0.6-1.2	1-1.5	0.5-0.6
Coeficiente de expansão térmica axial (10 ⁻⁶ /°C)	-0.7 a -0.5	-1.6 a -0.9	-

Novos processos de fabrico de CF's sugerem que a modificação ácida na superfície da fibra faz com que haja perfurações na superfície da fibra, o que segundo a literatura melhora a ligação interfacial. Já o tratamento eletroquímico, normalmente reduz a resistência da fibra [3].

O revestimento da superfície com níquel aumenta a polaridade da superfície através da introdução de grupos funcionais fortalecidos, o que resulta numa melhor ligação interfacial e melhor tenacidade à fratura [6].

As CF são conhecidas por possuírem uma força física considerável e bastante leves, elevado amortecimento de vibrações, alta tenacidade, elevada estabilidade dimensional, baixo abrasão, elevada condutividade elétrica, excelente absorção dos raios x, boa resistência à fadiga, excelente resistência química e elevada resistência à corrosão [9].

2.3 Evolução dos materiais reforçados com fibra de carbono

Os plásticos reforçados com fibra contínua atraíram muita atenção, uma vez que os componentes fabricados não eram capazes de alcançar as expectativas que se tinham criado relativamente às propriedades das fibras, bem como das suas matrizes [10].

No início dos anos 70, começaram por ser muito utilizados os tratamentos de superfície, com o intuito de aumentar a resistência à tração longitudinal dos plásticos reforçados com fibras, visto que não usavam todo o potencial que as fibras proporcionavam, sendo esta a razão da utilização dos tratamentos de superfície [10].

As CF apresentam um comportamento fraco de ligação nas matrizes poliméricas, daí ser essencial recorrer a tratamentos de superfície. Os tratamentos de superfície efetuados garantem a existência de grupos funcionais químicos nas superfícies das fibras, fazendo aumentar a atração entre as fibras e a matriz, o que faz com que haja uma ligação interfacial maior [11].

Nos últimos anos, existiu uma grande evolução das técnicas de fabrico destes componentes, especialmente no que toca à força e uniformidades das fibras de alto módulo, fabricadas a partir da resina epóxida [10].

Com o avanço da tecnologia e com o desenvolvimento de diferentes metodologias para a conceção de sistemas compósitos reforçados com fibras os materiais compósitos têm vindo a ser muito estudados e desenvolvidos em diversas indústrias como a automóvel, naval, aeroespacial, elétrica e militar [5].

Foram feitos diversos testes de forma a purificar ao máximo as matérias-primas, mas as propriedades transversais dos plásticos reforçados com fibra de carbono foram diminuindo, assim a maioria dos materiais compósitos que foram fabricados com múltiplas camadas apresentavam fissuras transversais internas. Realizaram-se estudos como forma de entender se este efeito resulta de alguma propriedade intrínseca na estrutura da fibra ou da matriz, ou se existia alguma ligação de interface que podia não estar completamente otimizada [5].

2.4 Propriedades dos compósitos de fibras de carbono

Os compósitos de fibra de carbono com matriz de resina epóxida, apresentam uma interface entre estas duas fases, ou seja, a ligação química e física existente entre a resina e a superfície da fibra. Dados os diferentes coeficientes de expansão térmica, as fibras sofrem diversas forças de tração, bem como diversas tensões diferenciais de expansão que acontecem quando a resina contrai mais do que a respetiva fibra, sendo que as fibras também sofrem tensões de contração face à polimerização da matriz [10].

A rigidez das CF vai aumentando na direção axial, enquanto a tensão aumenta. À medida que a resina epóxida passa para o domínio plástico esta sofre uma diminuição da sua rigidez, o que faz com que esta apresente um comportamento viscoelástico [10].

De referir que, as propriedades das CF em compósitos têm poucas variações em relação à temperatura, mas o módulo de elasticidade das fibras varia com a deformação [10].

Face às excelentes propriedades dos compósitos de fibras de carbono em relação à temperatura, estes conseguem manter as suas propriedades desde temperaturas criogénicas até temperaturas mais elevadas, mas também são tidos em conta como materiais estruturais de baixo peso e elevada rigidez quando combinados com polímeros [12].

Os compósitos de matriz epóxida reforçados com CF, são dos materiais mais utilizados, face às suas excelentes propriedades de resistência e densidade. Estes compósitos apresentam ótimas propriedades mecânicas e tribológicas, boa resistência à corrosão, boa resistência química e uma excelente estabilidade dimensional. Ainda assim, a tenacidade, a rigidez e a dureza da matriz, assim como o plano de corte da matriz, podem ser melhorados [12].

Foi a partir das CF, que se começou a utilizar em engenharia estrutural os polímeros, uma vez que as propriedades destes materiais eram superiores às propriedades dos metais convencionais utilizados, e eram capazes de satisfazer as necessidades requeridas, combinando o baixo peso com a elevada rigidez, sendo estas as propriedades mais desejadas na indústria aeroespacial, indústria onde começaram a ser utilizados os polímeros [13].

Os materiais compósitos baseados a partir de polímeros privilegiam múltiplas funcionalidades, face à combinação sinérgica de cargas funcionais com os polímeros altamente processáveis, o que faz aumentar as suas áreas de aplicação. Estes tipos de materiais empregues em áreas estruturais, podem ser classificados como sistemas de elevado desempenho, uma vez que são processados a partir de materiais sintéticos, oferecendo elevadas taxas de resistência sendo este tipo de polímeros reforçados com CF muito utilizados em aplicações elétricas e militares [5].

Foram feitos vários progressos no que toca aos comportamentos mecânicos do reforço da fibra após a colocação da matriz polimérica, uma vez que este passou a apresentar um baixo peso, elevada relação resistência-peso, excelente estabilidade dimensional aumentada e ainda um baixo custo de manutenção [5].

A carga aplicada nestes materiais leva a uma transferência de carga entre a matriz e as fibras de reforço, afetando também a ligação de interface entre a matriz e a fibra, bem como o alinhamento relativo e a natureza da fibra onde são definidos os comportamentos gerais do material. Tendo em conta a aplicação final destes materiais, as fibras podem ser alinhadas continuamente (numa ou em duas direções) ou aleatoriamente, assim como a seleção do tipo de matriz [5].

Os polímeros reforçados com CF são sujeitos a inúmeros tratamentos térmicos durante a aplicação de tensão. As propriedades destes materiais compósitos que vão desde a elevada resistência específica, elevada rigidez específica e boa resistência à corrosão, fazem com que sejam muito utilizados em turbinas eólicas e na indústria aeroespacial [11].

As propriedades mecânicas dos compósitos de matriz epóxida reforçados com CF não são afetadas apenas e só pelas características inerentes às fibras e à resina, são também igualmente afetadas pela interação interfacial entre as fibras e a resina. Assim a interface entre a fibra e a resina é um elemento-chave no desempenho futuro do compósito [14].

Os compósitos estruturais são propícios à propagação de fissuras ao longo das interfaces interlaminares, sendo a delaminação o acontecimento que mais ocorre. A delaminação está ligada a uma grande perda de rigidez e resistência longitudinal, o que resulta na falha final da estrutura. De forma a aumentar a vida útil dos compósitos, é necessário aumentar a sua resistência à delaminação [15].

As propriedades mecânicas destes materiais compósitos são garantidas a partir da qualidade da adesão interfacial entre a matriz polimérica e a CF [11].

Como foi referido, a elevada resistência e rigidez específica faz dos compósitos reforçados com CF`s um dos materiais mais utilizados em diversas indústrias. Mas a fraca aderência interfacial que existe entre a CF e a matriz polimérica, faz com que haja rutura do material quando sujeito a cargas de flexão. Este acontecimento pode ser explicado devido à superfície inerte e baixa energia superficial das fibras de carbono, que não interage fortemente com a resina polimérica, o que leva a uma má aderência entre a fibra e a matriz, para se tentar aumentar essa resistência interfacial passa por produzir e testar nanotubos de carbono (CNT`s) e de seguida aumentar a área de superfície da ligação, o que pode melhorar a transferência de carga entre a fibra e a matriz [16], [17].

Quando é removida a camada dimensionada ou é feita a dessalinização da CF, a superfície desta fica apta para a realização de um tratamento de superfície. O tratamento de superfície realizado a partir da oxidação, suscita o aparecimento dos grupos carbonil e hidroxil, o que faz aumentar as interações interfaciais com a resina epóxida. Este tratamento de superfície fez com que a interação fibra e resina fosse reforçada com o aumento de grupos funcionais reativos sobre a fibra de carbono, o que faz com que a resistência à flexão seja maior [16].

Os compósitos de CF`s, que sofreram tratamento de superfície apresentam cerca de 50% de melhorias no que diz respeito à tensão de corte interlaminar, tendo em conta os compósitos

de CF's não tratados à superfície. Os compósitos tratados à superfície, apresentam também uma melhoria da rugosidade superficial, aumentando assim a interligação mecânica entre a fibra e a matriz [16].

Os compósitos com fibras tratadas com recurso ao plasma, apresentam propriedades mais fracas dos que os compósitos com fibras tratadas a partir da oxidação do ácido nítrico. As fibras tratadas a partir da oxidação do ácido nítrico apresentam um aumento da resistência à flexão, um aumento da resistência de corte e um aumento da resistência ao corte interlaminar. Este tratamento realizado a partir do ácido nítrico, aumenta também a rugosidade da superfície na forma de fendas, com a criação de um novo grupo químico reativo, o que faz aumentar a aderência fibra-matriz [16].

As matrizes poliméricas podem ser classificadas como resinas termoendurecíveis, e termoplásticas. As resinas termoendurecíveis são as mais utilizadas nestes polímeros, são resinas curadas pela ação de uma fonte de calor ou de uma reação química. Uma vez que, estas resinas passam que por um processo de cura não podem voltar a ser reaquecidas ou derretidas na sua forma líquida, as resinas epóxicas são um tipo de resinas termoendurecíveis [11].

Nos compósitos reforçados com fibras, estas suportam a maior parte das cargas, onde a matriz serve como agente de transferência destas mesmas cargas. As matrizes podem ser de cerâmicas, metálicas ou poliméricas, assim como as fibras [11].

Pode-se dizer que, os compósitos de matriz polimérica reforçada com CF's possuem um elevado desempenho, mas possuem desvantagens no que toca às propriedades dominadas pela matriz, o que limita as suas áreas de aplicação. Ainda assim, estes materiais fazem com que existam cada vez mais estudos, para que sejam obtidas grandes melhorias de conceção e que as suas áreas de aplicação sejam aumentadas significativamente, como por exemplo em componentes estruturais, componentes biomédicos e componentes para automóveis [12].

2.5 Comportamento mecânico dos compósitos de fibras de carbono

No setor aeroespacial, assim como no setor automóvel, as estruturas compostas durante o seu tempo de vida útil, são sujeitas a diversas cargas de fadiga. De forma a otimizar o desempenho e aumentar a vida útil destes materiais quando sujeitos a diversas cargas de fadiga,

é importante compreender o comportamento do início de propagação de danos, quando atua uma carga dinâmica sob o material [18].

As propriedades mecânicas dos materiais de polímeros reforçados com fibra, são determinadas principalmente pelas propriedades das fibras, no que toca às propriedades de fadiga dos materiais estão variam bastante conforme a matriz que é utilizada [19].

Os materiais compósitos demonstram melhores propriedades de fadiga quando são fabricados a partir de matrizes onde são usadas resinas endurecidas, assim quando é otimizada a resistência da resina, é melhorada a resistência à fadiga dos materiais [19].

Os compósitos de matriz polimérica, quando submetidos a uma carga de fadiga à tração, têm tendência a dividir-se ao longo da direção da fibra (fissuração transversal) [19].

O início e o crescimento dos mecanismos de dano dos compósitos são estimulados por campos de deformações locais, que dependem da sequência de empilhamento, bem como do carregamento a que são sujeitos [18].

A falha de matriz, normalmente aparece em laminados unidirecionais quando submetidos a cargas transversais, ou em laminados multidirecionais sujeitos ao impacto das cargas. Quando o plano é sujeito a diversos vetores de tensão é suscetível que esta falha ocorra, para casos uniaxiais existe uma tensão secundária, perpendicular à tensão nominal responsável pela falha. Esta tensão secundária, que é paralela ao plano de falha original, pode atrasar ligeiramente o aparecimento da falha [20].

A falha *unfolding* está associada a laminados altamente curvos, normalmente é combinada com a delaminação interna, onde são observadas fissuras interlaminares, uma vez que este tipo de laminados é sujeito a elevadas cargas fletoras. Esta falha ocorre quando a fibra não está bem envolvida na matriz. A falha *unfolding* está assim associada ao aparecimento de tensões normais interlaminares provocadas pela curvatura dos materiais e que podem atingir altos valores em comparação com os baixos valores à tração interlaminar [19], [21].

Face à natureza anisotrópica, os compósitos apresentam estados de tensão multiaxiais internos complexos. As fissuras localizadas das telas crescem ao longo da direção das fibras das suas telas respetivas [18].

Com o aumentar da densidade de fissuração em cada tela, os campos de tensões locais à volta das fissuras situados nas telas adjacentes, começam a interagir o que faz com que haja concentrações de tensões adicionais, que fazem aumentar o crescimento da fissura e consequente diminuição das propriedades do material [18].

Quando carregados uniaxialmente estes materiais têm tendência a formar fissuras transversais, que vão crescendo conforme o carregamento, enquanto atravessam a espessura da camada, estendem-se ao longo da direção da fibra [18].

A redução da rigidez dos materiais é um dos indicadores de dano durante um carregamento de fadiga, que pode ser dividido em três regiões:

- (I)- início de propagação múltiplas fissuras;
- (II) – crescimento lento e estável das fissuras ao longo da interface fibra-matriz;
- (III) – fratura das fibras numa vida útil curta antes da falha [19].

Nos últimos anos, tem-se vindo a efetuar diversos estudos como forma de entender o comportamento destes materiais quando sujeitos a estados de tensão multiaxiais, uma vez que os ensaios uniaxiais não são muito conclusivos quanto ao comportamento dos materiais, quando sujeitos a cargas multiaxiais durante o tempo de vida útil [18].

Assim, estudos recentes onde foram testados mecanismos de dano e falha de tubos de tração e torção de compósitos de carbono submetidos a cargas biaxiais, revelaram que quando submetidos a baixas taxas de biaxilidade, a falha fica distribuída ao longo de todo o comprimento do tubo, sendo os mecanismos de dano da matriz subjugados, o que faz com que haja uma elevada retração das fibras na falha por fadiga. Quando submetidos a elevadas taxas de biaxilidade os tubos apresentaram uma falha localizada com mecanismos de falha da fibra subjugados, onde a falha por fadiga ocorreu face à rutura da fibra. Na figura 3, pode-se observar a delaminação das fibras quando sujeitas a cargas elevadas [18].

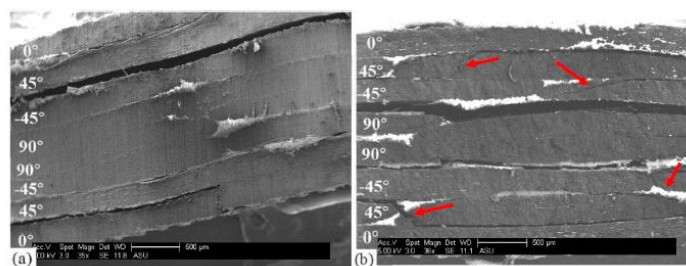


Figura 3 - a) delaminação severa a 30% da vida de fadiga; b) fratura e delaminação severa a 60% da vida de fadiga [18]

Um outro estudo revelou que, ao serem efetuados este tipos de ensaios em corpos tubulares tração-torção, podem existir variações significativas na espessura e na fração de volume das fibras, o que leva a que estes corpos venham a apresentar um comportamento de fadiga multiaxial diferente dos típicos corpos de prova planos ou ligeiramente encurvados, pelo que se torna mais difícil de analisar a fadiga multiaxial em materiais compósitos como no setor aeroespacial e automóvel [18].

Quando são efetuados testes transversais de compressão-tração, não é necessário o fabrico de provetes especiais, uma vez que a tração é aplicada regularmente e a compressão é submetida na parte lateral dos provetes. Quando se tem duas cargas longitudinais de tração, os provetes já têm de ser cruciformes de forma a poder ser introduzida a carga ao longo dos eixos perpendiculares [20].

Sempre que se quer testar um provete sujeito a cargas biaxiais transversais tração-tração, tem de se desenvolver um estado uniforme de tensões biaxiais no provete, suscetível a falhas; proceder à maximização da área sujeita nominalmente a tensões biaxiais; minimizar as zonas de possíveis concentrações de tensões derivadas da geometria; ocorrência de falha na zona sujeita a um estado de tensões biaxiais [20].

Na figura 4, é possível observar quatro exemplos de provetes testados sobre as condições de cargas transversais, onde cada um deles possui diferentes raios de curvatura e espessuras [20].

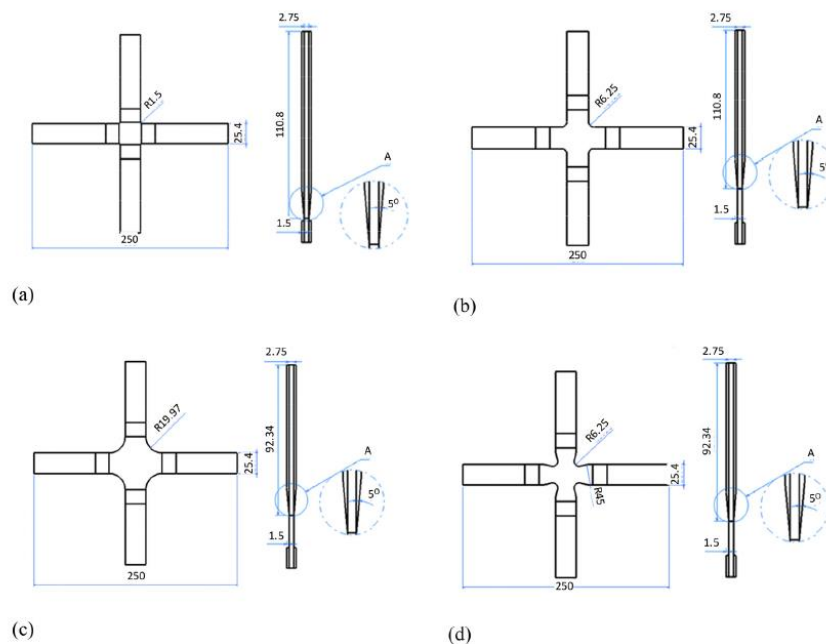


Figura 4 - Provetes testados sob cargas biaxiais [20]

O processo de fabrico de provetes cruciformes especificamente projetados para testes transversais à tração é uma tarefa difícil. A posição específica das fibras (perpendicular ao plano do provete), as dimensões do provete e o valor reduzido da resistência à tração transversal complicam fortemente o processo de fabrico e aumentam consideravelmente os custos. Onde o risco de existir fratura é bastante elevado [20].

Os provetes foram fabricados com algumas diferenças geométricas com o intuito de reduzir as concentrações de tensões nas arestas livres, e uniformizar na zona central do provete as distribuições de tensões [20].

Os compósitos de polímeros reforçados com fibra curta de carbono também têm ganho especial atenção, face ao seu baixo custo, possuem excelentes capacidades de produzir produtos com geometrias complexas e têm propriedades mecânicas isotrópicas [22].

Neste tipo de materiais é observado um amolecimento cíclico contínuo, que resulta do aparecimento e crescimento de fissuras na matriz, nas extremidades da fibra e na interface fibra-matriz. O fator que determina o aumento do desempenho destes materiais quando submetidos a condições de fadiga é o comprimento e o volume das fibras, uma vez que quanto maior for o comprimento e volume das fibras, maior é a resistência à fadiga, bem como a resistência a cargas de tração [22].

A presença de alguns poros nestas fibras reduz significativamente o ciclo de vida do material, assim a dispersão e a porosidade das fibras têm uma grande influência na vida em fadiga destes materiais [22].

2.6 Outros reforços de Carbono

Os materiais de carbono, como a grafite, o grafeno e os nanotubos de carbono, são excelentes possibilidades de reforço para o processo de produção de componentes de engenharia multifuncionais, uma vez que conseguem combinar um alto desempenho mecânico, menor atrito, um melhor comportamento de desgaste e excelentes condutividades elétricas e térmicas. Futuramente estes materiais vão ser ótimas soluções para a substituição de componentes metálicos [12].

2.6.1 Grafite

A adição de quantidades progressivas de grafite na matriz, permite reduzir a rugosidade superficial dos materiais, o que resulta em superfícies de resina mais lisas. Já a resina pura depois do polimento apresenta bastantes ranhuras irregulares. Na figura 5 é possível visualizar essas diferenças [12].

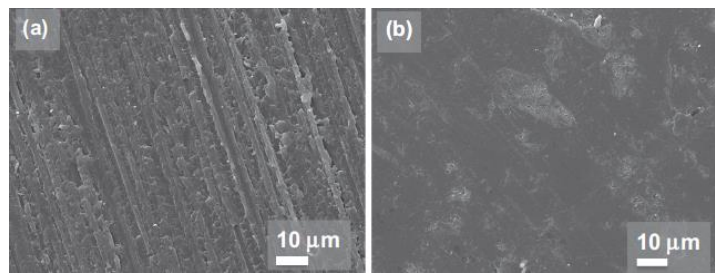


Figura 5 - a) Superfície da resina pura; b) superfície da resina após a adição de grafite [12]

Esta consequente adição de grafite nos compósitos faz com que existam alterações microestruturais que se vão refletir nas propriedades mecânicas dos mesmos. Estes compósitos apresentam um modelo de *Young* maior do que um compósito com matriz epóxida pura, e vai aumentando à medida que a percentagem de grafite é maior. A resistência do material também é maior, à medida que se aumenta a percentagem de grafite [12].

À medida que aumenta o teor de grafite o coeficiente de atrito diminui e o desgaste diminui também. Quanto mais dispersa a grafite estiver na matriz mais limitada é a deformação da mesma, assim a quantidade de desgaste por fadiga consegue ser reduzida, como resultado da ação lubrificante da grafite. O módulo de corte e o módulo de corte de flexão também aumentam com o aumento de grafite [12].

2.6.2 Grafeno

O grafeno consiste numa monocamada plana (2D) de átomos de carbono, arranjados entre si numa rede hexagonal, com a espessura de um átomo [23].

Na rede hexagonal existem átomos hibridizados na forma sp^2 , o que resulta num eletrão livre por cada átomo de carbono na orbital p, esta particularidade da estrutura do grafeno torna possível a sua utilização em várias aplicações. Cada ligação entre átomos tem um comprimento de 0.142 nm [23].

Durante muitos anos o grafeno foi visto apenas como fulereno, nanotubos e grafite construídos de forma diferente pela mesma estrutura hexagonal de carbonos sp^2 . Os fulerenos e os nanotubos podem ser visualizados mentalmente como uma camada de grafeno envolvida numa forma esférica e cilíndrica, respetivamente, e a grafite como uma pilha de folhas alternadas deste alternadas, como se pode verificar visualizar na figura 6 [23].

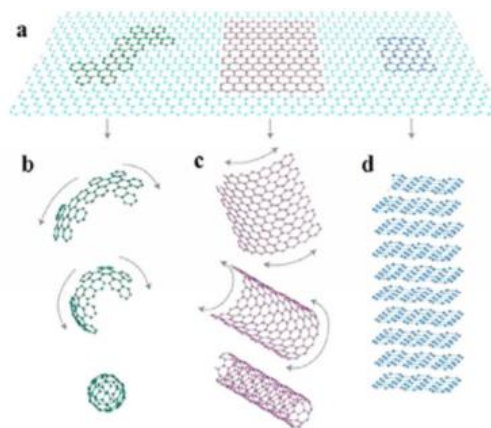


Figura 6 - Alótropos do carbono: a) 2-D grafeno, b) 0-D fulereno, c) 1-D nanotubo carbono, d) 3-D grafite [23]

Os elétrons num sólido são restritos a certas faixas, ou bandas, de energia. Num isolante ou num semicondutor, o elétron ligado ao átomo só é libertado quando recebe energia suficiente para saltar o “*gap*”, mas quando falamos no grafeno esse “*gap*” é infinitesimal. É por esta razão que os elétrons do grafeno se deslocam muito fácil e rapidamente [23].

As principais propriedades do grafeno são a elevada condutividade elétrica; elevada condutividade térmica; elevada resistência mecânica; bastante leve; elevada flexibilidade e maleabilidade; elevada área superficial; elevada rigidez; espessura muito fina; elevada transparência e elevada impermeabilidade [23].

As nanoplacas de grafeno são nanocristais de grafite semelhantes a plaquetas de camadas multigráficas. Uma área superficial específica alta entre um polímero e um *nanofiller* maximiza a transferência de tensão da matriz do polímero para o *nanofiller* [24].

Os compósitos reforçados com CF's revestidos com nanoplacas de grafeno, apresentam um aumento significativo da resistência à flexão, da resistência ao corte plano e ainda na resistência à compressão [16].

Ainda assim, como as nanoplacas de grafeno possuem grandes forças de Van der Waals na sua área de superfície e fortes interações entre as nanopartículas planares, as suas aplicações ainda são um pouco limitadas [24].

2.6.3 Nanotubos de Carbono

2.6.3.1 Produção Nanotubos de Carbono

Os nanotubos de carbono (CNT) abrangem diversas áreas, desde o reforço estrutural de fibras até a dispositivos fotoelétricos [2].

Os CNT são um material que apresenta como sua estrutura tubos ocos. São materiais que possuem baixa densidade e propriedades mecânicas intrinsecamente superiores em comparação aos materiais convencionais, elevada resistência à tração, elevada condutividade térmica e elevada condutividade elétrica, quando estão à temperatura ambiente os CNT são fortes candidatos ao fabrico de nanocompósitos poliméricos de alto desempenho, apresentam distribuições de tamanhos único, áreas de superfície altamente especificadas e são capazes de formar um grupo carboxílico na sua superfície [15], [25], [26].

De forma a melhorar também as propriedades mecânicas dos compósitos, têm sido introduzidos CNT's nestes materiais, face às suas melhores propriedades mecânicas. Após a introdução dos CNT os compósitos apresentam melhorias no que diz respeito às propriedades interfaciais da matriz da fibra, resistência ao corte interfacial, tenacidade à fratura interlaminar e temperatura de transição vítrea. [14].

Os CNT são formados por uma única folha de grafeno ou em multicamadas envolvidas à volta de um eixo central imaginário, com determinado ângulo espiral. É a estrutura dos CNT que lhes conferem as suas propriedades mecânicas e elétricas especiais [27].

Os CNT são considerados aditivos eficazes para aplicação em polímeros, uma vez que, permitem melhorar as propriedades mecânicas e elétricas dos polímeros, com características multifuncionais únicas [26], [28].

Uma melhoria da dispersão dos CNT, e uma otimização da interação interfacial, tornam-se os principais obstáculos para se obter nanocompósitos com um elevado desempenho [27].

Para se obterem melhores propriedades interfaciais entre a fibra e a resina, têm surgido diversos estudos em que os CNT são ligados diretamente a feixes de fibras e tecidos [2], [14], [29].

São utilizados diferentes métodos para a produção de CNT's:

- **Fiação húmida a partir de fases líquido-cristalinas alotrópicas de CNT's ou dispersões poliméricas:** a produção de CNT's por este método apresenta um alto grau de pureza e alinhamento e um acondicionamento relativamente denso de CNT's com pouca porosidade. Para este método a densidade descrita pelo autor é de $1,58\text{g/cm}^3$). Este método permite ter um controlo eficaz do diâmetro e da proporção de CNT's que se querem obter, uma vez que as fibras de CNT podem ser tecidas através de CNT's disponíveis no mercado, desde que as suas propriedades tenham alta pureza e cristalinidade. Quando é requerido que o material possua alta pureza, torna de imediato o CNT com um custo mais

elevado, por se tratar de um processo mais cuidado, logo a sua utilização em grandes quantidades acaba por ser limitada face a esta condicionante. Quando os CNT's são dispersos em solventes mais convencionais ou em soluções poliméricas também fiadas a húmido em fibras, estas fibras apresentam um menor grau de alinhamento, ou seja, as suas propriedades são reduzidas. Porém existe uma grande potencial de desenvolvimento [2].

- **Fiação a seco de matrizes de CNT verticais:** este método consiste em pré sintetizar matrizes altamente alinhadas, e que foram produzidas num substrato plano, e de seguida surgiu o enrolamento dos CNT's a partir da parede lateral da matriz, maximizando a interação das ligações Van der Waals entre os CNT's. O material fiado forma uma rede de CNT's que é densificada a partir de torção, ou por deposição de uma camada fina num substrato. Quanto maior for a otimização extensiva da fase de síntese, maior é o controlo sobre o diâmetro e comprimento dos CNT's, e apresentam também um baixo teor de impurezas nas fibras resultantes [2].
- **Crescimento dos nanotubos de carbono na fibra por deposição química em fase de vapor (CVD):** este método também é conhecido como o método de fiação direta, neste processo os hidrocarbonetos são formados a partir de catalisadores metálicos (entre os mais comuns estão o ferro, o níquel e o cobalto) a temperaturas que variam entre os 500 e os 1000 °C. A estas temperaturas os hidrocarbonetos deterioram-se, produzindo assim os CNT's quando a solução arrefece. Estas moléculas atuam como um centro de nucleação para a formação de novas partículas. Os CNT's gerados podem ser purificados a partir de um tratamento ácido. Neste processo a superfície da fibra de carbono atua como substrato que depois vais reagir e decompor-se, formando-se assim o CNT. Na figura 7, pode-se observar o processo descrito [1], [2], [29].

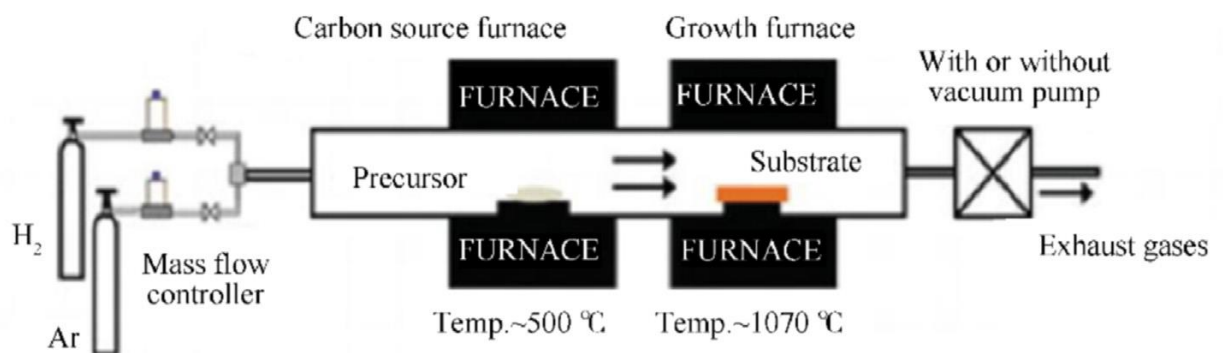


Figura 7 -Método de Produção CVD [1]

De notar que é importante que a preparação do substrato e os métodos utilizados para a deposição do catalisador são vitais para um bom crescimento dos CNT. Na figura 8 pode-se constatar o processo de crescimento dos CNT [29].

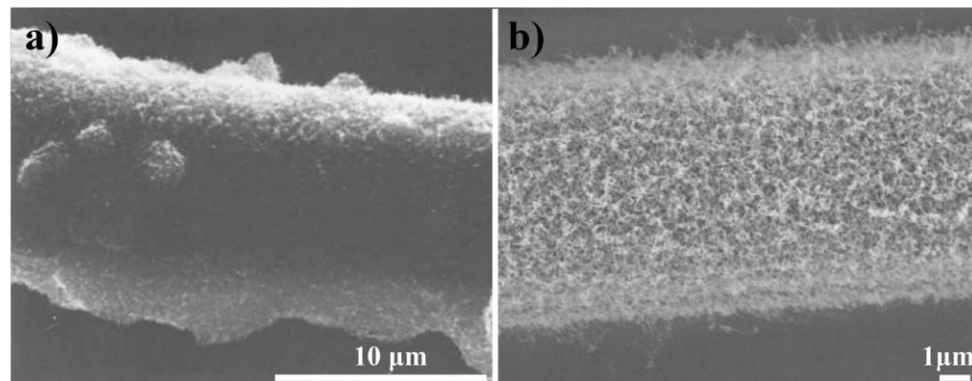


Figura 8 - Processo de crescimento dos CNT a) crescimento dos filamentos de carbono e b) crescimento dos CNT [29]

Na figura 9 é possível ver o comprimento de CNT's a várias escalas.

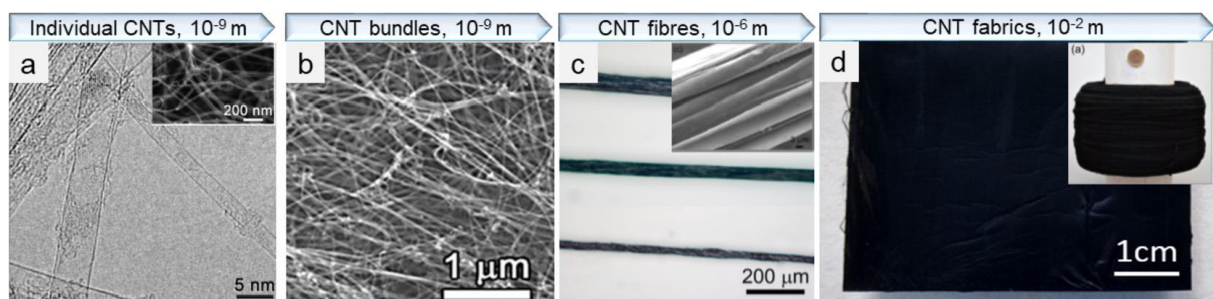


Figura 9 - Diversos CNT: a) CNT's agrupados em feixes; b) Microscopia de um conjunto de milhares de grupos de CNT; c) Fibras CNT contínuas produzidas por CVD e densificadas com acetona; d) Tecido CNT em macroescala produzido com milhares de fibras CNT [2]

Ainda assim, o processo de crescimento dos CNT na fibra por deposição química em fase de vapor (CVD), pode danificar a superfície da fibra, e assim os CNT formados estão sujeitos a desaparecer durante a produção do material compósito. Existe uma fraca adesão interfacial entre o polímero e o composto híbrido fibra/nanotubo, sendo por isso afetada a transferência de tensões, o que limita o reforço do composto, o que torna a nível de engenharia um processo muito complexo. Uma outra desvantagem é o elevado teor de impurezas em comparação com os outros métodos de fiação. Assim, para este método é necessária uma otimização rigorosa dos parâmetros de síntese e purificação [2], [28].

Apesar de ser um método que apresenta uma baixa produção para a utilização laboratorial, é um método bastante indicado para uma produção em massa, uma vez que consegue oferecer uma fiação contínua e rápida de CNT's com elevada proporção [2].

- **Deposição eletroforética dos nanotubos de carbono na superfície da fibra (EPD):** A EPD é obtida a partir da coagulação de partículas, o que faz com que as partículas carregadas depositadas sejam dispersas numa suspensão líquida em direção à superfície do eletrodo de carga oposta sob um campo elétrico aplicado. Durante este processo, o movimento eletroforético da partícula carregada vai provocar um sobre carregamento da partícula, que conseqüentemente vai causar a formação do depósito mais rígida e homogênea na superfície do eletrodo [29].

O processo EPD envolve dois tipos de eletrodos (contra eletrodos e eletrodos de trabalho) e uma fonte de alimentação que fornece o campo elétrico necessário aos eletrodos. Este processo pode ser dividido em duas etapas, na primeira etapa ocorre o processo de eletroforese, onde o campo elétrico fornecido força as partículas que estão suspensas no líquido a deslocarem-se na direção do eletrodo, que é seguida pela segunda etapa do processo de eletroforese, ou seja, o processo de deposição das partículas na superfície do eletrodo [29].

Existe assim neste processo EPD a parte catódica, onde as partículas carregadas positivamente são depositadas no eletrodo negativo (cátodo), e a parte anódica onde as partículas negativas são depositadas no eletrodo positivo (ânodo). Estes dois métodos são influenciados pelo pH da solução ou pela carga superficial da partícula. O processo EPD observa-se na figura 10 [29].

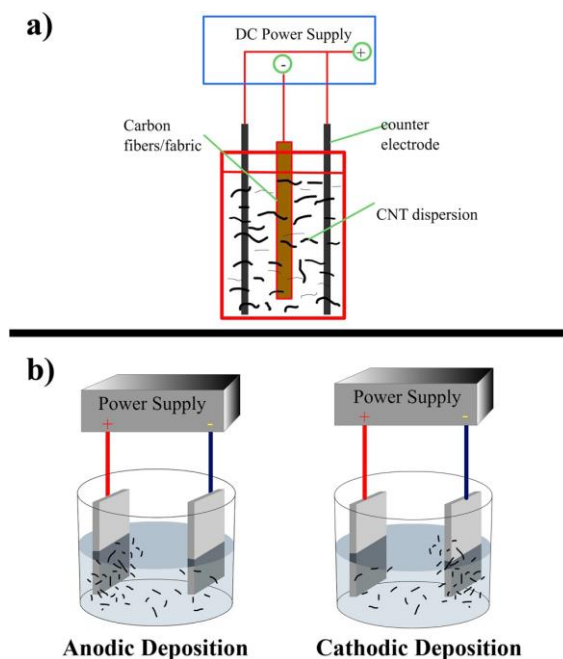


Figura 10 - Processo EPD a) Preparação do processo e b) Tipos de EPD [29]

- **Método de deposição por eletropulverização (ESD):** neste método a suspensão/líquido é convertida num aerossol fino através do uso de um campo elétrico que é direcionado para a superfície do alvo, este método é adequado para preparar camadas micrométricas ou mais finas de spray. Este método é considerado uma das técnicas de manipulação mais promissoras que pode ser usada para a produção de CNT's em larga escala, pois apresentam uma boa relação custo-benefício e capacidade de oferecer um revestimento mais homogêneo. Na figura 11 observa-se o processo de uma forma esquematizada [29].

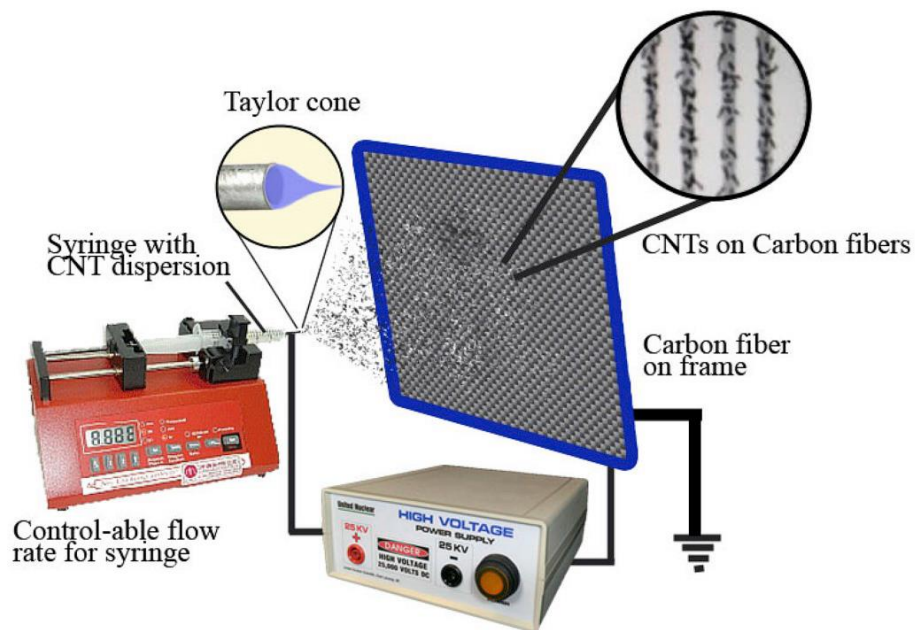


Figura 11 - Processo ESD [29]

Pesquisas recentes utilizam a radiação gama para a modificação de polímeros, esta já é uma técnica aplicada em diversos processos industriais, uma vez que é possível melhorar a estabilidade térmica e as propriedades mecânicas. Trata-se de um processo limpo, que requer menos energia e permite uma maior velocidade de processamento, para além de se realizar a uma temperatura ambiente. A radiação gama é uma forte radiação ionizante que pode reorganizar as estruturas internas dos materiais e causa a formação de ligações entre os diferentes materiais apresentados no compósito, o que faz com que haja uma melhoria significativa entre os diferentes componentes do compósito. Para o caso dos CNT a radiação gama melhora as propriedades mecânicas até a um certo patamar, mas a partir desse patamar as propriedades começam a estabilizar e até a diminuir [26].

Uma das desvantagens é a baixa dispersão que os CNT têm com as matrizes poliméricas. Quando os compósitos poliméricos são preparados a partir de fundição, o processo de cura é atrasado face à natureza da eliminação de radicais livres da nanocarga de carbono. Pode-se referir também como desvantagem o grande esforço que é necessário para quebrar os feixes e se obter CNT's individuais com boas propriedades [30].

2.6.3.2 Propriedades Mecânicas CNT

No que diz respeito às propriedades mecânicas dos CNT, os autores recorreram à unidade GPa/SG (GPa/Peso específico). A resistência à tração específica é aproximadamente 70 GPa/SG. O melhor módulo de elasticidade alcançado foi de $160 \text{ N} \pm 40 \text{ GPa/SG}$ e foi alcançado para as fibras CNT sintetizadas a partir de soluções de cristal líquido (LC). Em valores específicos as fibras CNT já superam o aço usado comercialmente, as ligas de alumínio, as fibras de vidro, bem com os materiais meta-aramida. Muitas fibras de CNT estão já a atingir 2 GPa/SG e 150 GPa/SG de rigidez [2].

Na figura 12 é possível observar os módulos de elasticidade e a resistência à tração das fibras CNT produzidas a partir de diferentes métodos.

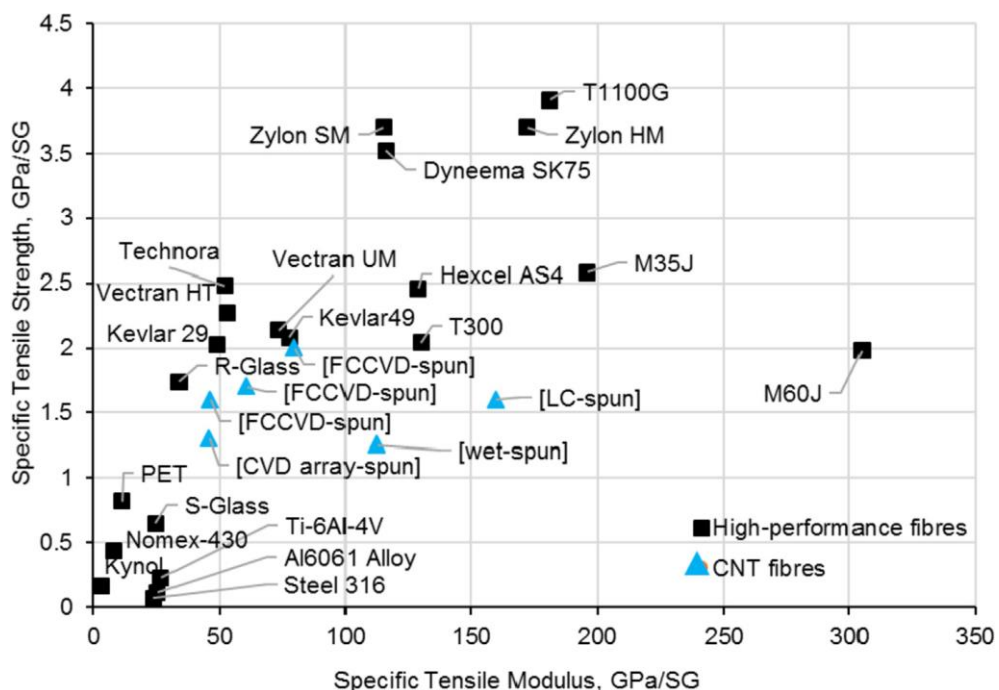


Figura 12 - Comparação das propriedades mecânicas de diferentes métodos de produção de CNT [2]

As fibras de CNT apresentam uma alta energia de fratura em tração. A sua alta tenacidade facilita o processo de fabricação e processamento das fibras. Os valores de energia de fratura normalizados por alta densidade andam na faixa de 50/100 J/g, que são desejáveis para as aplicações onde a absorção de energia e a tolerância a danos são essenciais [2].

2.6.3.3 Estrutura Molecular dos CNT

As fibras de CNT apresentam uma natureza multifacetada em relação à sua estrutura e propriedades. A maioria das fibras CNT apresentam uma alta mobilidade de carga e condutividade térmica que são incomuns em fibras de alto desempenho [2].

Os polímeros de alto desempenho apresentam número de ligações químicas e físicas na sua estrutura molecular suficientes para a transferência da tensão efetiva ao longo do eixo da fibra, enquanto a rigidez é comandada pelo grau em que as ligações químicas estão alinhadas. Fazendo a comparação dos polímeros sintéticos usados nas fibras os CNT podem ser considerados moléculas altamente conjugadas semelhantes aos polímeros de haste rígida. Na figura 13 é possível observar os exemplos das estruturas moleculares [2].

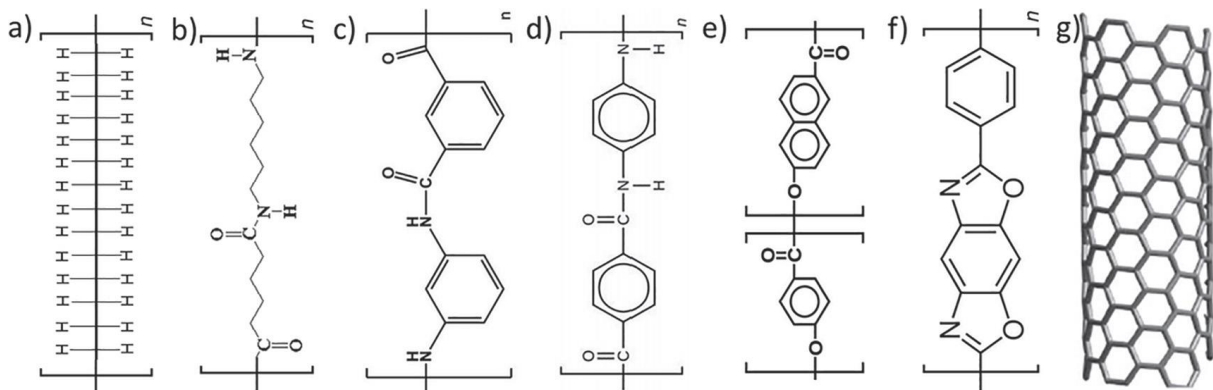


Figura 13 - Exemplos de estruturas moleculares: a) polietileno; b) nylon 6; c) meta-aramida (Nomex); d) para-aramida (Kevlar); e) poliéster (Vectran); f) Zylon; g) CNT de parede simples [2]

Antes de existir a estrutura molecular dos CNT pode ser caracterizada pela denominada equação quiral:

$$\hat{C}_h = n\bar{a}_1 + m\bar{a}_2 \quad (1)$$

onde, $\hat{C}_h$ é a combinação linear dos vetores da base da rede, $\bar{a}_1$ e $\bar{a}_2$ são os vetores da base da rede e n e m são os índices quirais, ou seja, são os inteiros positivos [31].

No processo de enrolamento da folha o átomo de grafeno A sobrepõe-se ao de carbono A' formando-se assim a estrutura do CNT, como se verifica na figura 14 [31].

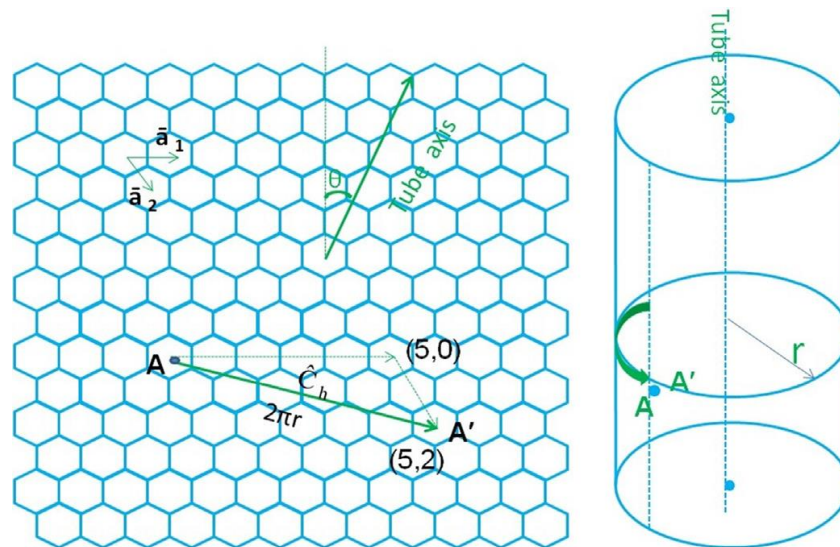


Figura 14 - Formação estrutural dos CNT [31]

Na figura 15 observa-se a diferença entre os CNT de parede simples e os CNT de parede múltipla.

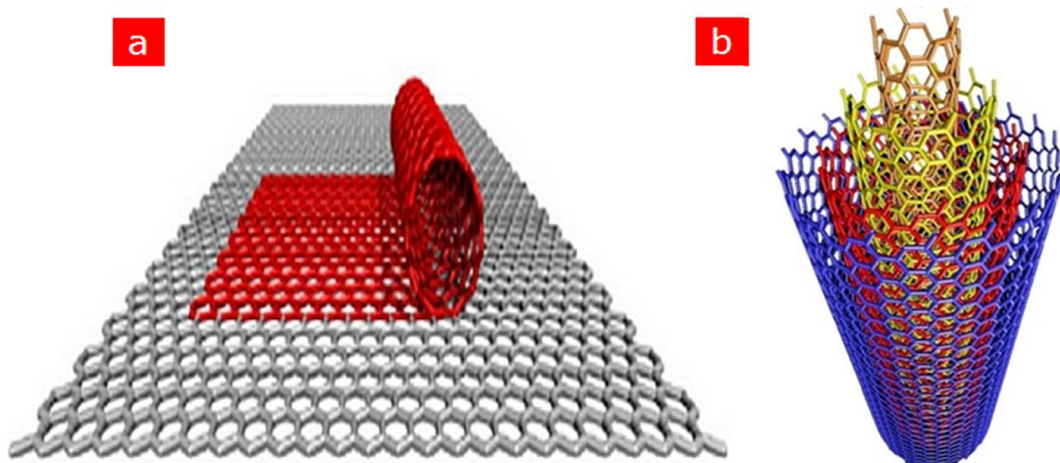


Figura 15 - a) CNT parede simples b) CNT de parede múltipla [31]

Os CNT's podem ser considerados como polímeros avançados, pois são caracterizados por uma estrutura molecular que consiste numa malha hexagonal repetida de átomos de carbono sp^2 hibridizados, enrolados em forma de cilindro. Os CNT possuem uma estabilidade térmica superior em relação aos polímeros de haste rígida, não possuem ponto de fusão ou temperatura de transição vítrea e são insolúveis na maioria dos solventes, mas podem ser processados em fibras a partir de soluções líquidas cristalinas em superácidos [2].

De notar que numa cadeia polimérica a quebra ocorre logo existe a separação de uma única ligação covalente, a estrutura molecular do CNT apresenta ligações covalentes em ambos os lados e direções, portanto, exige a separação de dez ou mais ligações para existir a rutura. A conjugação desta estrutura molecular torna os CNT estáveis, mesmo quando existem planos hexagonais com defeitos [2].

A maioria das fibras de alto desempenho, como é o caso das fibras CNT, apresentam uma tolerância a nós devido à natureza física da interação entre as moléculas adjacentes. Por exemplo, no caso das CF assim que existe um nó, ocorre logo a rutura das ligações. Quando ocorre um nó numa fibra CNT, este nó não causa danos aparentes, e quando é libertada a tensão de flexão provocada pelo nó, a fibra pode ser endireitada novamente com uma tensão axial muito pequena e preservando praticamente a 100% a resistência à tração [2].

Na figura 16 verifica-se através de SEM o quão a fibra CNT fica achatada quando existe um nó sem existir rutura.

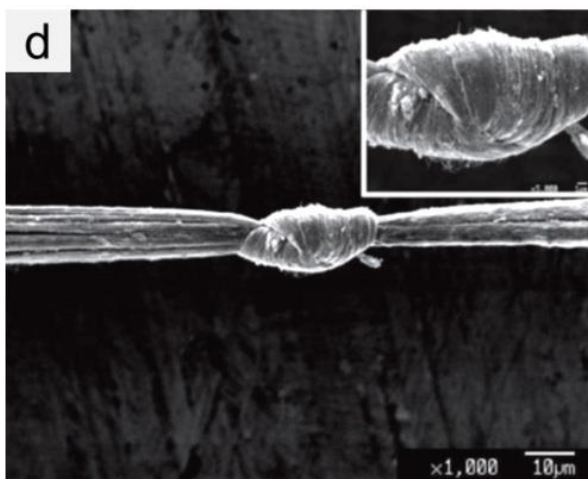


Figura 16 - Nó CNT [2]

Segundo o modelo de Staudinger existem três princípios constitutivos para se obterem fibras CNT com alta resistência e rigidez, são eles:

- 1- Alto peso molecular das cadeias longas, com poucos defeitos nas extremidades da cadeia.
- 2- Orientação perfeita das correntes no sentido axial.
- 3- Perfeito agrupamento lateral das correntes [2].

Uma das características comuns das fibras CNT é o grau de conjugação ou aromaticidade dos CNT, é independente do grau de ordem dos seus conjuntos supramoleculares, ou seja, os feixes cristalinos [2].

2.6.3.4 Compósitos com a adição de CNT nas matrizes

O procedimento geral para a produção de compósitos com fibras CNT começa pela infiltração de pré-formas de CNT numa matriz polimérica, este processo pode ser feito a partir de diferentes métodos como moldar uma resina líquida, que tenha sofrido desgaseificação, a vácuo sobre pré-formas, pulverização ou imersão de pré-formas nas soluções poliméricas diluídas. Consegue-se uma fácil infiltração do polímero em pré formas de CNT ao usar soluções epóxi de baixa viscosidade com várias concentrações de acetona, depois segue-se o processo de secagem em estufa a vácuo para o solvente ser removido. São então infiltradas as fibras e mantas de CNT nos moldes personalizados, que podem ser de silicone, metal e folhas de Teflon. Em certos casos é feita uma nova desgaseificação a vácuo ou uma cura a vácuo, para garantir a compatibilidade do compósito [2].

Estudos realizados com híbridos CF/CNT confirmam que as condições de cura na autoclave necessitam de ser otimizadas para permitir que a resina possa fluir através dos CNT durante um período mais longo [2].

A adição de CNT's na matriz epóxida melhora também as propriedades de compressão e flexão dos compósitos [32].

Quando se tenta adicionar CNT's em matrizes poliméricas surgem alguns obstáculos, pois é difícil obter uma boa aderência e uma dispersão uniforme entre os CNT e a matriz, uma vez que os CNT tendem a aglomerar-se entre si faces às fortes ligações de Van der Waals, portanto a melhoria na mistura da matriz polimérica não consegue ser alcançada se os CNT não aderirem quimicamente aos grupos poliméricos. A baixa permeabilidade dos CNT dificulta a impregnação por resina para o fabrico de nanocompósitos [32], [33].

A modificação química dos CNT pode criar condições favoráveis para a adesão entre os CNT e a matriz polimérica, para se obterem CNT's mais funcionais com a matriz polimérica as propriedades de absorção de átomos ou moléculas nas paredes externas dos CNT devem sofrer modificações. Para se obterem multicamadas de CNT's mais funcionais deve ser provocada uma reação entre as paredes dos CNT's e os grupos carboxílicos, para que haja a oxidação dos CNT's [33].

Contudo, estudos recentes revelam que o uso da radiação gama para a modificação de polímeros é utilizada em muitos processos industriais para melhorar a estabilidade térmica e as propriedades mecânicas. É um processo limpo, que requer menos energia, e permite uma maior velocidade do processo, tudo realizado a temperatura ambiente [26].

A radiação gama é uma forte radiação ionizante que pode reorganizar a estrutura interna do material, desde reduzir a sua natureza hidrofílica e iniciar radicais livres na superfície dos materiais que podem causar a formação de ligações entre os diferentes materiais apresentados nos compósitos, o que ajuda a melhorar a adesão entre os diferentes componentes do compósito, ainda assim a radiação gama só melhora as propriedades mecânicas até a um certo nível, depois começam a diminuir [26].

Quando o tamanho dos CNT é mais pequeno do que o das cadeias moleculares, as cadeias poliméricas crescem ao longo da superfície dos CNT, que são consideradas moléculas rígidas. Quanto maior for o tamanho dos CNT, menor é a sua influência no que toca às restrições geométricas. A cristalização interfacial é feita a partir dos cristais interfaciais que existem entre os polímeros e os CNT [27].

A inclusão de CNT's em materiais com resina epóxida, quando submetidos a forças de compressão uniaxiais, faz com que a resistência à fadiga aumente e assim possua mais ciclos de vida [34].

O revestimento por spray tem sido uma técnica muito utilizada e eficaz para depositar CNT's em materiais pré-impregnados, onde existe um bom controlo da formação da rede de nanotubos e da sua localização. Os laminados que resultam desta técnica de deposição demonstram uma excelente resistência à fratura, ainda assim esta é uma técnica muito limitada face à dificuldade de integrar pó de CNT's na estrutura composta [35].

As principais técnicas de integração de CNT's podem ser classificadas e divididas em diversas partes: (i) mistura da resina desordenada; (ii) crescimento *in situ* dos CNT, onde é feito o dimensionamento dos CNT; (iii) transferência física das partículas, ou seja, revestimento por spray; (iv) técnica de intercalação de CNT's. O método (i) permite elevadas melhorias nas propriedades da matriz quando existe baixa percentagem de massa. O método (ii) melhora significativamente a tenacidade à fratura do material [24].

A adição de CNT's permite assim melhorar as propriedades na resistência a tensões de corte interlaminar e aumentar a resistência à fratura interlaminar [15].

A inclusão de nanotubos pré-montados “véus”, permite olhar para diversos campos de aplicação a partir deste processo, uma vez que possui vantagens na simplificação do processo de integração e ainda uma grande melhoria das propriedades mecânicas [35].

Ultimamente as fibras de basalto têm vindo a atrair bastante atenção, pois apresentam uma maior resistência térmica, ductilidade superior e ainda um menor custo do que as CF [36].

Cada tipo de material possui as suas próprias propriedades e limitações em relação a outros materiais, daí cada vez sejam estudadas as estruturas híbridas. As estruturas híbridas consistem na colocação de duas ou mais fibras de reforço diferentes numa única matriz, de forma a minimizar os aspetos menos positivos de um compósito com apenas um tipo de fibra, tornando assim estes materiais mais equilibrados e ao mesmo tempo com menor custo. O processo de hibridação é bastante flexível, pois permite ajustar propriedades, como a tenacidade, a resistência e a rigidez [36].

Estes materiais híbridos ainda apresentam algumas imperfeições, por exemplo quando sujeitos a condições de flexão, e uma vez que as camadas superiores estão sujeitas a forças de compressão e as camadas inferiores a forças de tração, vai existir um corte inter-laminar, o que leva à delaminação ao longo da espessura. A resistência à flexão pode ser afetada por diversos fatores, como a rutura inicial por corte, principalmente nos compósitos híbridos, onde os gradientes de tensão podem ser bastante complexos devido aos diferentes graus de rigidez entre as camadas [36].

Na figura 17, é possível verificar a deformação de um compósito de CF's de matriz epóxida revestida com CNT, nesta imagem é notória a desagregação dos CNT [37].

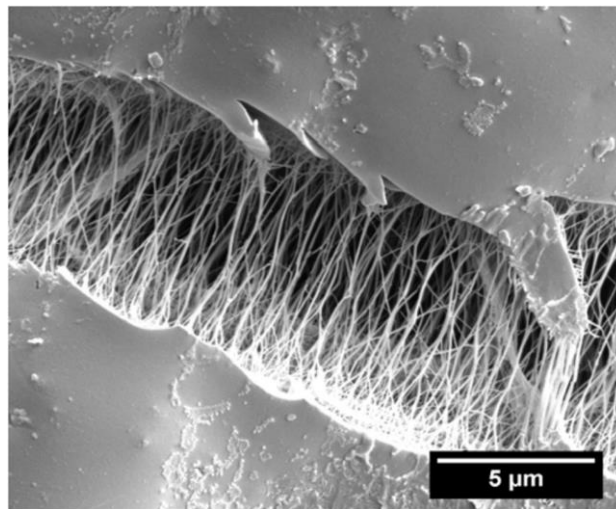


Figura 17 - Fissura compósito revestido com CNT's [37]

2.7 Corte de fibras de carbono

O facto de os compósitos reforçados com fibras possuírem duas fases muito diferenciadas em termos de propriedades mecânicas e térmicas, faz com que o processo de corte seja mais delicado entre a matriz e o reforço. É a anisotropia do reforço da fibra que influencia a formação de cavacos durante o processo de fabrico [3].

É necessário garantir a qualidade da interface, a estabilidade dimensional e a existência de superfícies lisas e precisas para a montagem de rolamentos e juntas adesivas em estruturas fabricadas para aeronaves, para tal é fundamental que os parâmetros de fabrico sejam bem definidos, ou seja, a velocidade de corte, a taxa de avanço e a profundidade de corte, estes parâmetros variam consoante o fabrico de fibras mais curtas ou mais compridas [3].

São usados assim diferentes tipos de pastilhas de corte, desde pastilhas de carbonetos de tungsténio não revestido, pastilhas cerâmicas e pastilhas de nitreto de boro cúbico [3].

No que diz respeito ao comportamento das pastilhas de corte, as pastilhas de nitreto de boro cúbico demonstram melhores resultados do que as pastilhas de tungsténio e cerâmicas. As pastilhas cerâmicas são propícias a choques térmicos e mecânicos, o que leva ao aparecimento de lascas nas arestas de corte, tornando assim estas pastilhas inadequadas para o fabrico de compósitos reforçados com CF. As pastilhas de nitreto de boro cúbico são mais caras, mas têm uma maior vida útil, os materiais no fim do processo apresentam muito pouca rugosidade superficial [3].

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Ao longo deste capítulo vão ser apresentados todos os materiais e métodos, que foram utilizados, bem como todos os equipamentos necessários para a sua realização.

3.1 Materiais

No estudo em causa foram elaboradas 3 diferentes placas de compósitos. A primeira placa tinha como matriz resina Resina Vinilester Pre-Acelerada (*ATLAC 580*), reforçada com fibras de carbono, placa que ficou denominada como “580-CF”. A segunda placa tinha como matriz também resina poliéster reforçada com fibras de carbono, com a adição de 0.5% de nanotubos de carbono, ficou denominada como “580-CF-CNT-0.5”. Por fim, a terceira placa, é semelhante à segunda placa, tendo apenas uma diferente concentração de nanotubos de carbono, neste caso 1% e ficou denominada como “580-CF-CNT-1”. As composições das placas encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 - Composições (wt) das placas compósitos

Placa	Resina 580 (g)	CF (g)	CNT (g)
580-CF	220	212.2	0
580-CF-CNT-0.5	220	214.8	1.1
580-CF-CNT-1	220	216.6	2.2

Para a conceção das diferentes placas de compósitos foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Fibras de carbono, fornecido por *Poliamol* com uma gramagem de 200 g/m^2 [38];
- Manta de Absorção, fornecida por *Castro Composites* com uma gramagem de 100 g/m^2 [38];
- Peel Ply, fornecido por *Castro Composites* com uma gramagem de 64 g/m^2 [38];
- Filme sangrador, fornecido por *Castro Composites* com furação P3 de $25\text{ }\mu\text{m}$ [38] ;
- Saco de Vácuo, fornecido por *Castro Composites*;
- Filme Teflonado Desmoldante, fornecido por *Castro Composites*, com adesivo 70 microns [38];
- Resina Vinilester Pre-Acelerada *ATLAC 580*, fornecido por *Santos & Elvas, Lda.*;
- Catalisador para Poliéster, fornecido por *Santos & Elvas, Lda.*;
- Nanotubos de carbono, fornecido por *TimesNano*;
- Pipetas graduadas Pasteur;
- Balança Analítica da marca *A&D*, cujo modelo é *GR-200*;
- Balança Compacta de Precisão, da *marca A&D*, cujo modelo é *EK-1200G*;
- Autoclave, fornecida por *TermoLab*;

- Máquina de cortar compósitos + Aspirador, da marca *METABO*
- Lupa de observação 30x, da marca *Leica*, cujo modelo é *Zoom 2000*;
- Extensómetro, da marca *Epsilon*, cujo modelo é *3542*;
- Máquina ensaio de tração, da marca *Impact Test Equipment*, cujo modelo é *TS300*;
- Lixadeira, da marca *Buehler*, cujo modelo é *Metaserv 2000*;
- Engenho de Furar, da marca *Bosh*, cujo modelo é *450-2*;
- Forno elétrico, fornecido pela *TermoLab*, cujo modelo é *MLM 13/10*;
- Máquina de ultrassons, da marca *Elma*, cujo modelo é *Transsonic 420*;
- Revestidor turbomolecular, da marca *Quorum*, cujo modelo é *Q150T ES*;
- Microscópio eletrónico, da marca *HITACHI*, cujo modelo é *S-2400*.

3.2 Preparação dos materiais e fibras

Para a conceção das placas, primeiramente foram cortadas 8 telas de fibras de carbono com a dimensão de 370x330mm para cada placa, ou seja, foram cortadas no total 24 tiras de carbono. Para o corte destas fibras o rolo foi esticado sobre uma mesa plana e com o auxílio de uma régua foram marcadas as dimensões de cada tira, como se pode observar na figura 18. De notar que foi utilizada fita isolante para a marcação das dimensões de cada tira, para evitar que aquando do corte das fibras estas se comesçassem a desfiar. De referir ainda que o corte das fibras foi realizado com uma tesoura tradicional.

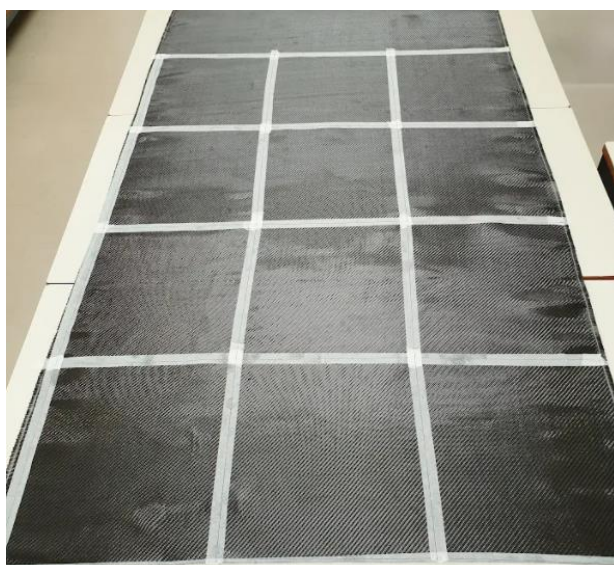


Figura 18 – Preparação para o corte das fibras de carbono

Na tabela 3 são apresentadas as propriedades mecânicas das fibras de carbono usadas ao longo da concepção dos compósitos.

Tabela 3 - Propriedades fibra de carbono [39]

Nome	Fibra de carbono
Módulo de elasticidade	225 GPa
Coeficiente de <i>Poisson</i>	0,2
Módulo de elasticidade transversal	15 GPa
Coeficiente de expansão térmica	$-0,5 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}$

Após o corte das fibras, procedeu-se ao corte, para cada placa, de 2 telas de peel ply com a dimensão de 380x340mm, figura 19, uma tela de filme, figura 20, e 3 telas de manta de absorção, figura 21, também com a dimensão de 380x340mm.

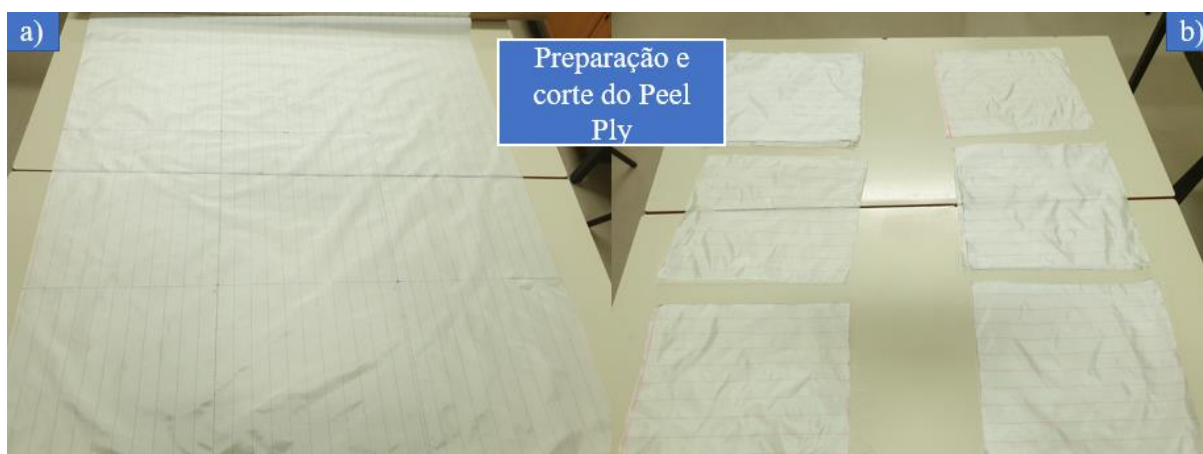


Figura 19 – Peel Ply - a) Preparação para o corte e b) Corte



Figura 20 – Preparação e corte do Filme sangrador

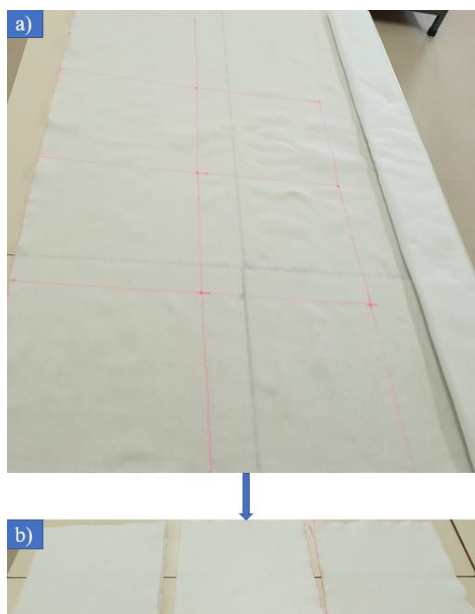


Figura 21 – Manta de Absorção – a) Preparação e b) Corte

O procedimento para o corte destes materiais foi idêntico ao das fibras de carbono, mas não foi necessária a utilização de fita isolante, pois estes materiais são fáceis de cortar. Todos estes materiais foram cortados com uma dimensão maior do que as fibras, de forma que as fibras ficassem totalmente cobertas.

Foi ainda cortado uma tela de filme desmoldante com a dimensão de 400x350mm.

3.3 Preparação da Resina

3.3.1 Resina Compósito 580- CF

Colocou-se um copo de plástico na balança compacta de precisão e fez-se a sua tara, imediatamente a seguir, pesou-se 220g de Resina Vinilester Pre-Acelerada ATLAC 580, resina que foi colocada diretamente no interior do copo, figura 22.

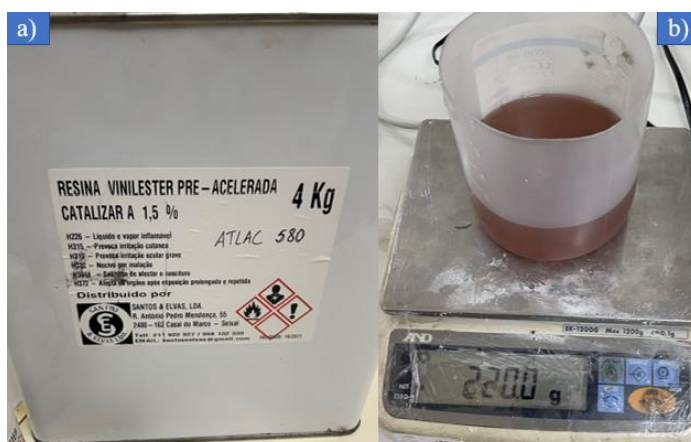


Figura 22 – Preparação Resina – a) Resina utilizada e b) Pesagem resina

A Resina Vinilester Pre-Acelerada *ATLAC 580*, apresenta as propriedades apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades Resina Vinilester Pre-Acelerada ATLAC 580 [40]

Nome	ATLAC 580
Resina Base	VE Uretano
Viscosidade	400-500 mPa.s
Alongamento na rutura	4.2 %
Resistência Tração	83 MPa
Temperatura de deflexão térmica (HDT)	115°C
Tempo de gel desde 25°C até 35°C	33-43 min

Foi retirado o copo da balança compacta de precisão e colocou-se a pipeta graduada de Pasteur, onde se fez também a sua tara. Com a pipeta graduada de Pasteur foi retirado o catalisador diretamente da embalagem até ter a proporção de 2% da quantidade de resina, ou seja, 4,4g.

Com o auxílio de um agitador de madeira foi misturado o catalisador na resina, até se obter uma mistura uniforme. Assim que a mistura é completa, esta muda para uma cor acastanhada e, fica pronta a utilizar.

3.3.2 Resina Compósitos 580-CF-CNT-0.5 e 580-CF-CNT-1

O procedimento inicial para a preparação da resina destas duas placas é igual ao da placa 580, ou seja, foram pesadas 220g de resina, para cada uma das placas.

Após a pesagem da resina, foram pesadas 1.1g e 2.2g de CNT's, recorrendo à balança analítica, respetivamente para cada placa.

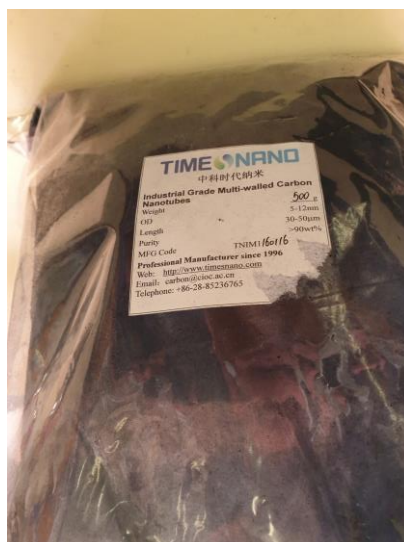


Figura 23 – Nanotubos de Carbono

Os CNT's utilizados apresentam, segundo o fornecedor, as propriedades descritas na tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades CNT's

Nome	Nanotubos de carbono de paredes múltiplas de grau industrial
Pureza	>90%
Diâmetro Exterior	5-12 mm
Comprimento	30-50 μm
Área de Superfície Especial	>325 m^2/g
Densidade <i>Tap</i>	0.94 mg/cm^3
Método de Produção	CVD

Assim, a concentração de CNT's da placa 580-CF-CNT-0.5 consiste em 0.5% da quantidade de resina, e a concentração da placa 580-CF-CNT-1 consiste em 1% da quantidade de resina. A pesagem dos CNT's é demonstrada na figura 24.



Figura 24 - Pesagem CNT's

Feita a pesagem dos CNT's, estes foram sujeitos a um tratamento de ultrassons, que consistiu em ligar a máquina 1 minuto, de forma que os CNT's se dispersassem, figura 25.



Figura 25 – Tratamento ultrassons

Foi realizado o mesmo processo da placa 580-CF para o catalisador. Ou seja, para cada placa, foram retiradas 4.4g de catalisador. Com cuidado, para não acumular muitos CNT's na superfície, fez-se a mistura do catalisador com os CNT's na resina, até a textura apresentar uma boa dissolução, sem aglomerados de CNT's, como se observa na figura 26.



Figura 26 – Preparação da matriz

Feita a dissolução dos constituintes da matriz, a mistura foi sujeita novamente a um tratamento de ultrassons realizado na *Transsonic 420*. O tratamento consistiu também em ligar os ultrassons 1 minuto. O tratamento da mistura pode ser observado na figura 27.



Figura 27 – Tratamento ultrassons da matriz

3.4 Fabrico do Compósito

Preparada a matriz e cortados os materiais, procedeu-se ao fabrico do compósito. O fabrico foi feito da seguinte forma:

1. Foi limpa e desgordurada uma placa de aço, para não haver contaminação dos restantes materiais.
2. Sobre a placa de aço, foi colado o filme teflonado desmoldante.

3. Por cima do desmoldante, foi colada uma tela de peel-ply. Para o peel-ply ter uma boa aderência às camadas superiores, foi distribuída de forma uniforme e homogênea a matriz (resina e seus constituintes).
4. Pesagem das fibras de carbono na balança compacta de precisão, conforme a figura 28.



Figura 28 – Pesagem fibras

5. Foram colocadas oito camadas de fibras de carbono, umas sobre as outras, e entre elas foi sempre distribuída de forma uniforme e homogênea a matriz.
6. Foi colocada a última camada de peel-ply, e espalhada a última quantidade de matriz.
7. Colocada uma tela de filme sangrador.
8. Foram colocadas três telas de manta de absorção.
9. Terminado o compósito, figura 29.



Figura 29 – Compósito terminado



Figura 30 – Sequência de montagem dos elementos de produção do compósito

3.5 Preparação Moldes Resina

Foram preparados moldes para o fabrico de provetes de cada matriz em específico. Os objetivos destes foi a avaliação das propriedades das resinas base.

Previamente à preparação da matriz, foram produzidos os moldes em silicone. Os moldes foram produzidos recorrendo a provetes de aço maquinados nas oficinas da ESTSetúbal, que foram inseridos no silicone de forma a delimitar a zona do provete.

A matriz foi preparada da mesma maneira do que para a placa compósito, mas em menor quantidade.

3.5.1 Resina 580-CF

Para a produção destes moldes foram preparadas 150g de Resina Vinilester Pre-Acelerada *ATLAC 580*, sendo o processo o mesmo que foi descrito em 3.3.1. Sendo a quantidade de resina 150g e a mistura de catalisador 2% da quantidade de resina, foram pesadas 3g de catalisador, novamente o processo a ser igual ao descrito em 3.3.1.

Feita a mistura do catalisador na resina, a mistura foi colocada nos moldes de silicone, figura 31.



Figura 31 - Provets Resina 580-CF

3.5.2 Resina 580-CF-CNT-0.5 e 580-CF-CNT-1

Tal como os provetes de resina 580, o processo de realização destes provetes foi o mesmo para a placa compósito 580-CF-CNT-0.5 e 580-CF-CNT-1, diferindo novamente as quantidades.

A quantidade de resina para ambos os provetes foi 150g, sendo o catalisador 2% da quantidade de resina, a quantidade deste foi 3g.

Quanto à adição de CNT's, e sendo a proporção de 0,5% e 1% da quantidade de resina para os dois tipos de provetes, foi adicionado 0.75g para os provetes 580-CF-CNT-0.5 e 1.5g para os provetes 580-CF-CNT-1.

De referir que depois da pesagem, os CNT's foram submetidos 1minuto ao tratamento por ultrassons na máquina *Transsonic 420*. Feita a mistura dos CNT's, com o catalisador e resina, a mistura foi novamente submetida 1 minuto ao tratamento por ultrassons na máquina *Transsonic 420*.

O processo de colocação desta mistura dos moldes foi igual ao da resina 580-CF, descrito em 3.5.2, figura 32.

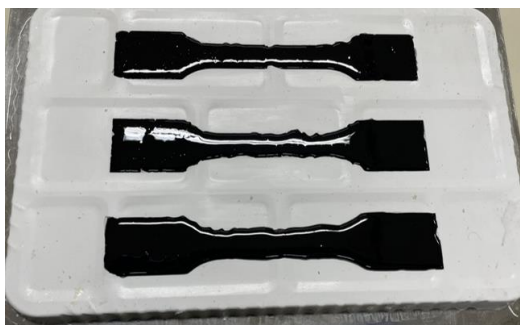


Figura 32 - Provets Resina 580-CF-CNT-1

Foram produzidos 3 provetes para cada tipo de resina.

3.6 Vácuo e Cura

O processo de vácuo e cura foi realizado da mesma forma para todas as placas compósitos.

Primeiro foi preparado o vácuo, para tal foi cortado o saco de vácuo, com dimensões necessárias a albergar no seu interior a placa de compósito previamente preparada. O saco foi fechado com fita isoladora dupla para alta temperatura.

Foi colocada a placa compósito dentro do saco de vácuo, juntamente com uma válvula circular metálica, que permite a extração contínua do ar, fazendo o vácuo dentro do saco, figura 33.



Figura 33 – Saco de Vácuo

A placa foi colocada na autoclave, e foi ligado o vácuo durante 24h, figura 34. De referir que foram também colocados na autoclave os provetes de resina, correspondentes à resina usada para a conceção do compósito. Estes provetes ficaram 24h à temperatura ambiente, mas não sujeitos a vácuo.



Figura 34 - Vácuo

Passadas 24h a autoclave foi fechada e ligada. O processo de cura das placas compósito e dos respectivos provetes de resina foi de 3h a 100°C. A taxa de aquecimento foi de 10°C por minuto.

Após o arrefecimento, foram retirados os provetes e a respetiva placa compósito. Na figura 35, pode-se observar que após a cura o excesso de resina foi absorvido, notando-se pequenas bolhas de resina na manta de absorção.

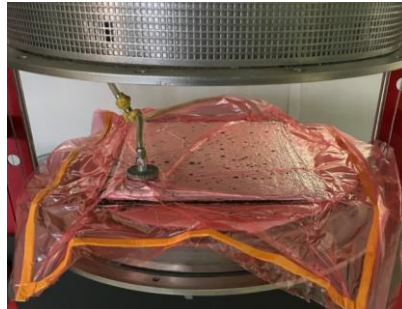


Figura 35 - Fim da cura

Na figura 36, pode-se observar a placa 580-CF após ser desmoldada.



Figura 36 – Compósito 580-CF

Por sua vez na figura 37, observa-se os provetes de resina 580-CF-CNT-1, após a cura e a desmoldagem.



Figura 37 – Provetes Resina 580-CF-CNT-1– a) Moldados e b) Desmoldados

3.7 Corte e Acabamento

As placas e os provetes foram preparadas para os ensaios de tração. Para tal, as placas compósitas foram cortadas e os provetes sofreram um processo de acabamento.

3.7.1 Corte Placas Compósitas

O processo de corte das placas 580-CF, 580-CF-CNT-0.5 e 580-CF-CNT-1 foi idêntico. Definiu-se de modo a facilitar os ensaios de tração, que as dimensões de cada provete seriam 250x20mm, conforme a figura 38.



Figura 38 - Dimensionamento Provetes Compósitos

As tiras foram cortadas recorrendo à máquina de cortar compósitos e ao aspirador *METABO*, tal como na figura 39.

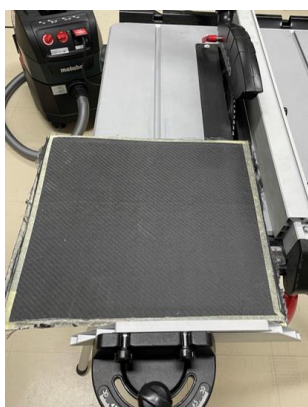


Figura 39 – Preparação para o Corte dos Compósitos

Primeiramente foram retirados os excessos e as partes residuais das extremidades da placa, figura 40.

Feito isso cortaram-se as tiras longitudinalmente, com a largura de 20mm. Após o corte longitudinal efetuou-se o corte para que as tiras tivessem um comprimento de 250mm. Foram cortadas 10 tiras de cada placa.

Após o corte, todas as tiras foram devidamente identificadas, figura 41.



Figura 40 – Corte Compósitos



Figura 41 – Provete Final

3.7.2 Acabamento dos Provetes de Resina

Depois de serem desmoldados os provetes passaram por um processo de acabamento. Os provetes foram lixados recorrendo à lixadeira a água da marca *Buehler, Metaserv 2000*, figura 42.



Figura 42 – Acabamento Provete Resina

De modo a eliminar ao máximo todos os excessos e defeitos dos provetes foram utilizadas lixas de granulometria 800 e 1200. Primeiramente foi usada a lixa de granulometria de 800 para eliminar mais rapidamente os defeitos e excessos, e posteriormente para um melhor acabamento foi usada a lixa de granulometria 1200. Na figura 43 pode-se observar o antes e o depois do processo de acabamento num provete 580-CF-CNT-1.

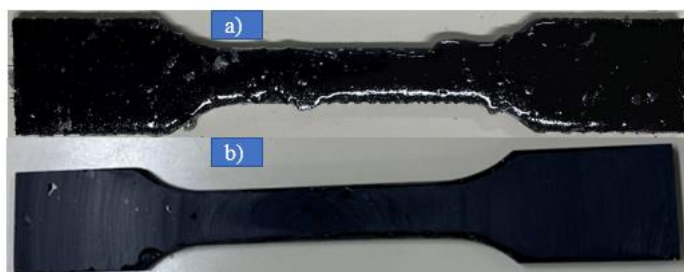


Figura 43 – Provetes Resina 580-CF-CNT-1- a) Antes do acabamento e b) Após o acabamento

3.8 Furação Provetes Compósito

A furação dos provetes compósitos foi feita tendo em conta a seguinte tabela 6.

Tabela 6 – Tipologia dos provetes compósitos

Tipo de furação	Sem Furo	Um Furo	Dois Furos
580-CF	3 provetes	3 provetes	3 provetes
580-CF-CNT-0.5	3 provetes	3 provetes	3 provetes
580-CF-CNT-1	3 provetes	3 provetes	3 provetes

Para os provetes com um furo, foi marcado o centro do provete e feito um furo com diâmetro de 3mm, conforme a figura 44.

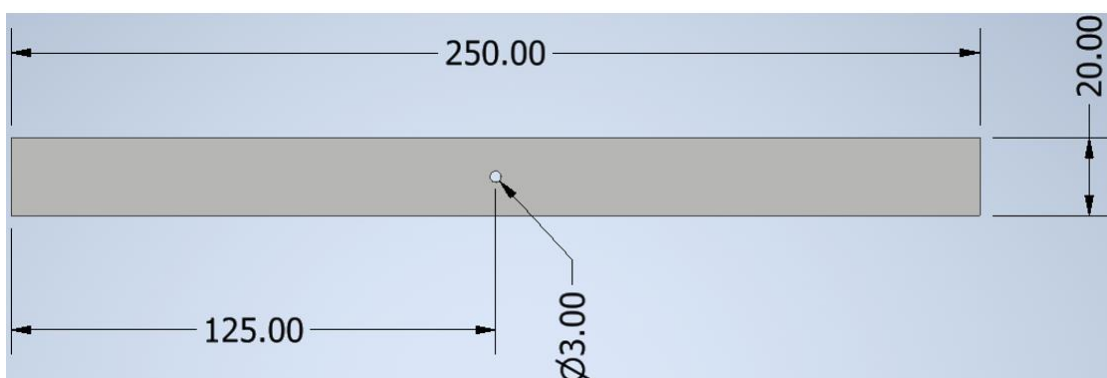


Figura 44 - Esquematização Provetes com 1 furo

Já para os provetes com dois furos, também têm um diâmetro de 3mm, e o centro de cada furo espaçado 6mm com a extremidade do provete, como é demonstrado na figura 45.

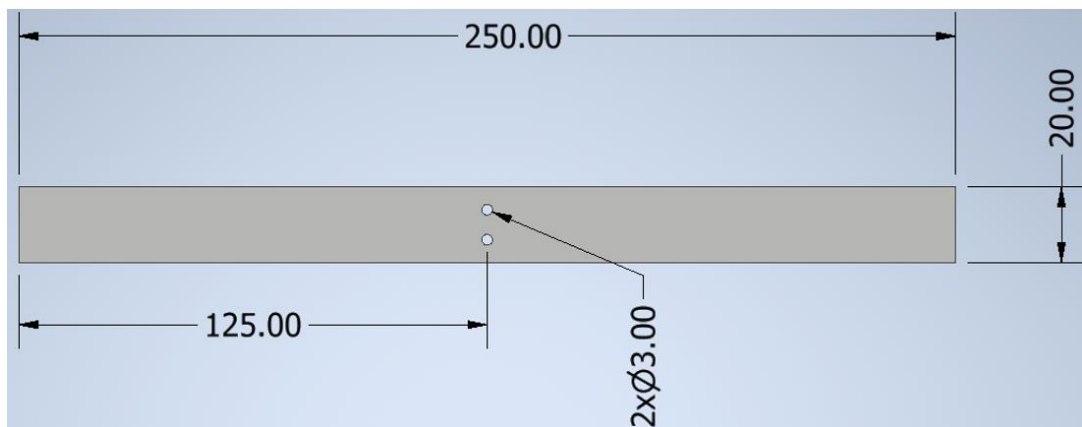


Figura 45 - Esquematização Provetes com 2 furos

De referir que os furos foram realizados recorrendo ao engenho de furar 450-2 da Bosh, figura 46.



Figura 46 – Furação provetes

3.9 Ensaios de tração

Com recurso à máquina de ensaios de universal *Impact Test Equipment TS300* (célula de carga 50kN), e de forma a determinar as propriedades mecânicas de todos os provetes foram realizados ensaios destrutivos de tração, segundo a norma ASTM D3039 com uma velocidade de ensaio de 1 mm/min.

Para a realização de cada um dos ensaios foi também colocado um extensómetro axial do tipo “clip-on” da marca *Epsilon 3542*, de forma a medir a deformação instantânea de cada dos provetes ensaiados, na figura 47 é possível observar como foi colocado o provete na máquina de ensaios bem como a colocação do extensómetro.

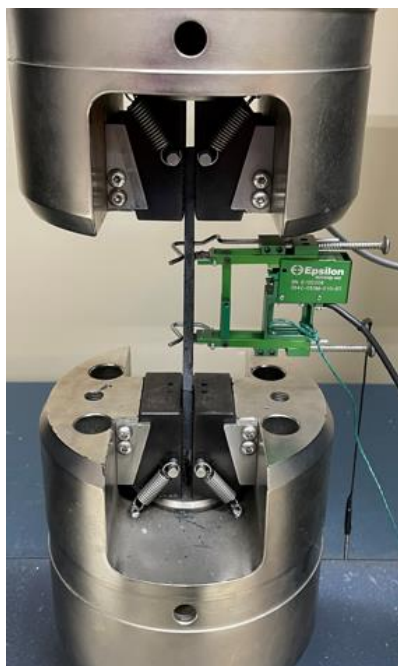


Figura 47 – Preparação Ensaio de tração

Na figura 48 observa-se o antes e o depois de um ensaio de tração realizado num provete 580-CF-CNT-1 com um furo. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente.

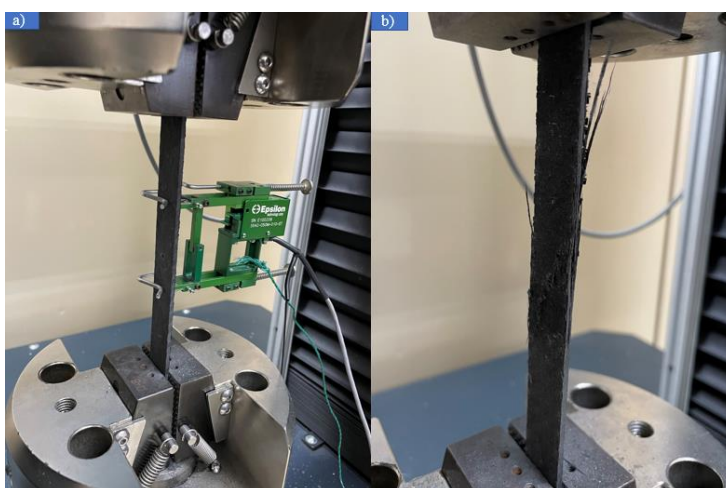


Figura 48 – Ensaio de Tração- a) início do ensaio e b) fim do ensaio

Como foi referido, a realização de ensaios de tração permite determinar as propriedades mecânicas dos provetes. Neste estudo foram retiradas as seguintes propriedades:

- **Tensão Normal:**[41]

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ , onde:} \quad (2)$$

- σ – Tensão [MPa]
- F – Força [N]
- A – Área transversal da secção do provete [mm²]

- **Extensão Normal:**[41]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \text{ onde:} \quad (3)$$

- ε – Extensão Nominal [mm/mm]
- Δl – variação do comprimento do provete [mm]
- l_0 – comprimento inicial do provete [mm]

Durante a realização dos ensaios a curva tensão-deformação para todos os provetes foi como a curva a apresentada na figura 49.

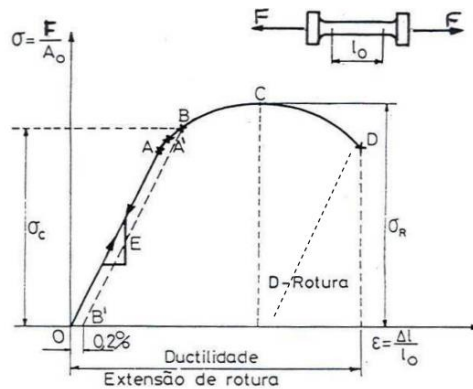


Figura 49 – Curva tensão- deformação [41]

- **Lei de Hooke:**[41]

Para determinar o coeficiente de elasticidade (E) dos provetes foi aplicada a lei de Hooke. A Lei de Hooke diz-nos que:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

onde, o módulo de elasticidade é dado pelo declive da curva (E), como se mostra na figura 50.

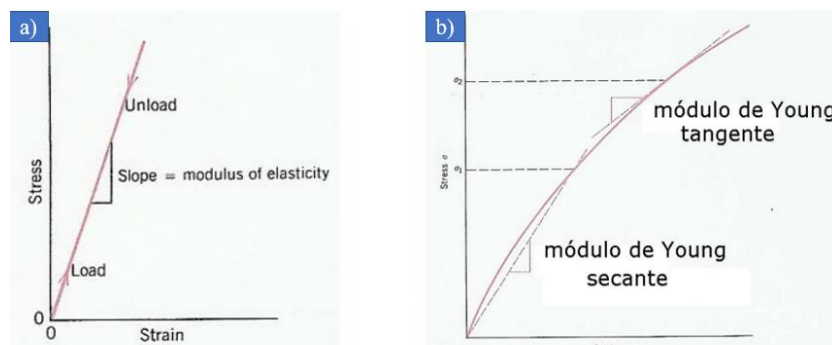


Figura 50 – Lei de Hooke [41]

3.10 Macrografias

Realizados os ensaios de tração de todos os provetes (compósitos e resina), procedeu-se à realização de macrografias na zona de fratura dos provetes. As macrografias foram realizadas recorrendo Lupa de observação 30x *Leica Zoom 2000*, como se pode observar na figura 51.



Figura 51 - Lupa de observação 30x *Leica Zoom 2000*

3.11 Determinação da percentagem de materiais de reforço

Para a determinação do teor de carbono dos compósitos realizou-se o seguinte procedimento:

1. Cortado três amostras de compósito, com aproximadamente 2 cm², de cada constituinte (580-CF, 580-CF-CNT-0.5 e 580-CF-CNT-1).
2. Recorrendo à balança analítica pesaram-se os cadinhos para cada tira, figura 52.



Figura 52 – Pesagem cadinho

3. Colocou-se o pedaço da tira cortada no interior no cadinho e fez-se nova pesagem, figura 53.



Figura 53 - Pesagem cadinho + compósito

4. Os cadinhos com cada tipo de compósito foram colocados no forno elétrico, *TermoLab MLM 13/10*, figura 54.



Figura 54 – Colocação cadinhos no forno

5. O forno foi fechado e ligado durante 2.5h a 550°C, de acordo com a norma ASTM D2584-02.
6. Após o arrefecimento as tiras foram novamente pesadas no interior do cadinho, figura 55.



Figura 55 – Pesagem cadinho + compósito após forno

3.12 Microscopia Eletrônica de Varrimento

Antes de ser realizada a microscopia propriamente dita, existiu um processo de preparação para que pudesse ser realizado o SEM nas melhores condições.

Primeiramente foram cortados os provetes de cada tipologia (compósito e resina) na zona de fratura com cerca de 1cm.

Posteriormente foi realizado um revestimento com ouro em escala nanométrica no revestidor turbomolecular *Quorum Q150T ES*, figura 56, esta pulverização a frio, tem como objetivo a oxidação dos elétrons na zona de fratura de modo a ser possível uma melhor visualização SEM. Todo este processo ocorreu cerca de 25 min.



Figura 56 - Quorum Q150 ES [42]

Após a realização do processo preparatório ao SEM, foi realizado o SEM. O SEM foi realizado recorrendo ao microscópio eletrónico *HITACHI S-2400*, figura 57.



Figura 57 - Microscópio eletrónico: painel de instrumentos

Capítulo 4

Resultados

Após a realização de todos os ensaios laboratoriais, são apresentados neste capítulo os resultados obtidos a partir desses ensaios, onde são apresentadas também as macrografias e feitos comentários sucintos aos resultados e macrografias.

4.1 Estrutura dos CNT

Na figura 58 pode-se observar a partir da microscopia eletrônica de varrimento as estruturas dos CNT.

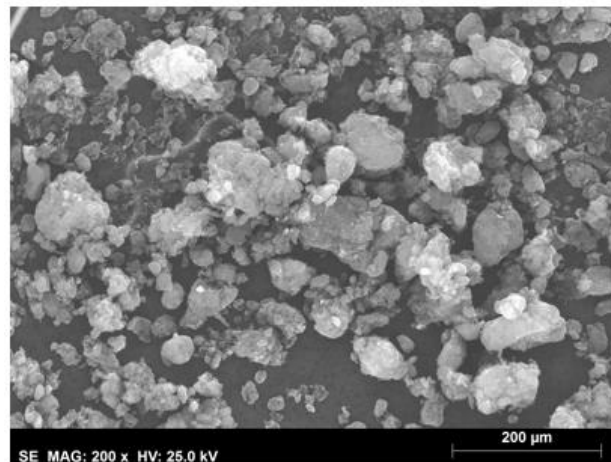


Figura 58 - Estrutura CNT's

4.2 Massa dos Compósitos

As placas de compósito foram desmoldadas e pesadas. Tendo sido obtido os valores da tabela 7.

Tabela 7 - Massa dos compósitos após a cura

Tipologia	Massa dos Compósitos
Placa 580	372g
Placa CNT 1.1	377g
Placa CNT 2.2	339g

4.3 Fração de materiais de reforço

Na tabela 8 apresentam-se os valores estatísticos obtidos para as frações mássicas das diferentes tipologias de compósitos existentes.

Tabela 8 – Dados Estatísticos das frações mássicas dos materiais de reforço

Tipologia	Fração Mássica de Resina	Desvio Padrão	Fração Mássica de Fibras	Desvio Padrão
580-CF	75,6 %	5,1 %	24,4 %	5,1 %
580-CF-CNT-0.5	76,1 %	0,6 %	23,9 %	0,6 %
580-CF-CNT-1	67,6%	2,2 %	32,4 %	2,2 %

Face aos valores dos dados estatísticos obtidos na tabela 8 é possível calcular a fração volúmica de carbono e de resina presente em cada tipologia de compósito. Na tabela 9 são apresentados valores estatísticos das frações volúmicas dos respetivos compósitos.

Tabela 9 - Teor de Carbono

Tipologia	Fração Volúmica de Resina	Desvio Padrão	Fração Volúmica de Fibras	Desvio Padrão
580-CF	80,9 %	4,2 %	19,1 %	4,2 %
580-CF-CNT-0.5	81,3 %	0,5 %	18,7 %	0,5 %
580-CF-CNT-1	74,0 %	1,9 %	26,0 %	1,9 %

Ao contrário do esperado, os resultados obtidos na tabela 8 e 9 para a fração mássica e volúmica dos materiais de reforço ficaram muito dos valores esperados (50.50%).

4.4 Propriedades Mecânicas Compósitos

4.4.1 Compósitos 580-CF

Os primeiros resultados apresentados na tabela 10 dizem respeito aos compósitos 580-CF. De referir que o módulo de *Young* foi calculado a partir da lei de *Hooke* e que a tensão máxima foi retirada a partir dos dados fornecidos pelo software da máquina *Impact Test Equipment TS300*.

Na figura 59 é apresentada a curva observada enquanto se realizavam os ensaios de tração.

Nesta curva é possível observar o domínio elástico do provete compósito, até ocorrer a rotura e onde é registada a tensão máxima do ensaio, bem como a deformação máxima. Foi também a partir da parte elástica que foi calculado o módulo de elasticidade. Após o domínio elástico passamos para o domínio plástico, onde são removidas todas as forças aplicadas e é terminado o ensaio.

Sendo os ensaios de tração, ensaios destrutíveis após o término dos ensaios, é impossível a recuperação inicial da forma dos provetes.

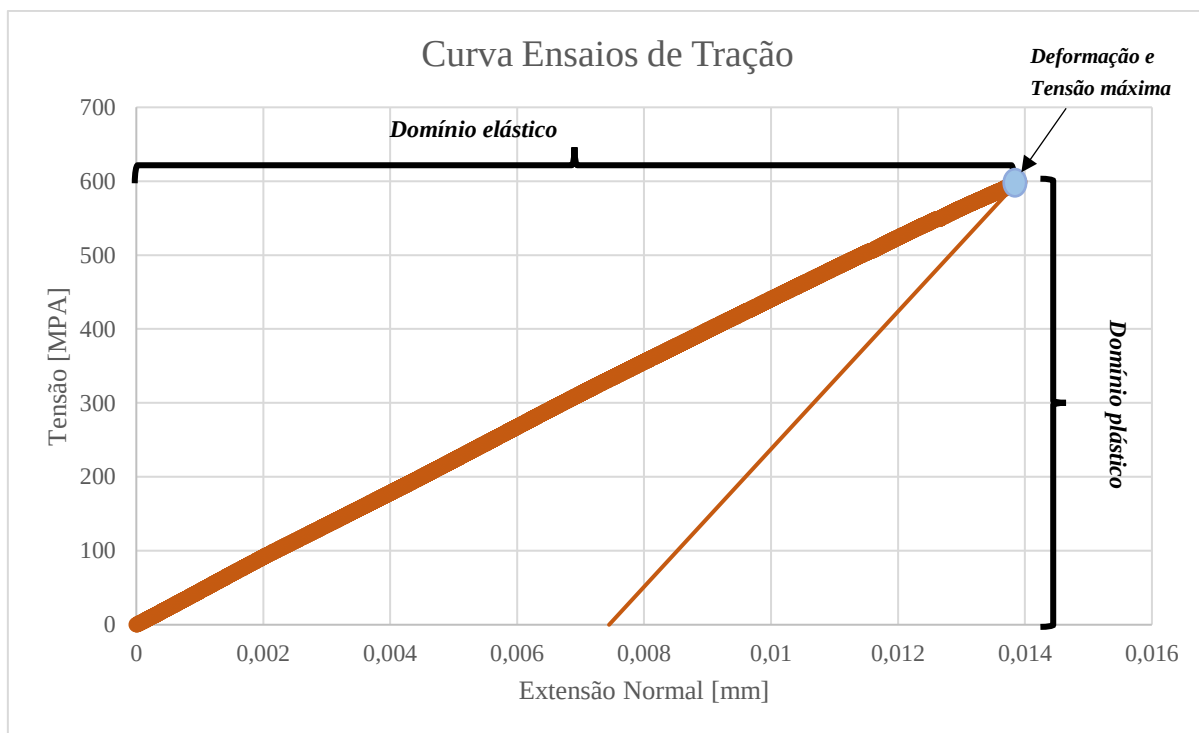


Figura 59 - Curva Ensaio de Tração

Na figura 60 é apresentada uma das curvas de onde foram retirados os módulos de *Young* para o compósito sem furo.

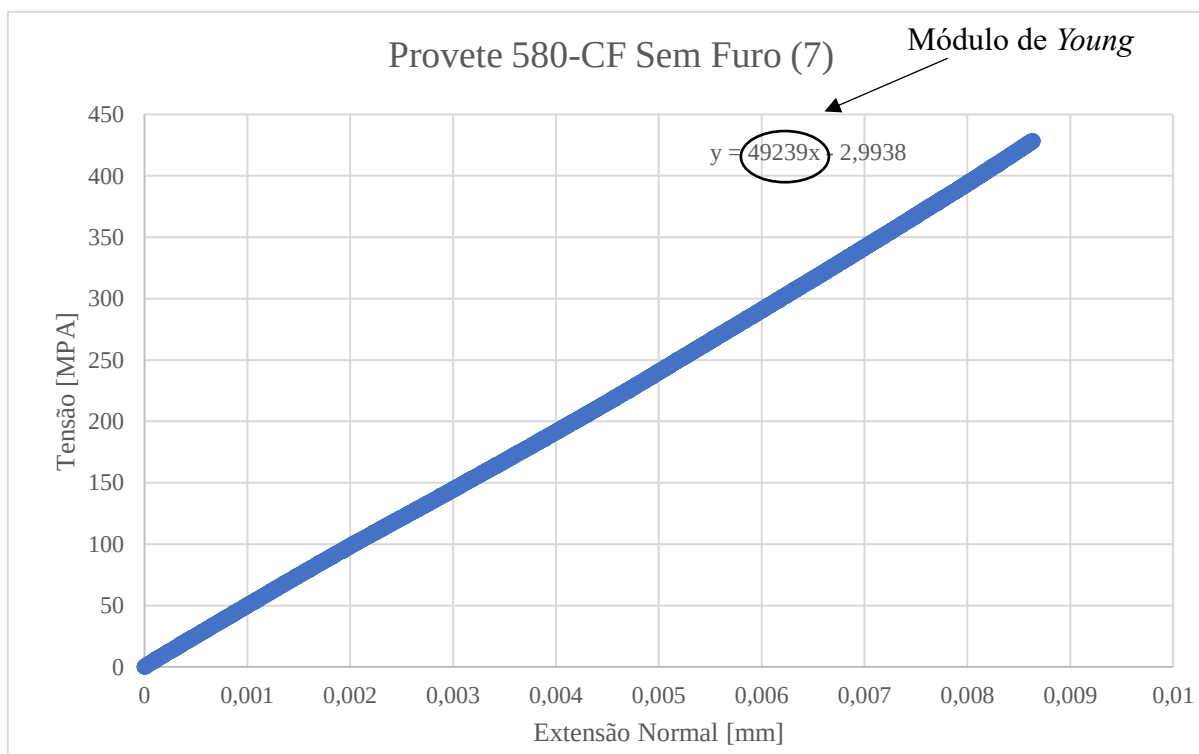


Figura 60 – Curva Módulo de *Young* Provete 580-CF Sem Furo (7)

Tabela 10 - Dados Compósitos 580-CF

580-CF	Tipologia	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão máxima σ (MPa)	Extensão Normal	Módulo de Young E (GPa)
580-CF (1)	2 furos	20,17	2,26	45,584	15811	346,9	0,0086	42,151
580-CF (2)	2 furos	20,34	2,34	47,596	15778	331,5	0,0080	42,708
580-CF (3)	2 furos	20,31	2,39	48,541	15395	317,2	0,0088	39,420
580-CF (4)	1 furo	20,35	2,33	47,416	17014	358,8	0,0116	37,477
580-CF (5)	1 furo	20,27	2,35	47,635	17480	367,0	0,0113	38,477
580-CF (6)	1 furo	20,28	2,33	47,252	17989	369,4	0,0115	39,691
580-CF (7)	Sem furo	20,17	2,30	46,391	28546	615,3	0,0117	49,239
580-CF (8)	Sem furo	20,33	2,29	46,556	27892	599,1	0,0139	43,132
580-CF (9)	Sem furo	20,21	2,28	46,079	29301	635,9	0,0132	48,570

Conforme, a tabela 10 observa-se que a tensão máxima foi de 635,9 MPa para o provete 9, onde não existia furação. O módulo de *Young* mais elevado registou-se para o provete 7, também sem furo, e foi de 49,239 GPa.

4.4.2 Compósitos 580-CF-CNT-0.5

Os segundos resultados apresentados na tabela 11 dizem respeito aos compósitos 580-CF-CNT-0.5. De referir que o módulo de *Young* e a tensão máxima, foram calculados da mesma forma que em 4.2.1.

Na figura 61 é apresentada uma das curvas de onde foram retirados os módulos de *Young* para o compósito com um furo.

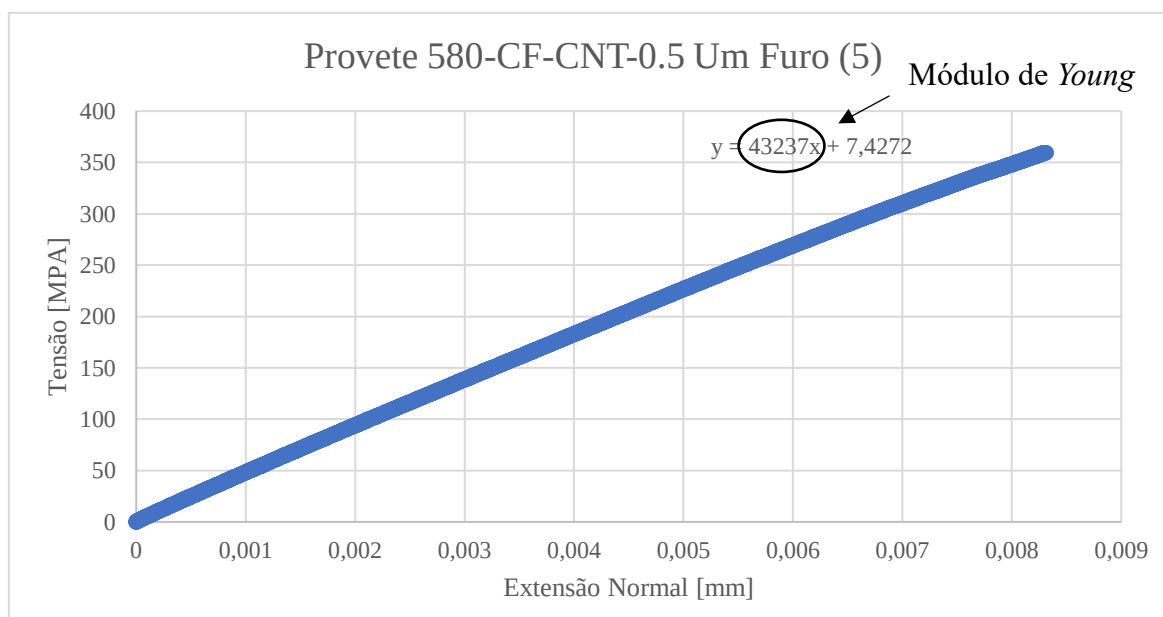


Figura 61 - Curva Módulo de Young Provete 580-CF-CNT-0.5 Um furo (5)

Tabela 11 - Dados Compósitos 580-CF-CNT-0.5

580-CF-CNT-0.5	Tipologia	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão máxima σ (MPa)	Extensão Normal	Módulo de Young E (Gpa)
580-CF-CNT-0.5 (1)	2 furos	20,48	2,40	49,152	17670	359,5	0,0092	41,312
580-CF-CNT-0.5 (2)	2 furos	20,46	2,49	50,945	17341	340,4	0,0094	36,947
580-CF-CNT-0.5 (3)	2 furos	20,40	2,25	45,900	16384	357,0	0,0100	38,541
580-CF-CNT-0.5 (4)	1 furo	20,48	2,48	50,790	19986	393,5	0,0106	39,695
580-CF-CNT-0.5 (5)	1 furo	20,24	2,20	44,528	19012	427,0	0,0115	43,237
580-CF-CNT-0.5 (6)	1 furo	20,46	2,46	50,332	19570	388,8	0,0108	38,112
580-CF-CNT-0.5 (7)	Sem furo	20,48	2,37	48,538	24102	497,0	0,0110	45,306
580-CF-CNT-0.5 (8)	Sem furo	20,46	2,42	49,513	24578	496,4	0,0110	44,870
580-CF-CNT-0.5 (9)	Sem furo	20,32	2,40	48,768	25986	582,9	0,0115	46,904

Conforme, a tabela 11 observa-se que a tensão máxima foi de 582,9 MPa para o provete 9, onde não existia furação. O módulo de *Young* mais elevado registou-se também para o provete 9, e foi de 46,904 GPa.

4.4.3 Compósitos 580-CF-CNT-1

Por fim, os terceiros resultados apresentados na tabela 12 dizem respeito aos compósitos 580-CF-CNT-1. O módulo de *Young* foi igualmente calculado como no subcapítulo 4.2.3.

Na figura 62 é apresentada uma das curvas de onde foram retirados os módulos de *Young* para o compósito com dois furos.

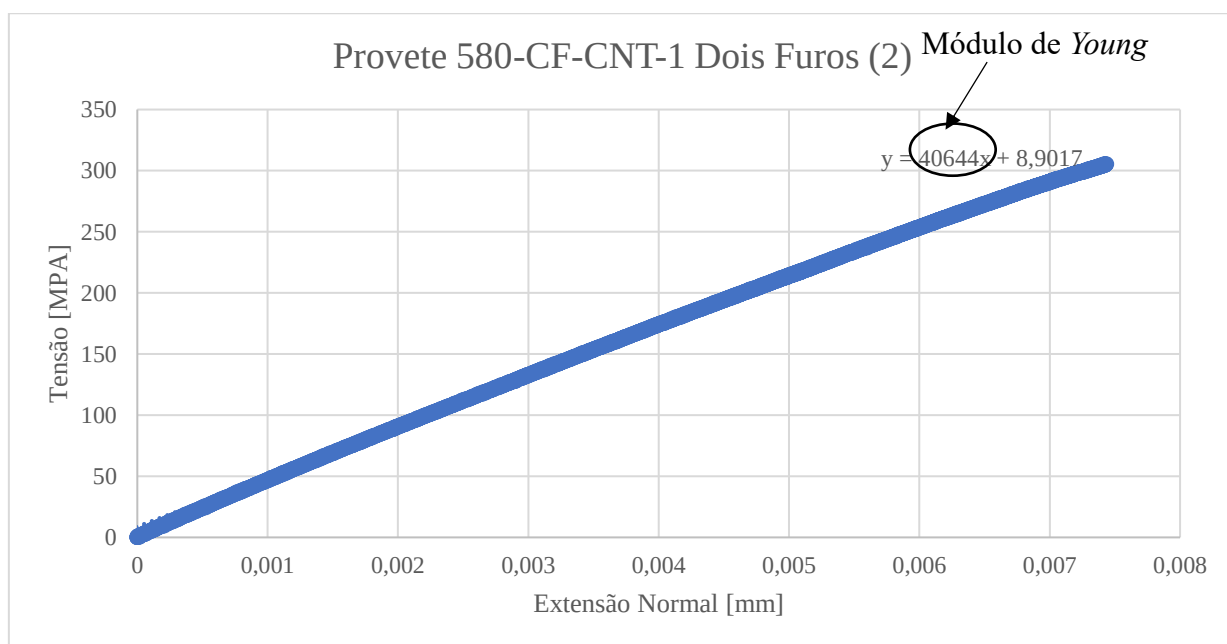
Figura 62 - Curva Módulo de *Young* Provete 580-CF-CNT-1 Dois Furos (2)

Tabela 12 - Dados Compósitos 580-CF-CNT-1

580-CF-CNT-1	Tipologia	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão máxima σ (MPa)	Extensão Normal	Módulo de Young E (GPa)
580-CF-CNT-1 (1)	2 furos	19,59	2,29	44,861	14669	327,0	0,0086	38,772
580-CF-CNT-1 (2)	2 furos	19,77	2,19	43,296	14289	330,0	0,0082	40,644
580-CF-CNT-1 (3)	2 furos	18,74	2,01	37,667	11114	295,1	0,0100	43,047
580-CF-CNT-1 (4)	1 furo	19,74	2,19	43,231	16334	377,8	0,0078	46,532
580-CF-CNT-1 (5)	1 furo	19,82	2,24	44,397	18095	407,6	0,0116	43,297
580-CF-CNT-1 (6)	1 furo	18,62	2,12	39,474	15692	397,5	0,0103	47,063
580-CF-CNT-1 (7)	Sem furo	19,83	2,27	45,014	21653	481,0	0,0118	46,763
580-CF-CNT-1 (8)	Sem furo	19,72	2,40	47,328	22654	478,7	0,0121	46,332
580-CF-CNT-1 (9)	Sem furo	19,74	2,32	45,797	22154	483,7	0,0114	45,373

Observa-se na tabela 12, que a tensão máxima foi de 483,7 MPa para o provete 9, onde não existia qualquer tipo de furação. O melhor módulo de *Young* registou-se para o provete 6, provete com 1 furo, e foi de 47,063 GPa.

4.5 Propriedades mecânicas resinas

4.5.1 Resina 580

Os provetes de resina 580 após os ensaios de tração a que foram submetidos, apresentaram os valores descritos na tabela 13. O módulo de *Young* foi calculado a partir da lei de *Hooke* e a tensão máxima foi retirada a partir dos dados fornecidos pelo software da máquina *Impact Test Equipment TS300*.

Na figura 63 é apresentada uma das curvas de onde foram retirados os módulos de *Young*, de realçar que para todos os provetes, inclusive os dos outros constituintes, não existiu furação.

Tabela 13 - Dados Resina 580

580	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão máxima σ (MPa)	Extensão Normal	Módulo de Young E (Gpa)
580 (1)	15,05	5,7	85,785	1175,7	13,7	0,0040	3,302
580 (2)	14,7	6	88,2	1615,9	18,3	0,0057	3,176
580 (3)	13,9	6,3	87,57	1451,8	16,5	0,0052	3,153

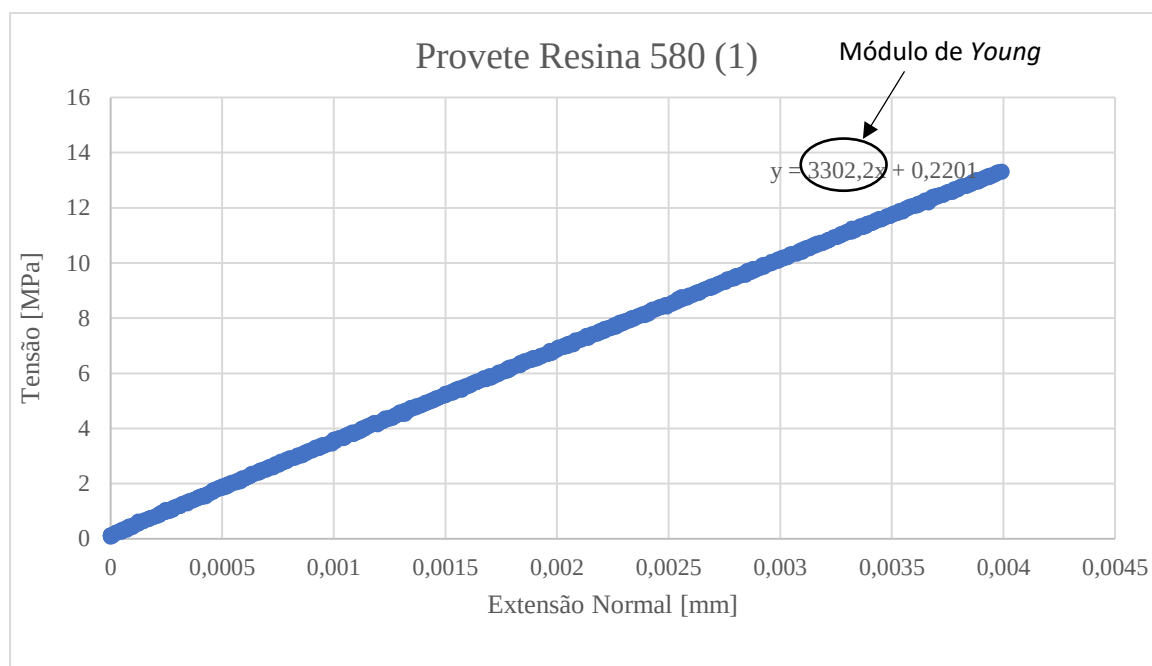


Figura 63 - Curva Módulo de Young Provete Resina 580 (1)

Conforme os dados observados na tabela 13, a tensão máxima foi de 18,32 MPa para o provete 2. O melhor módulo de *Young* registou-se para o provete 1, e foi de 3,302 GPa.

4.5.2 Resina 580-CNT-0.5

Os resultados descritos na tabela 14, para esta resina apenas têm em consideração dois provetes, pois o primeiro provete quebrou-se durante a montagem na máquina de ensaios de tração, *Impact Test Equipment TS300*. O módulo de *Young* e a tensão máxima foram calculados exatamente como em 4.3.1.

Na figura 64 é apresentada uma das curvas de onde foram retirados os módulos de *Young*.

Tabela 14 - Dados Resina 580-CNT-0.5

580-CNT-0.5	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão máxima σ (MPa)	Extensão Normal	Módulo de <i>Young</i> E (Gpa)
580-CNT-0.5 (2)	14,16	6,51	92,1816	1510,3	16,4	0,0062	3,4
580-CNT-0.5 (3)	13,51	6,03	81,4653	946,7	11,6	0,0031	3,86

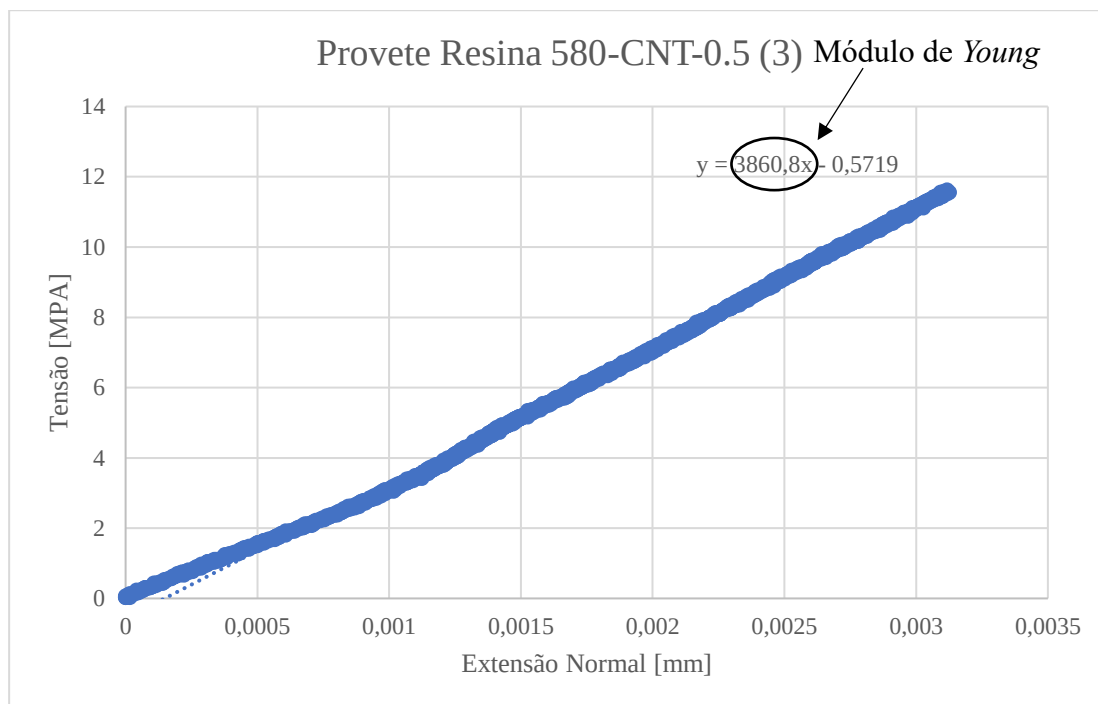


Figura 64 - Curva Módulo de *Young* Provete Resina 580-CNT-0.5 (3)

Tendo em conta os dados observados na tabela 14, a tensão máxima foi de 16,38 MPa para o provete 2. O melhor módulo de *Young* registou-se para o provete 3, e foi de 3,86 GPa.

4.5.3 Resina 580-CNT-1

Os provetes de resina CNT 2.2 após os ensaios de tração a que foram submetidos, apresentaram os valores descritos na tabela 15. O módulo de *Young* foi calculado a partir da lei de *Hooke* e a tensão máxima foi retirada a partir dos dados fornecidos pelo software da máquina *Impact Test Equipment TS300*.

Na figura 65 é apresentada uma das curvas de onde foram retirados os módulos de *Young*.

Tabela 15 - Dados Resina 580-CNT-1

580-CNT-1	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão máxima σ (MPa)	Extensão Normal	Módulo de <i>Young</i> E (Gpa)
580-CNT-1 (1)	13,55	5,75	77,9125	883,8	11,34328	0,0032	3,477
580-CNT-1 (2)	14,43	5,34	77,0562	686,9	8,912949	0,0027	3,283
580-CNT-1 (3)	14,69	5,67	83,2923	1195,7	14,35537	0,0043	3,24

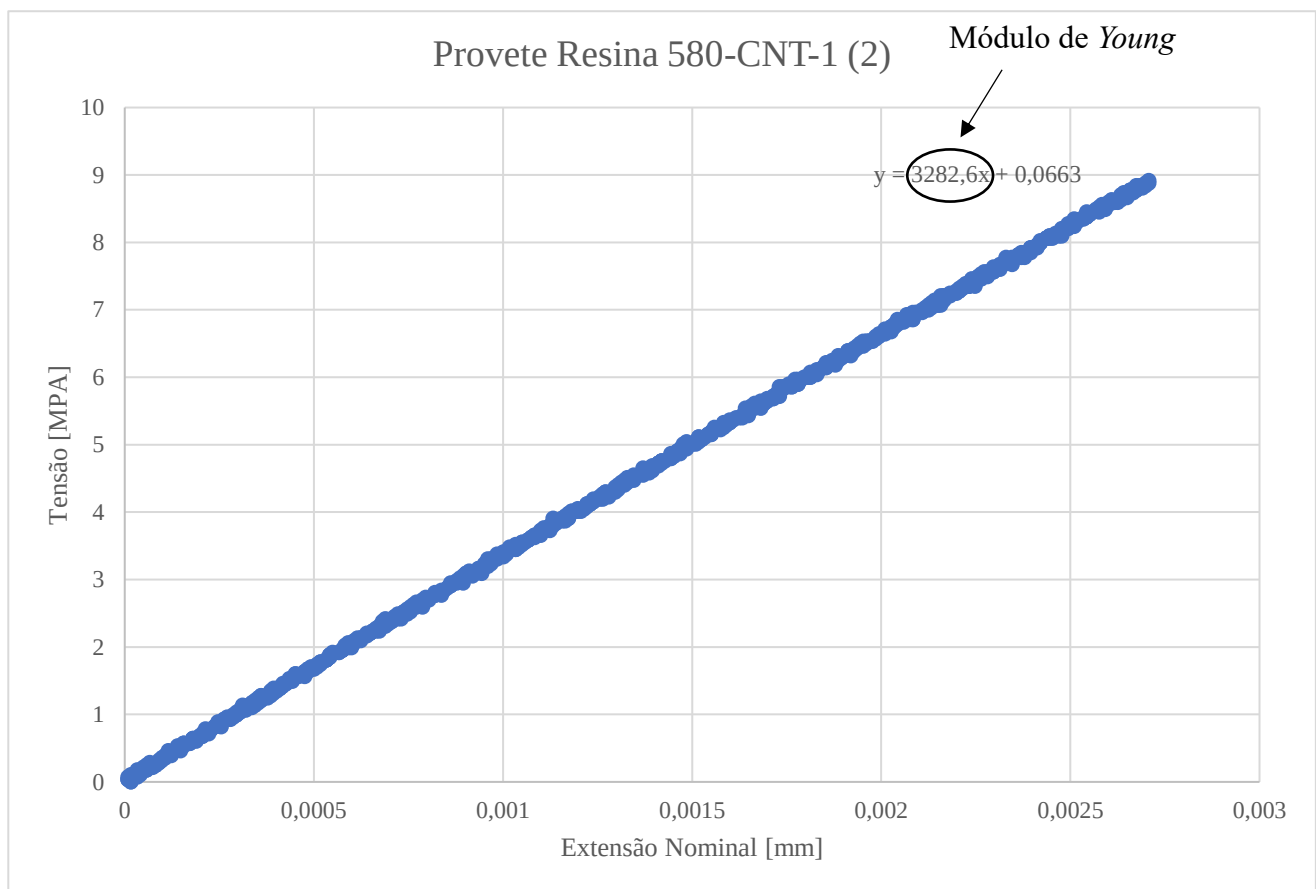


Figura 65 - Curva Módulo de Young Provete Resina 580-CNT-1 (2)

Observa-se na tabela 15, que a tensão máxima registrada foi de 14,355 MPa para o provete 3. O melhor módulo de Young registou-se para o provete 1, e foi de 3,477 GPa.

4.6 Macrografias Compósitos

Como consta no tópico 3.10 as macrografias foram realizadas recorrendo Lupa de observação 30x *Leica Zoom 2000*. Nos subcapítulos que se seguem são apresentadas imagens das fraturas dos compósitos, provocadas pelos ensaios de tração.

4.6.1 Compósitos 580-CF

Nos três conjuntos de imagens que se seguem são apresentadas as macrografias dos compósitos 580 sem furo, com um furo e com dois furos respetivamente.

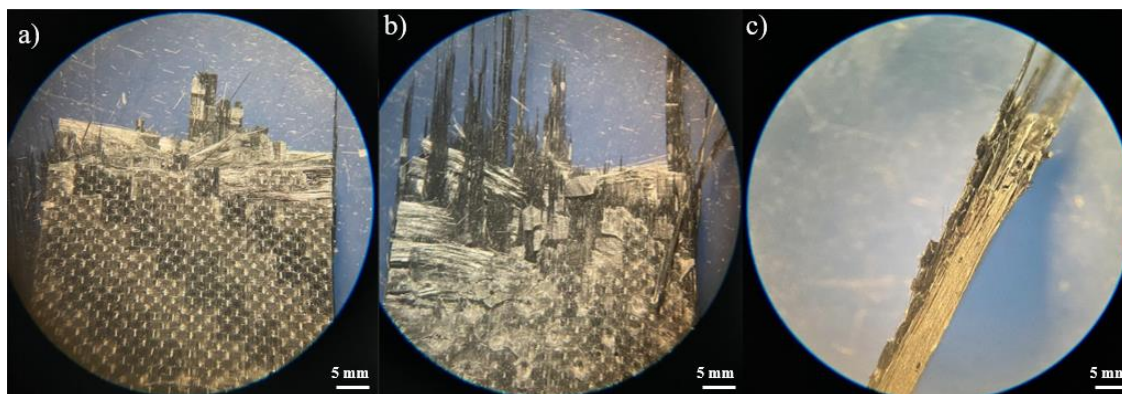


Figura 66 - Macrografias Compósitos 580-CF Sem Furo: a) zona de fratura traseira; b) zona de fratura frontal e c) delaminação

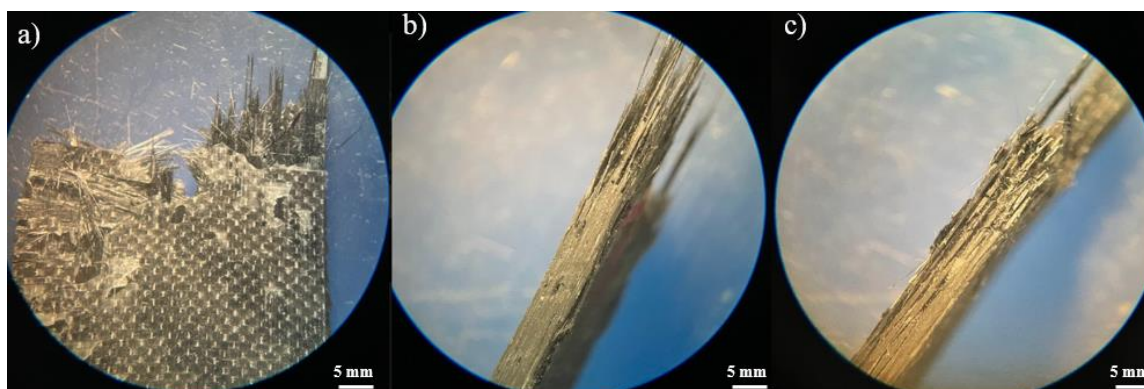


Figura 67 - Macrografias Compósitos 580-CF Um Furo: a) zona de fratura frontal; b) face com menor delaminação e c) face com maior delaminação

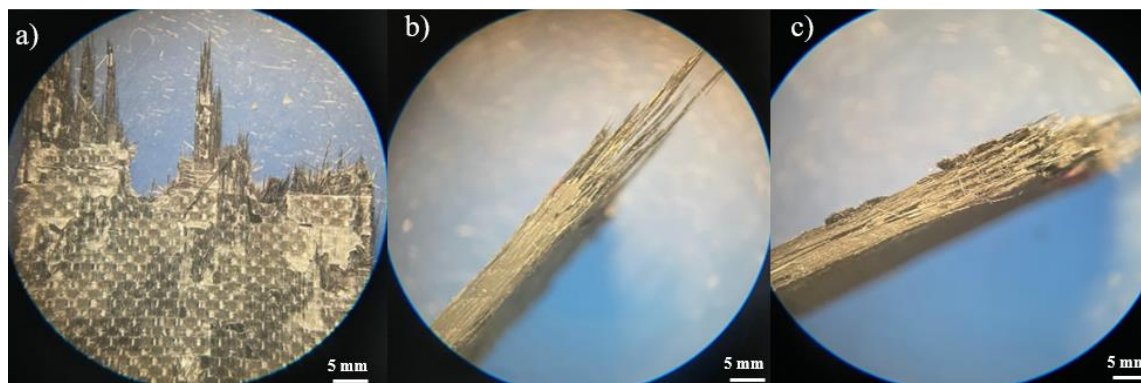


Figura 68 - Macrografias Compósitos 580-CF Dois Furos: a) zona de fratura frontal; b) face com menor delaminação e c) face com maior delaminação

Nos provetes onde existe furação a fratura ocorreu na zona esperada, na zona das furações, uma vez que é a zona onde se encontra a maior concentração de tensões. Já a cedência para os provetes sem furo também ocorreu sensivelmente a meio da zona central do provete.

Visualmente, para todos os provetes, a zona mais afetada em termos de delaminação das camadas do compósito foi em redor da zona de fratura, mantendo as restantes partes e camadas intactas.

4.6.2 Compósitos 580-CF-CNT-0.5

Nos próximos três conjuntos de imagens que se seguem são apresentadas as macrografias dos compósitos 580-CF-CNT-0.5 sem furo, com um furo e com dois furos respetivamente.

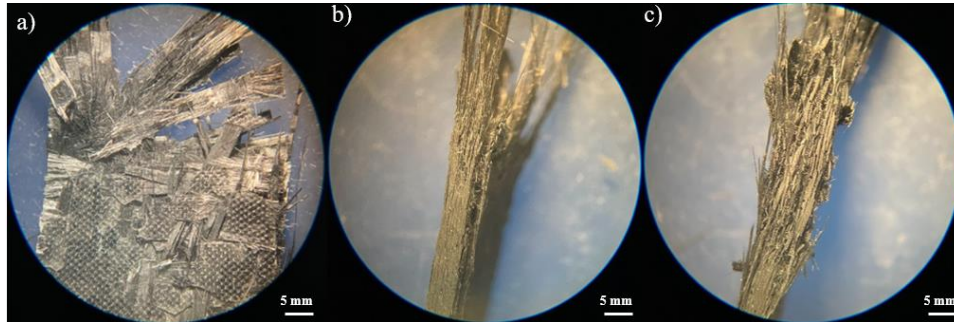


Figura 69 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-0.5 Sem Furo: a) zona de fratura frontal; b) face com menor delaminação e c) face com maior delaminação

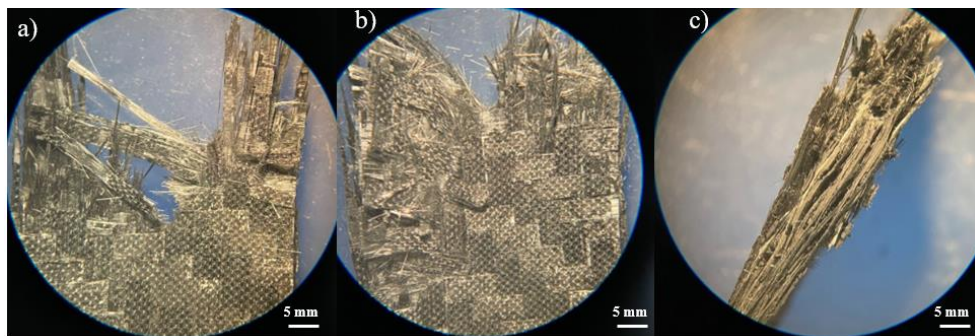


Figura 70 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-0.5 Um Furo: a) zona de fratura frontal; b) zona de fratura traseira e c) delaminação

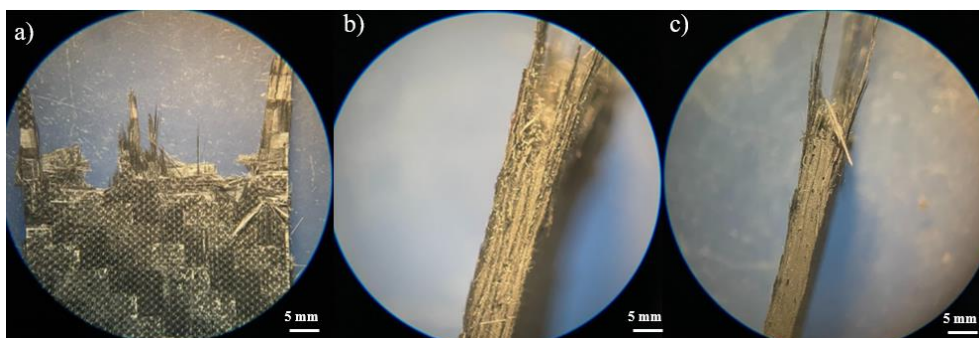


Figura 71 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-0.5 Dois Furos: a) zona de fratura frontal; b) face com maior delaminação e c) face com menor delaminação

Nos provetes em que existe furação a fratura ocorreu na zona esperada, na zona das furações, onde tal como nos provetes 580-CF, é a zona onde se encontra a maior concentração de tensões. Já a fratura para os provetes também ocorreu sensivelmente a meio dos provetes.

Visualmente, para todos os provetes, a zona mais afetada em termos de delaminação das camadas do compósito foi em redor da zona de fratura, mantendo as restantes partes do provete sem grandes deformações. Para estes compósitos nas faces laterais já é possível observar pequenos aglomerados que correspondem aos CNT.

4.6.3 Compósitos 580-CF-CNT-1

Os próximos três conjuntos de imagens apresentados são as macrografias dos compósitos 580-CF-CNT-1 sem furo, com um furo e com dois furos respetivamente.

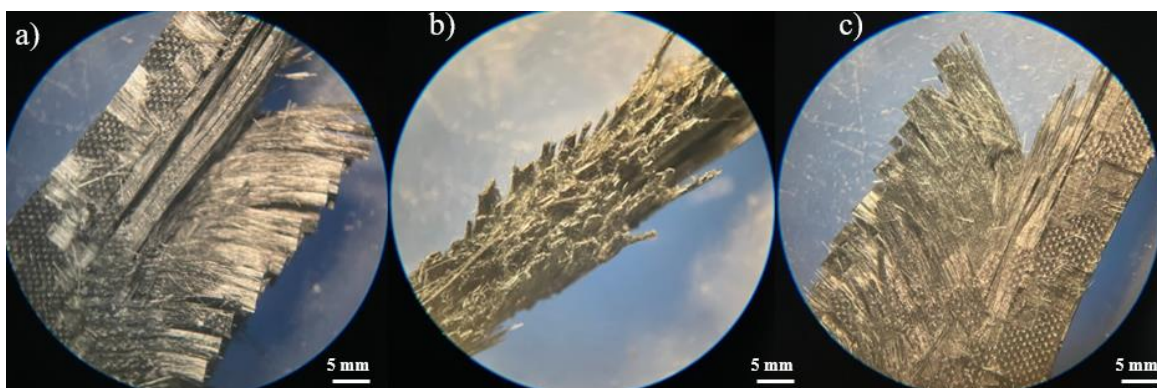


Figura 72 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-1 Sem Furo: a) zona de fratura frontal; b) delaminação e c) zona de fratura traseira

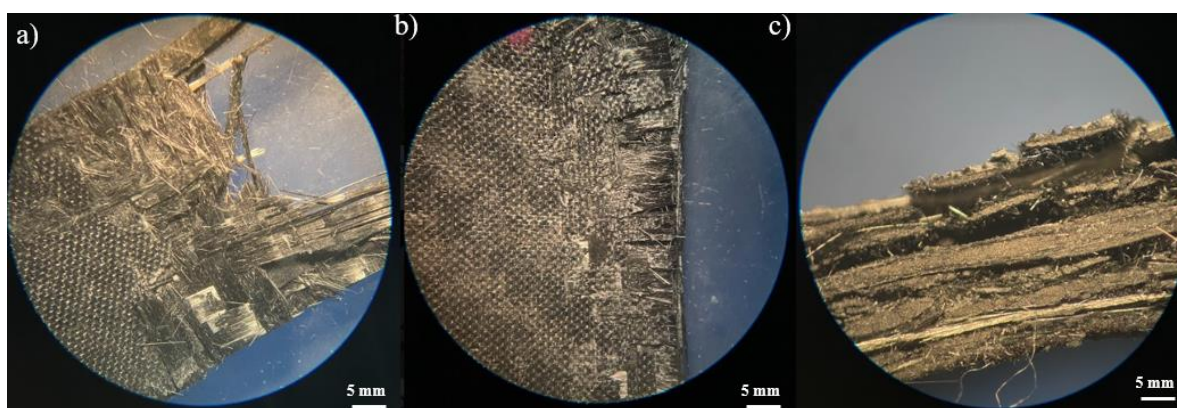


Figura 73 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-1 Um Furo: a) zona de fratura frontal; b) zona de fratura traseira e c) delaminação

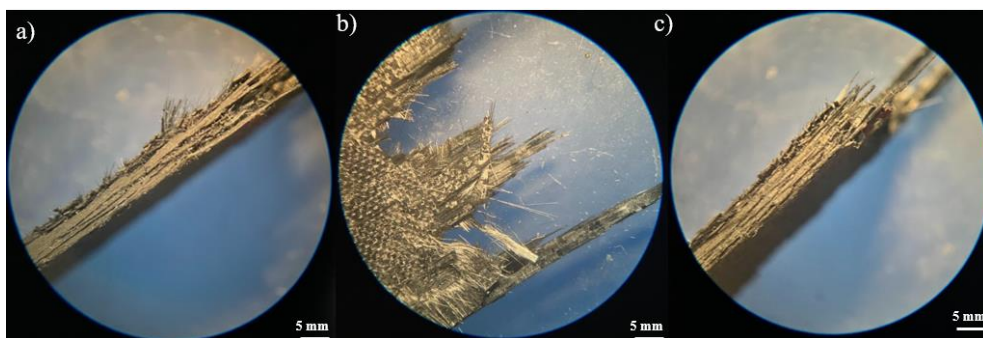


Figura 74 - Macrografias Compósitos 580-CF-CNT-1 Dois Furos: a) face com menor delaminação; b) zona de fratura frontal e c) face com maior delaminação

A fratura, para os compósitos com um furo e dois furos, tal como nos ensaios dos compósitos anteriores ocorreu na mesma zona, na zona das furações, exatamente pelo mesmo princípio. E a fratura para os compósitos sem furo, também ocorreu da mesma forma que os compósitos anteriores.

Nota-se que para estes provetes 580-CF-CNT-1, visualmente, a deformação foi bastante superior aos restantes compósitos. Nestes provetes nas faces laterais já é possível observar maiores aglomerados de CNT's do que nos compósitos de 580-CF-CNT-0.5.

4.7 Macrografias Resinas

Tal como no tópico 4.6 as macrografias foram realizadas recorrendo lupa de observação 30x *Leica Zoom 2000*. Nos subcapítulos que se seguem são apresentadas imagens das fraturas das resinas após os ensaios de tração.

4.7.1 Resina 580-CF

As imagens apresentadas de seguida, são as macrografias dos provetes resina 580-CF.

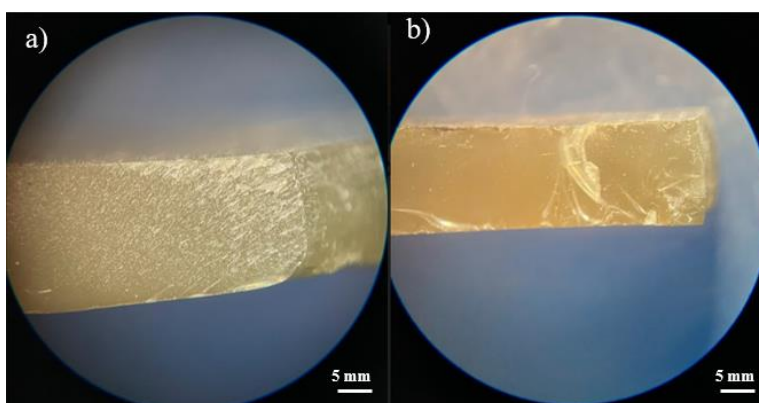


Figura 75 - Macrografias Resina 580-CF: a) superfície de fratura e b) fissuras existentes

Constatou-se que para esta composição os provetes apresentam uma fratura frágil e irregular, contudo visualmente a porosidade apresentada é praticamente nula. Face a estas observações pode-se constatar que a fratura ocorreu pelo tempo que o provete esteve exposto às cargas aplicadas.

4.7.2 Resina 580-CF-CNT-0.5

As imagens apresentadas na figura 76, são as macrografias dos provetes resina 580-CF-CNT-0.5.

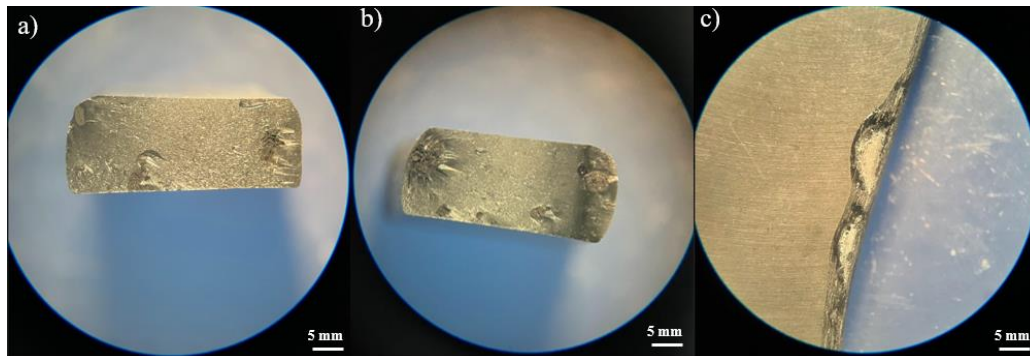


Figura 76 - Macrografias Resina 580-CF-CNT-0.5: a) fissuras existentes; b) aglomerados de CNT e c) lascas provocadas pelo ensaio de tração

Para esta composição observa-se também uma fratura frágil e irregular, nota-se o aumento da porosidade. Repara-se também nos aglomerados de CNT que não se conseguiram dispersar. Nesta composição existiram também zonas laterais dos provetes que ficaram lascadas.

4.7.3 Resina 580-CF-CNT-1

São agora apresentadas as macrografias dos provetes resina 580-CF-CNT-1.

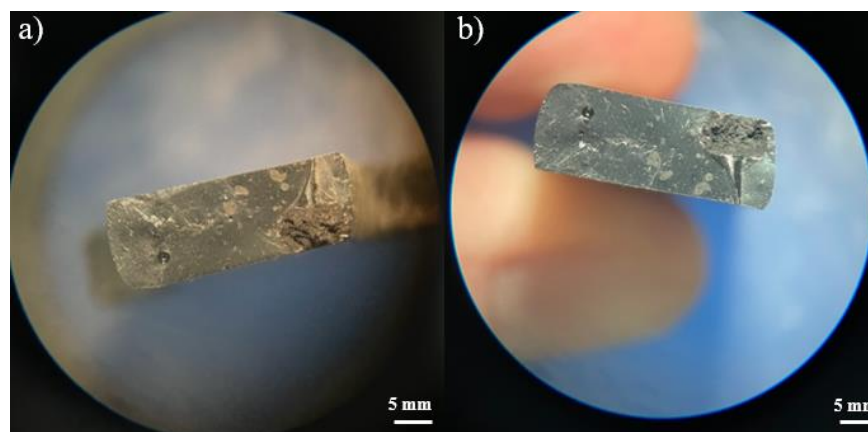


Figura 77 - Macrografias Resina 580-CF-CNT-1: a) aglomerado de CNT's e b) aglomerados de CNT's e fissuras

Para os provetes 580-CF-CNT-0.5, figura 76 consta-se também uma fratura frágil e irregular, nota-se ainda mais o aumento da porosidade em comparação com os provetes 580-CF-CNT-1. Repara-se também nos aglomerados de CNT que não se conseguiram dispersar, e apresentam maiores dimensões.

4.8 Micrografias Resinas

Nos subcapítulos que se seguem são apresentadas as micrografias das resinas.

4.8.1 Resina 580

De seguida, na figura 78, são apresentadas as micrografias da resina 580.

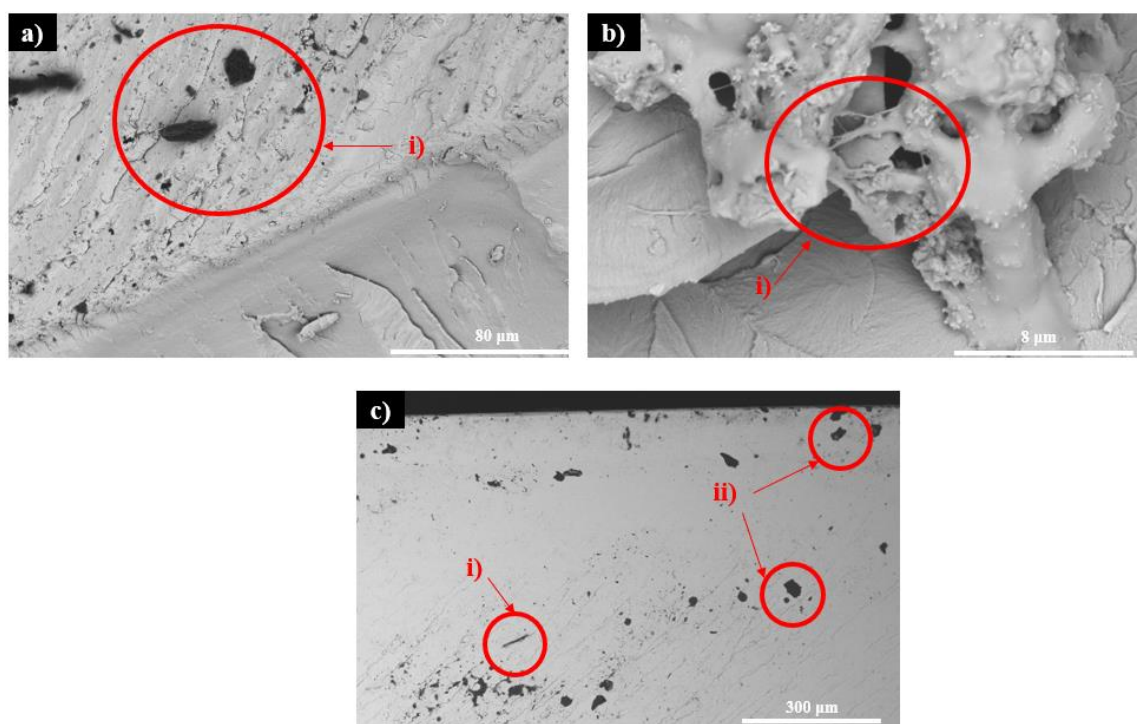


Figura 78 - Micrografias 580: a) Micrografia com ampliação, b) Micrografia com ampliação e c) Micrografia com ampliação

Na figura 78 a) i), observam-se vários tamanhos de poros existentes na superfície de fratura. Já na figura 78 b) i), é possível observar a que os CNT estão em tensão.

Por fim na figura 78 c) i), visualiza-se uma fissura com uma dimensão considerável e observa-se também a existência de vários poros na periferia da superfície, bem como no centro, figura 78 c) ii).

Pode-se afirmar que a superfície de fratura, tendo em conta as micrografias, apresenta alguma rugosidade.

4.8.2 Resina 580-CNT-0.5

São agora apresentadas as micrografias referentes aos provetes de resina 580-CNT-0.5

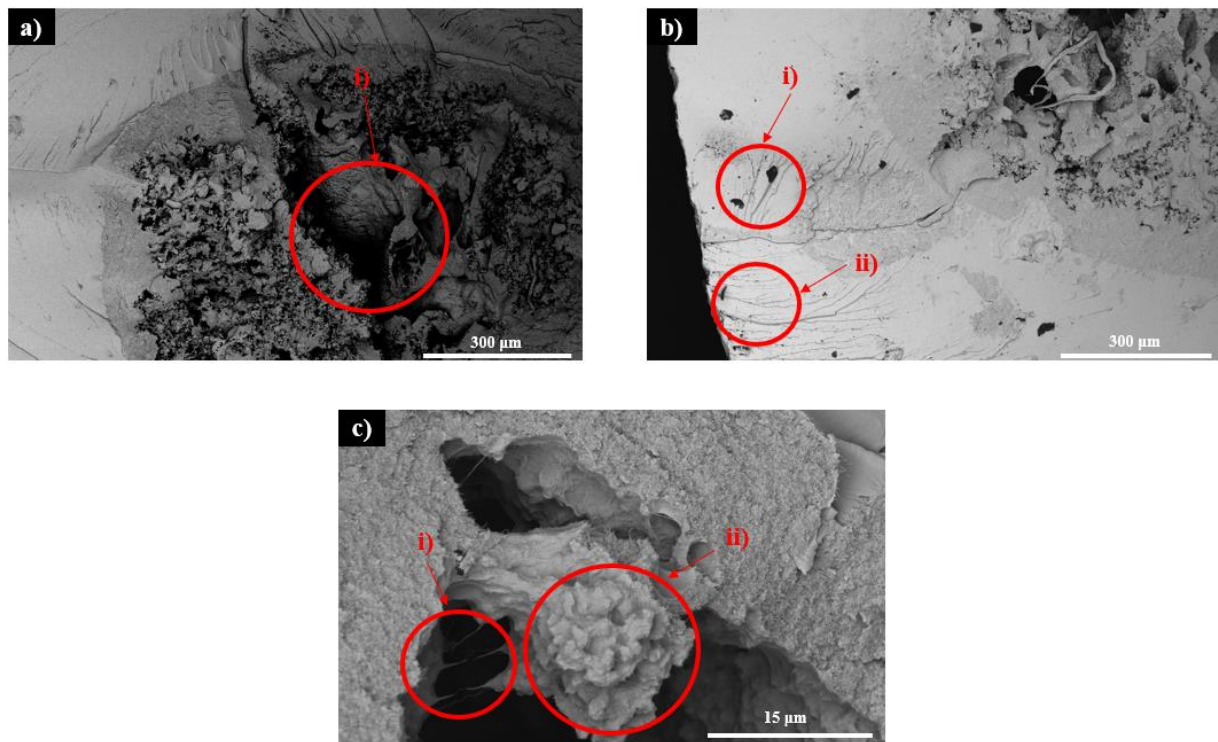


Figura 79 - Micrografias 580-CNT-0.5: a) Micrografia com ampliação 105x, b) Micrografia com ampliação 110x e c) Micrografia com ampliação 2500x

Primeiramente consegue-se observar de uma forma muito perceptível na figura 79 a) i), uma grande fissura existente na superfície de fratura

Na figura 79 b) i), verifica-se a existência de alguns poros, da mesma forma que é notória a presença de mais fissuras ao longo da superfície de fratura, figura b) ii).

Já na figura 79 c), observa-se o CNT (ii) a fazer a “ponte”, ou seja, estão a ser quebradas as ligações da cadeia polimérica (i) e o CNT fica isolado, sem ocorrer a fratura do mesmo.

A superfície de fratura da resina 580-CNT-0.5, apresenta uma superfície rugosa.

4.8.3 Resina 580-CNT-1

Por fim são apresentadas as micrografias referentes aos provetes 580-CNT-1.

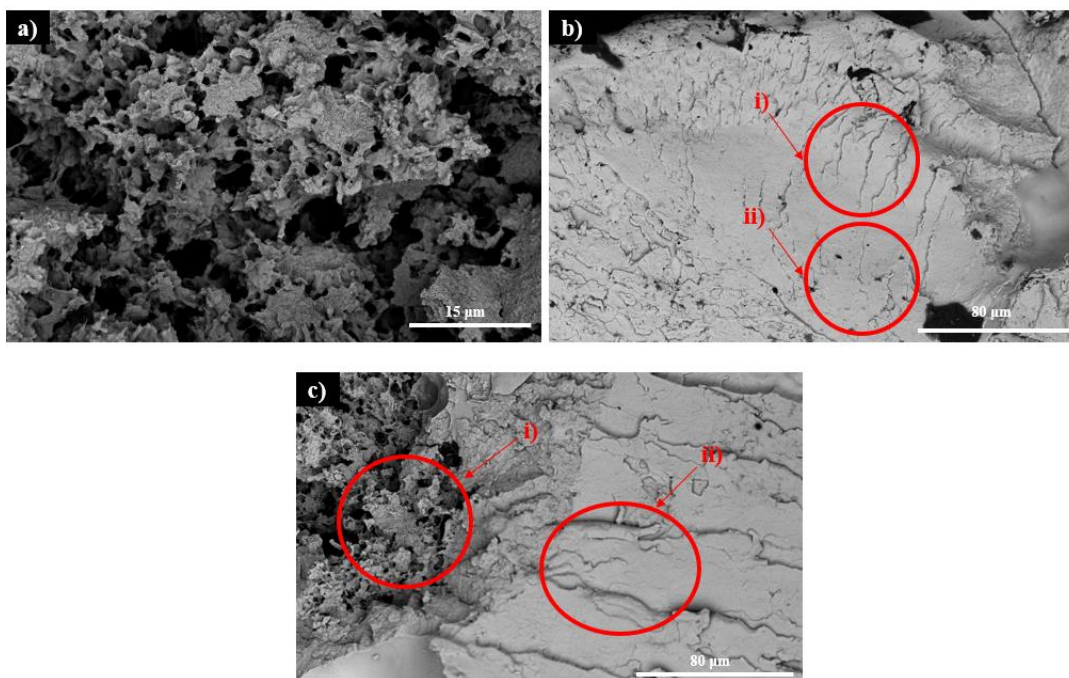


Figura 80 -Micrografias 580-CNT-1: a) Micrografia com ampliação 1000x, b) Micrografia com ampliação 500x e c) Micrografia com ampliação 500x

Na figura 80 a) e na figura 80 c) i), é perceptível os aglomerados de CNT's existentes.

Por sua vez na figura 80 b) i), observa-se poros de diferentes dimensões, bem como a existência de bastantes fissuras, figura 80 b) ii) e figura 80 c) ii).

À semelhança dos provetes 580-CNT-0.5, os provetes 580-CNT-1 apresentam uma superfície de fratura rugosa.

Capítulo 5

Discussão dos Resultados

Durante este capítulo vão ser analisados de forma mais criteriosa os resultados obtidos durante o trabalho experimental. Tendo sempre como auxílio a literatura.

5.1 Interpretação dos resultados obtidos para compósitos

Para uma melhor interpretação dos resultados obtidos e para uma melhor percepção, foram calculadas as médias e desvios padrões dos vários tipos de compósitos e tipologias, como se vai demonstrar. No final é feita uma comparação gráfica entre os diferentes tipos de compósitos e tipologias.

5.1.1 Compósitos 580-CF

Na tabela 16 são apresentados os dados estatísticos referentes à tensão máxima, deformação máxima e módulo de *Young* dos provetes dos compósitos 580-CF.

Tabela 16 - Dados Estatísticos Compósitos 580-CF

Tipologia	Tensão máxima σ (MPa)		Extensão Normal		Módulo de <i>Young</i> E (Gpa)	
	Média σ	Desvio Padrão σ	Média Extensão	Desvio Padrão Extensão	Média E	Desvio Padrão E
Dois Furos	331,84	12,12	0,01	0,0003	41,43	1,44
Um Furo	365,06	4,51	0,01	0,0001	38,55	0,91
Sem Furo	616,77	15,05	0,01	0,0009	46,98	2,73

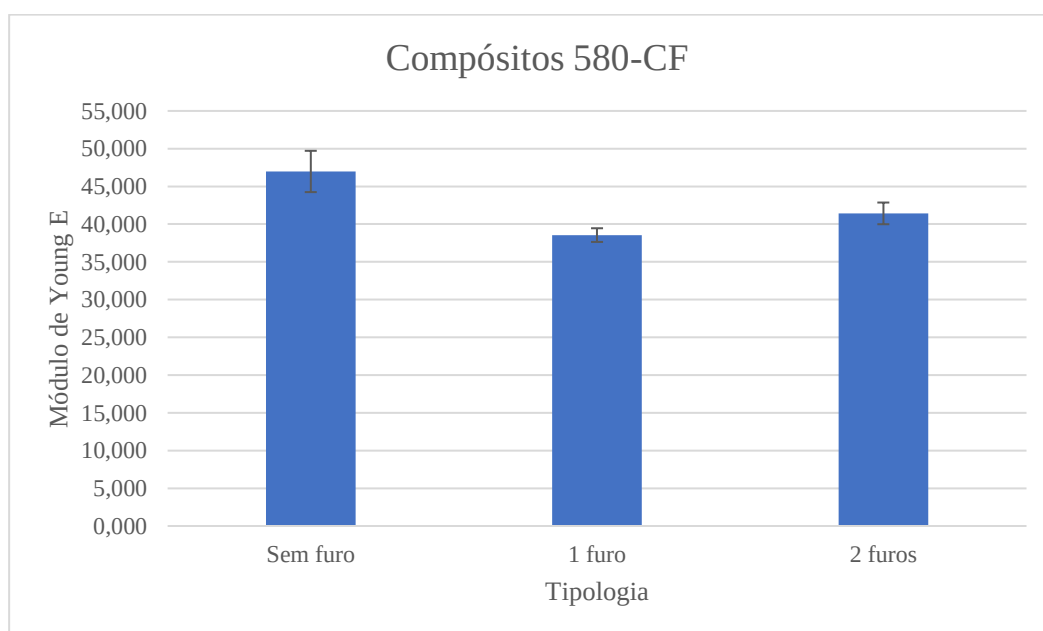


Figura 81 - Compósitos 580-CF

Tendo em conta a tabela 16 e a figura 81, pode-se afirmar que o compósito 580-CF sem furo é bastante consistente uma vez que, a fratura ocorre para valores elevados e apresenta um módulo de elasticidade elevado.

Quando existe furação os valores de tensão máxima diminuem consideravelmente em relação aos provetes sem furo, o pode ser explicado pelo facto de existir uma menor área, devido aos furos, gerando uma concentração de tensões junto a este detalhe de construção, levando como tal a uma fratura prematura. Em relação aos módulos de elasticidade a diferença entre os provetes com furações não foi significativa.

5.1.2 Compósitos 580-CF-CNT-0.5

Apresentam-se agora os dados estatísticos referentes à tensão máxima, deformação máxima e módulo de *Young* dos provetes dos compósitos 580-CF-CNT-0.5.

Tabela 17 - Dados Estatísticos 580-CF-CNT-0.5

Tipologia	Tensão máxima σ (MPa)		Extensão Normal		Módulo de <i>Young</i> E (Gpa)	
	Média σ	Desvio Padrão σ	Média Extensão	Desvio Padrão Extensão	Média E	Desvio Padrão E
Dois Furos	352,28	8,47	0,01	0,0004	38,93	1,80
Um Furo	403,10	16,99	0,01	0,0004	40,35	2,14
Sem Furo	525,40	40,63	0,01	0,0002	45,69	0,87

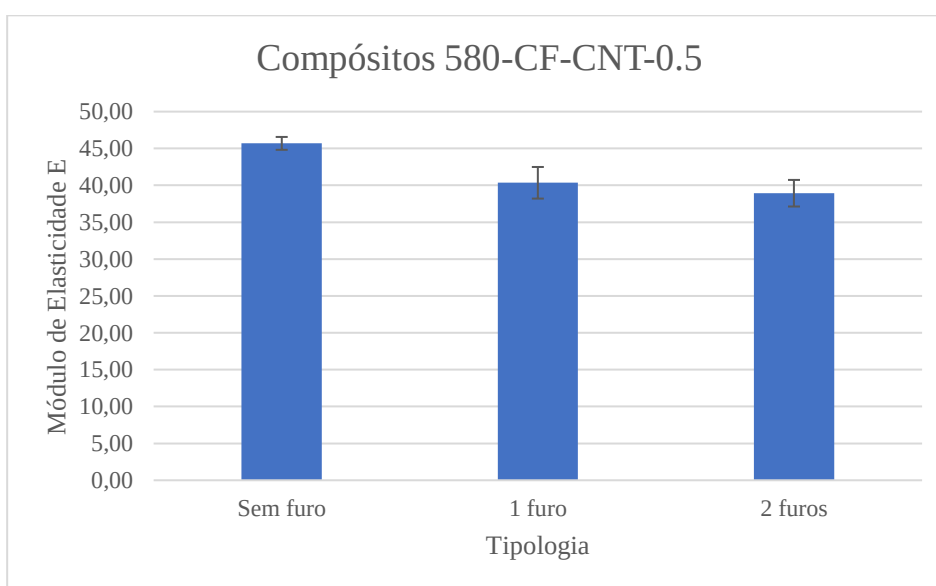


Figura 82 - Compósitos 580-CF-CNT-0.5

Observando a tabela 17 e a figura 82, pode-se afirmar que o compósito 580-CF-CNT-0.5 sem furo é consistente uma vez que, a fratura ocorre para valores algo elevados e apresenta um módulo de elasticidade mais elevado.

Quando existe furação os valores de tensão máxima diminuem exponencialmente em relação aos provetes sem furo, tal como ocorreu para os provetes 580-CF. Neste caso existindo a adição de CNT's a diminuição é maior dos provetes com um furo para os provetes com dois furos. Este comportamento pode ser explicado pela existência de maior número de defeitos, introduzidos pela presença de CNT's na matriz do compósito (figura 76 vs 75). Estes defeitos foram então responsáveis pela redução verificada nas propriedades mecânicas.

Em relação aos módulos de elasticidade a diferença entre os provetes com furações não foi muito significativa, tendo apresentado praticamente o mesmo módulo de elasticidade.

5.1.3 Compósitos 580-CF-CNT-1

Vão ser agora apresentados os dados estatísticos relativamente à última composição dos compósitos 580-CF-CNT-1, referentes à tensão máxima, deformação máxima e módulo de *Young*.

Tabela 18 - Dados Estatísticos 580-CF-CNT-1

Tipologia	Tensão máxima σ (MPa)		Extensão Normal		Módulo de <i>Young</i> E (Gpa)	
	Média σ	Desvio Padrão σ	Média Extensão	Desvio Padrão Extensão	Média E	Desvio Padrão E
Dois Furos	317,35	15,82	89,73	7,59	40,82	2,80
Um Furo	394,31	12,35	99,49	15,64	45,63	1,66
Sem Furo	481,15	2,07	117,83	2,72	46,16	0,58

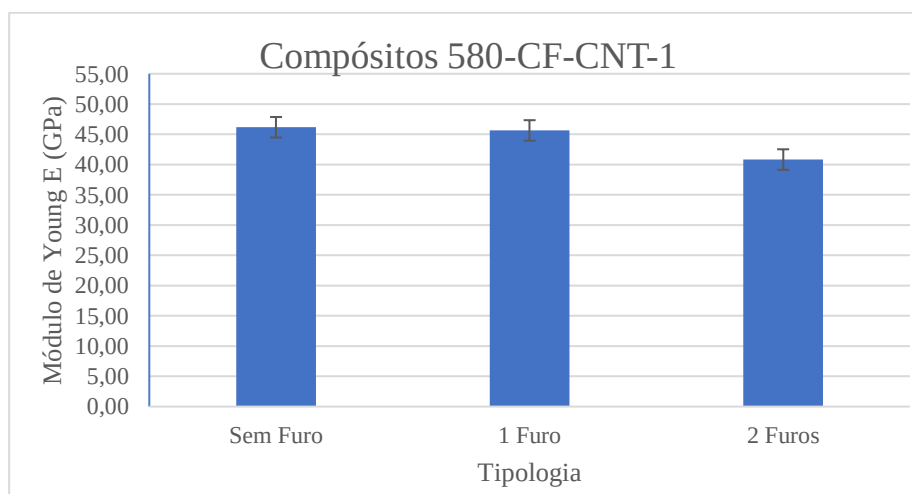


Figura 83 - Compósitos 580-CF-CNT-1

Tendo como referência a tabela 18 e a figura 83, pode-se afirmar que o compósito 580-CF-CNT-1 sem furo apresenta alguma consistência, a fratura ainda ocorre para valores um pouco elevados e apresenta um módulo de elasticidade mais elevado.

Quando existe furação os valores de tensão máxima tendem a diminuir gradualmente quando comparados aos provetes sem furo, o que pode ser explicado pelas concentrações de tensões introduzidas por estes. Neste caso em particular sendo a concentração de CNT's a mais elevada a diminuição é maior dos provetes com um furo para os provetes com dois furos. Em relação aos módulos de elasticidade a diferença entre os provetes com furações não foi significativa, tendo apresentado praticamente o mesmo módulo de elasticidade. Mais uma vez a diferença pode ser explicada pela introdução de defeitos na matriz, resultante da adição de CNT's.

5.2 Comparação dos resultados obtidos para resinas

Os dados estatísticos referentes às resinas estão representados na tabela 19, e a figura 84 é feita a comparação entre os módulos de *Young* das diferentes composições de resinas.

Tabela 19 - Dados Estatísticos Resinas

Composição	Tensão máxima σ (MPa)		Extensão Normal		Módulo de <i>Young</i> E (Gpa)	
	Média σ	Desvio Padrão σ	Média Extensão	Desvio Padrão Extensão	Média E	Desvio Padrão E
580	16,20	1,90	0,005	0,001	3,21	0,07
580-CNT-0.5	14,00	2,38	0,005	0,002	3,63	0,23
580-CNT-1	11,54	2,23	0,003	0,001	3,33	0,10

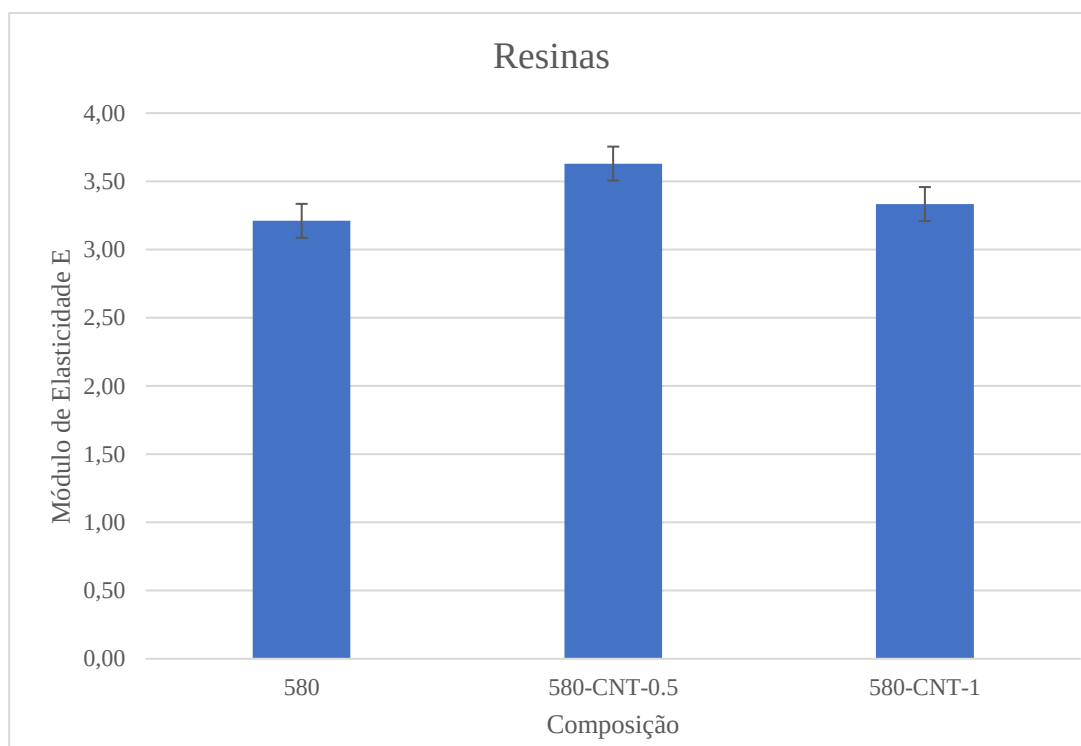


Figura 84 - Comparação Resinas

Conforme a figura 84, à semelhança do que se constatou com os compósitos, é possível constatar que a adição de CNT's não teve um impacto significativo no aumento do módulo de elasticidade, sendo o módulo de elasticidade idêntico para as três composições.

Aparentemente o melhor resultado é obtido com a adição de 0.5% de CNT's, existindo neste ponto um equilíbrio entre o aumento de rigidez esperado e os defeitos adicionais introduzidos.

Sendo os provetes das resinas maciços é ainda mais notória a diminuição da resistência à fratura, sendo que esta resistência diminui consideravelmente quanto maior for a concentração de CNT's. Mais uma vez esta diminuição deve-se ao facto da difícil dispersão dos CNT's e quanto maior for a quantidade a adicionar, mais aglomerados vão existir.

5.3 Comparação dos resultados obtidos para compósitos

Vão ser apresentados os gráficos correspondentes à comparação dos resultados entre as diferentes composições e tipologias dos provetes realizados.

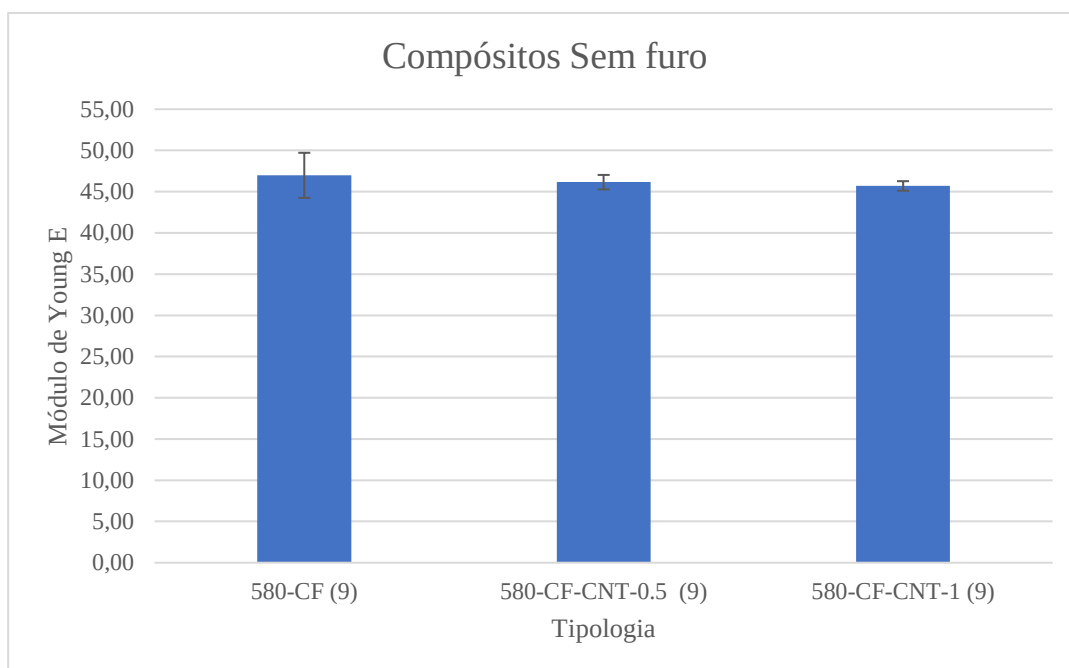


Figura 85 - Comparação Compósitos Sem Furo

Na figura 84, observamos a influência dos materiais existentes nos compósitos sem furo. Aparentemente o aumento da adição e concentração de CNT's fez reduzir o módulo de elasticidade, e a tensão máxima/cedência (tabelas 16, 17 e 18), uma vez que como se constata na figura 84 e nas tabelas 15,16,17 os melhores resultados obtidos são os dos compósitos 580-CF. O valor médio do módulo de elasticidade dos compósitos 580-CF é 46,98 GPa e o valor médio mínimo foi registado para os compósitos 580-CF-CNT-1 e foi de 45,69 GPa.

O facto dos compósitos 580-CF apresentarem melhor módulo de elasticidade e uma tensão de cedência mais elevada, pode ser explicado com as micrografias apresentadas no tópico 4.8.

Quanto maior for a percentagem de CNT's existentes nos provetes, mais difícil é a homogeneidade e a uniformidade dos CNT presentes nas misturas, face aos aglomerados de CNT's existentes e, por conseguinte, a sua difícil dispersão, como se observa na figura 79 e 80.

Tendo em conta esta análise, pode-se afirmar que a adição de CNT's nos provetes 580-CF-CNT-0.5 e 580-CF-CNT-1 teve um efeito negativo, devido a esta falta de homogeneidade e uniformidade dos próprios CNT's, o que fez com que a fratura neste tipo de provetes tivesse ocorrido de forma prematura e com uma menor carga aplicada, reduzindo também a rigidez do compósito quando comparados com os provetes de compósitos 580-CF.

O facto de os compósitos 580-CF apresentarem valores mais consistentes e elevados, pode ser explicado uma vez que a fratura ocorreu quando foram quebradas todas as ligações da cadeia polimérica da resina.

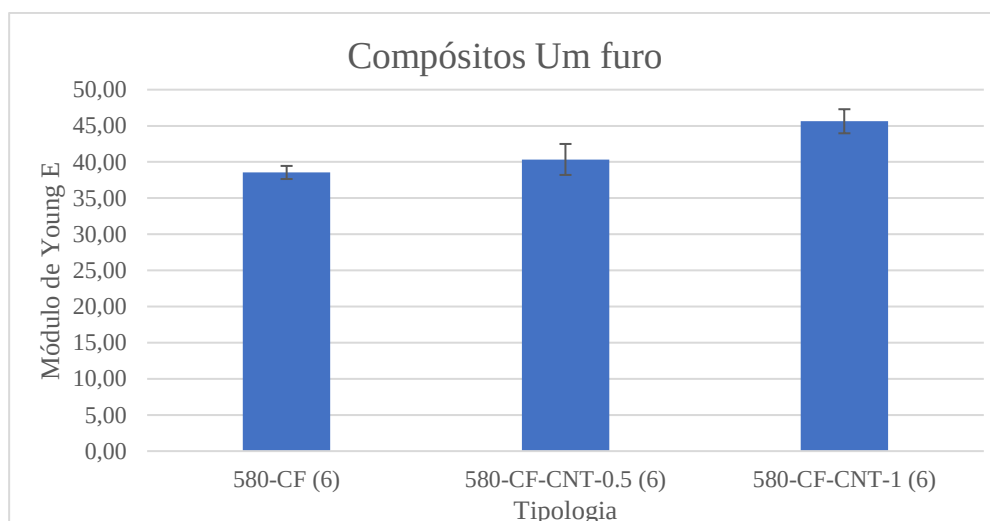


Figura 86 - Comparação Compósitos Um Furo

Na figura 86 são apresentados os valores referentes aos compósitos com um furo. Para os compósitos com este detalhe de construção verificou-se que o aumento da concentração de CNT's fez aumentar o módulo de elasticidade, embora que ligeiramente. A diferença existente entre as tensões de cedência também diminuiu (tabelas 16, 17 e 18). O valor médio do módulo de elasticidade mais elevado foi registado para os compósitos 580-CF-CNT-1 e foi 45,63 GPa e o valor médio mínimo foi registado para os compósitos 580-CF e foi de 38,55 GPa.

Tendo em conta estes dados podemos afirmar que na presença de um furo a adição de CNT's é benéfica para o aumento do módulo de elasticidade e para uma diminuição menos significativa da tensão de cedência. Estas constatações podem ser explicadas a partir das figuras 79 c) e 80 c), pois para este detalhe de construção foi mais difícil quebrar as denominadas "pontes" dos CNT's.

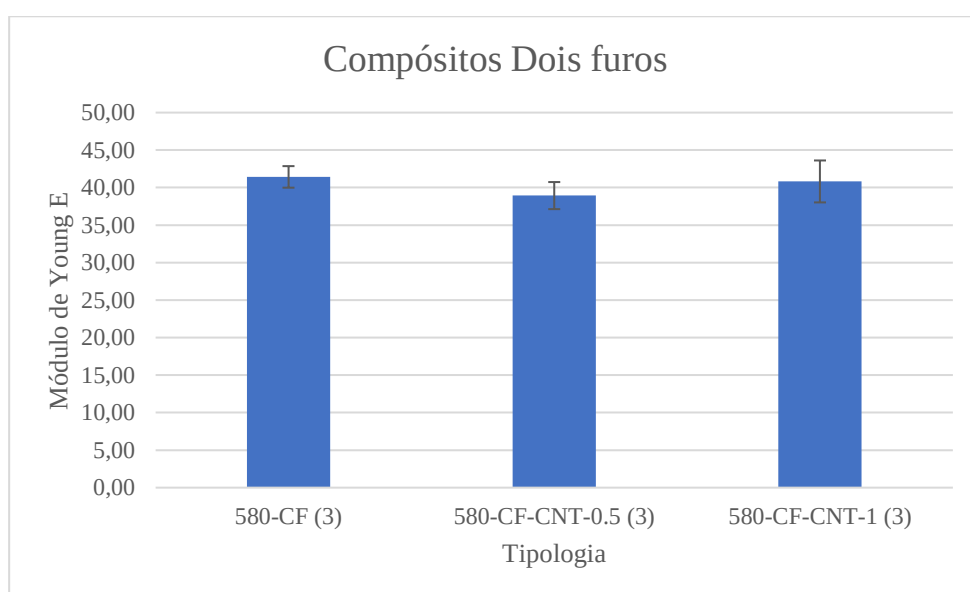


Figura 87 - Comparação Compósitos Dois Furos

Analisando agora a figura 87, o efeito dos CNT's já não é tão notório para este tipo de detalhe de construção (dois furos), pois o valor médio máximo do módulo de elasticidade registado foi 41,43 GPa para os compósitos 580-CF, e o valor médio mínimo foi 38,93 GPa e foi registado para os compósitos 580-CF-CNT-0.5.

Comparando os dados apresentados nas tabelas 16, 17 e 18, relativamente ao desvio padrão podemos dizer que estatisticamente não existiram diferenças entre as diferentes tipologias.

Podemos concluir que adicionar CNT's ou não adicionar CNT's, com este tipo de detalhe de construção não demonstra qualquer tipo de diferença nem aparente nem significativa.

Os autores A. Abdel-Hakim et al. [26] apesar de terem usado um material de reforço diferente, neste caso fibra de sisal, e terem submetido os materiais a um processo de radiação gama, concluíram também que existe a melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos até a uma certa quantidade de CNT's adicionada, que neste caso foi 0,4%, para os compósitos com 0,6% de CNT's o módulo de elasticidade diminuiu consideravelmente de 60,2 MPa para 46,3 MPa. Esta queda considerável do módulo de elasticidade pode ser explicada pelo maior número de aglomerados de CNT's existentes, o que faz com que a homogeneidade da mistura diminua, tal como aconteceu no presente trabalho.

As micrografias obtidas pelos autores Xiau et al. [14] demonstraram que quanto maior for a adição de CNT's na mistura (0,15% adição máxima), maior é a instabilidade da mistura, ou seja, tal como foi observado no presente trabalho uma maior adição de CNT's resulta numa menor homogeneidade da mistura, uma vez que existem maiores aglomerados de CNT's e a orientação aleatória dos mesmos. Foi constatado da mesma forma que até a uma certa quantidade de CNT's adicionados existe uma melhoria da resistência mecânica, mas a partir desse valor de CNT's adicionado a resistência mecânica diminui.

Segundo os autores Baptista et al. [12], apesar do processo experimental ter sido diferente do realizado neste trabalho, pois consistiu na adição de grafite em resina epóxi, os autores constataram que quanto maior for a adição de grafite na mistura maior a porosidade que vai existir na mesma, o que se observou também neste trabalho.

Podemos afirmar que os dados obtidos neste trabalho estão enquadrados dentro dos estudos existentes na área, pelo que a credibilidade dos mesmo é real.

5.4 Modelo de Hirsch's

De forma a validar os resultados e os dados estatísticos apresentados ao longo desta dissertação foi aplicada a regra das misturas [39] e o modelo de Hirsch's [40].

A regra das misturas é dividida em duas partes. É calculado o módulo de elasticidade em série e em paralelo, para depois no final de calculados estes dois módulos de elasticidade ser aplicado o modelo de Hirsch's. Para o módulo de elasticidade em paralelo temos a equação que é mostrada de seguida [39]:

$$E_{mistura} = E_1 \frac{v_1}{V} + E_2 \frac{v_2}{V} \dots + E_i \frac{v_i}{V} \quad (5)$$

em que:

- E – Módulo de Elasticidade
- $\frac{v}{V}$ – Fração Volúmica

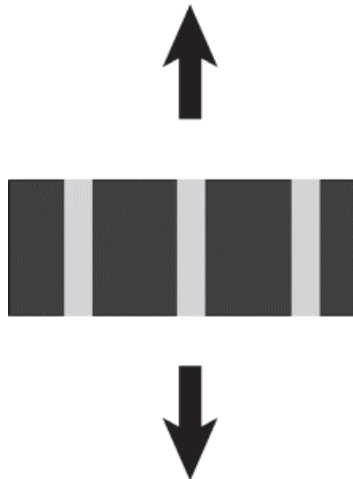


Figura 88 - Mistura em Paralelo [39]

Para a mistura em série temos a seguinte equação [39]:

$$\frac{1}{E_{mistura}} = \frac{v_1}{E_1} + \frac{v_2}{E_2} \dots + \frac{v_i}{E_i} \quad (6)$$

em que:

- E – Módulo de Elasticidade
- $\frac{v}{V}$ – Fração Volúmica

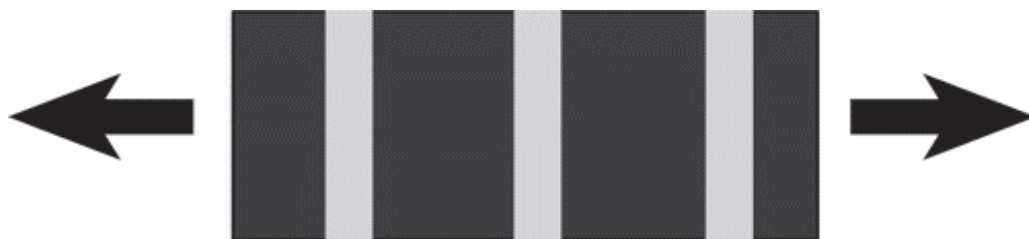


Figura 89 - Mistura em Série [39]

Para o cálculo das misturas em paralelo e em série, foi feita uma pesquisa dos módulos de elasticidade, da resina, da fibra de carbono e dos CNT's, conforme a tabela 20.

Tabela 20 - Módulos de Elasticidade Teóricos [39], [43]

Valores teóricos	Módulo de Elasticidade
Resina	3.5 GPa
Fibras	225 GPa
CNT	1200 GPa

Para se fazer o cálculo aplicando a regras das misturas, foram organizados os dados correspondentes a cada compósito, para uma melhor organização. Nas tabelas que se seguem são apresentados esses dados.

Na tabela 21 são apresentados os valores utilizados para o compósito 580-CF.

Tabela 21 - Valores Compósito 580-CF

Componente	Resina	Fibras
Massa (g)	220	212,2
Densidade (g/cm³)	1,1	1,8
Fração Volúmica (%)	0,63	0,37

Na próxima tabela 22 são apresentados os valores utilizados para o compósito 580-CF-CNT-0.5.

Tabela 22 - Valores Compósito CNT 580-CF-0.5

Componente	Resina	Fibras	CNT
Massa (g)	220	214,8	1,1
Densidade (g/cm³)	1,1	1,8	2,1
Fração Volúmica (%)	0,63	0,37	0,0016

Por fim na tabela 23 são apresentados os valores utilizados para o compósito 580-CF-CNT-1.

Tabela 23 - Valores Compósito 580-CF-CNT-1

Componente	Resina	Fibras	CNT
Massa (g)	220	216,6	2,2
Densidade (g/cm ³)	1,1	1,8	2,1
Fração Volúmica (%)	0,622	0,37	0,0033

De referir que os valores das densidades foram retirados dos fabricantes, o valor das massas é o usado para a conceção dos compósitos e o volume foi calculado tendo em conta a seguinte equação:

$$V = \frac{1}{\frac{\text{Densidade}}{\text{Massa}}} \quad (7)$$

Foi então calculado o módulo de elasticidade para a regra das misturas, aplicando as equações (6) e (7), tendo sido obtidos os valores que constam na tabela 24.

Tabela 24 - Valores Regra das Misturas

Tipologia	E (GPa), Mistura Paralelo	E (GPa), Mistura Série
Compósitos 580-CF	85,461	5,060
Compósitos 580-CF-CNT-0.5	88,179	5,750
Compósitos 580-CF-CNT-1	90,232	5,309

Após o cálculo das misturas em paralelo e em série foi então aplicado o modelo de Hirsch's, segundo a seguinte equação:

$$E_{mistura} = x \left(E_1 \frac{v_1}{V} + E_2 \frac{v_2}{V} \right) + (1 - x) \left(\frac{E_1 E_2}{E_1 \frac{v_2}{V} + E_2 \frac{v_1}{V}} \right) \quad (8)$$

em que:

- $E_{mistura}$ – Módulo de Elasticidade do compósito
- $\frac{v}{V}$ – Fração Volúmica
- E_1 – Módulo de Elasticidade mistura em paralelo
- E_2 - Módulo de Elasticidade mistura em série

O objetivo desta equação é saber qual o valor de x que melhor se adapta à nossa equação de forma a termos os mesmos resultados que os obtidos experimentalmente, para os provetes sem furo das diferentes composições. Pois com base no valor de x é possível saber se a regra das misturas foi bem aplicada.

Assim é apresentada na tabela 25 os valores obtidos.

Tabela 25 – Regra de Hirsch`s

Tipologia	χ	$E_{mistura}$ (GPa)
Compósitos 580-CF	0,52	46,9
Compósitos 580-CF-CNT-0.5	0,485	45,7
Compósitos 580-CF-CNT-1	0,481	46,16

Com base nos valores obtidos para χ e os respectivos módulos de elasticidade, pode-se concluir que os valores de χ rondam os 0.5 e os módulos de elasticidade da mistura foram equivalentes aos valores dos experimentais. Face a esses resultados pode-se afirmar que o comportamento final do compósito apresenta aproximadamente o mesmo peso segundo o modelo de mistura em série e em paralelo. Tal seria de esperar uma vez que todas as camadas de compósito apresentam a mesma direção e que possuem a mesma quantidade de fibras entrançadas nas duas direções do plano [0°, 90°]. Visto que as frações volúmicas de fibra, medidas experimentalmente, se encontram abaixo do esperado (~19-26% vs. ~37%) é expectável que o valor de χ seja afetado por esta diferença. Com uma maior fração de matriz polimérica será de esperar que o valor χ de aumente, dando primazia ao comportamento segundo a regra das misturas em paralelo, para que o valor final seja igual ao experimental.

5.5 Fator de Concentração de Tensão

O cálculo do fator de concentração (K_t) é feito tendo em conta a seguinte equação[44]:

$$K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma} \quad (8)$$

onde:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$ – média da tensão máxima registada (compósitos sem furo)
- σ – média das tensões com furo

Assim, tendo em conta a equação (8), foram registados os seguintes valores:

Tabela 26 - Fator de Concentração, compósitos 580-CF

Fator de Concentração, K_t	580-CF
Um furo	1,69
Dois furos	1,86

Tabela 27 - Fator de Concentração, compósitos 580-CF-CNT-0.5

Fator de Concentração, K_t	580-CF-CNT-0.5
Um furo	1,30
Dois furos	1,49

Tabela 28 - Fator de Concentração, compósitos 580-CF-CNT-1

Fator de Concentração, K_t	580-CF-CNT-1
Um furo	1,22
Dois furos	1,52

Com base nos valores apresentados nas tabelas 26, 27 e 28 podemos afirmar que quando existem 2 furos o fator de concentração é maior do que os compósitos com um furo. Este maior valor pode ser explicado porque, a presença dos dois furos reduz área da superfície dos provetes, e como são dois furos vão provocar uma maior alteração na distribuição das tensões, ou seja, em vez de existirem distribuições uniformes, a presença dos dois furos provoca uma maior perturbação no valor.

Embora, conforme já foi referido, a presença de CNT's tenha revelado um efeito delatório na tensão máxima suportada pelos compósitos, reduzindo a sua tensão de carga máxima. Revelou também um efeito positivo na presença de detalhes de construção. Verificou-se uma tendência para a redução do fator de concentração de tensão com o aumento da concentração de CNT's, o que pode explicar pela existência de “pontes” formadas por estes na região dos furos, que evitam uma queda tão acentuada da resistência mecânica da amostra.

Capítulo 6

Conclusões e Proposta de Trabalhos Futuros

Este capítulo encerra o tema desta dissertação de mestrado, onde primeiramente são apresentadas e analisadas as conclusões sobre os resultados obtidos sobre o tema em estudo, e de seguida são apresentadas algumas propostas para futuros desenvolvimentos na área da adição de fillers de carbono a compósitos de matriz poliéster reforçada com fibra de carbono.

6.1 Conclusões

Esta dissertação teve como principal objetivo estudar e produzir compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de carbono com a adição de fillers de carbono, para a realização deste estudo foram fabricados três tipos de compósitos, de forma a ser feito um estudo mais conclusivo.

Assim, foram realizados compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de carbono sem a adição de fillers de carbono, e compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de carbono e com a adição de fillers de carbono, cujas concentrações são 0.5% e 1% da concentração de resina.

Após os resultados obtidos podemos afirmar que:

- ✓ Para os compósitos 580-CF o módulo de elasticidade médio obtido foi de 46,98 GPa, 38,55 GPa e 41,23GPa, para a tipologia sem furo, um furo e dois furos, respectivamente.
- ✓ Já para os compósitos 580-CF-CNT-0.5, foram obtidos para o módulo de elasticidade médio os seguintes valores, 45,69 GPa, 40,35 GPa e 38,93 GPa para os compósitos sem furo, um furo e dois furos, respectivamente.
- ✓ Quanto aos compósitos 580-CF-CNT-1, os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade foram 46,16 GPa, 45,63 GPa e 40,82 GPa, respectivamente para os compósitos sem furo, um furo e dois furos.
- ✓ Quando comparados os compósitos na presença de um furo, estes apresentam um melhor módulo de elasticidade à medida que se aumenta a concentração de CNT's, pois os resultados da média dos módulos de elasticidade foram 38,55 GPa, 40,35 GPa e 45,69 GPa, para os compósitos 580-CF, 580-CF-CNT-0.5 e 580-CF-CNT-1, respectivamente. Face a estes resultados pode-se afirmar que os CNT's atuaram de forma eficaz, uma vez que houve a melhoria da resistência mecânica para este detalhe de construção.
- ✓ Para os compósitos com dois furos, a influência dos CNT's foi nula, uma vez que os resultados obtidos são idênticos.
- ✓ Quanto maior for a concentração de CNT's maior o número de aglomerados existentes e, por sua vez maior o número de fissuras e rugosidade existentes na superfície de fratura.

- ✓ A afirmação descrita acima, é a justificção para os valores da tensão de cedência e da resistência mecânica, nos compósitos sem furo, diminuir à medida que se aumenta a concentração de CNT's, uma vez que os valores médios do módulo de elasticidade obtidos foram 46,98 GPa, 46,16 GPa e 45,69 GPa, para os compósitos 580-CF, 580-CF-CNT-0.5 e 580-CF-CNT-1, respetivamente.
- ✓ Os valores obtidos para os compósitos, vão de encontro aos valores obtidos para as resinas, pois para uma pequena percentagem de CNT's, 0,5 % neste caso, os CNT's conseguem atuar, mas assim que é aumentada a sua concentração o efeito é o contrário e o valor da resistência mecânica diminui.
- ✓ Quando comparadas as superfícies de fratura, a superfície de fratura da resina 580 é muito menos rugosa dos que os provetes de resina CNT, que apresentam uma superfície de fratura muito mais rugosa e com maior número de fissuras provocadas pelos CNT's.
- ✓ Face aos resultados obtidos pelo modelo de Hirsch's, podemos concluir que a regra das misturas prevê que o comportamento final do compósito possui aproximadamente o mesmo peso nas duas orientações limites.
- ✓ Tendo em conta os valores alcançados para o fator de concentração, é mais uma vez visível que na presença de um furo os CNT's são eficazes, e na presença de dois furos essa adição de CNT's já não se faz sentir na resistência mecânica dos materiais.

Assim, perante todos os resultados obtidos é possível afirmar que os componentes onde sejam utilizados compósitos de matriz poliéster com a adição de CNT's reforçados com fibras de carbono a adição de CNT's não irá ter nenhum benefício adicional para o material sem qualquer tipo de defeito. Já se o material apresentar algum tipo de defeito os CNT's, em pequena proporção, atuam de forma eficaz de forma a retardar a fratura.

6.2 Propostas de Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros realizados neste campo, sugere-se:

- ✓ Utilização de uma máquina de ultrassons mais avançada, para uma melhor dispersão dos CNT's.
- ✓ Estudar o tamanho dos CNT's no comportamento à resistência mecânica.

Bibliografia

- [1] M. M. Harussani, S. M. Sapuan, G. Nadeem, T. Rafin, and W. Kirubaanand, "Recent applications of carbon-based composites in defence industry: A review," *Defence Technology*, vol. 18, no. 8, pp. 1281–1300, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.DT.2022.03.006.
- [2] A. Mikhilchan and J. J. Vilatela, "A perspective on high-performance CNT fibres for structural composites," *Carbon N Y*, vol. 150, pp. 191–215, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.CARBON.2019.04.113.
- [3] M. Rahman, S. Ramakrishna, J. R. S. Prakash, and D. C. G. Tan, "Machinability study of carbon fiber reinforced composite," *J Mater Process Technol*, vol. 89–90, pp. 292–297, May 1999, doi: 10.1016/S0924-0136(99)00040-0.
- [4] "14º enacor encontro nacional de conservação rodoviária - ppt carregar." <https://slideplayer.com.br/slide/1261591/> (accessed Aug. 26, 2022).
- [5] Prashanth S, Subbaya KM, Nithin K, and Sachhidananda S, "Fiber Reinforced Composites - A Review," *Journal of Material Sciences & Engineering*, Accessed: Oct. 26, 2022. [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/9d4a/93d3a6a3352f0e56738991609486856bd64e.pdf>
- [6] A. Vedrtam and S. P. Sharma, "Study on the performance of different nano-species used for surface modification of carbon fiber for interface strengthening," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 125, p. 105509, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2019.105509.
- [7] M. F. de S. F. Moura, A. M. B. de. Moraes, and A. G. de. Magalhaes, "Materiais compósitos : materiais, fabrico e comportamento mecânico," 2005.
- [8] F. Mesquita, S. Bucknell, Y. Leray, S. v. Lomov, and Y. Swolfs, "Single carbon and glass fibre properties characterised using large data sets obtained through automated single fibre tensile testing," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 145, p. 106389, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2021.106389.
- [9] I. M. Alarif, "Investigation the conductivity of carbon fiber composites focusing on measurement techniques under dynamic and static loads," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 4863–4893, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.JMRT.2019.08.019.
- [10] J. D. H. Hughes, "The carbon fibre/epoxy interface—A review," *Compos Sci Technol*, vol. 41, no. 1, pp. 13–45, Jan. 1991, doi: 10.1016/0266-3538(91)90050-Y.
- [11] F. L. Jin and S. J. Park, "Preparation and characterization of carbon fiber-reinforced thermosetting composites: a review," *Carbon letters*, vol. 16, no. 2, pp. 67–77, Apr. 2015, doi: 10.5714/CL.2015.16.2.067.
- [12] R. Baptista, A. Mendão, F. Rodrigues, C. G. Figueiredo-Pina, M. Guedes, and R. Marat-Mendes, "Effect of high graphite filler contents on the mechanical and tribological failure behavior of epoxy matrix composites," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 85, pp. 113–124, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.TAFMEC.2016.08.013.
- [13] Fitzer Erich, Gkogkidis Antonios, and Heine Michael, "Carbon fibres and their composites (A Review)," *High Temperatures-High Pressures*, vol. 16, pp. 363–392, 1984, Accessed: Oct. 26, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Michael-Heine-3/publication/259871446_Carbon_Fibers_and_their_Composites_A_Review/links/55cf544c08ae118c85c008af/Carbon-Fibers-and-their-Composites-A-Review.pdf

- [14] C. Xiao, Y. Tan, X. Wang, L. Gao, L. Wang, and Z. Qi, "Study on interfacial and mechanical improvement of carbon fiber/epoxy composites by depositing multi-walled carbon nanotubes on fibers," *Chem Phys Lett*, vol. 703, pp. 8–16, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.CPLETT.2018.05.012.
- [15] W. Xin *et al.*, "Impact and post-impact properties of multiscale carbon fiber composites interleaved with carbon nanotube sheets," *Compos B Eng*, vol. 183, p. 107711, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107711.
- [16] A. K. Srivastava, V. Gupta, C. S. Yerramalli, and A. Singh, "Flexural strength enhancement in carbon-fiber epoxy composites through graphene nano-platelets coating on fibers," *Compos B Eng*, vol. 179, p. 107539, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107539.
- [17] B. K. Deka, K. Kong, Y. bin Park, and H. W. Park, "Large pulsed electron beam (LPEB)-processed woven carbon fiber/ZnO nanorod/polyester resin composites," *Compos Sci Technol*, vol. 102, pp. 106–112, Oct. 2014, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2014.07.026.
- [18] X. Zhao, X. Wang, Z. Wu, and J. Wu, "Experimental study on effect of resin matrix in basalt fiber reinforced polymer composites under static and fatigue loading," *Constr Build Mater*, vol. 242, p. 118121, May 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118121.
- [19] E. Correa, A. Barroso, M. D. Pérez, and F. París, "Design for a cruciform coupon used for tensile biaxial transverse tests on composite materials," *Compos Sci Technol*, vol. 145, pp. 138–148, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2017.03.045.
- [20] T. Skinner, S. Datta, A. Chattopadhyay, and A. Hall, "Fatigue damage behavior in carbon fiber polymer composites under biaxial loading," *Compos B Eng*, vol. 174, p. 106942, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.106942.
- [21] J. M. González-Cantero, E. Graciani, B. López-Romano, and F. París, "Competing mechanisms in the unfolding failure in composite laminates," *Compos Sci Technol*, vol. 156, pp. 223–230, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2017.12.022.
- [22] C. Capela, S. E. Oliveira, and J. A. M. Ferreira, "Fatigue behavior of short carbon fiber reinforced epoxy composites," *Compos B Eng*, vol. 164, pp. 191–197, May 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2018.11.035.
- [23] N. P. Singh, V. K. Gupta, and A. P. Singh, "Graphene and carbon nanotube reinforced epoxy nanocomposites: A review," *Polymer (Guildf)*, vol. 180, p. 121724, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.POLYMER.2019.121724.
- [24] Y. C. Chiou, H. Y. Chou, and M. Y. Shen, "Effects of adding graphene nanoplatelets and nanocarbon aerogels to epoxy resins and their carbon fiber composites," *Mater Des*, vol. 178, p. 107869, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.MATDES.2019.107869.
- [25] W. Zhang, X. Deng, G. Sui, and X. Yang, "Improving interfacial and mechanical properties of carbon nanotube-sized carbon fiber/epoxy composites," *Carbon N Y*, vol. 145, pp. 629–639, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.CARBON.2019.01.063.
- [26] A. Abdel-Hakim, E. H. Awad, K. F. El-Nemr, and T. M. El-Basheer, "Impact of gamma radiation and multi-walled carbon nanotubes on the mechanical and acoustical properties of reinforced sisal fiber/polyester resin composites," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 189, p. 109768, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.RADPHYSCHEM.2021.109768.
- [27] Q. hao Yu, F. Zhu, J. Juan Su, and J. Han, "Effective stress transferring interface and mechanical property enhancement of poly(l-lactide)/multi-walled carbon nanotubes

- fibers,” *Mater Chem Phys*, vol. 234, pp. 296–303, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2019.06.006.
- [28] E. Y. Choi, M. H. Kim, and C. K. Kim, “Fabrication of carbon fiber grafted with acyl chloride functionalized multi-walled carbon nanotubes for mechanical reinforcement of nylon 6,6,” *Compos Sci Technol*, vol. 178, pp. 33–40, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2019.05.012.
- [29] M. R. Zakaria, H. Md Akil, M. H. Abdul Kudus, F. Ullah, F. Javed, and N. Nosbi, “Hybrid carbon fiber-carbon nanotubes reinforced polymer composites: A review,” *Compos B Eng*, vol. 176, p. 107313, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107313.
- [30] A. K. M. Moshikul Alam *et al.*, “Modification of structure and properties of well-dispersed dendrimer coated multi-walled carbon nanotube reinforced polyester nanocomposites,” *Polym Test*, vol. 68, pp. 116–125, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2018.04.005.
- [31] N. Yang, X. Chen, T. Ren, P. Zhang, and D. Yang, “Carbon nanotube based biosensors,” *Sens Actuators B Chem*, vol. 207, no. PartA, pp. 690–715, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.SNB.2014.10.040.
- [32] M. T. Kim, K. Y. Rhee, J. H. Lee, D. Hui, and A. K. T. Lau, “Property enhancement of a carbon fiber/epoxy composite by using carbon nanotubes,” *Compos B Eng*, vol. 42, no. 5, pp. 1257–1261, Jul. 2011, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2011.02.005.
- [33] D. Byron, A. Pacheli Heitman, J. Neves, P. P. de Souza, and P. S. de Oliveira Patricio, “Evaluation of properties of polymer concrete based on epoxy resin and functionalized carbon nanotubes,” *Constr Build Mater*, vol. 309, p. 125155, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125155.
- [34] R. Sherman *et al.*, “Electro-mechanical characterization of three-dimensionally conductive graphite/epoxy composites under tensile and shear loading,” *Composites Communications*, vol. 15, pp. 30–33, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.COCO.2019.05.010.
- [35] Y. Ou, C. González, and J. J. Vilatela, “Interlaminar toughening in structural carbon fiber/epoxy composites interleaved with carbon nanotube veils,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 124, p. 105477, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2019.105477.
- [36] G. Sun, S. Tong, D. Chen, Z. Gong, and Q. Li, “Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers,” *Int J Mech Sci*, vol. 148, pp. 636–651, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.IJMECSCI.2018.08.007.
- [37] F. Smail, A. Boies, and A. Windle, “Direct spinning of CNT fibres: Past, present and future scale up,” *Carbon N Y*, vol. 152, pp. 218–232, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.CARBON.2019.05.024.
- [38] “Resinas e fibras de reforço.” <https://www.castrocompositesshop.com/#> (accessed May 28, 2022).
- [39] L. N. McCartney, “Predicting properties of undamaged and damaged carbon fibre reinforced composites,” *The Structural Integrity of Carbon Fiber Composites: Fifty Years of Progress and Achievement of the Science, Development, and Applications*, pp. 425–467, Jan. 2016, doi: 10.1007/978-3-319-46120-5_16/COVER.
- [40] “ATLAC® 580.” Accessed: Oct. 28, 2022. [Online]. Available: https://euroresins.com/wp-content/uploads/2018/03/ATLAC-580_001610.pdf
- [41] “QM-propriedades mecânicas 2”.
- [42] “Quorum Technologies | Microscopy Coating | Cryogenics.” <https://www.quorumtech.com/> (accessed Oct. 29, 2022).

- [43] M. Paradise and T. Goswami, “Carbon nanotubes – Production and industrial applications,” *Mater Des*, vol. 28, no. 5, pp. 1477–1489, Jan. 2007, doi: 10.1016/J.MATDES.2006.03.008.
- [44] V. Map and T. Lfac, “DETERMINAÇÃO DO FACTOR CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES EM PLACAS UTILIZANDO A EXTENSOMETRIA COM VALIDAÇÃO NUMÉRICA”.