



**POLITECNICO
SETÚBAL**

Alfredo Miguel
de Cabral
Figueiredo
Rodrigues da Cruz

**Produção e avaliação do
comportamento a tração de
compósitos híbridos
carbono/basalto**

Relatório de Dissertação do Mestrado em
Engenharia de Produção do Instituto Politécnico
de Setúbal

ORIENTADOR

Prof. Doutor Célio Pina

Prof. Doutor, Ricardo Baptista

Dezembro 2024

Alfredo Miguel
de Cabral
Figueiredo
Rodrigues da Cruz

**Produção e avaliação do
comportamento a tração de
compósitos híbridos
carbono/basalto**

JÚRI

Presidente: Prof. Pedro Filipe do Carmo Cunha

Orientadores: Prof. Doutor Célio Pina

Prof. Doutor, Ricardo Baptista

Vogal: Prof. Ricardo Lamberto Duarte Cláudio

Dezembro 2024

Agradecimentos

A toda minha família, pelo incentivo e suporte durante todos estes anos, principalmente a minha irmã por me acordar todas as vezes e que necessário me ensinou a escrever no computador.

Aos orientadores e restantes professores por todo o valioso conhecimento transmitido, persistência, disponibilidade e apoio para a conclusão deste trabalho.

Em particular, ao orientador Ricardo Batista pela presença ao longo de todo este percurso, ao apoiar assim como incentivar à continuação do projeto e ao orientador Célio Pina pelo abanão e força final, que conseguiu incentivar à conclusão do projeto.

Ao IPS, o qual disponibilizou o material e todos os equipamentos, ao ISEL pela disponibilidade para a realização das análises em SEM

Resumo

A utilização de materiais compósitos cresceu nos últimos anos dada a sua elevada resistência mecânica e baixa densidade, sobretudo quando comparadas com as propriedades de diferentes ligas metálicas. Outra vantagem é a possibilidade de combinar diferentes materiais na produção de compósitos híbridos, que utilizam diferentes fibras de reforço para otimizar as propriedades finais do material desenvolvido. É assim fundamental efetuar ensaios experimentais para determinar as propriedades destes materiais, ou desenvolver metodologias que permitam prever o comportamento destes, nomeadamente na presença de entalhes ou outros pormenores de construção. Neste trabalho foram fabricadas diferentes configurações de provetes de teste utilizando fibras de reforço de carbono e basalto em matrizes epóxicas. As fibras, ao criar o provete de compósito, foram dispostas com orientações 0/90 ou 45/90 e assim foram testados à tração, com ou sem a aplicação de um furo no centro do provete. Ao mesmo tempo foi desenvolvido um modelo numérico de cada configuração utilizando o método dos elementos finitos. Conseguiu-se determinar que a tensão de rotura em provetes de compósitos híbridos carbono-basalto são 15% superiores à utilização apenas de basalto e 28% inferiores à utilização apenas de carbono. Assim os resultados obtidos mostram que os compósitos híbridos apresentam propriedades interessantes à sua utilização prática, permitindo baixar o custo de fabrico destes materiais. Para além disso os resultados comprovam que os modelos numéricos são uma ferramenta viável à previsão das suas propriedades finais.

Palavras-chave: Materiais compósitos, Fibra de carbono, Fibra de basalto, Elementos finitos, Ensaio experimentais.

Abstract

The use of composite materials has grown in recent years due to their high mechanical strength and low density, especially when compared to the properties of different metal alloys. Another advantage is the possibility of combining different materials in the production of hybrid composites, which use different reinforcing fibers to optimize the final properties of the developed material. It is therefore essential to carry out experimental tests to determine the properties of these materials or to develop methodologies that allow predicting their behavior, particularly in the presence of notches or other construction details. In this work, different configurations of test specimens were manufactured using carbon and basalt reinforcing fibers in epoxy matrices. The fibers, when creating the composite specimen, were arranged with orientations of 0/90 or 45/90 and were thus tested for tensile strength, with or without the application of a hole in the center of the specimen. At the same time, a numerical model of each configuration was developed using the finite element method. It was determined that the tensile strength in hybrid carbon-basalt composite specimens is 15% higher than using only basalt and 28% lower than using only carbon. Thus, the results obtained show that hybrid composites have interesting properties for practical use, allowing the reduction of manufacturing costs of these materials. Furthermore, the results prove that numerical models are a viable tool for predicting their final properties.

Keywords: Composite materials, Carbon fiber, Basalt fiber, Finite elements, Experimental tests.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Siglas e Acrónimos	viii
Lista de Símbolos.....	ix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Introdução e Âmbito de Trabalho.....	2
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização do documento.....	3
Capítulo 2	4
Revisão Bibliográfica.....	4
2.1. Materiais compósitos	5
2.2. Elementos de reforço – Fibras.....	6
2.2.1. Fibras de Carbono.....	6
2.2.2. Fibras de Basalto.....	8
2.3. Matrizes poliméricas.....	10
2.4. Provetes unidireccionais.....	10
Capítulo 3	11
Materiais e Métodos	11
3.1. Materiais.....	12
3.2. Fabrico dos compósitos.....	12
3.3. Ensaio de tração.....	13
3.4. Determinação da fração mássica	13
3.5. Análise microestrutural	14
3.6. Análise por Elementos Finitos.....	14
Capítulo 4	18
Resultados e Discussão	18
4.1. Determinação da fração mássica	19
4.2. Ensaio de tração.....	19
4.3. Análise de microscopia	24
4.4. Análise de Elementos Finitos	25
Capítulo 5	32

Conclusões	32
5.1. Conclusão	33
5.2. Trabalhos futuros.....	34
Bibliografia.....	35
Anexo I	1
Gráficos resultante tensão extensão	1

Lista de Figuras

Figura 2-1 - Evolução da utilização dos materiais ao longo do tempo.	5
Figura 2-2 - (a) tecido de fibra de basalto, (b) tecido de fibra de carbono, (c) fios de fibra de carbono, (d) fios de fibra de basalto.	9
Figura 3-1- Geometria do provete criado em <i>software</i> Abaqus.....	14
Figura 3-2 – Exemplo de visualização dos carregamentos e condições de fronteira em <i>software</i> Abaqus	16
Figura 3-3 – Exemplo de apresentação e criação das unidades para a rede em <i>software</i> Abaqus	17
Figura 4-1 - Variação de comprimento do provete em ensaio de tração (é de notar que o resultado apresenta uma alteração devido a um valor com discrepância (carbono basalto 45/90 ensaio sem furo))	20
Figura 4-2 – Variação de comprimento da zona útil do provete 50mm	20
Figura 4-3 - Exemplo de gráfico tensão extensão resultante do ensaio de tração (Basalto 45/90). Este gráfico pode ser explicado dividindo em 3 partes, zona elástica, zona plástica e zona de rotura.	21
Figura 4-4 - Exemplo de gráfico resultante tensão extensão (Carbono 0/90).	22
Figura 4-5 - Tensão de rutura máxima de provetes em ensaio de tração.....	22
Figura 4-6 - Resultados do modulo de Elasticidade dos ensaios de tração.....	23
Figura 4-7 - Imagem SEM (exemplo Basalto 45/ Carbono 90).....	24
Figura 4-8 - Exemplo representativo de fotografia SEM da zona de fratura (exemplo representativo Basalto 45/ Carbono 90).	25
Figura 4-9- Exemplo de representação da variação do comprimento do provete.....	26
Figura 4-10 - Resultado de variação de comprimento no provete completo em simulação	27
Figura 4-11 - Figura de representação no cálculo de variação de comprimento	28
Figura 4-12 - Simulação de variação de comprimento da zona útil [50 mm].....	29
Figura 4-13 - Exemplo representativo de identificação de tensão (Carbono Basalto 0/90)	29
Figura 4-14 - Tensão de rotura da simulação	30
Figura 4-15 - Tensão máxima exibindo valores de simulação e ensaio experimental	31

Lista de Tabelas

Tabela 3-1 - Determinação da orientação das camadas formando o provete.....	12
Tabela 3-2 - Propriedades dos materiais utilizados	15
Tabela 3-3 - Parâmetros utilizados na simulação, nos ensaios de tração, para realização de incrementos	15
Tabela 3-4 - Valores de carregamento em simulação.	16
Tabela 4-1 - Média percentual (%) resultante das frações mássicas da fibra.....	19

Lista de Siglas e Acrónimos

CAD- Desenho Assistido por Computador do inglês *Computer Aided Design*

CAE- Engenharia Assistida por Computador do inglês *Computer Aided Engineering*

CAM- Fabrico Assistido por Computador do inglês *Computer Aided Manufacturing*

CNC- Controlo Numérico Computadorizado

FEA- Análise por Elementos Finitos do inglês *Finite Element Analysis*

PAN- Poliacrilonitrila

RPM- Rotações por Minuto

SEM- Microscópio Eletrónico de Varrimento do Inglês *Scanning Electron Microscope*

UV- Ultravioleta

Lista de Símbolos

°C - Graus Celsius

mm - Milímetros

ATM - Atmosferas

mm/min - Milímetros por minuto

kV - quilovolt

kW - quilowatt

$F_{massica}$ - Fração mássica

M_{fibras} - Massa das fibras

M_{total} - Massa total

RPM - Rotações por minuto

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é apresentado o enquadramento, a motivação e os objetivos da dissertação.

1.1. Introdução e Âmbito de Trabalho

Os compósitos são materiais utilizados em larga escala em sistemas que implicam uma baixa variabilidade e grande durabilidade, por este motivo é de extrema importância que estes sejam melhorados. Deste modo, a realização de ensaios que permitam determinar os pontos fracos destes materiais e a sua otimização são necessários.

A utilização de materiais compósitos é devido a várias razões tais como a flexibilidade de design, densidade reduzida, resistência e durabilidade entre outras. A utilização de um compósito híbrido (mais de um material de reforço) permite tirar o partido das propriedades mais desejadas destes materiais que sozinhos é impossível.

A utilização das fibras combinadas de basalto e de carbono tem com objetivo a obtenção das melhores propriedades de ambos os compostos, isto é, manter a resistência à tração das fibras de carbono assim como manter a resistência às elevadas temperaturas, disponibilidade e custos baixos das fibras de basalto

Os provetes são utilizados para a realização de diversos ensaios, quando é necessário testar os materiais previamente, caso se pense em utilizar um ou mais materiais, diversas orientações ou diferentes organizações de camadas. Estes ensaios podem ser suportados e previamente estudados pelo método de elementos finitos de modo a comprovar a resistência e durabilidade para este estudo.

1.2. Objetivos

Com este trabalho pretende-se investigar o comportamento de provetes compósitos, utilizando fibras de carbono e basalto. Os compósitos serão fabricados pelo método de empilhamento em vácuo e a cura da resina feita em autoclave. Depois de maquinados os provetes, serão efetuados ensaios de tração nas configurações normal e com furo, que pretende simular a existência de um pormenor de construção.

Com o objetivo de avaliar o comportamento de diferentes materiais e da direção de empilhamento das fibras, serão analisadas diferentes configurações, alternado a orientação das fibras e dos materiais utilizados. Estas configurações são posteriormente analisadas e avaliadas de modo a identificar a melhor. Será também analisada a influencia de um defeito nas propriedades à tração dos compósitos fabricados.

As fibras utilizadas são fibras de carbono e fibras de basalto. Nestes ensaios com estas configurações de empilhamento e orientação irá ser demonstrada a compatibilidade destes dois materiais, podendo assim resultar no aproveitamento das melhores características dos diferentes materiais.

Espera-se então que a resistência à tração das fibras de carbono complemente as fibras de basalto para um material mais económico e com maior acessibilidade.

Com o objetivo de prever o comportamento destes materiais serão desenvolvidos modelos de elementos finitos que pretendem representar as configurações experimentais. O comportamento dos modelos numéricos será comparado com os resultados experimentais, para

avaliar a sua utilização como ferramenta na previsão de resultados

1.3. Organização do documento

Este documento encontra-se dividido nos seguintes temas como a revisão bibliográfica, onde existe a contextualização teórica do tema assim com estudos relevantes para o mesmo. De seguida o tema é a metodologia onde é descrito os métodos utilizados assim como o procedimento para a recolha de dados. O capítulo seguinte apresenta os resultados assim como existe a análise destes resultados seguidamente existe a discussão e a interpretação dos mesmos e o que estes podem implicar. Por capítulo final existe a conclusão onde é apresentado o resumo dos principais pontos assim como sugestões para pesquisas futuras

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado o estado da arte em relação às estruturas dos materiais compósitos, mencionando as suas vantagens e desvantagens, área de utilização e processos de fabrico. Será feita uma apresentação das fibras de basalto e carbono e uma comparação entre elas no que diz respeito às áreas de aplicação. É feita uma pequena apresentação dos provetes unidireccionais e para que servem.

2.1. Materiais compósitos

Um material compósito é a combinação de dois ou mais materiais [1,2]. Os materiais compósitos sintéticos foram introduzidos pelos egípcios quando desenvolveram o contraplacado, intercalando tiras de madeira de boa qualidade com tiras de qualidade inferior. Antigos, no entanto, posteriores a este exemplo e também amplamente utilizados, têm-se os tijolos e o Betão. A combinação de barro, com a função de matriz, com palha, com a função de reforço, os tijolos antigos foram amplamente utilizados na construção. Os egípcios também utilizavam compósitos ao fazer máscaras mortuárias de linho ou papiro embebido em gesso [3]. O betão é constituído por agregado de areia e cimento, o qual atualmente se reforça com armações de ferro de modo a aumentar a sua resistência [4]. Podemos ver a evolução detalhada dos diversos materiais compósitos ao longo do tempo na Figura 2-1.

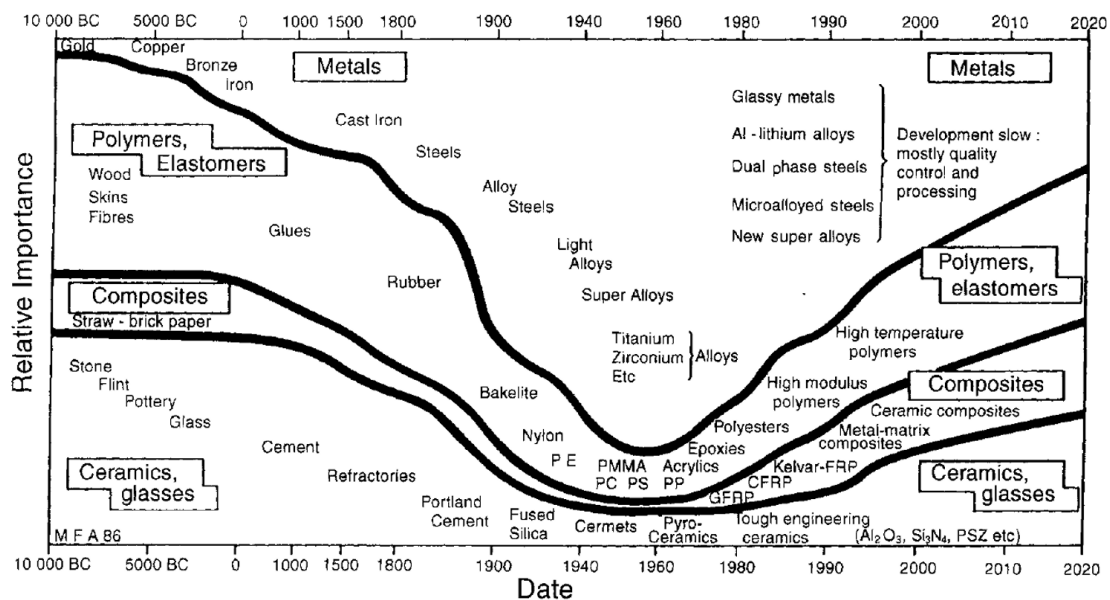


Figura 2-1 - Evolução da utilização dos materiais ao longo do tempo [5].

Os compósitos também podem ser de origem natural, como, por exemplo, o tecido ósseo dos vertebrados, composto por uma estrutura mineral à base de cálcio, na qual estão dispostas proteínas de colagénio [6].

Os compósitos podem ser agrupados em três grupos consoante o material constituinte da sua matriz. Esta pode ser de: a) cerâmica, apresentando uma elevada capacidade térmica, com aplicação em meios corrosivos e/ou com elevadas temperaturas [7]; b) metálica, apresentando uma rigidez elevada, com aplicação em meios oxidantes e/ou com altas temperaturas [8]; e c) polimérica, apresentando baixa densidade, com aplicação em reforços orgânicos. Os polímeros utilizados nas matrizes poliméricas podem ser termoplásticos ou termoendurecíveis. No entanto, nos termoplásticos, devido ao seu comportamento viscoelástico, a matriz deforma-se com o passar do tempo, temperatura e humidade [1].

Estes materiais podem ainda ser classificados consoante o elemento de reforço. O mais

habitual é reforço de fibras, contínuas ou descontínuas, mas podem ser também partículas. Os compósitos reforçados por fibras contínuas têm geralmente uma resposta ortotrópica. Estas distribuem-se na matriz em várias camadas, isto é, laminados, ou numa só camada, tendo uma distribuição unidireccional ou em malha. Os compósitos reforçados por fibras descontínuas, por outro lado, apresentam um comportamento isotrópico ou anisotrópico, distribuindo-se as fibras por uma só camada unidireccionalmente ou aleatoriamente. Finalmente, os compósitos reforçados por partículas, podem apresentar um comportamento anisotrópico ou ortotrópico, apresentando as partículas uma distribuição aleatória dos componentes suspensos na matriz. Este último elemento de reforço é utilizado geralmente quando a resistência à tração não é importante [1].

Atualmente a designação de material compósito é dada a materiais que são constituídos por uma matriz de base polimérica e reforçada com fibras. Estas fibras podem ser de diversos materiais como basalto, carbono e kevlar e o polímero é geralmente resina, epóxi ou polietileno, isto é, materiais termoendurecíveis. O uso destes materiais permitiu a obtenção de uma boa relação entre resistência e densidade, e o intercalar de diferentes materiais com diferentes características permitiu uma boa dispersão de calor [9].

No caso dos compósitos de fibras longas, cada material tem a sua função, elemento de reforço ou matriz ligante. Os materiais formam entre si uma interface, da qual dependem muito as suas propriedades finais. Estas propriedades dependem das suas propriedades físicas das propriedades base, geometria e concentração de cada constituinte [1,2].

Os elementos de reforço dão resistência e rigidez ao compósito e ajudam a suportar o esforço estrutural [10], enquanto, a matriz permite a agregação destes elementos conferindo-lhes proteção. Além disso a matriz confere a forma ao compósito [1,10].

Os materiais compósitos destacam-se pela combinação de resistência, rigidez e baixa densidade. Sendo materiais anisotrópicos, suas propriedades variam de acordo com a orientação e o número de camadas de materiais de reforço, ou seja, as fibras. Ao combinar uma matriz, um material de reforço e sua orientação, é possível personalizar as propriedades do produto final. Além disso, os compósitos apresentam excelente relação resistência-peso, flexibilidade para moldar peças complexas e durabilidade devido à resistência à fadiga e a fatores ambientais como raios UV, flutuações de temperatura, humidade e exposição química [3].

2.2. Elementos de reforço – Fibras

As fibras são o material mais utilizado como elemento de reforço de matrizes poliméricas.

2.2.1. Fibras de Carbono

Uma fibra de carbono é constituída por inúmeros filamentos torcidos entre si. Cada filamento é composto essencialmente, por átomos de carbono ligados criando um “cristal”, alinhados paralelamente ao eixo longo do mesmo, formando um fio longo e fino com cerca de 0,005 mm -

0,010 mm de diâmetro. É este alinhamento que lhe confere a sua elevada resistência [11–14]. Somando a esta característica a baixa densidade e o facto de este não sofrer corrosão, este material pode ser utilizado em múltiplas áreas com diversos fins, como na área aeroespacial, indústria automóvel, entre outras [15].

A fibra de carbono é um compósito filamentosos, obtido a partir de vários tipos de materiais compostos de carbono através da decomposição térmica sem oxigenação, também conhecida como pirólise [11,15]. As fibras de carbono podem ser classificadas em: Alto módulo; Médio Módulo; e Baixo Módulo, dependendo do material a partir do qual são obtidas [15].

Thomas Edison, pela decomposição térmica de algodão, obteve pela primeira vez este material, para utilizar nas suas lâmpadas incandescentes. No decorrer da década de 60, com a utilização de poliacrilonitrila (PAN) no fabrico da fibra de carbono, pelo Japão e Inglaterra, deu-se o seu aperfeiçoamento permitindo a ampla utilização que apresenta atualmente. O aumento da procura deste material faz com que exista uma constante busca por novas técnicas de fabrico e otimização do mesmo por parte dos investigadores [16,17].

O processo de fabrico pode ser dividido em 4 fases: fiação, estabilização, carbonização, tratamento superficial e dimensionamento [2,18]. Na fiação a acrilonitrila em pó é misturada com outro plástico e um catalisador para formar plástico PAN, sendo de seguida extrudido em forma de fibras, mediante um de vários métodos existentes, é aqui que a estrutura interna atómica é formada. As fibras são de seguida lavadas e esticadas até à dimensão pretendida, contribuindo para a orientação das moléculas essencial para uma eficaz carbonização. O próximo passo é a estabilização, onde as fibras são expostas a temperaturas de 200°C -300°C durante 30 minutos-120 minutos, para alterar quimicamente as ligações atómicas tornando-as mais estáveis. De seguida as fibras sofrem um processo de carbonização, onde são aquecidas a temperaturas entre 1000°C e 3000°C por alguns minutos num forno que contém uma mistura gasosa sem oxigénio. À medida que as fibras são aquecidas estas vão perdendo todos os átomos não-carbono, fazendo com que os átomos de carbono que permanecem nas fibras formem cristais de carbono fortemente ligados e alinhados paralelamente ao eixo da fibra. Após a carbonização as fibras não têm uma grande afinidade com as resinas usadas em compósitos, sendo necessário fazer um tratamento superficial. A solução utilizada é a ligeira oxidação das fibras, através da exposição das fibras a gases como ar, dióxido de carbono ou ozono, ou líquidos como o hipoclorito de sódio ou ácido nítrico. O último passo é o dimensionamento onde as fibras (Figura 2-2c) recebem outro tratamento superficial para as tornar mais resistentes ao manuseamento, ou para as tornar mais compatíveis com determinadas resinas, sendo de seguida enroladas em bobines de vários tamanhos.

Existem outros processos que foram desenvolvidos de acordo com o material a ser utilizado, como estiramento das fibras diante do calor em meio oxidante ou ainda onde o material é submetido à deposição e eletrodeposição de outros elementos, com objetivo de aumentar sua resistência.

Na Alemanha, tem sido usado laser infravermelho na produção das fibras de carbono. Esta nova forma de produção permite substituir os fornos e assim reduzir os gastos energéticos e as

deformações causadas pelas bolhas originadas pela presença de ar no processo de fabricação, consequentemente obtêm-se uma produção com menos custos e mais rápida e um produto mais resistente. Este novo processo poderá possibilitar a produção de fibras até cem vezes mais resistentes que o aço [17].

Os compósitos reforçados com fibra de carbono são usados quando necessários componentes leves e de alta resistência, por exemplo, para peças de aeronaves e naves espaciais, chassi de carros de corrida, eixos, tacos de golfe, quadros para bicicletas, canas de pesca, molas de automóveis e muitos outros.

2.2.2. Fibras de Basalto

O basalto é um mineral de origem natural, presente em muitos locais do mundo, no entanto a sua constituição, isto é, a combinação dos diferentes elementos, varia consoante as condições e velocidade de arrefecimento da lava quando esta chega à superfície [19]. O processo de fabricação exige a utilização de um tipo único de matéria-prima, o que implica que apenas algumas pedreiras apresentem as características necessárias à aplicação do mesmo a nível industrial, ou seja, que apenas algumas pedreiras possam ser exploradas a nível industrial. A origem e subsequente composição química do basalto têm influência nas características mecânicas e físicas dos filamentos obtidos [20,21] .

Paul Dhé, em 1923, permitiu a formulação do processo de síntese das fibras de basalto através da obtenção da primeira patente para extrusão das mesmas [21]. No entanto o interesse pelo fabrico deste material apenas começou a partir da década de 50, pela União Soviética [22], devido às suas possíveis aplicações nas indústrias militares e espaciais. Considerando a sua importância, esta tecnologia foi mantida fora do âmbito civil até princípios da década de 90, com a chegada da Perestroika.

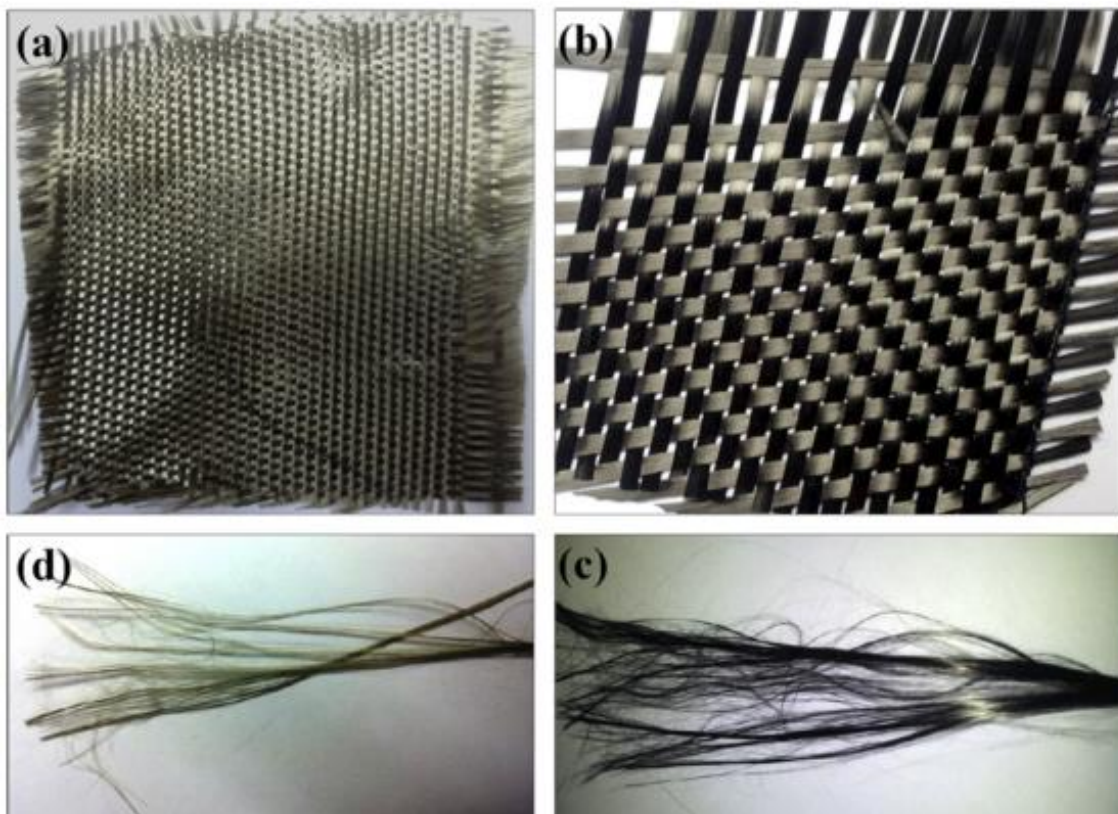


Figura 2-2 - (a) tecido de fibra de basalto, (b) tecido de fibra de carbono, (c) fios de fibra de carbono, (d) fios de fibra de basalto. Adaptado de [23]

As fibras de basalto podem ser obtidas através do processo descrito seguidamente: em primeiro lugar a rocha basáltica é lavada e esmagada, sendo introduzida no forno de fundição onde passa ao estado líquido; seguidamente, o basalto líquido passa por um crivo que contém centenas de pequenos orifícios; por último o basalto ao passar pelos orifícios passa a ter a forma de filamentos, que são arrefecidos e puxados por um rolo que pode, através da variação da velocidade de recolha das fibras, regular a dimensão dos filamentos. O processo de obtenção destas fibras é semelhante ao de obtenção de fibras de vidro [2,23].

As fibras de basalto têm vantagens ambientais uma vez que são de origem natural, é uma rocha abundante, e requer menos energia para a produção do que outro tipo de fibras, assim com estas são recicláveis, através da fusão do material basalto, este pode ser fabricado em outras fibras de basalto [24] .

As fibras de basalto têm também boas propriedades mecânicas, alta resistência a tração, boa resistência a compressão e o módulo de elasticidade similar a outras fibras. Em relação a propriedades térmicas, estas conseguem manter as propriedades mecânicas a altas temperaturas e são resistentes ao fogo. As fibras de basalto têm também elevada resistência à corrosão devido a sua natureza e resistência a radiação UV assim como maior isolamento a condução elétrica [25].

2.3. Matrizes poliméricas

Os polímeros são constituídos por meros, moléculas simples, que se repetem formando longas cadeias. Estas podem ser, tendo em conta o tipo de ligação entre cadeia, termoplásticos ou termoendurecíveis. A estrutura dos termoplásticos permite que estes sejam resistentes ao calor, isto é, após aquecimento retornam às características iniciais. Os materiais termoendurecíveis por outro lado não são resistentes ao calor, no entanto devido à sua baixa viscosidade e baixo peso molecular permitem uma boa ligação ao material de reforço [1,26].

Para usar polímeros em compósitos estes devem apresentar boas propriedades mecânicas, boa capacidade de adesão, boa resistência ao meio, alta tensão de rutura, boa tenacidade e capacidade de deformar sem partir [2].

Estes são muito utilizados pois são menos dispendiosos, facilmente produzidas e leves. A somar a isto, apresentam ainda, uma boa resistência á corrosão e abrasão, no entanto, apresentam baixa resistência térmica quando comparadas a outras matrizes e elevado coeficiente de expansão térmica, ou seja, não podem ser aplicadas em sistemas que impliquem temperaturas acima dos 250°C [27].

2.4. Provetes unidirecionais

Os provetes unidirecionais são amostras de materiais que possuem fibras alinhadas em uma única direção. Essa orientação específica é projetada para explorar ao máximo as propriedades mecânicas das fibras, como a resistência e a rigidez, numa direção predominante. Estes provetes unidirecionais são amplamente utilizados em estudos de comportamento mecânico de materiais compósitos.

O estudo de provetes unidirecionais é crucial para o desenvolvimento de materiais compósitos. A escolha adequada das fibras, matriz e métodos de fabricação, juntamente com ensaios precisos, permite a otimização das propriedades mecânicas para aplicações específicas. A pesquisa contínua nessa área pode levar a inovações significativas em diversos campos da engenharia e tecnologia.

Os provetes unidirecionais podem ser submetidos a vários tipos de testes para avaliar suas propriedades mecânicas. Os ensaios de tração, são o principal ensaio para medir a resistência à tração e o módulo de elasticidade na direção das fibras.

Este tipo de provetes é utilizado em diversas indústrias como na construção civil onde pode ser testado o reforço de estruturas, como vigas e colunas, na indústria Aeroespacial onde componentes estruturais leves e de alta resistência podem ser testados, indústrias desportivas onde se testa equipamentos desportivos como tacos de golfe, quadros de bicicleta e raquetes de ténis, ou na indústria automóvel para testes de peças que requerem alta performance mecânica e baixa densidade.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo pretende-se apresentar os materiais e equipamentos utilizados para a realização dos ensaios assim como identificar e explicar os métodos utilizados para estes ensaios.

3.1. Materiais

Na produção dos compósitos utilizou-se tecido de fibra de carbono com malha unidirecional com uma espessura de 0.16 mm (comercializado por Santos e Elvas) e tecido de fibras de basalto com malha unidirecional com espessura de 0.14 mm (comercializado por Santos e Elvas).

O tecido foi impregnado usando uma resina epóxi SR1500 (comercializado por Santos & Elvas) misturada com catalisador 2503 (comercializado por Santos & Elvas) em porções volumétricas de 3/1, respetivamente.

3.2. Fabrico dos compósitos

No fabrico do compósito usou-se como molde uma placa de alumínio, de modo a criar uma base uniforme e lisa. Para evitar a aderência a esta placa, colocou-se uma camada de tecido desmoldante, duas camadas de manta de absorção, feltro com 2 mm de espessura, de forma a absorver o excesso de resina, uma camada de desmoldante perfurado, a qual auxilia no desmolde e permeável á resina, por fim uma camada de peel ply, para a fácil remoção do compósito da placa de suporte.

Na produção do compósito usou-se um conjunto com 12 camadas. Os tecidos usados foram tecidos de fibra de carbono e tecidos de fibra de basalto, ambos tecidos com malha unidirecional. O compósito foi realizado através do empilhamento de 6 camadas de tecido com uma determinada orientação seguindo-se outras 6 com orientação inversa, em forma de ficar simétrico. As diferentes configurações utilizadas podem também ser observadas através da Tabela 3-1.

Tabela 3-1 - Determinação da orientação das camadas formando o provete

Dois materiais				Híbrido	
Carbono		Basalto			
Cross	Quasi	Cross	Quasi	Cross	Quasi
0/90/0/90	0/90/45/-45	0/90/0/90	0/90/45/-45	0/90/0/90	0/90/45/-45
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Carbono	Carbono
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Basalto	Basalto
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Carbono	Carbono
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Basalto	Basalto
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Carbono	Carbono
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Basalto	Basalto
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Basalto	Basalto
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Carbono	Carbono
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Basalto	Basalto
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Carbono	Carbono
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Basalto	Basalto
Carbono	Carbono	Basalto	Basalto	Carbono	Carbono

Depois do empilhamento e impregnação do tecido, colocaram-se os mesmos materiais (tecido desmoldante perfurado, manta de absorção e peel ply) em ordem inversa de modo a realizar a desamoldação do compósito.

Este conjunto foi colocado dentro de um saco de vácuo com o extrator, inserido na zona superior, de forma a retirar o ar do interior do saco.

Para uma melhor cura da resina coloca-se no autoclave (Termolab) à temperatura e pressão recomendadas. Isto é, o autoclave foi regulado para produzir vácuo no interior do saco onde se encontra a placa de compósito e com uma pressão exterior de 2 atm a uma temperatura de 200°C durante 180 min com uma rampa de aquecimento de 20 min, o arrefecimento foi efetuado com o vaco e pressão ligadas até atingir a temperatura ambiente.

Depois da finalização da cura do material compósito foi realizado o corte dos provetes. A realização do corte do provete foi efetuada no CNC router DHOletec com uma rotação de 5000 rpm e uma velocidade de 250 mm/min

Cada tipo de provete foi cortado no CNC router seguindo o programa proveniente do programa de CAD/CAM utilizado. Metade dos provetes foram ainda furados no seu centro, com um engenho de furar uma fresa de 2 mm.

3.3. Ensaio de tração

Como equipamento de ensaios de tração utilizou-se a máquina eletromecânica TS300, Impact Test Equipment célula de 50 kN, com uma velocidade do travessão de 1 mm/min. Foi também utilizado um extensómetro 50 mm Impact Test Equipment na zona central do provete com uma abertura inicial de 50 mm,

Como resultado destes ensaios foram recolhidos os valores de carga, variação de comprimento do provete, extensão na zona de prova, tensão nominal e módulo de elasticidade. A extensão foi obtida com a utilização de um extensómetro mecânico, a tensão nominal é calculada dividindo o valor da carga pela área nominal do provete e o módulo de elasticidade é dado pelo declive da zona linear da curva tensão-extensão.

O provete utilizado seguiu a Norma ASTM D3039/D3039M-00 [28], dimensões esquematizadas na figura 3.1

3.4. Determinação da fração mássica

Para a determinação da fração mássica das fibras (3-1) foi extraída uma porção pequena do provete ensaiado. Em seguida as amostras foram colocadas em cadinhos de forma individual e assim registado o peso dos mesmos[29].

Posteriormente os cadinhos foram colocados na mufla Termolab de 1,5 kW a uma temperatura de 500°C de forma à resina degradar-se deixando assim apenas as fibras. Após o arrefecimento dos cadinhos com as fibras estes foram pesados.

A diferença entre as duas pesagens permite determinar a fração mássica de fibra restante,

quantidade de material de fibras do provete em relação ao total

$$F_{massica} = \frac{M_{fibras}}{M_{total}} = \frac{M_{total} - M_{resinas}}{M_{total}} \quad (3-1)$$

Onde $F_{massica}$ é fração mássica, M_{fibras} é massa das fibras, M_{total} é Massa total da amostra e $M_{resinas}$ é massa das resinas

3.5. Análise microestrutural

As superfícies de fratura foram observadas num microscópio eletrónico de varrimento (Phenom ProX), usando uma tensão de aceleração de 20 kV e uma ampliação variando de 20 x até 1500 x de amplificação. As amostras para isso foram previamente revestidas com uma liga Au-Pd para aumentar condutividade das amostras. Com isto poder-se-á visualizar os resultados dos ensaios de tração relativamente à zona de fratura da amostra dos ensaios, estas imagem exibem a distribuição das fibras e a sua fratura.

3.6. Análise por Elementos Finitos

O *software* de CAE é uma ferramenta poderosa usada em engenharia para simular, validar e otimizar projetos, produtos e processos de fabricação. O método de análise dos elementos finitos (FEA) é uma técnica fundamental em *softwares* CAE [30].

No *software* Abaqus CAE 6.14 foi produzido um modelo do provete. Primeiramente construiu-se no espaço 2D um componente deformável, com características de *Shell* onde se desenhou a forma do provete. O provete foi posteriormente cortado com as mesmas dimensões dos provetes usados nos ensaios de tração (Figura 3-1). Esta geometria foi usada para todos as simulações, apenas as restantes características de material e disposição das camadas foi alterada.

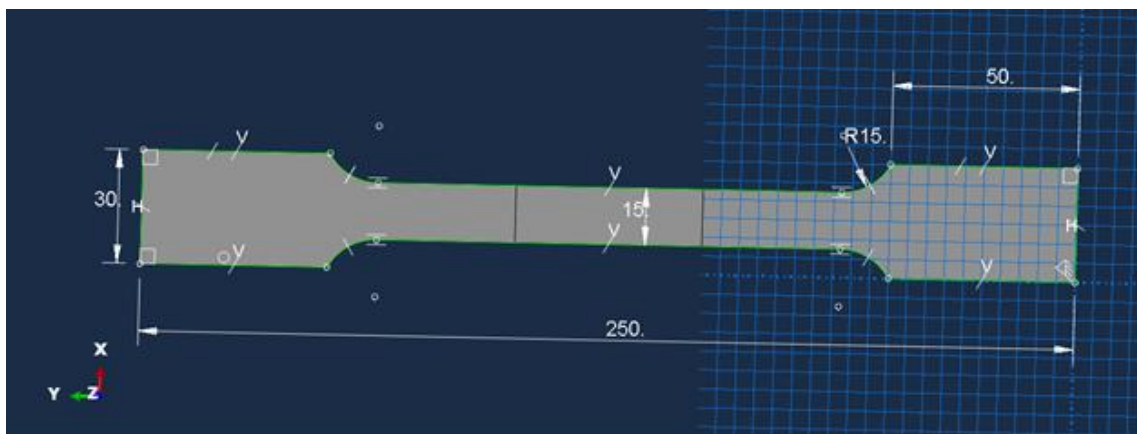


Figura 3-1- Geometria do provete criado em *software* Abaqus

Inserir-se no programa (na aba das propriedades) as propriedades dos materiais (Tabela 3-2) que constituem o provete, assim como as características do mesmo. Assim este constrói o formato das camadas (espessura, orientação, material e quantidade das camadas), utilizando-se a mesma disposição dos provetes físicos (Tabela 3-1)

Tabela 3-2 - Propriedades dos materiais utilizados

Material	E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
Basalto	16380	16380	1638	0,24	0,24	0,24	819	819	819
Carbono	57200	57200	4400	0,3	0,4	0,4	2200	2200	2000

Criou-se um “step” no modelo de simulação, ou seja, indicador para a simulação dos ensaios de tração onde se indica as especificações dos incrementos, isto é, a frequência dos incrementos, localização dos pontos de simulação e variáveis de interesse para a realização do relatório da simulação do *software*. As especificações utilizadas neste ensaio encontram-se na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 - Parâmetros utilizados na simulação, nos ensaios de tração, para realização de incrementos

frequência	n=1
localização	médio
variáveis	tensão e deformação

As condições de fronteira consideradas foram: i) na zona inferior do modelo, de modo a ficar amovível: a) não permitir o deslocamento e b) não permitir a rotação, assim como ii) na zona superior, exceto permitir o movimento segundo o eixo YY de forma a causar extensões neste sentido. Na zona superior aplicou-se o carregamento sob uma forma de carga distribuída (Tabela 3-4 indica os valores -valor positivo- para os carregamentos nas simulações) de modo a simular os ensaios de tração (Figura 3-2 – Exemplo de visualização dos carregamentos e condições de fronteira em *software* Abaqus Figura 3-2).

Os valores de carregamento utilizados na simulação, Tabela 3-4, foram retirados de valores máximos de carregamento suportado pelo provete, obtidos nos ensaios de tração, deste modo a simulação é executada de forma a realizar a comparação direta para estes resultados.

Tabela 3-4 - Valores de carregamento em simulação.

Material	Orientação	Condição	Carregamento [MPa]
Basalto	0/90	sem furo	274,
		com furo	240,
	45/90	sem furo	217,67
		com furo	174,
Carbono	0/90	sem furo	455,
		com furo	365,
	45/90	sem furo	376,
		com furo	319
Basalto-Carbono	0/90	sem furo	342
		com furo	343,
	45/90	sem furo	402,87
		com furo	339,

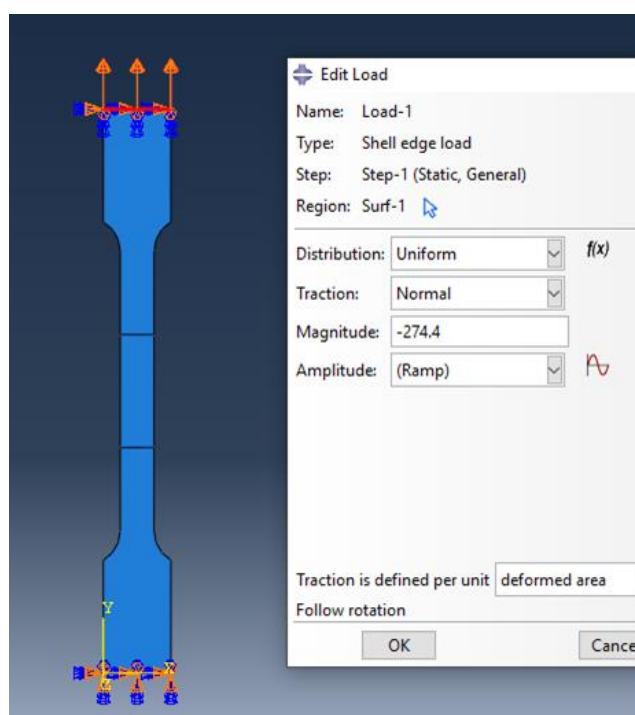


Figura 3-2 – Exemplo de visualização dos carregamentos e condições de fronteira em *software* Abaqus

Criou-se a “malha”, rede de elementos que o *software* realiza para dividir o modelo com uma dimensão média de 1 mm, com um desvio não superior a 0,1 mm devido a existirem zonas do provete com geometria não retangular. Esta malha realiza a divisão do provete em pequenos elementos exemplificado na Figura 3-3.

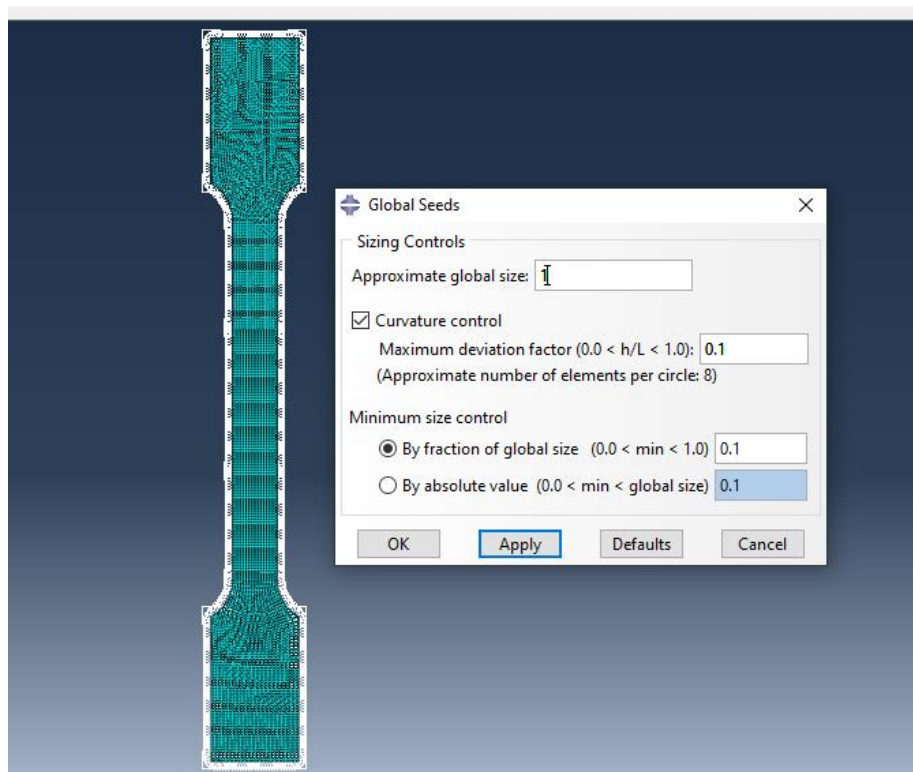


Figura 3-3 – Exemplo de apresentação e criação das unidades para a rede em *software* Abaqus

Após realizada a simulação obtém-se um relatório de deformação e tensões, onde se tem uma indicação visual e numérica do resultado obtido para o carregamento exercido.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo pretende-se apresentar os resultados obtido nos ensaios realizados e a discussão dos mesmos

4.1. Determinação da fração mássica

Com este ensaio pode-se evidenciar a produção do provete como um resultado positivo uma vez que os resultados da fração mássica obtidos estão entre os 57% e 76%, como pode ser representado na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Média percentual (%) resultante das frações mássicas da fibra

	B-0/90	B-45/90	C 0/90	C 45/90	CB 0/90	C90 /B45
	75,7	65,1	68,4	64,6	51,4	69,4
	76,2	65,9	66,5	65,7	61,7	71,2
Média (%)	75,9	65,5	67,5	65,2	56,5	70,3

A diferença da impregnação deve-se ao facto dos materiais e camadas terem diferentes níveis de porosidades o que dificulta o processo.

Estes resultados significam que na produção dos mesmos ocorreu uma impregnação suficiente da resina, de acordo com o esperado.

4.2. Ensaio de tração

Os ensaios de tração são um exemplo de ensaios para a determinação das características do material, resultando em valores consoante o tempo do mesmo ou consoante o movimento do equipamento.

Na Figura 4-1 é mostrada a variação total de comprimento, dada pelo deslocamento das amarras, dos provetes em ensaio de tração. Esta figura mostra que os provetes sem furo com as fibras nas orientações 0/90 apresentam uma variação de comprimento menor que as de 45/90, este aumento da variação de comprimento do provete é inversamente proporcional a quantidade de fibra na mesma orientação que o carregamento, tornando-o mais rígidos.

Para os provetes com furo e com as fibras em uma orientação 0/90 apresentam uma variação de comprimento maior que os provetes com orientação 45/90, o que mostra a ineficiência das fibras 45/90 de suportarem carregamento e assim a fraturar mais cedo. Esta deformação é dependente do material, como se pode observar. Os provetes com fibras carbono tem uma variação de comprimento menor que as de basalto em 43% e 31%, com ou sem furo, respetivamente (Figura 4-1).

Pode-se também observar que os provetes híbridos têm valores de variação de comprimento de 7% e 30%, sem e com furo, respetivamente, maior que as fibras de Basalto e 35% e 0%, sem e com furo, respetivamente, menor que os provetes de fibra de Carbono, para a orientação de 0/90. Estes resultados dos provetes híbridos encontram-se entre os dois valores de materiais simples, indicando que os materiais se complementaram.

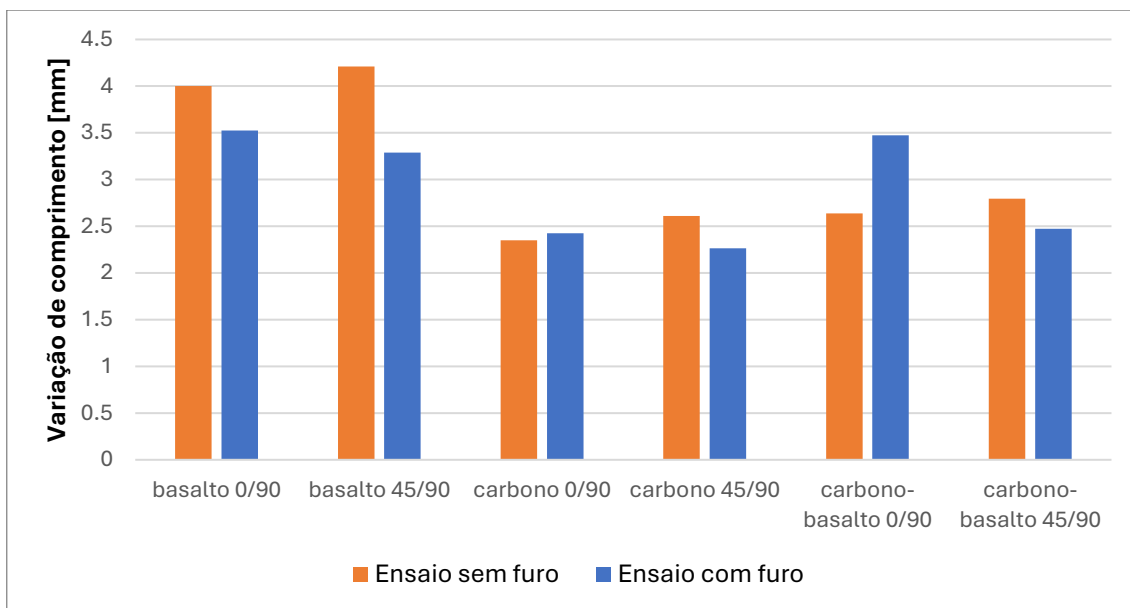


Figura 4-1 - Variação de comprimento do provete em ensaio de tração (é de notar que o resultado apresenta uma alteração devido a um valor com discrepância (carbono basalto 45/90 ensaio sem furo))

A variação de comprimento da zona útil dado pelo extensómetro 50mm é exibida na Figura 4-2. Aqui é observado que a variação de comprimento na zona útil para os provetes de carbono apresenta o menor valor na orientação de 0/90 e o compósito de basalto apresenta valores mais elevados. Os provetes híbridos apresentam valores intermédios

Os provetes não apresentam grande sensibilidade para os valores de variação de comprimento na zona útil quando existe a inserção de um furo (Figura 4-2).

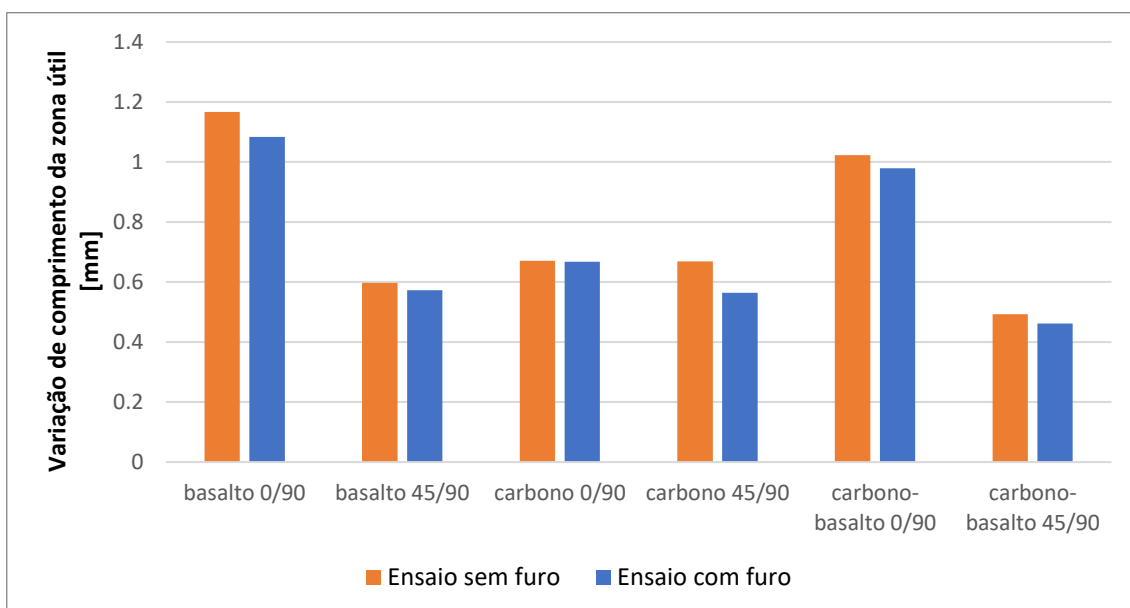


Figura 4-2 – Variação de comprimento da zona útil do provete 50mm

O gráfico tensão deformação (Figura 4-3, figura exemplo) é obtido por meio de ensaios de

tração Este ensaio permite avaliar as propriedades mecânicas, como elasticidade, resistência e capacidade de deformação plástica

Como se vê pelo Figura 4-3 pode-se concluir que o material Basalto apresenta fratura frágil uma vez que a zona plástica é bastante reduzida. Como se verifica, na Figura 4-3 , apesar da existência de um pequeno planalto, isto é, zona plástica muito limitada, ocorre logo de seguida a zona de rotura, assim sendo, resultando de imediata queda na tensão suportada pelo mesmo. Este tipo de resultado foi obtido para todos os ensaios, isto é, para os dois tipos de materiais assim como para as diferentes orientações, mostrando assim as características dos dois materiais apresentarem serem de fratura frágil.

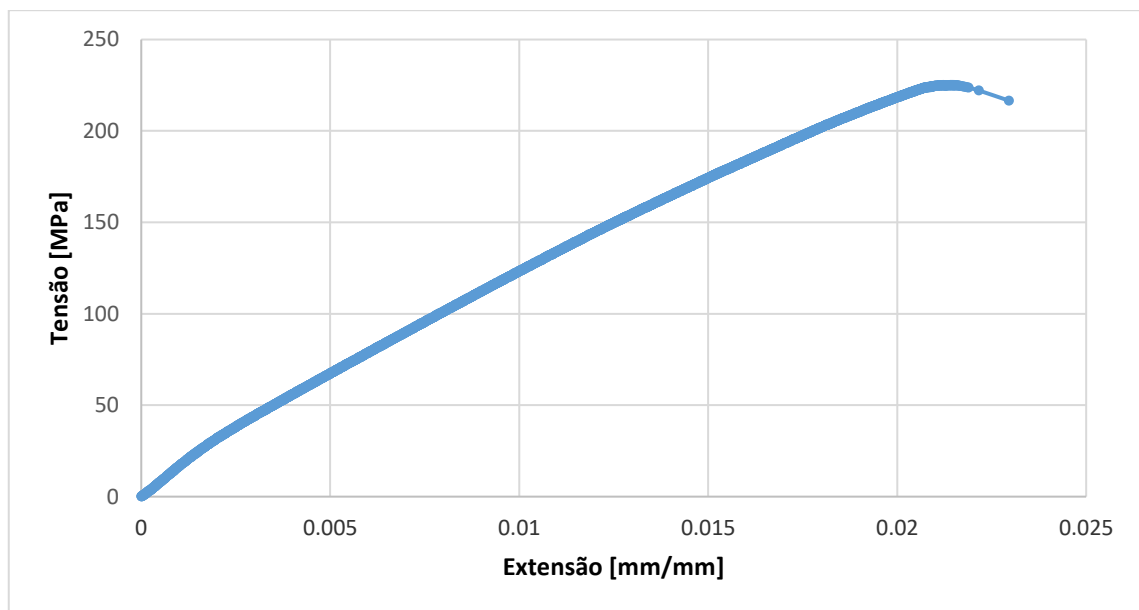


Figura 4-3 - Exemplo de gráfico tensão extensão resultante do ensaio de tração (Basalto 45/90). Este gráfico pode ser explicado dividindo em 3 partes, zona elástica, zona plástica e zona de rotura.

O gráfico tensão deformação (Figura 4-4, figura exemplo, e figuras do anexo I), pode ser adaptado de forma à ilustrar o método usado para a obtenção do modulo de elasticidade.

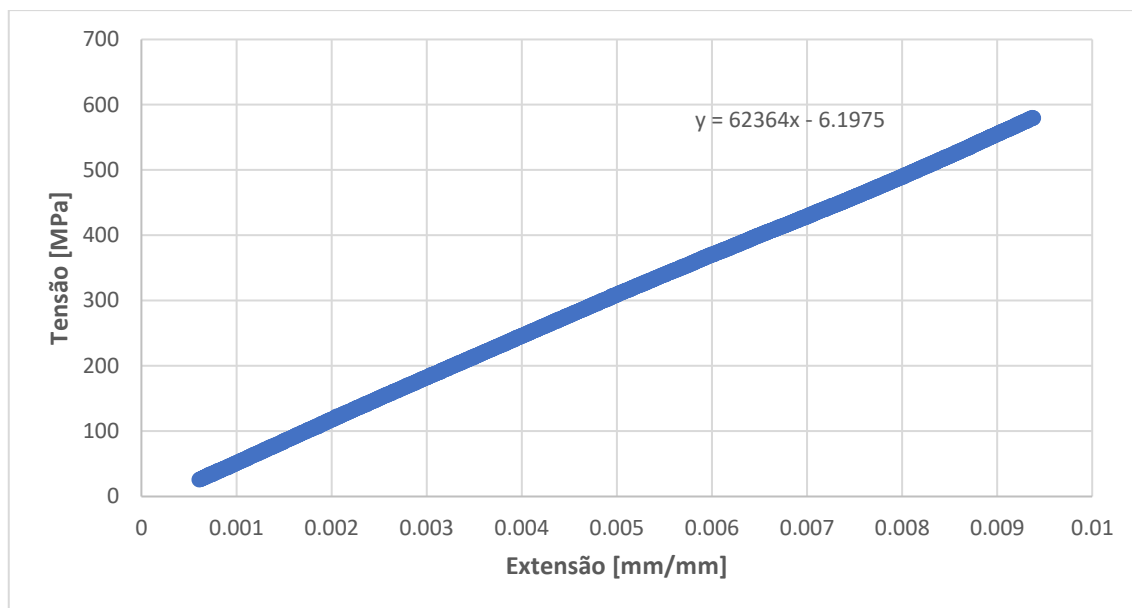


Figura 4-4 - Exemplo de gráfico resultante tensão extensão (Carbono 0/90).

Os resultados de tensão de rotura obtidos são apresentados na Figura 4-5, onde é observada a comparação dos vários materiais e orientações, em que nos compósitos de um único material apresentam uma tensão de rutura menor quando se introduz um defeito no mesmo (presença do furo).

O material fibra de carbono, apresenta uma tensão de rotura superior mesmo com a presença de um entalhe (um furo) em relação ao material fibra de basalto (Figura 4-5). Esta diferença entre as tensões de rotura chega a ser de 37% e 30% maior para o material fibra de carbono na orientação 0/90, com e sem furo, respetivamente.

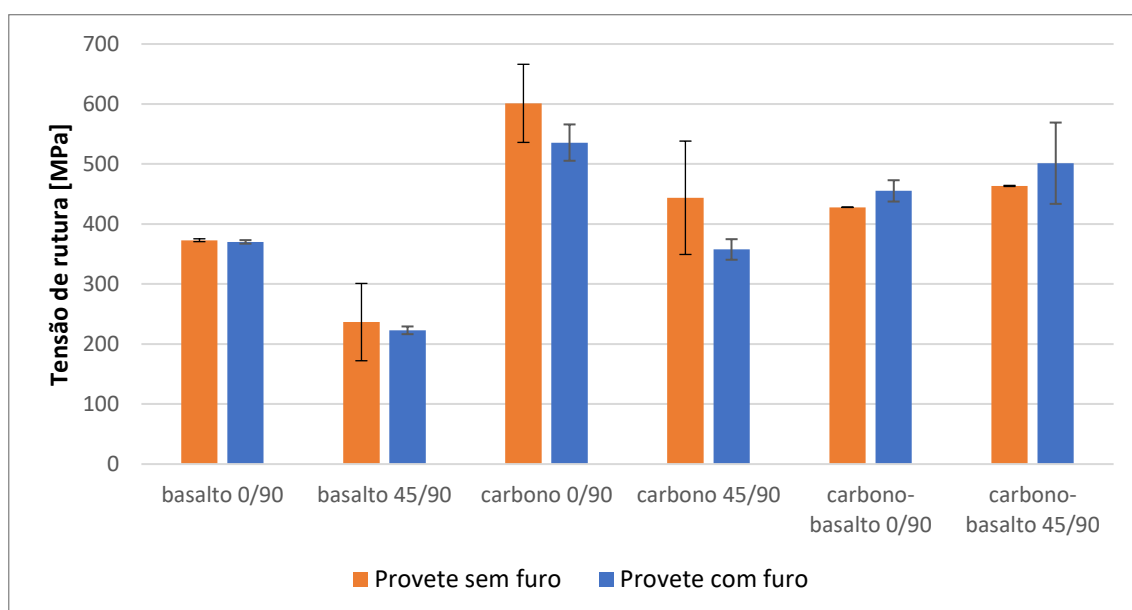


Figura 4-5 - Tensão de rutura máxima de provetes em ensaio de tração

Este resultado não se verifica quando o compósito é híbrido (Figura 4-5). Para os provetes híbridos a tensão de rotura é menor em 15% que os provetes com apenas fibras de carbono e um aumento de 23% para os provetes de basalto na situação com furo, podendo-se demonstrar a capacidade deste material suportar carga mesmo em condições onde existe um entalhe (furo). Indicando assim que um material complementa o outro, resultando de um maior carregamento suportado pelo provete, maior tensão suportada (tensão de rotura é similar nos provetes híbridos para as duas orientações e com ou sem furo), em [31] verifica-se o mesmo.

Os resultados obtidos para o modulo de elasticidade são apresentados na Figura 4-6.

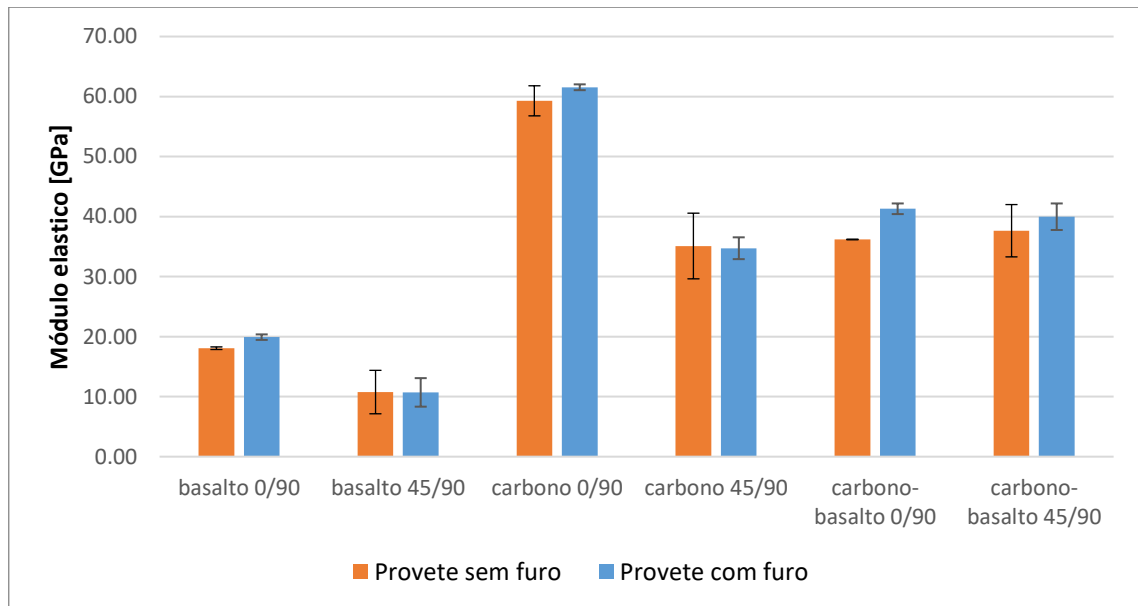


Figura 4-6 - Resultados do modulo de Elasticidade dos ensaios de tração

Figura 4-6 mostra a diferença entre os dois materiais, em que os compósitos de fibras de carbono apresentam um modulo de elasticidade mais elevado que os compósitos fibras de basalto o que evidencia a sua maior rigidez, a diferença é uma diminuição em 67% na orientação de 0/90. A Redução de modulo de elasticidade devido á orientação das fibras foi semelhante para a as fibras de carbono e basalto. Nos provetes de basalto existe uma diminuição em 38% ao alterar a orientação das fibras de 0/90 para 45/90 enquanto nos provetes de fibras de carbono demonstra uma diminuição em 40%.

A existência de um furo não conduz a uma alteração significativa do modulo de elasticidade, tal também foi verificado por outros autores [31]. Nos provetes com furo não se nota uma diferença superior a 12% sendo o valor mais elevado nos ensaios de compósito híbrido carbono basalto na orientação 0/90.

Os provetes híbridos foram influenciados em relação à combinação dos dois materiais pois pode-se visualizar que para o modulo de elasticidade é 100% superior ao modulo de elasticidade obtido para as fibras de Basalto e 38% menor em relação ao obtido para as Fibras de Carbono resultando num material mais rígido que o basalto, tal como foi indicado em diversos estudos [32,33]. No entanto, apesar de valores intermédios entre ambos os materiais, para os compósitos

híbridos para as duas orientações estudadas os valores de modulo de elasticidade são semelhantes aos obtidos para o carbono 45/90.

4.3. Análise de microscopia

A análise em SEM da zona de fratura mostra fratura frágil das fibras. Pode-se observar na Figura 4-7 um exemplo da superfície de fratura do compósito Basalto 45/ Carbono 90 onde se vêem conjuntos de fibras empilhadas com orientações diferentes cuja face da fratura da fibra plana indicia fratura frágil (Figura 4-8)

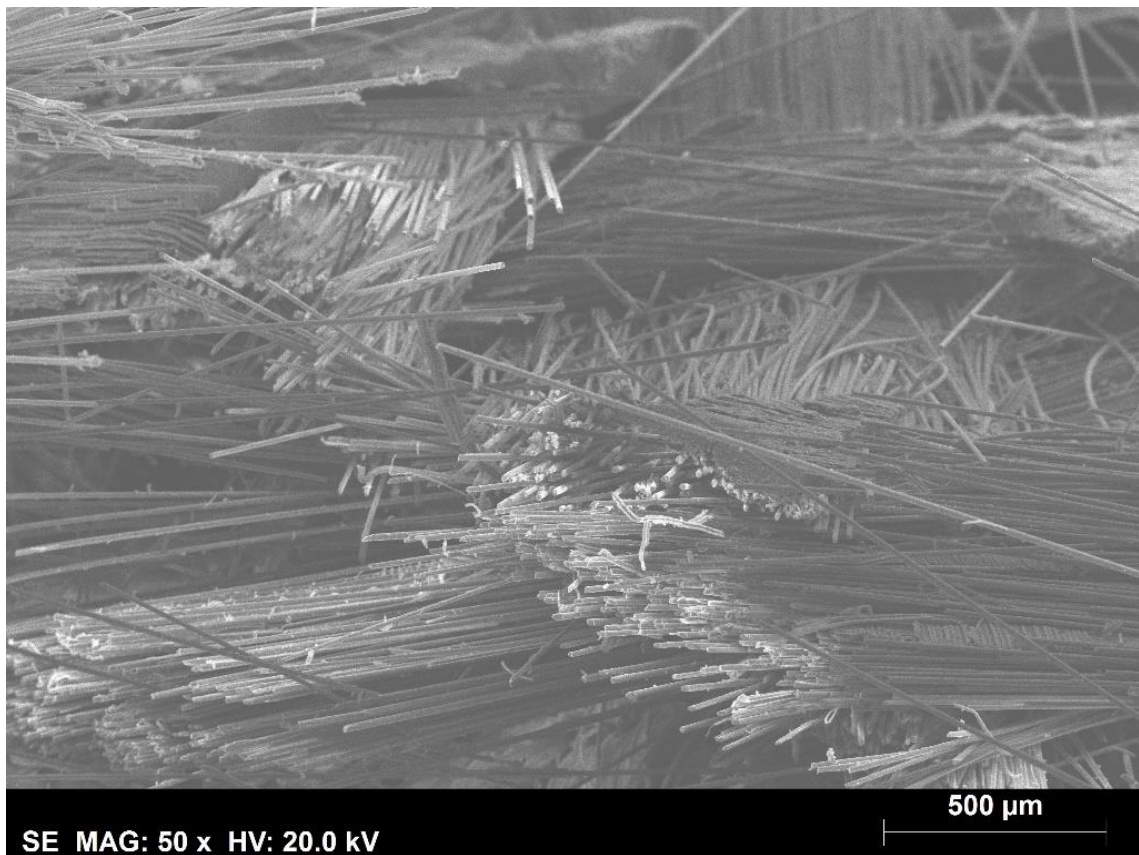


Figura 4-7 - Imagem SEM (exemplo Basalto 45/ Carbono 90)

Observou-se que as fibras apresentam uma face de fratura reta, perpendicular em relação ao comprimento da fibra sem qualquer tipo de deformação previa, daí a conclusão de o material apresentar um comportamento á fratura frágil (Figura 4-8).

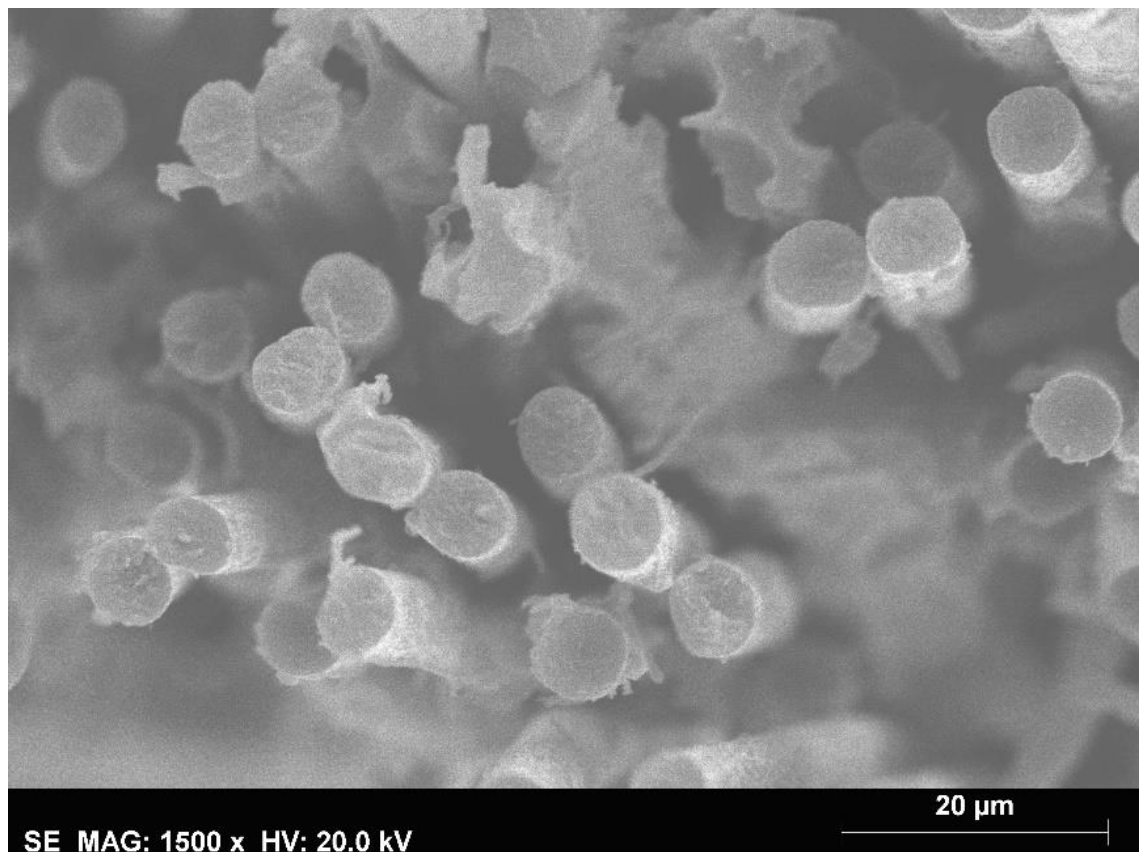


Figura 4-8 - Exemplo representativo de fotografia SEM da zona de fratura (exemplo representativo Basalto 45/ Carbono 90).

Pode-se ainda visualizar, na Figura 4-8, a ausência de fibras em zonas da fratura, isto pode indicar que a fratura do material frágil foi removida pela outra zona de fratura. Esta ausência está evidenciada com as zonas vazias, deixando assim apenas a impressão das fibras.

O comportamento de fratura de material frágil é evidenciado para os dois tipos de material, fibras de basalto e fibras de carbono, como no estudo [34].

4.4. Análise de Elementos Finitos

As simulações têm como resultados a deformação do provete, exemplificado pela Figura 4-9. Esta imagem mostra a variação de comprimento total (em mm) que o provete sofreu assim como as zonas em que a maior deformação ocorreu.

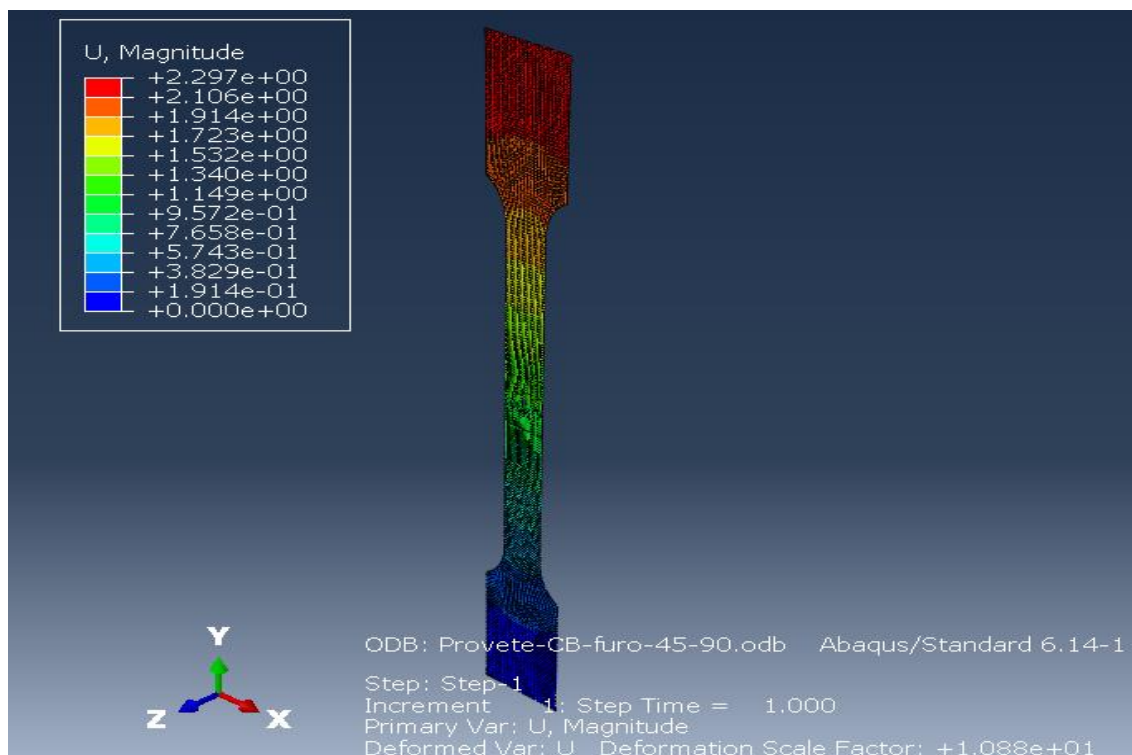


Figura 4-9- Exemplo de representação da variação do comprimento do provete.

A figura apresenta uma escala de cores de magnitude, em mm, correspondendo o vermelho à variação de comprimento mais elevada

O resultado das simulações para os provetes com e sem furo para os dois materiais e híbridos pode ser observado no Figura 4-10. De notar que os provetes de basalto apresentam uma maior variação de comprimento. Provetes com o furo apresentam menor variação de comprimento, todavia estes valores são o resultado de ensaios de tração até a rutura mostrando que o provete tem falha com valores de comprimento menores (Figura 4-10).

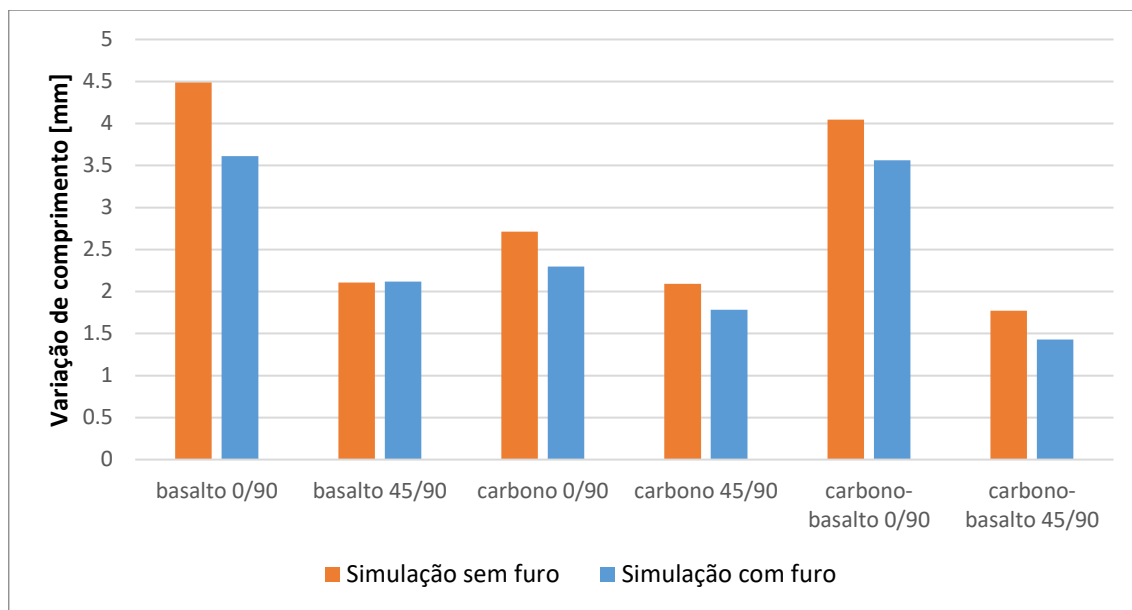


Figura 4-10 - Resultado de variação de comprimento no provete completo em simulação

A tendência para uma maior variação de comprimento pode ser observada nos provetes com basalto. Isto pode ser explicado pois o basalto é um material com um valor de rigidez menor em relação as fibras de carbono, como diz o estudo [35].

A deformação na zona central do provete pode também ser calculada no *software* Abaqus identificando 2 pontos em sentidos contrários do centro, que se encontra a 25mm do centro, representado na Figura 4-11. O *software* apresenta os valores de distância entre os dois pontos antes e depois da deformação (ensaio de tração). Os valores obtidos neste cálculo podem ser observados na Figura 4-12.

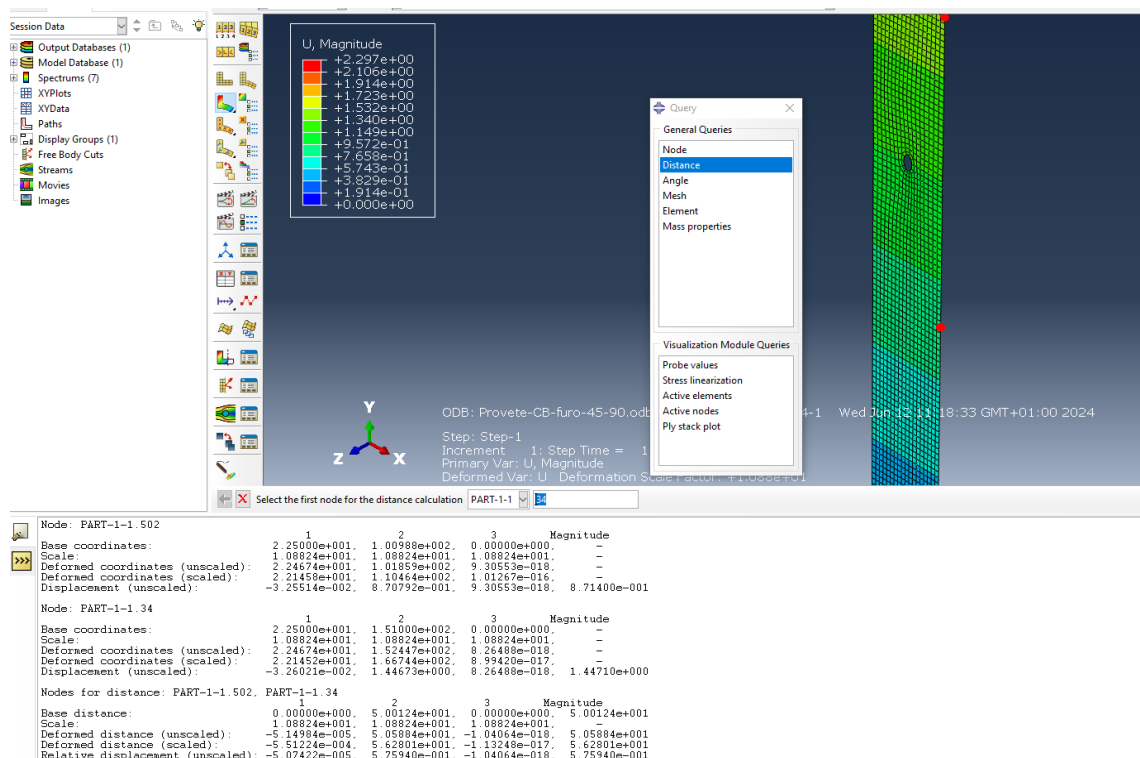


Figura 4-11 - Figura de representação no cálculo de variação de comprimento

Os valores expressos na Figura 4-12, apresentam a comparação dos valores da simulação. Este gráfico demonstra a deformação que o provete sofre indicando a variação de comprimento em uma zona com 50 mm. Verifica-se que os provetes com a orientação de 0/90 apresentam maior variação de comprimento, e os provetes com furo tem uma variação de comprimento ligeiramente inferior até sofrerem a rotura, exceto no basalto 45/90.

Os resultados mostram que os provetes híbridos têm um valor intermedio de variação de comprimento em relação as simulações com os materiais simples, demonstrando que estes materiais se complementam (o compósito híbrido adquire características dos materiais constituintes), como no estudo [31].

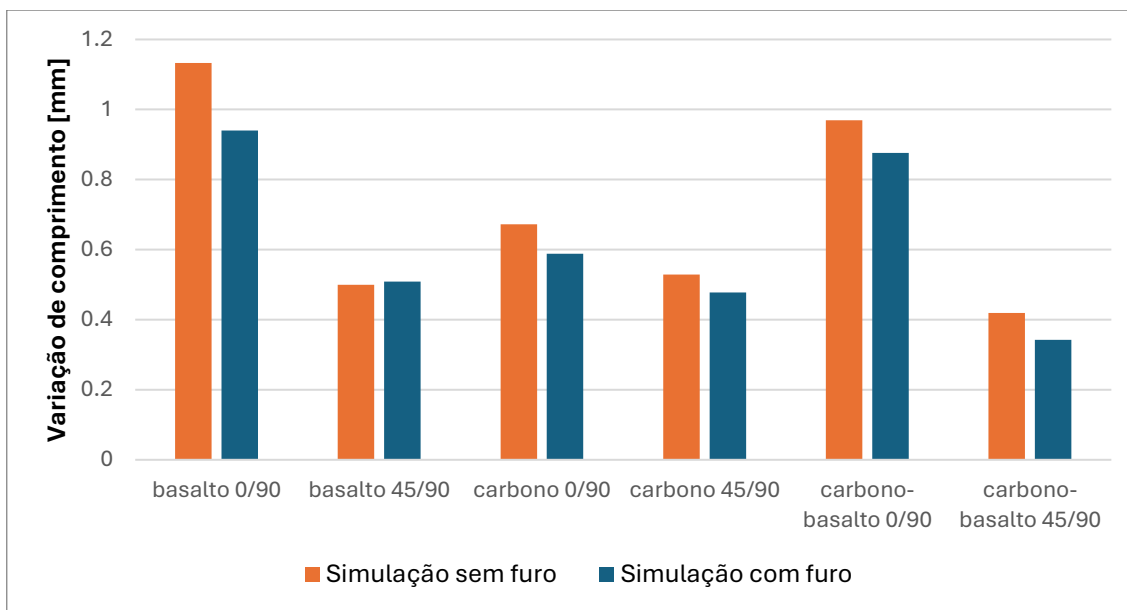


Figura 4-12 - Simulação de variação de comprimento da zona útil [50 mm]

Na Figura 4-13 mostra-se um exemplo dos valores da tensão na zona central do provete onde ocorre a fratura deste. Estes valores foram recolhidos para todas as simulações e podem ser visualizados na Figura 4-14. Estes valores são recolhidos da primeira camada do provete na simulação (camada sempre composta por fibras de carbono).

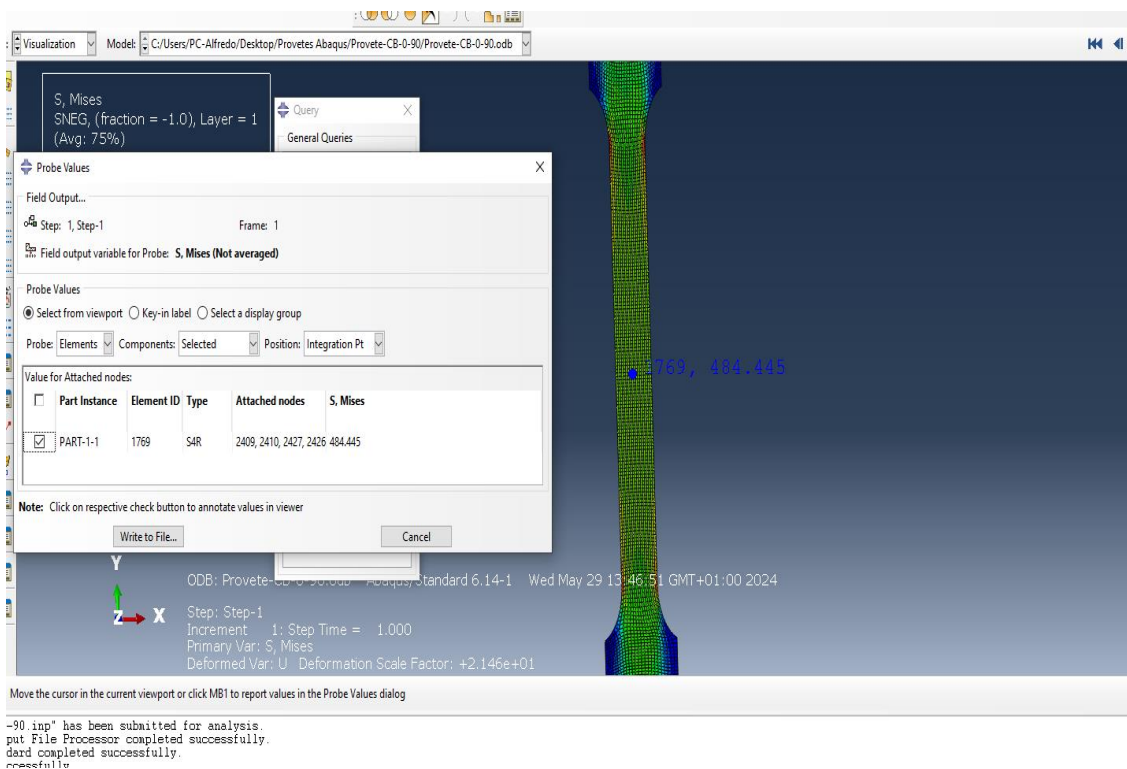


Figura 4-13 - Exemplo representativo de identificação de tensão (Carbono Basalto 0/90)

Pode-se realçar que os resultados das simulações onde existe a inserção do furo registam

o valor de tensão até a rotura menor que para os provetes sem furo (Figura 4-14).

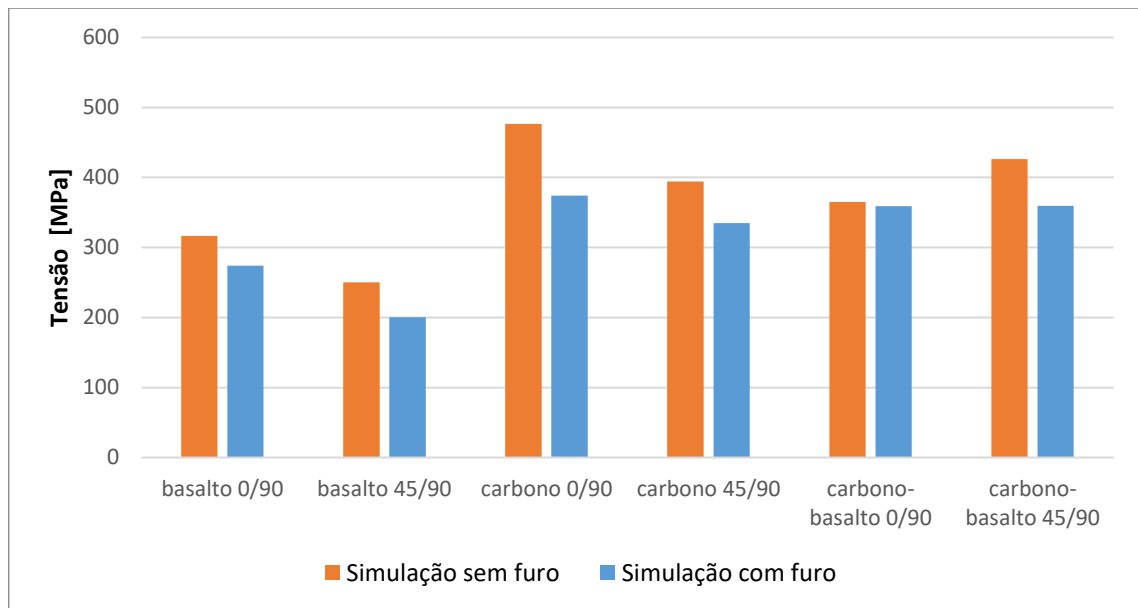


Figura 4-14 - Tensão de rotura da simulação

A partir da Figura 4-14 pode-se também fazer notar que os valores de tensão suportada pelas fibras de carbono são superiores aos das fibras de basalto mesmo com o entalhe do furo. Ainda na Figura 4-14, observa-se que, nos provetes híbridos existiu um aumento da tensão máxima de rotura relativamente aos provetes de basalto. Estas simulações apresentam um valor intermedio comparativamente as simulações de materiais simples. Permitindo verificar que os materiais simples se complementam, aumentando a tensão máxima para as simulações dos provetes híbridos, relativamente aos compósitos só com fibra de basalto como no estudo [31].

A simulações para o compósito de materiais híbridos apresentam também um aumento na tensão máxima de rotura para a orientação de 45° em comparação as simulações com as fibras todas orientadas a 0/90 (Figura 4-14).

Na Figura 4-15 , pode-se ver que as fibras de Carbono apresentam um valor mais alto para a tensão de rotura e isso pode também ser observado com os valores das simulações.

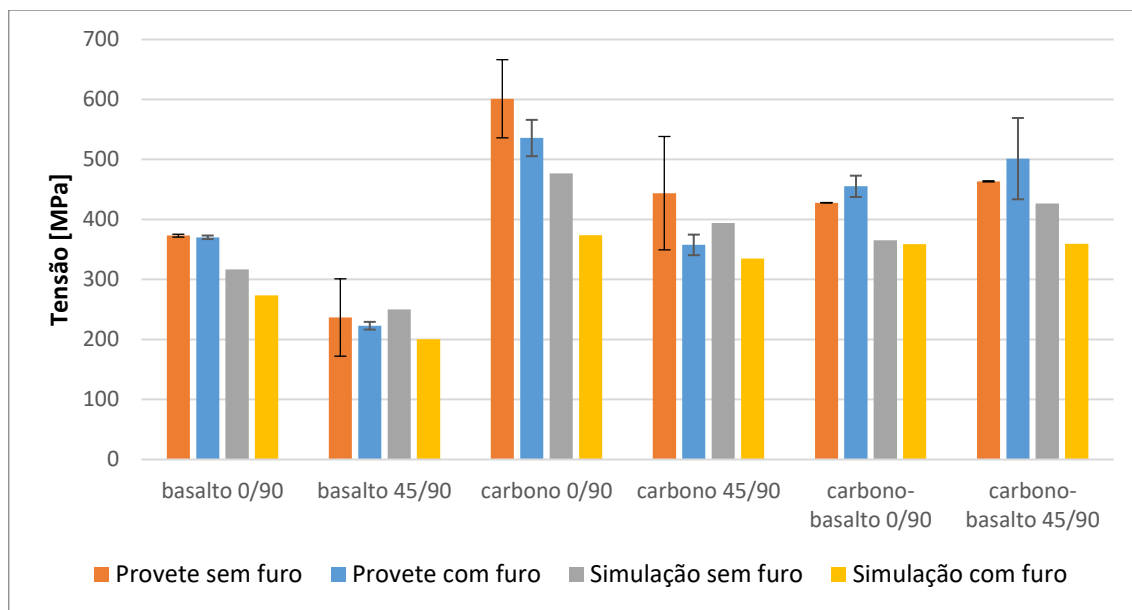


Figura 4-15 - Tensão máxima exibindo valores de simulação e ensaio experimental

Através da Figura 4-15, os provetes de basalto apresentam uma diferença de 1% na tensão de rotura com e sem furo. No caso dos provetes híbridos esta diferença aumenta para 6%, no entanto é menor do que a diferença verificada nos provetes de carbono 11%. Isto mostra que a inserção de um furo tem menos impacto na tensão de rotura, para os provetes de basalto.

Pode-se também observar que aos valores experimentais foram semelhantes aos das simulações para os provetes híbridos, uma vez que estes apresentam valores intermédios quando comparados aos não híbridos, tanto para as diferentes orientações como para os provetes com e sem furo. Este feito demonstra que os dois tipos de fibras se complementam, ajudando assim os valores de tensão de rotura (Figura 4-15).

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo pretende-se apresentar os resultados obtido nos ensaios realizados e a discussão dos mesmos

5.1. Conclusão

Apesar dos resultados satisfatórios, como qualquer projeto de dissertação houve desafios a superar e foi necessário contornar algumas dificuldades, tais como o tipo de amarra utilizada nos ensaios de tração. Inicialmente, foram utilizadas amarras lisas que tiveram de ser substituídas por amarras com dentes pois estas escorregavam ao serem apertadas.

Com os resultados pode-se constatar que as fibras de carbono apresentam uma maior tensão de rutura (37% para as fibras de Basalto e 28% para o material híbrido na orientação 0/90). Pode-se verificar que o módulo de elasticidade das fibras de Carbono é maior em 69% que o das fibras de Basalto e 38% que o material híbrido para a orientação de 0/90. Assim, através dos ensaios de tração pode-se concluir que as fibras de carbono apresentam uma maior tensão de rotura (37% de valor máximo obtido), menor variação de comprimento (31% de valor mínimo na sua variação em relação ao basalto) e maior módulo de elasticidade que as fibras de basalto (apresenta valor máximo de 67%), resultando em um material ideal para aplicações com maior esforços aplicados.

Os provetes híbridos, todavia, apresentam valores intermédios entre os dois materiais simples resultando em um meio termo. Esta observação pode ser tomada para os resultados de tensão de rotura, onde as camadas de fibra de carbono fornecem uma maior resistência ao compósito, complementando as fibras de basalto, para os valores de variação de comprimento e para o módulo de elasticidade o mesmo princípio aplica-se, pois, esta característica também apresentam valores entre os dois compósitos com os materiais simples.

Com estes valores dos ensaios e simulações dos provetes híbridos pode-se constatar que a mistura de fibras de carbono intercaladas com fibras de basalto em uma orientação de 0/90 é uma alternativa viável para componentes ou estruturas de não esforço máximo podendo assim se economizar nas despesas dos mesmos.

É mostrado que o compósito de fibras de basalto tem menor sensibilidade nos resultados de tensão de rotura em relação à presença de furos. Essa característica também é observada no compósito híbrido

Foi demonstrado que a utilização de material híbrido apresenta um resultado de valores intermédios resultando assim em material que consegue tirar proveito das características dos dois materiais simples principalmente a resistência a tração das fibras de carbono e na vertente económica a partir das fibras de basalto. Pode-se também confirmar que a presença dos furos em materiais compósitos apresenta diminuição na tensão de rotura comparado com os sem furo, mas menos impacto no material de basalto

Através das simulações pode-se observar que estas apresentam valores similares aos ensaios experimentais, mostrando assim a viabilidade de possíveis trabalhos serem realizados apenas com as simulações

5.2. Trabalhos futuros

Com a resolução deste projeto pode-se notar que se obteve resultados positivos para este trabalho, uma vez que se verificou que estas duas fibras se complementam originando um compósito híbrido menos dispendioso, mas perto no nível das características mecânicas de apenas compósitos de fibra de carbono. Contudo a investigação de outras orientações da malha ou mesmo a formação das camadas do provete pode levar a melhor resultados. Pode-se também indicar que procurar outros materiais pode levar a melhores resultados consoante a aplicação.

Bibliografia

- [1] F.C. Campbell, Structural Composite Materials, 2010. <https://doi.org/10.4324/9781410600745-17>.
- [2] R.A.M. Preto, Estudo experimental do comportamento mecânico de compósitos em fibras de basalto, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Mestrado Integrado - Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2013.
- [3] Fibrenamics, Materiais Compósitos: O Que são e Quais as Suas Propriedades?, Intelligence (n.d.). <https://www.fibrenamics.com/intelligence/reports/materiais-compositos-o-que-sao-e-quais-as-suas-propriedades> (accessed September 21, 2024).
- [4] V. Ryan, Composite Materials: Reinforced Concrete, Technol Student (2010). <http://www.technologystudent.com/joints/reinforc1.html>.
- [5] V. Šerifi, M. Tarić, D. Jevtić, A. Ristovski, M.Š. Išović, HISTORICAL DEVELOPMENT OF COMPOSITE MATERIALS, ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering. Volume XXV (2018). <https://doi.org/10.15660/AUOFMTE.2018-3.3392>.
- [6] A.L.S. da Silva, Compósito, (n.d.). <https://www.infoescola.com/materiais/composito/> (accessed September 21, 2024).
- [7] I.N. Fridlyander, V.Ya. Shevchenko, S.M. Barinov, Ceramic composite materials, Composite Materials (1992) 133–138. https://doi.org/10.20595/jjbf.19.0_3.
- [8] L. Iuliano, L. Settineri, A. Gatto, High-speed turning experiments on metal matrix composites, Compos Part A Appl Sci Manuf 29 (1998) 1501–1509. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00105-5](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00105-5).
- [9] Composites in General, Polym Sci Learn Cent (n.d.). <https://www.pslc.ws/macrog/mpm/analysis/general.htm>.
- [10] What Are Composites?, Spencer Composites Corporation (2022). http://www.spencercomposites.com/wordpress/?page_id=43.
- [11] G. Yang, Y. Lyu, F. Cheng, J. He, S. Zuo, W. Huang, Y. Hu, X. Hu, X. Chen, A low-cost and high-strength basalt/carbon fiber reinforced polymer improved by imitating tree-root micro/nano aramid short fiber, Chinese Journal of Aeronautics (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.08.007>.
- [12] A.T.D. Martins, Projeto E Fabricação De Tubos Compósitos Em Fibras De Carbono/Epóxi Para Próteses Transtibiais Por Moldagem Com Bladder, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- [13] L. Dong, F. Hou, Y. Li, L. Wang, H. Gao, Y. Tang, Preparation of continuous carbon nanotube networks in carbon fiber/epoxy composite, Compos Part A Appl Sci Manuf 56 (2014) 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.016>.

- [14] N. Yusof, A.F. Ismail, Post spinning and pyrolysis processes of polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fiber and activated carbon fiber: A review, *J Anal Appl Pyrolysis* 93 (2012) 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.10.001>.
- [15] L.R. dos Santos, Fibra de Carbono, *InfoEscola* (n.d.). <http://www.infoescola.com/quimica/fibra-de-carbono/> (accessed September 21, 2024).
- [16] G.W. Lebrão, Fibra de Carbono, *Revista Plástico Sul* (2008).
- [17] R.M. de Carvalho, L.T. Kubota, J.J. Rohwedder, Fibras de carbono: aplicações em eletroanalítica como material eletródico, *Quim Nova* 22 (1999) 591–599. <https://doi.org/10.1590/S0100-40421999000400018>.
- [18] D.F. de O.C. Sales, Projeto de reservatórios pressurizados fabricados com fibras de carbono através da técnica de enrolamento filamentar, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologias, 2017.
- [19] K. Singha, A Short Review on Basalt Fiber, *International Journal of Textile Science* 1 (2012) 19–28. <https://doi.org/10.5923/j.textile.20120104.02>.
- [20] V. Lopresto, C. Leone, I. De Iorio, Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic, *Compos B Eng* 42 (2011) 717–723. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.030>.
- [21] A. Ross, Basalt Fibers: Alternative to Glass?, *Composites World* (2006). <https://www.compositesworld.com/articles/basalt-fibers-alternative-to-glass>.
- [22] M. Lal Regar, A. Islam Amjad, Basalt Fibre – Ancient Mineral Fibre for Green and Sustainable Development, *Tekstilec* 59 (2016) 321–334. <https://doi.org/10.14502/Tekstilec2016.59.321-334>.
- [23] V. Dhand, G. Mittal, K.Y. Rhee, S.J. Park, D. Hui, A short review on basalt fiber reinforced polymer composites, *Compos B Eng* 73 (2015) 166–180. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.011>.
- [24] Q. Liu, M. T. Shaw, R. S. Parnas, A.-M. McDonnell, Investigation of Basalt Fiber Composite Mechanical Properties for Applications in Transportation, *Polym Compos* (2006) 101–113. <https://doi.org/10.1002/pc>.
- [25] Z. Li, J. Ma, H. Ma, X. Xu, Properties and Applications of Basalt Fiber and Its Composites, *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 186 (2018). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/2/012052>.
- [26] A.M.B. de Moraes, Estudo do comportamento à compressão de materiais compósitos, Tese Doutorado, Universidade do Porto Faculdade de Engenharia, 1997.
- [27] M. Haq, R. Burgueño, A.K. Mohanty, M. Misra, Hybrid bio-based composites from blends of unsaturated polyester and soybean oil reinforced with nanoclay and natural fibers, *Compos Sci Technol* 68 (2008) 3344–3351. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.007>.
- [28] ASTM D3039/D3039M-00, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 2000. <https://doi.org/10.1520/D3039>.

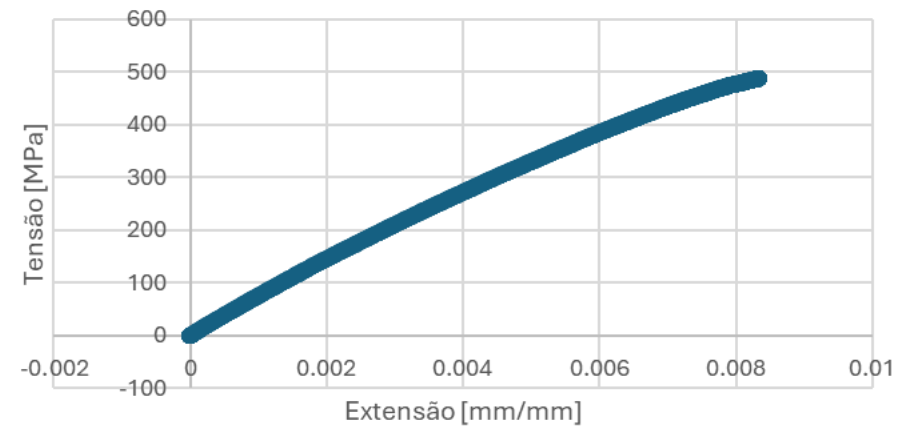
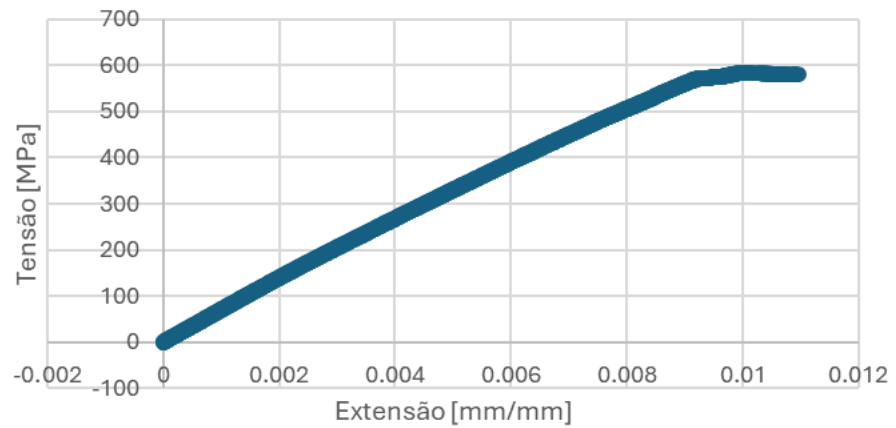
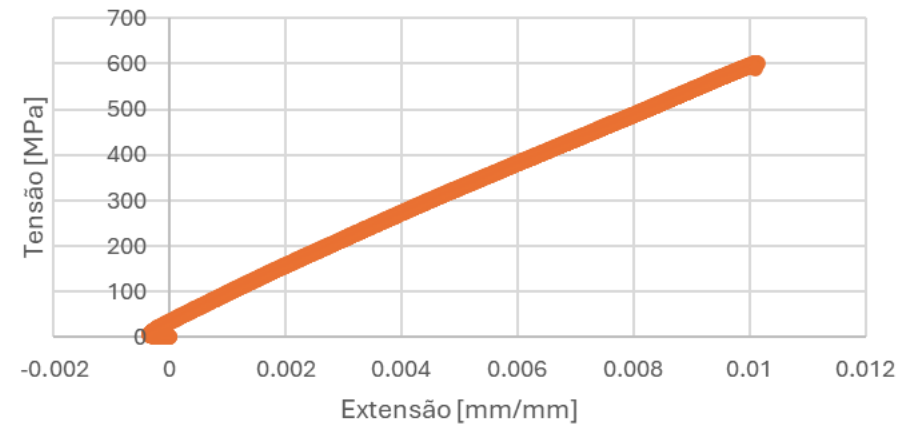
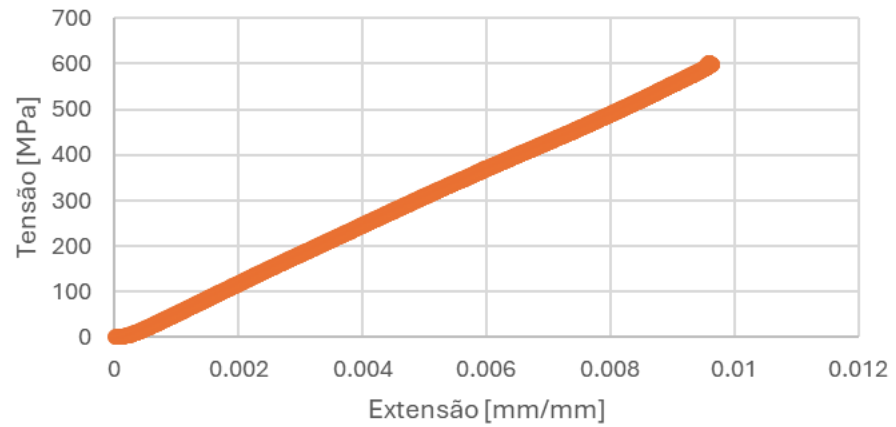
- [29] ASTM D2584–02, Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins, 2002.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Standard+Test+Method+for+Ignition+Loss+of+Cured+Reinforced+Resins#1>.
- [30] P.R.S. Costa, Otimização Topológica Para Fabricação Aditiva De Sistema De Suporte Do Auv Medusa Deep Sea, Mestrado em ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, 2018.
- [31] G. Sun, L. Wang, D. Chen, Q. Luo, Tensile performance of basalt fiber composites with open circular holes and straight notches, *Int J Mech Sci* 176 (2020) 105517. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105517>.
- [32] G. Sun, S. Tong, D. Chen, Z. Gong, Q. Li, Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers, *Int J Mech Sci* 148 (2018) 636–651. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.08.007>.
- [33] S.H. LEE, A.M. WAAS, Compressive response and failure of fiber reinforced unidirectional composites, *International Journal Of Fracture* 100 (1999) 275–306. <https://doi.org/10.1023/A>.
- [34] T. Czigány, Basalt Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites, *Materials Science Forum* 473–474 (2005) 59–66. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.473-474.59>.
- [35] D. Plappert, G.C. Ganzenmüller, M. May, S. Beisel, Mechanical Properties of a Unidirectional Basalt-Fiber/Epoxy Composite, *Journal of Composites Science* 4 (2020) 101. <https://doi.org/10.3390/jcs4030101>.

Anexo I

Gráficos resultante tensão extensão

Aqui encontram-se os gráficos resultantes tensão extensão para todos os ensaios efetuados

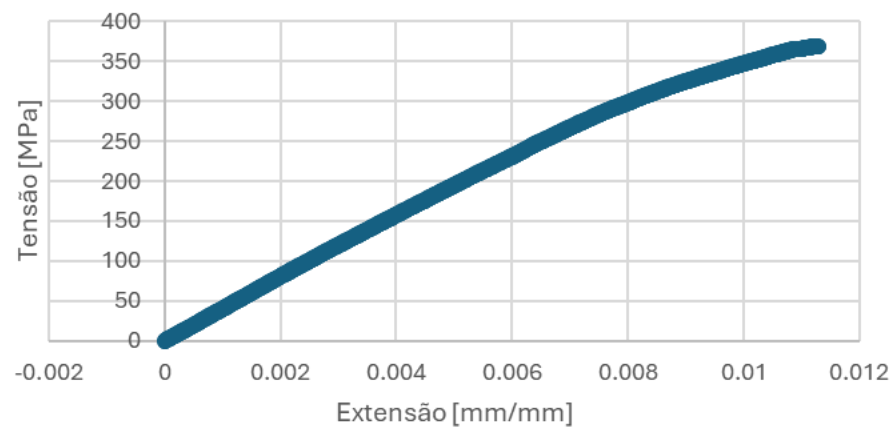
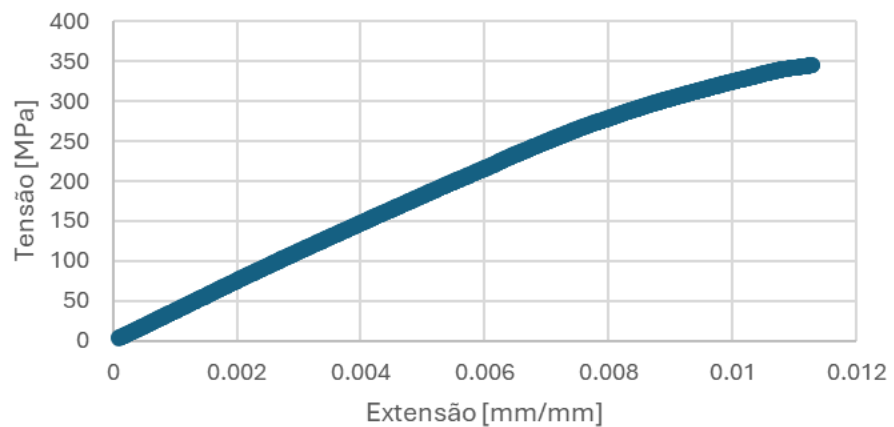
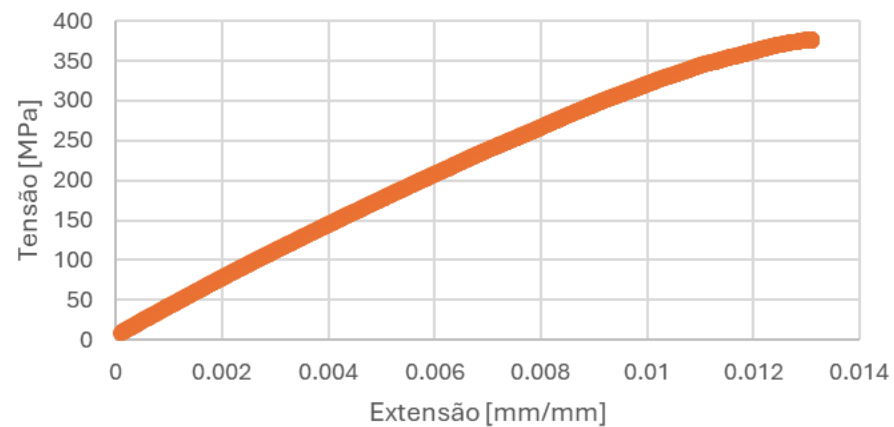
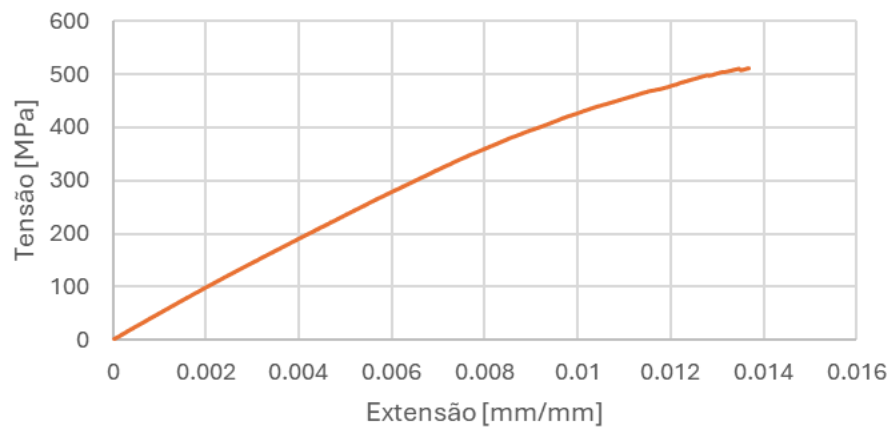
Carbono 0/90



● Ensaio sem furo

● Ensaio com furo

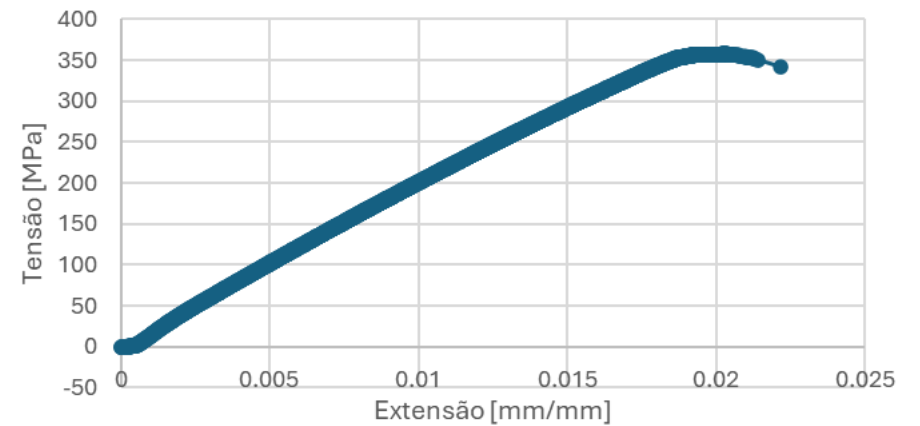
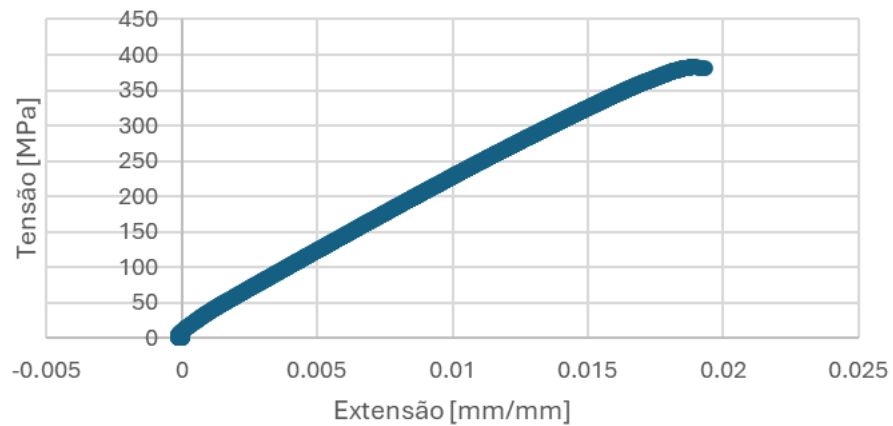
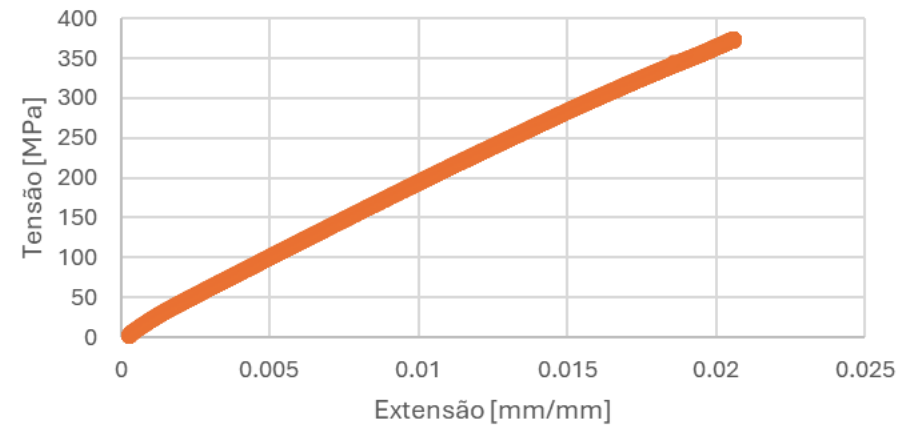
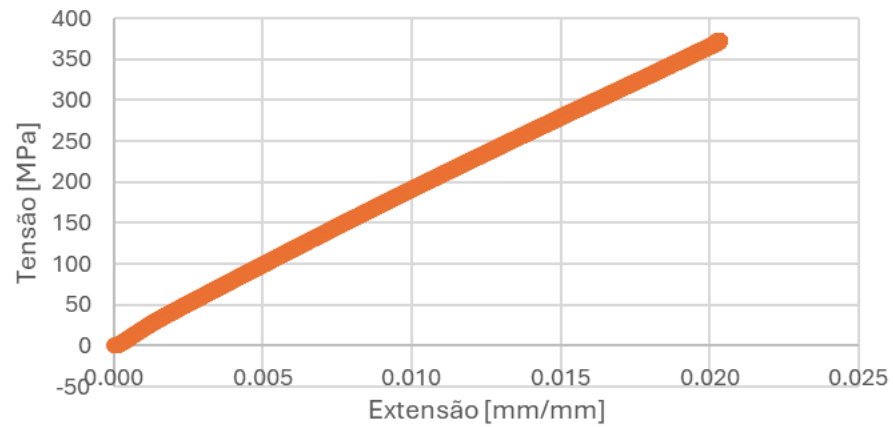
Carbono 45/90



● Ensaio sem furo

● Ensaio com furo

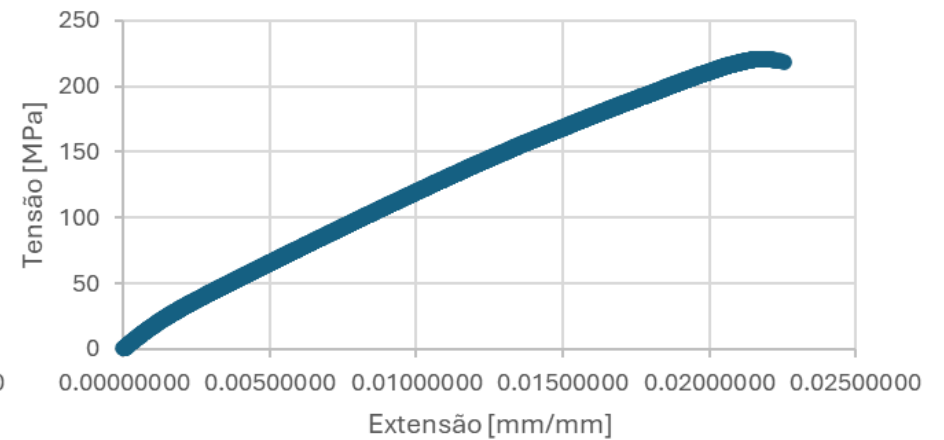
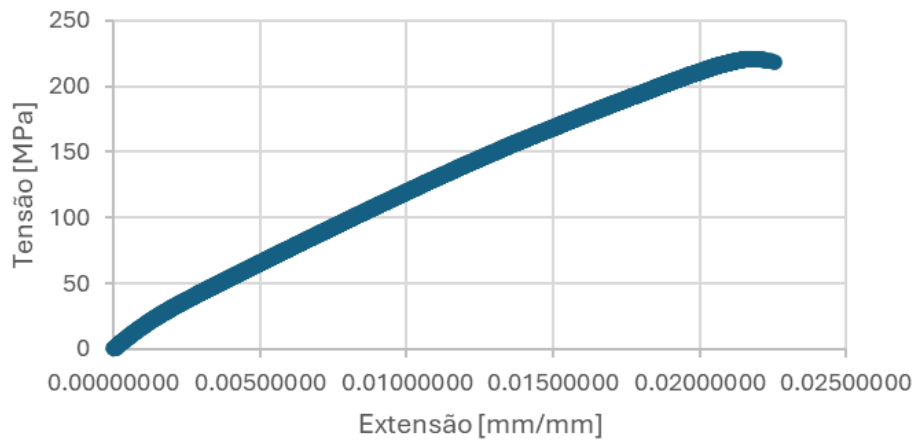
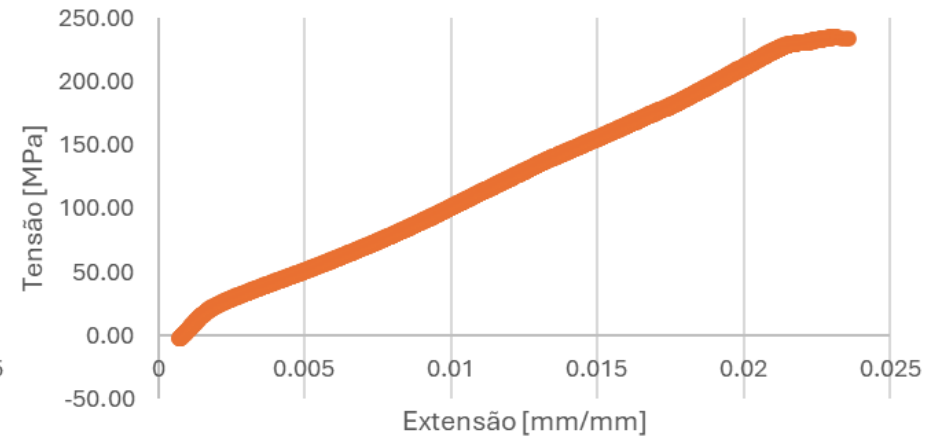
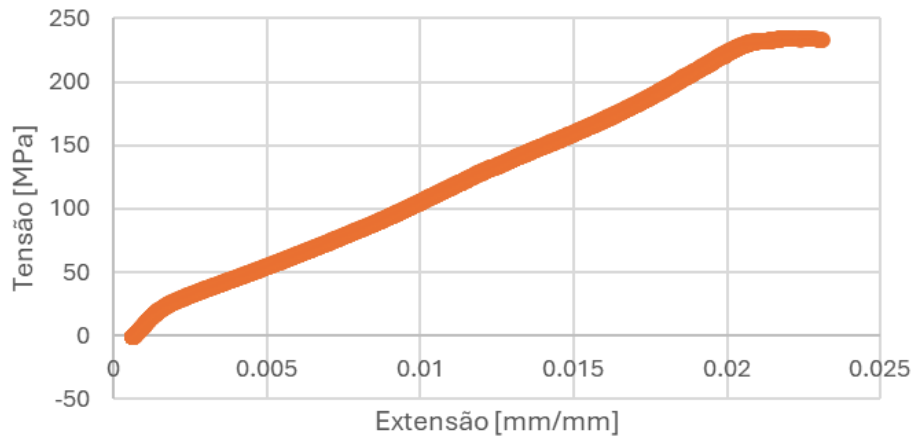
Basalto 0/90



● Ensaio sem furo

● Ensaio com furo

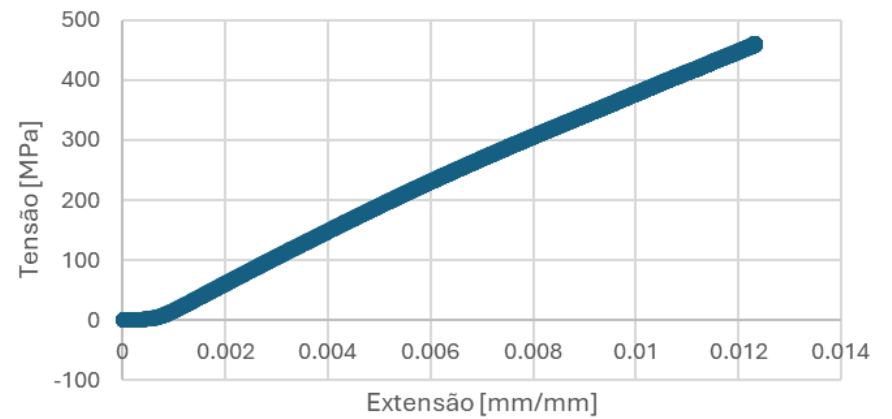
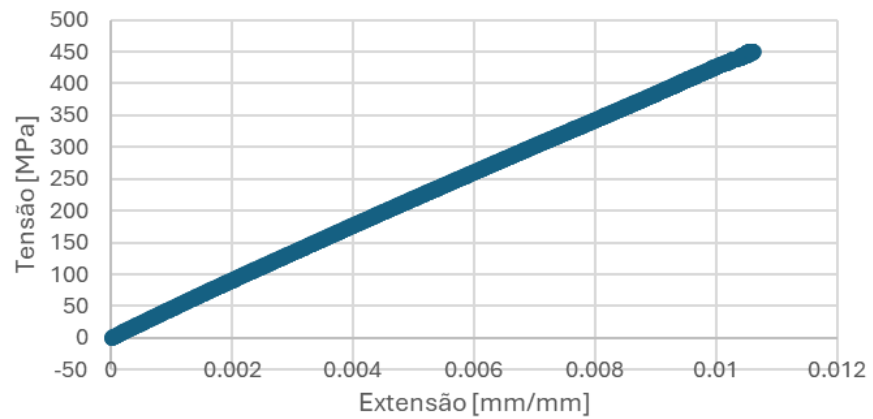
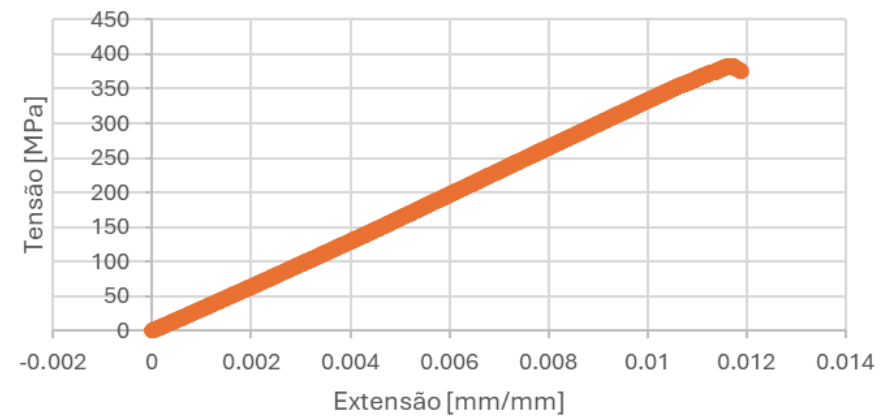
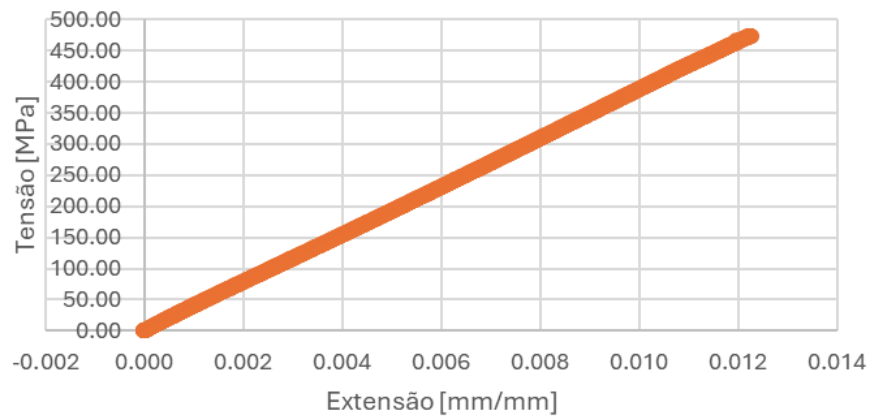
Basalto 45/90



● Ensaio sem furo

● Ensaio com furo

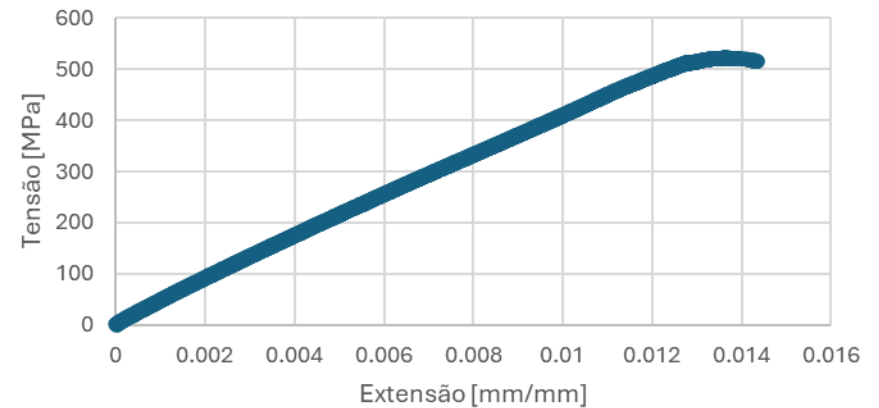
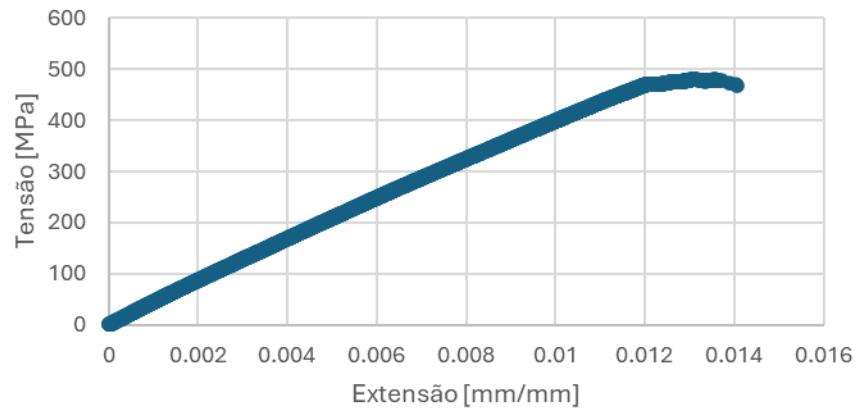
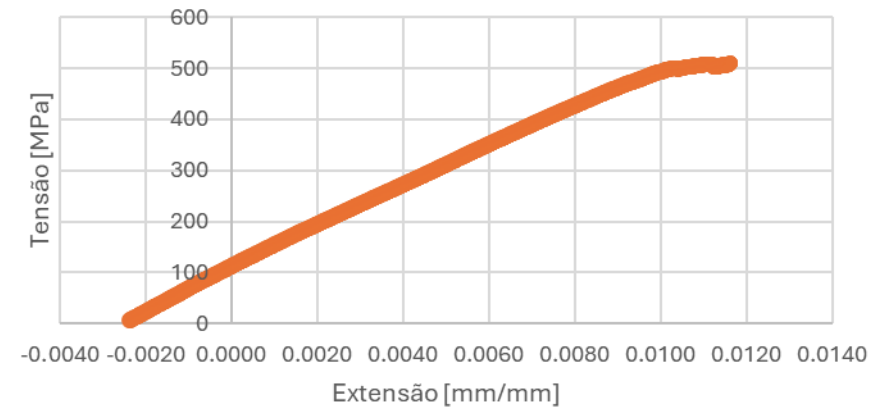
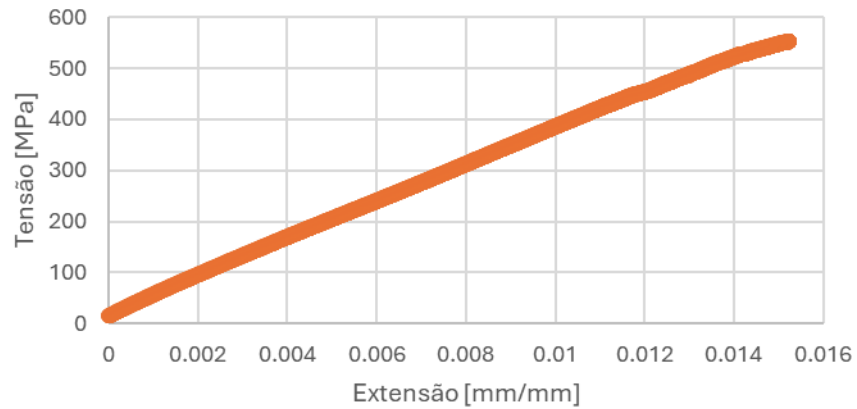
Carbono- Basalto 0/90



● Ensaio sem furo

● Ensaio com furo

Carbono-Basalto 45/90



● Ensaio sem furo

● Ensaio com furo