



Desenvolvimento E Conceção De Protótipo De Pequenas Dimensões Para Processo De Compressão A Quente

DIOGO MIGUEL CARNEIRO MOREIRA

outubro de 2024

**Desenvolvimento e Conceção de Protótipo de
Pequenas Dimensões para Processo de
Compressão a Quente**

Diogo Miguel Carneiro Moreira 1181755

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Construções Mecânicas**

**Orientador: Púria Esfandiari
Co-orientador: João Francisco Silva**

Versão submetida para discussão

Porto, Setembro 2024

Agradecimentos

Aos meus pais, Carla e Luis, deixo o maior e mais sincero agradecimento. Tudo o que sou hoje enquanto homem e enquanto pessoa devo a vocês. Por todos os sacrifícios que fizeram na vossa vida para proporcionar um futuro melhor aos vossos filhos, muito obrigado. Pelas oportunidades que me deram para chegar até aqui, pela confiança e pelo acreditar que sempre depositaram em mim, e pelo vosso infinito amor, estou eternamente grato. Ao meu irmão, pequeno Afonso, deixo também um agradecimento muito especial, pela sua constante alegria contagiante, que nos dias mais complicados faz com que todos em casa esqueçam os seus problemas. Pelas infinitas brincadeiras que fazemos juntos, foi sem dúvida um pilar na minha vida, apesar de tão jovem, proporcionou o equilíbrio mais natural possível entre o trabalho e a vida pessoal. É e será sempre uma das pessoas mais especiais no meu coração, em quem mais orgulho tenho.

Deixo um agradecimento também muito especial aos meus avós, Júlia e Carlos, que sempre estiveram presentes na minha vida, proporcionando todo o amor e paciência possíveis. A vocês, por toda a disponibilidade que tiveram em contribuir para o meu crescimento, o meu muito obrigado.

À minha Bisavó, Maria Alice, que infelizmente já não está entre nós, deixo um obrigado com saudade, por toda a participação que teve no meu crescimento e por todo o amor que tinha por mim. Uma das suas maiores alegrias nos seus últimos anos de vida era saber que o seu Bisneto ia ser Engenheiro e se ia tornar mestre. A ti, que tanto sofreste, dedico este marco da minha vida, porque sei que era um dos teus maiores orgulhos e felicidades antes de partires.

À minha namorada, Joana, deixo um grande obrigado, por todo o amor, carinho, companhia e apoio, não só ao longo da realização desta dissertação, mas também ao longo destes últimos 5 anos do meu percurso académico. Foi sem dúvida uma das pessoas que mais me aturou e apoiou nestes anos, todas as épocas de exames, nos momentos de aflição, estive lá para me fazer lembrar que era capaz e que no fim tudo corre bem. Obrigado por toda a estabilidade que me proporcionou e por ter estado sempre presente.

Aos meus orientadores, Engenheiro Púria Esfandiari e Engenheiro João Francisco Silva, que desde início me incentivaram para a realização desta dissertação, um muito obrigado por todo o apoio, por toda a paciência e por todo o conhecimento transmitido. A confiança e autonomia que me proporcionaram foi muito importante para o meu crescimento e para que possa entrar no mundo de trabalho com a pujança necessária para ter sucesso.

Deixo também um grande agradecimento à Engenheira Rita Carreiras, que esteve sempre presente e disponível para me ajudar a realizar toda a componente prática da dissertação. Obrigado pelo excelente ambiente de trabalho proporcionado a mim e aos meus colegas, e por todas as condições criadas para que tivéssemos o máximo de estabilidade e sucesso. Sem dúvida uma jovem Engenheira e Professora em ascensão que será uma grande mais valia para esta instituição de ensino pelo seu empenho e profissionalismo.

Aos meus colegas de curso, João Ramos, Bruno Teles, Gui Yang Fu e Diogo Santos deixo um obrigado, por todos os momentos que passamos juntos nestes últimos 5 anos, as horas que estudamos juntos e as vivências que partilhamos, foram sem dúvida um pilar muito importante para o sucesso e para que estes 5 anos tenham sido memoráveis.

Um agradecimento ao Simão Silva e à Engenheira Valentina, do GRAQ, por toda a disponibilidade e cooperação para realizar este estudo do biocompósito em parceria com o DEM.

Agradeço também ao centro de investigação M4S- Materials for Sustainability por toda a disponibilidade demonstrada para utilização de recursos e espaços essenciais para a realização desta dissertação.

Por fim, ao Engenheiro Vítor Moreira agradeço pela disponibilidade e profissionalismo que teve para maquinar o bloco de alumínio de forma rápida e eficaz bem como a paciência que teve em me passar algum conhecimento sobre o funcionamento da máquina CNC.

Resumo

A utilização desmedida dos recursos que o nosso planeta dispõe, é um problema que as futuras gerações vão ter de enfrentar e resolver. Estes problemas ambientais acabam por ser reflexo de uma economia consumista. A mudança de mentalidade exige tempo, tempo esse que não dispomos. É por isso importante encontrar soluções de forma a minimizar o impacto ambiental do consumo excessivo de bens, como por exemplo, desenvolvendo produtos à base de elementos naturais e facilmente degradáveis, de forma que, os produtos no fim da sua vida útil tenham menor impacto nos ecossistemas.

Neste seguimento, pretende-se estudar a viabilidade do fabrico de um biocompósito, recorrendo a castanha não comercializável. O biocompósito em causa deverá ser produzido recorrendo ao método de compressão a quente, que exige uma prensa hidráulica capaz de aplicar a pressão e temperatura durante um certo tempo. De uma forma geral, as prensas desenvolvidas para este processo são de elevada complexidade e com periféricos relativamente complexos. No entanto, no âmbito do estudo dos materiais compósitos, em que se realizam muitos testes com compósitos de pequenas dimensões, pode-se desenvolver equipamentos mais simples para se realizar estes ciclos de testes. Neste sentido, desenvolveu-se um protótipo de uma prensa de compressão a quente com alguma simplicidade, fazendo uso de periféricos simples para testar este e outros compósitos.

Para se realizar a otimização do compósito foram feitos diversos testes para se encontrar a composição e os parâmetros do processo de compressão a quente mais adequados. No que à prensa diz respeito, fez-se o estudo e fabrico do molde para a produção de uma prova de conceito com o biocompósito otimizado, bem como todos os sistemas de aquecimento e arrefecimento necessários. A prova de conceito terá como aplicação a decoração de interiores.

Foram realizados testes mecânicos e químicos ao biocompósito otimizado, de forma a caracterizá-lo, e foram feitos testes para avaliar o correto funcionamento da prensa para compressão a quente desenvolvida.

Por fim, e no seguimento dos estudos efetuados, conclui-se que o biocompósito foi possível de produzir, apresentando propriedades adequadas para a aplicação escolhida. Sendo um material natural, os resultados tendem a ser heterogéneos, no entanto possíveis de replicar em condições adequadas.

PALAVRAS-CHAVE: Prensa Hidráulica, Compressão a quente, materiais compósitos, biocompósitos, castanhas, molde.

Abstract

The excessive use of the resources that our planet provides is a problem that future generations will have to face and solve. These environmental problems are ultimately a reflection of a consumerist economy. Changing this mindset takes time, time that we do not have. Therefore, it is important to find solutions to minimize the environmental impact of the excessive consumption of goods, such as developing products made from natural and easily degradable elements, so that products at the end of their useful life have less impact on ecosystems.

In this context, the aim is to study the feasibility of manufacturing a biocomposite using non-commercial chestnuts. The biocomposite in question should be produced using the hot compression method, which requires a hydraulic press capable of applying pressure and temperature for a certain period of time. Generally, presses developed for this process are highly complex and come with relatively complex peripherals. However, within the scope of composite material studies, where many tests are conducted on small-sized composites, simpler equipment can be developed to carry out these test cycles. In this sense, a prototype of a hot compression press with some simplicity was developed, using simple peripherals to test this and other composites.

To optimize the composite, several tests were conducted to determine the most suitable composition and hot compression process parameters. As for the press, the mold was studied and manufactured to produce a proof of concept with the optimized biocomposite, as well as all the necessary heating and cooling systems. The proof of concept will be applied to interior decoration.

Mechanical and chemical tests were carried out on the optimized biocomposite to characterize it, and tests were conducted to evaluate the proper functioning of the developed hot compression press.

Finally, following the studies carried out, it was concluded that the biocomposite was feasible to produce, showing suitable properties for the chosen application. As it is a natural material, the results tend to be heterogeneous, but they are replicable under appropriate conditions.

KEYWORDS: Hydraulic Press, Hot Compression, Composite Materials, Biocomposites, Chestnuts, Mold.

Índice

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xv
Acrónimos e Símbolos	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos.....	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Compósitos.....	3
2.1.1. Matrizes Termoendurecíveis.....	6
2.1.2. Matrizes Termoplásticas	6
2.1.3. Fibras de Reforço.....	7
2.1.4. Castanhas	9
2.2. Semi-Produtos	10
2.3. Moldação por Compressão a Quente.....	12
2.4. Prensas Hidráulicas para Compressão a Quente	13
2.4.1. Princípio de Funcionamento	14
2.4.2. Tipos de Prensas Existentes	15
2.4.3. Sistemas de Cilindros Hidráulicos para Prensas	18
2.4.4. Molde e os seus Componentes	21
3. Métodos e Aplicação para o Fabrico do Biocompósito por Compressão a Quente.....	27
3.1. Matérias-Primas	27
3.2. Equipamentos e Procedimento para Produção do Biocompósito.....	29
3.3. Procedimento para Otimização do Biocompósito.....	35
3.4. Caracterização Mecânica do Biocompósito.....	36
3.4.1. Ensaio de Flexão	36
3.5. Caracterização Química do Biocompósito.....	39
3.5.1. Determinação da Humidade do Biocompósito	39
3.5.2. Determinação da Condutividade Térmica do Biocompósito.....	40
3.5.3. Ensaio de Degradação.....	41
3.5.4. Comportamento do Revestimento em Contacto com Água	41
4. Métodos e Aplicação para Desenvolvimento do Protótipo para Compressão a Quente.....	44
4.1. Molde para Compressão a Quente.....	45
4.1.1. Sistema de Arrefecimento do Molde	50
4.1.2. Sistema de Aquecimento do Molde	52
4.1.3. Controlo e Monitorização do Aquecimento do Molde	54
4.1.4. Controlo e Monitorização do Arrefecimento do Molde.....	59

5. Discussão de Resultados	60
5.1. Discussão dos Resultados dos Ensaios de Otimização.....	60
5.2. Discussão de Resultados da Caracterização Química	64
5.2.1. Determinação da Humidade do Biocompósito	64
5.2.2. Determinação da Condutividade Térmica do Biocompósito.....	65
5.2.3. Análise do Revestimento em Contacto com a Água.....	66
5.2.4. Resultados dos Ensaios de Degradação	67
6. Prensa Protótipo para Compressão a Quente.....	68
6.1. Sistema de Controlo e Monitorização da Temperatura	68
6.2. Sistema de Aplicação de Pressão.....	69
6.3. Sistema de Aquecimento do Molde	69
6.4. Sistema de Arrefecimento do Molde.....	69
6.5. Abertura do Molde e Extração da Peça	70
6.6. Peça Final Produzida com o Biocompósito Estudado	70
6.7. Estimativa de Custo do Protótipo.....	72
7. Conclusão	73
7.1. Conclusões Finais.....	73
7.2. Limitações e Trabalhos Futuros.....	74
Referências.....	75
Declaração de Integridade	79
Apêndice A- Desenhos De Definição Do Molde	81
Apêndice B- Ensaios Preliminares	85
Apêndice C- Ensaios D	86
Apêndice D- Resumo Ensaios Finais 80,100 e 120°C.....	87
Apêndice E- Gráficos dos ensaios de flexão	90
Apêndice F- Ensaio de molhabilidade	134
Apêndice G- Ensaio de aumento de massa por absorção de água.....	135

Lista de Figuras

Figura 1- Crescimento da utilização de compósitos, adaptado de [3]	3
Figura 2-Exemplos de aplicação de compósitos:.....	4
Figura 3- Composição de um compósito, adaptado de [8]	4
Figura 4- Pás de geradores eólicos em aterros [16]	6
Figura 5- Interior do BMW iX que recorre a fibras naturais, adaptado de [25].....	8
Figura 6- Castanhas não comercializáveis	9
Figura 7- Árvore Castanheiro [28]	9
Figura 8- Proveniência das Castanhas, adaptado de [29].....	10
Figura 9- Processo de produção de GMT, adaptado de [17].....	11
Figura 10- Processo de Moldação por Compressão a Quente, adaptado de [33].....	12
Figura 11- Exemplo de mecanismo de moldação por compressão, adaptado de [39]	15
Figura 12- a) Prensa Mecânica; b) Prensa Hidráulica; adaptado de [36].....	15
Figura 13- a) Prensa Hidráulica Manual [42] , b) Prensa Hidráulica Automática [43]	17
Figura 14- Geometria do Corpo da Prensa [36].....	17
Figura 15- Macaco Hidráulico [45]	18
Figura 16- Sistema para cilindro Hidráulico, adaptado de [46]	19
Figura 17- Sensor de medição de temperatura sem contacto [50].....	21
Figura 18- Termopar e princípio de funcionamento, adaptado de [54].....	22
Figura 19- Resistência de Cartucho [61].....	24
Figura 20- Manta de Aquecimento [62]	25
Figura 21- Castanhas Recebidas	27
Figura 22- Glicerol Utilizado	28
Figura 23- a) Robô de cozinha; b) Moinho de café.....	29
Figura 24- Peneiro utilizado	30
Figura 25- Desidratador de alimentos da Excalibur.....	30
Figura 26- Molde para fabrico de provetes em forma de disco	31
Figura 27- Prensa de compressão a quente do Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP.....	32
Figura 28- a) Mistura no molde; b) Provetes em forma de disco	32
Figura 29- Serra de corte.....	33
Figura 30- Esquema do procedimento de fabrico	34
Figura 31- Ensaio de flexão aos provetes do biocompósito	37
Figura 32- Balança de Humidade KERN	40
Figura 33- Aparelho para determinação de condutibilidade térmica	41
Figura 34- Intervalos de ângulos para teste da molhagem, adaptado de [65].....	42
Figura 35- Prensa Mader 20T com manómetro	44
Figura 36- Exemplo de geometrias para peça de decoração	46
Figura 37- Protótipo do hexágono para suporte de velas	46
Figura 38- Molde para produção da base para velas	47
Figura 39- Molde Superior.....	48
Figura 40- Molde Inferior	49
Figura 41- Molde em processo de maquinagem no DEM	49

Figura 42- Peças maquinadas para molde.....	50
Figura 43- Molde com sistema de arrefecimento da HASCO	51
Figura 44- Molde projetado equipado com sistema de arrefecimento	51
Figura 45- Bomba de recirculação de água	52
Figura 46- Resistências de Cartucho utilizadas.....	53
Figura 47- Interruptor ON/OFF e luz sinalizadora	54
Figura 48- Termostato Digital PID	55
Figura 49- Temporizador programável.....	56
Figura 50- Sistema de controlo e monitorização do aquecimento	57
Figura 51- Esquema das ligações efetuadas	57
Figura 52- Material a fluir para fora do molde	61
Figura 53- Absorção de Humidade do biocompósito	65
Figura 54- Resultados do ensaio de condutividade térmica	65
Figura 55- Protótipo da prensa de compressão a quente	68
Figura 56- Abertura do molde	70
Figura 57- Suporte para velas extraído do molde (sem impermeabilização)	71
Figura 58- Enquadramento da prova de conceito num ambiente decorativo	71

Lista de Tabelas

Tabela 1- Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça [4]	5
Tabela 2- Comparação Propriedades PEEK e Epóxido, adaptado de [19], [20]	7
Tabela 3- Principais Diferenças entre Prensas Mecânicas e Hidráulicas, adaptado de [41]	16
Tabela 4- Tipos de cilindros hidráulicos existentes, adaptado de [47].....	20
Tabela 5- Diferenças entre termopares, adaptado de [55], [56].....	23
Tabela 6- Classes da norma ISO 14125 (adaptado da norma ISO 14125)	38
Tabela 7- Fator para determinar distância entre apoios (adaptado da norma ISO 14125)	39
Tabela 8- Resultados Ensaio Preliminares D	62
Tabela 9- Ensaio Finais 80°C	63
Tabela 10- Ensaio Finais 100°C	63
Tabela 11- Ensaio Finais 120°C	63
Tabela 12- Comparação de valores de condutividade térmica	66
Tabela 13- Ensaio de molhabilidade.....	66
Tabela 14- Resultados dos ensaios de submersão	67
Tabela 15- Resultados da degradação do material	67

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DMC	<i>Dough Molding Compound</i>
GMT	<i>Glass Mat Thermoplastic</i>
GRAQ	Grupo de Reação e Análises Químicas
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
PEEK	Poliéter-éter-cetona
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
SMC	<i>Sheet Molding Compound</i>
TMC	<i>Thick Molding Compound</i>

Lista de Símbolos

A	Área	m^2
c_p	Calor Específico	$J/g \cdot ^\circ C$
m	Massa	Kg
ρ	Massa Volúmica	g/cm^3
E	Módulo à flexão	GPa
P	Pressão	Pa
σ_u	Resistência à tração	GPa
T	Temperatura	$^\circ C$

1. Introdução

A presente dissertação, foi desenvolvida no Mestrado em Engenharia Mecânica, na área de Construções Mecânicas, no Instituto Superior De Engenharia Do Porto.

Foca-se, primeiramente no desenvolvimento de um protótipo, com todos os sistemas periféricos necessários, para o processo de compressão a quente, com o objetivo de fabricar biocompósitos.

Por fim, foca-se ainda no estudo da viabilidade da utilização de desperdício de matéria orgânica para o fabrico de biocompósitos, para aplicações não estruturais. Pretende-se com isto produzir uma peça para uso não estrutural, que servirá como prova de conceito para o biocompósito que será estudado, recorrendo a castanhas não comercializáveis, que representam desperdício alimentar.

A presente dissertação é dotada de uma forte componente experimental, que permitirá atingir os vários objetivos propostos.

1.1. Contextualização

Nos dias que correm, a importância dos compósitos nas mais variadas indústrias é inquestionável e tem vindo a aumentar com o passar dos anos devido ao forte investimento, o que levou à evolução dos processos de produção dos mesmos e à consequente redução de custos.

A evolução dos materiais compósitos levou à redução de preço de vários produtos, pela existência de processos de produção simples, eficientes e rápidos que permitem dotar estes produtos de excelentes propriedades mecânicas e químicas com um peso bastante reduzido, uma combinação de propriedades que é difícil de ambicionar obter recorrendo aos materiais que a indústria estava acostumada. Foram precisamente estas vantagens que levaram os compósitos poliméricos a ganharem rapidamente o seu espaço nas indústrias mais competitivas, ao lado dos materiais convencionais utilizados há largas décadas.

No entanto, a indústria mundial depara-se atualmente, com a difícil tarefa de adaptar os seus processos de fabrico e produtos de forma a reduzir a pegada ecológica e as emissões de CO₂, mantendo a qualidade, enquanto reduzem o preço, numa altura em que a indústria de alguns países do oriente cresce exponencialmente. Para isto ganha relevo, por exemplo, o uso de materiais mais sustentáveis e um melhor aproveitamento das matérias-primas que o planeta nos fornece. Garantindo que os produtos que saem da linha de produção poderão ser reciclados ou reaproveitados no fim do seu tempo de vida útil, mantendo um preço competitivo.

Os compósitos derivados de substâncias orgânicas e naturais têm ganho alguma atenção nestes últimos anos e os testes realizados com as mais diversas substâncias naturais têm ganho relevo. Desta forma, pretende-se em parceria com o GRAQ, Grupo de Reações e Análises Químicas, estudar a viabilidade do fabrico de produtos, recorrendo a um biocompósito inovador, não estrutural, 100% orgânico, não tóxico e 100% biodegradável, feito com castanhas resultantes do desperdício da comercialização das mesmas. Produto este, que irá ao encontro da crescente procura por parte dos consumidores em produtos com menor impacto ambiental.

Um dos processos mais utilizados na produção de compósitos, como o que se pretende estudar, é a compressão a quente. Trata-se de um processo conhecido pela indústria há largos anos e que tem grande importância. Tipicamente, para a produção de compósitos pelo processo de compressão a quente, utilizam-se prensas hidráulicas, capazes de aquecer e arrefecer os moldes. No interior destes moldes, encontramos as misturas (matriz + fibras), que mediante certas condições de pressão, temperatura e tempo, permitirão obter o compósito final. As prensas utilizadas neste processo são quase sempre de dimensões elevadas e apresentam grande versatilidade bem como custos elevados. Surge então, desta forma, a necessidade de desenvolver um protótipo de uma prensa hidráulica para compressão a quente, de dimensões e custos inferiores mantendo alguma da versatilidade e permitindo que possa ser facilmente utilizada, por exemplo, por instituições de ensino ou grupos de investigação.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem objetivos os seguintes objetivos:

- Estudo, otimização e fabrico, em parceria com o GRAQ, de um biocompósito, tendo como base, as castanhas que não passam no controlo de qualidade da indústria alimentar, ou seja, castanhas que representam desperdício alimentar.
- Recorrer ao processo de compressão a quente para obter o biocompósito, e otimizar os parâmetros de processo necessários (tempo, temperatura, pressão).
- Desenvolvimento de um protótipo de uma prensa, com alguma simplicidade e com periféricos simples, para o fabrico de peças em compósito pelo processo de compressão a quente.
- Construção e teste do protótipo e de todos os sistemas periféricos necessários.
- Desenvolvimento de uma peça, que servirá como prova de conceito, no seguimento do estudo efetuado sobre o biocompósito.
- Desenvolvimento e fabrico do molde, para utilização no protótipo, para obtenção da prova de conceito.
- Fabrico da prova de conceito, utilizando o biocompósito estudado, o protótipo da prensa e o molde desenvolvido.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentadas as informações mais relevantes retiradas dos estudos realizados com incidência nos principais temas que suportam a componente teórica desta dissertação. Pretende-se com toda esta informação dotar o leitor de todo o conhecimento necessário para entender as decisões tomadas e os resultados obtidos.

Com base no tema e nos objetivos previamente apresentados considerou-se essencial estudar os materiais compósitos, o processo de compressão a quente e as prensas hidráulicas, as suas variantes e componentes.

2.1. Compósitos

Os compósitos têm vindo a ganhar uma grande importância na indústria em geral, estando atualmente a revolucionar algumas das indústrias mais exigentes do mundo. Um dos exemplos mais claros do potencial desta recente classe de materiais e da revolução causada por ela é o setor da aviação. Como se pode observar na Figura 1, a percentagem de materiais compósitos utilizados para construir uma aeronave da Boeing, passou de 1% para 50% em meio século apenas, devendo-se ao incrível avanço que se tem vindo a verificar nos processos de produção dos compósitos e às principais vantagens inerentes à utilização dos mesmos, que permitem obter peças com elevada resistência específica, com elevada resistência à corrosão, com boas capacidade de isolamento térmico e elétrico e com liberdade nas formas e tamanhos pretendidos [1] [2] [3] [4].

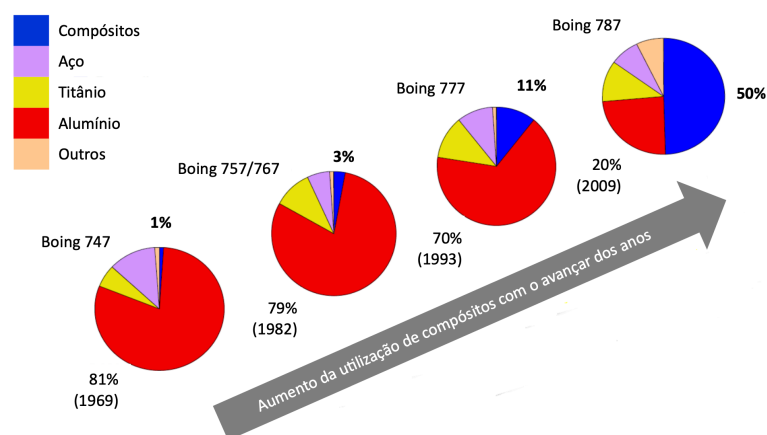


Figura 1- Crescimento da utilização de compósitos, adaptado de [3]

Conforme se verifica, os compósitos cativaram as indústrias em que se prioriza desempenho e onde os tempos de produção e os preços não são um problema, no entanto, estes materiais são tão versáteis que também passaram a ter grande influência em indústrias como a automóvel e desportiva em que os tempos de produção e os preços são os principais fatores para a escolha de materiais, a Figura 2 mostra alguns exemplos de utilizações comuns dos compósitos.

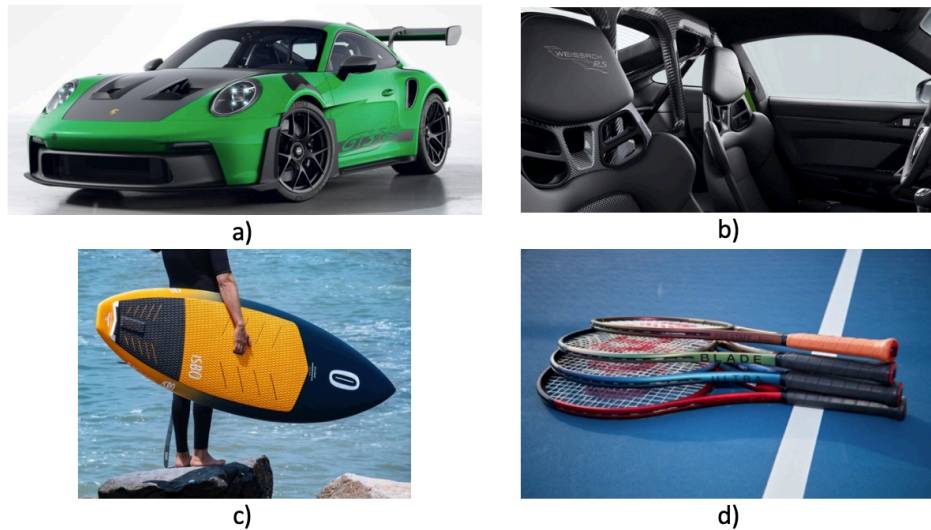


Figura 2-Exemplos de aplicação de compósitos:

a) Porsche 911 GT3 RS Exterior [5]; b) Porsche 911 GT3 RS Interior [5]; c) Prancha de Surf [6]; d) Raquetes Ténis [7];

Um compósito consiste essencialmente na combinação de dois ou mais elementos que não se misturam e cuja união, se bem executada, permitirá obter uma peça com propriedades superiores às dos seus constituintes de forma separada [4].

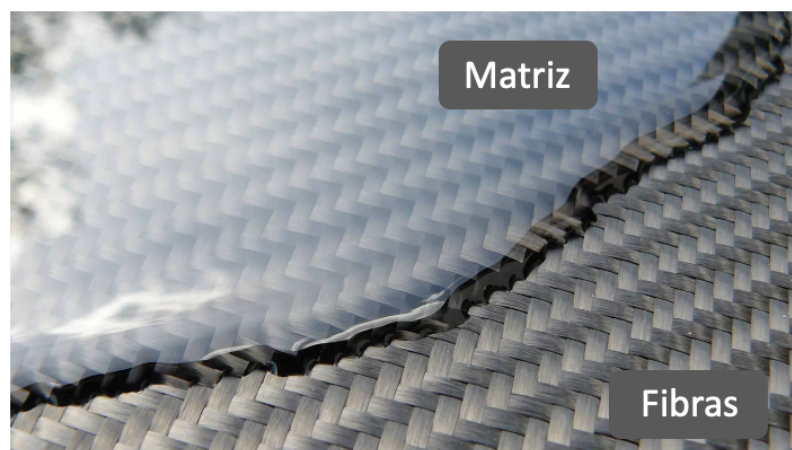


Figura 3- Composição de um compósito, adaptado de [8]

Os compósitos são constituídos pela matriz, que normalmente é um material polimérico e aglomerante, e pelo reforço/fibras, tal como ilustra a Figura 3. A matriz é o elemento mais importante na ligação pois é responsável por promover a estabilidade da estrutura, por garantir uma equilibrada distribuição de esforços pelas fibras e por preservar as mesmas [4]. No que diz respeito às fibras, estas podem apresentar propriedades mecânicas superiores às dos materiais idênticos na forma maciça, como se pode observar na Tabela 1, e têm um papel fundamental pois são responsáveis por suportar grande parte dos esforços aplicados à peça, sendo caracterizadas pela sua elevada rigidez e resistência mecânica [4] [9] [10].

Tabela 1- Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça [4]

	Módulo de elasticidade $E(GPa)$	Resistência à tração $\sigma_u(GPa)$	Massa Volúmica $\rho(g/cm^3)$	Módulo específico $E/\rho(N \cdot m/Kg)$	Resistência específica $\sigma_u/\rho(N \cdot m/Kg)$
Fibras:					
Vidro E	72	3,5	2,54	28,5	1,38
Vidro S	87	4,3	2,49	35,0	1,70
Carbono	690	2,2	2,15	321	1,00
Boro	393	3,1	2,70	146	1,15
Sílica	72,4	5,8	2,19	33	2,65
Tungsténio	414	4,2	19,3	21	0,22
Berílio	240	1,3	1,83	131	0,71
Kevlar	131	3,6	1,45	90	2,48
Materiais na forma maciça:					
Aço	210	0,34 - 2,1	7,8	26,9	0,043 - 0,27
Ligas de Al	70	0,14 - 0,62	2,7	25,9	0,052 - 0,23
Vidro	70	0,7 - 2,1	2,5	28	0,28 - 0,84
Tungsténio	350	1,1 - 4,1	19,3	18,1	0,057 - 0,21
Berílio	350	0,7	1,83	164	0,38

As matrizes dos compósitos poliméricos podem ser de natureza termoendurecível ou termoplástica, os primeiros também são vulgarmente designados por resinas termoendurecíveis [4].

Atualmente o termo biocompósitos tem ganho alguma relevância, estes compósitos partem da premissa da utilização de matérias 100% naturais na sua composição, tanto na matriz como nas fibras. O biocompósito que se pretende desenvolver assenta, profundamente, nesta categoria de compósitos. A matriz será composta pelo amido da castanha, que é considerado um termoplástico biológico e pelo glicerol natural, no que diz respeito às fibras, estas também serão naturais (casca da castanha) e por isso temos todas as condições para denominar este produto de biocompósito.

2.1.1. Matrizes Termoendurecíveis

Atualmente na indústria é feita uma utilização mais frequente dos termoendurecíveis, isto deve-se principalmente ao facto de apresentarem uma menor viscosidade durante o processamento, o que facilita o processo de impregnação das fibras. Temos também como vantagens, o facto de possuírem uma melhor resistência a altas temperaturas, melhor estabilidade dimensional, menor custo e boa resistência química [4] [9] [11].

No entanto, as matrizes termoendurecíveis apresentam dois problemas ambientais que levaram à necessidade de a indústria procurar alternativas nos últimos anos.

Primeiro, a cura nestes polímeros é irreversível e as peças não podem ser reparadas, reaproveitadas ou recicladas, um exemplo que ilustra a magnitude deste problema são as pás dos geradores eólicos, que são feitas na esmagadora maioria de fibra de vidro com resina termoendurecível, e têm uma vida útil que vai de 20 a 25 anos por norma. Ao fim desse tempo as pás são retiradas e substituídas e muito provavelmente vão ficar acumuladas em aterros, tal como mostra a Figura 4, devido à dificuldade técnica e monetária que existe em reciclar a resinas termoendurecíveis [12] [13] [14] [15].



Figura 4- Pás de geradores eólicos em aterros [16]

Em segundo lugar, a utilização de termoendurecíveis está associada à emissão de substâncias perigosas como o estireno, que a longo prazo e se inalado com frequência pode dar origem a problemas de saúde graves.

2.1.2. Matrizes Termoplásticas

No que diz respeito aos termoplásticos, e ao contrário dos termoendurecíveis, dispomos de uma viscosidade bem mais elevada, que vai dificultar o processo de impregnação e resultar numa reduzida adesão entre as fibras e a matriz, dando origem a propriedades mecânicas inferiores ao desejado. No entanto, existe uma crescente procura por parte da indústria em produzir peças com termoplásticos pois são mais dúcteis, mais tenazes, logo mais resistentes

ao impacto, têm menos higroscopicidade, possibilitam tempos de fabrico mais curtos, não estão associados à emissão de substâncias perigosas como o estireno, fatores que levam a um aumento do interesse na utilização de termoplásticos no fabrico de compósitos. Para além disto, os compósitos termoplásticos podem ser reutilizados ou reparados no fim do seu ciclo de utilização, o processo de separação das fibras pode ser complexo, e por isso, tipicamente repara-se o compósito sem efetuar separação [4] [17] [18].

Na Tabela 2 temos a comparação das principais propriedades entre o termoplástico PEEK, e um termoendurecível, o Epóxido, ambos com fibras de carbono e de elevado desempenho, podemos concluir da análise destes números que os dois materiais têm propriedades idênticas, no entanto, há uma que se destaca por ter uma ordem de grandeza diferente, falamos taxa de libertação de energia crítica, G_{IC} , que descreve a propagação de fissuras num sólido analisando a energia, quantificando a variação da energia potencial relacionada com a propagação da fissura, de forma simplificada, reflete a resistência ao impacto, nos termoplásticos em geral temos valores de resistência ao impacto muito superiores, o que em muitas aplicações é um fator essencial para evitar possíveis delaminagens [4] [9] [19].

Tabela 2- Comparação Propriedades PEEK e Epóxido, adaptado de [19], [20]

Propriedades	PEEK e Carbono	Epóxido e Carbono
Fração Volúmica das Fibras, %	62	62
Resistência à Tração, GPa	2,44	1,86
Resistência à Flexão, GPa	1,50	1,66
Módulo à Flexão, GPa	131	131
Resistência à Flexão, GPa	1,0	1,3
Taxa de libertação de energia crítica, J/m^2	3230	260
Tensão de corte, MPa	117	110

O biocompósito que será desenvolvido, terá na sua matriz o amido, que faz parte do miolo da castanha. Este amido, é considerado um termoplástico biológico.

2.1.3. Fibras de Reforço

As fibras utilizadas nos compósitos podem ser de origem sintética ou natural. As fibras, em geral, têm como principais características, elevadas rigidez, resistência específica, resistência à flexão, resistência à corrosão, resistência ao impacto e ao desgaste [11].

As fibras naturais, tal como o nome sugere são provenientes da natureza, podendo ter origem vegetal, animal ou mineral. Estas fibras apesar de apresentarem propriedades mecânicas inferiores às fibras sintéticas, têm vindo a ganhar o interesse da indústria, para aplicações não estruturais, uma vez que, tipicamente, apresentam custos reduzidos, tenacidade, boa resistência à tração, boa capacidade de amortecimento ao impacto, boas propriedades térmicas, pegadas ecológica reduzidas ou nulas, são abundantes na terra, não tóxicas, necessitam de cerca de 10 a 30% menos energia para serem processadas e por fim, têm o

potencial de ajudar a lidar com os resíduos da agricultura. Este último ponto vai de encontro a um dos objetivos desta dissertação, que é, recorrer ao processo de compressão a quente e à prensa desenvolvida para estudar a viabilidade do fabrico de peças fazendo uso das fibras obtidas das castanhas que não são adequadas para comercialização [21] [22] [23] [24].

Com o interesse que existe atualmente nas fibras naturais e na produção de compósitos com menor pegada ambiental, alguns autores sugerem que estamos perante o crescimento dos biocompósitos, referidos anteriormente e que têm grande potencial [24]. As principais marcas de automóveis alemãs têm recorrido intensamente a compósitos com fibras naturais para produzir componentes para o interior das suas viaturas, falamos de peças como, os painéis das portas, tabliers, entre outros [24]. Este aumento da procura deve-se também, ao facto, da união europeia e países como o Japão nos últimos anos, terem feito legislações, que obrigam os produtores de automóveis a garantir que uma certa percentagem do veículo deve ser reaproveitável ou reciclável no fim do teu tempo de vida útil, o que pode ser mais facilmente garantido com o uso de produtos naturais por exemplo nos interiores dos carros. Por exemplo a união europeia chegou a definir em 2015, que 85% de cada automóvel deve ser possível de reciclar ou de ser reaproveitado, enquanto o Japão definiu nesse mesmo ano, que 95% dos veículos produzidos em território nacional devia ir de encontro à legislação em causa. Tudo isto, juntamente com as crescentes “preocupações” dos governos com o ambiente levaram a que na última década o interesse pelos compósitos com fibras naturais esteja a subir rapidamente. No entanto um dos principais fatores limitadores do uso de fibras sintéticas, prende-se com a heterogeneidade das mesmas [23] [24].

Existe ainda alguma indefinição quanto aos biocompósitos, alguns autores defendem que para ser um biocompósito basta essencialmente possuir fibras naturais, no entanto, há autores que defendem que o termo bio implica que o produto em causa seja 100% natural. Considerando ambas as definições, o produto que se pretende desenvolver é 100% natural, sendo sem qualquer tipo de dúvida um biocompósito.



Figura 5- Interior do BMW iX que recorre a fibras naturais, adaptado de [25]

2.1.4. Castanhas

Para se desenvolver o biocompósito pretendido, vai-se recorrer a castanhas que são desperdício da indústria. Estas por vezes não possuem miolo, têm formas pouco apelativas, são de dimensões muito pequenas ou já se encontram fora da época de colheita, não apresentando a qualidade necessária. Estas castanhas são rejeitadas pelo controlo de qualidade, não possuindo, até agora, potencial para retorno financeiro. A Figura 6 mostra exemplos de castanhas que são rejeitadas pelo controlo de qualidade.

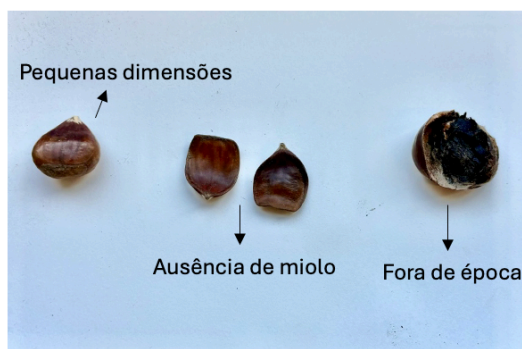


Figura 6- Castanhas não comercializáveis

O castanheiro, visível na Figura 7, é a árvore responsável pelas castanhas. Os castanheiros podem ser encontrados, predominantemente, na zona centro-sul do continente europeu, ocupando uma área de aproximadamente 2,5 milhões de metros quadrados. O norte da Península Ibérica, o sul de França e centro-norte de Itália são as principais regiões europeias onde podem ser encontrados [26].

Portugal é um dos maiores produtores de castanha de Europa, com cerca de 24 700 toneladas anuais (dados de 2013). Cerca de 77% da produção destina-se à exportação para países como Itália, França, Espanha e Brasil. Aproximadamente 35% das castanhas colhidas em Portugal são rejeitadas pelo controlo de qualidade, ou seja, existem cerca de 8645 toneladas de castanhas que representam desperdício anualmente. Tratando-se de um produto sazonal, pode ser necessário conservar o desperdício de forma a utilizá-lo fora de época [27].



Figura 7- Árvore Castanheiro [28]

O castanheiro dá origem a flores e folhas, daqui resultam os ouriços, que contêm no interior as castanhas. Castanhas estas, que por sua vez, são constituídas pela casca, que possui no seu interior fibras e pelo fruto (miolo). Tal como se pode verificar de forma simplificada na Figura 8.

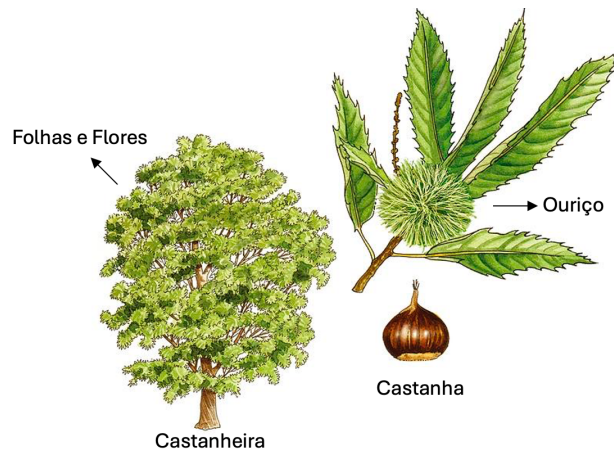


Figura 8- Proveniência das Castanhas, adaptado de [29]

As castanhas têm cerca de 35% de amido na sua composição, sendo o seu principal constituinte. O peso do amido pode variar dependendo da altura da colheita e da região geográfica onde é feita a mesma. Trata-se em geral de um alimento muito nutritivo.

O amido da castanha terá como função unir as fibras do biocompósito que se pretende desenvolver.

2.2. Semi-Produtos

Na indústria usam-se recorrentemente semi-produtos, que consistem essencialmente em pré-combinações de fibras e matriz, que podem ser de dois tipos, compostos de moldação ou pré-impregnados. Estes semi-produtos vão ser posteriormente processados dando a origem a peças finais. A utilização destes elementos pré-preparados contribui em grande parte para as altas cadências de produção uma vez que evitam a necessidade de as fabricas efetuarem as misturas de elementos.

Compostos de Moldação

Os compostos de moldação são obtidos fazendo uso de fibras longas ou curtas que são impregnadas com resinas termoplásticas ou termoendurecíveis. Colocam-se no interior do molde pré-aquecido e por ação da compressão percorrem o molde preenchendo os espaços e expulsando o ar que se encontrava no interior do mesmo.

Os compostos mais utilizados na indústria são SMC, TMC, DMC ou GMT (*Sheet Molding Compound, Thick Molding Compound, Dough Molding Compound ou Glass Mat Thermoplastic*). Na sua grande maioria os compostos de moldação são termoendurecíveis, no entanto, a quantidade de compostos termoplásticos tem vindo a aumentar na indústria, devido a todas as vantagens adjacentes ao uso dos termoplásticos que foram referidas anteriormente.

GMT (*Glass Mat thermoplastic*)

Os GMT são tipicamente usados em processos de moldação por compressão a quente, a sua matriz pode ser constituída por qualquer tipo de termoplástico, no entanto, o mais comum e estudado é o polipropileno, já o reforço consiste em fibras de vidro, com um comprimento mínimo de 25mm. [4] [30] [31].

Recorrendo à compressão a quente e ao GMT é possível obter uma alta cadência de produção, com tempos de fabrico bastante reduzidos, em cerca de um 1 minuto é possível obter uma peça, o que faz com que este composto de moldação seja atrativo para a indústria automóvel que por sinal é uma das maiores consumidoras de GMT para a produção de painéis para os veículos [31] [32].

Nos dias que correm os compostos GMT têm ganho protagonismo em relação aos restantes compostos referidos anteriormente, esta ascensão é fruto de a matriz ser constituída por matriz termoplástica, o que irá permitir que no fim da vida útil da peça se realize um reprocessamento da mesma. Esta capacidade de reaproveitamento é muito importante numa fase em que a indústria procura processos e produtos com menor impacto ambiental [4].

A sua produção é muito parecida com os SMC e pode ser observada na Figura 9, consiste essencialmente em fazer passar a matriz no estado líquido pelas fibras de vidro que se encontram sob a forma de manta, posteriormente essa mistura é envolvida em filmes de polipropileno, passa por um forno, depois por uma etapa de arrefecimento e por fim é cortada, resultando em pré produtos sobre a forma de placas. A indústria automóvel recorre fortemente a este composto.

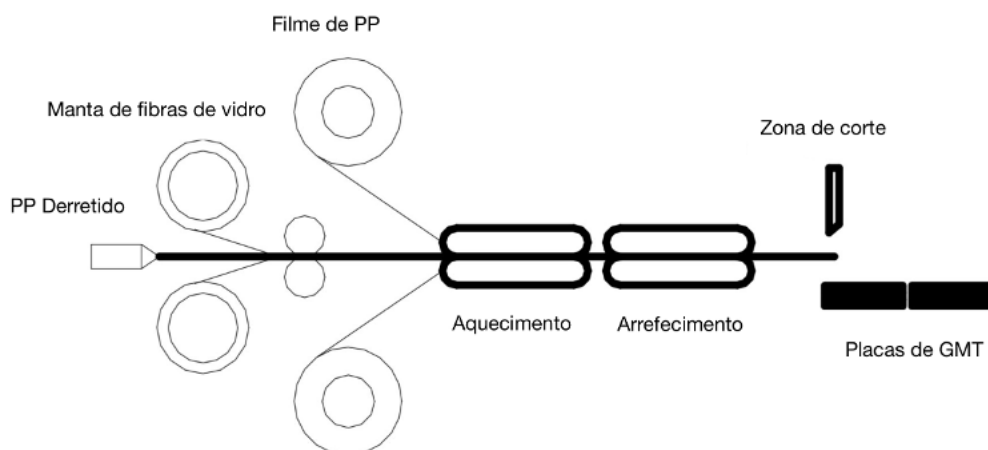


Figura 9- Processo de produção de GMT, adaptado de [17]

O biocompósito que se pretende desenvolver, tem potencialidade de ser fornecido como um composto de moldação, para ser posteriormente processado por compressão a quente. Esse composto de moldação será uma mistura das fibras das castanhas com o amido da castanha e glicerol, sendo que o amido, nestas condições é considerado um termoplástico natural.

2.3. Moldação por Compressão a Quente

O processo de moldação por compressão a quente, é um processo de produção de compósitos, que recorre a moldes fechados. É um processo largamente utilizado pela indústria há muitos anos, sendo que a mesma já tem elevado conhecimento deste processo, tendo como principais características [33] [34]:

- Permite obter peças com alguma complexidade geométrica;
- Os moldes têm geometrias mais simples e por isso os custos são mais controlados;
- Permite a produção de peças grandes;
- As peças possuem rebarba que deve ser retirada no fim do processo;
- Tempos de produção reduzidos;

No processo de compressão a quente, Figura 10, faz-se uso de moldes fechados que estão pré aquecidos e que após a colocação da mistura pretendida no seu interior são fechados, comprimidos, aquecidos e mantidos à temperatura de cura e à pressão necessárias durante um certo período, de forma a garantir que a mistura se acomoda à cavidade do molde, ocupando-a e garantindo que é atingida a consolidação. Na fase final, é feito o arrefecimento dos moldes, é retirada a pressão, a peça é extraída e as rebarbas são retiradas se necessário. Neste processo tipicamente uma das placas molde encontra-se estacionária enquanto a outra placa se desloca e aplica pressão [4] [33] [35].

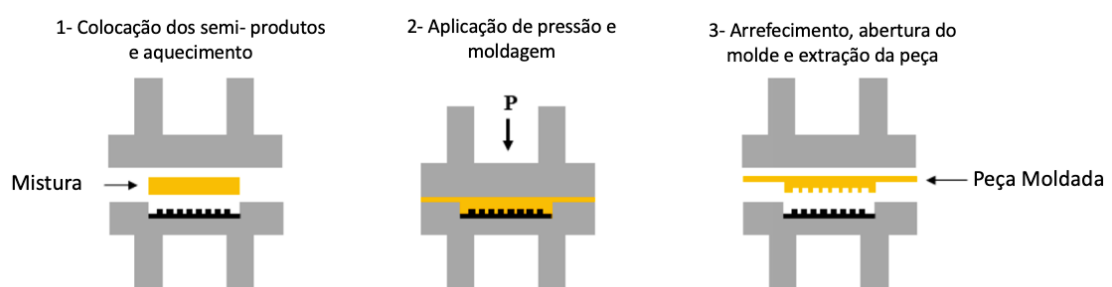


Figura 10- Processo de Moldação por Compressão a Quente, adaptado de [33]

Normalmente, a temperatura dos moldes é obtida através de resistências, no caso dos termoendurecíveis está compreendida num intervalo de 80° até 170°C, já no que diz respeito a termoplásticos as exigências a nível de temperatura são maiores, por exemplo para processar uma matriz PEEK são necessárias temperaturas até cerca de 400°C, sendo assim as prensas devem ser dimensionadas para esse nível de temperaturas [4].

A pressão aplicada toma valores desde os 0,5 até aos 20 MPa, o que implica a utilização de moldes metálicos [4].

O tempo de cura deste processo nos compósitos depende, obviamente, da mistura que estamos a moldar e o seu valor é inversamente proporcional à temperatura utilizada no processo. Genericamente os tempos de produção recorrendo a processos de compressão a quente são reduzidos, podendo ir desde 30 segundos, no caso de peças mais pequenas e mais simples, até 4 minutos no caso de peças de maiores dimensões e com maior complexidade, sendo assim possível produzir entre 15 a 30 peças por hora. Pode-se desta forma considerar que os processos de compressão a quente têm elevada cadência de produção, quando devidamente otimizados e quando usados semi-produtos [4] [34].

Para a produção do biocompósito proposto, pretende-se produzir um composto de moldação que será uma pasta constituída pelas fibras da castanha e pela matriz que será constituída por uma ou mais matérias-primas, mantendo o biocompósito 100% natural. Este composto de moldação será utilizado no processo de compressão a quente.

2.4. Prensas Hidráulicas para Compressão a Quente

Uma prensa é um mecanismo usado pelo homem há centenas de anos, apresentou uma rápida evolução pela necessidade que o ser humano encontrou em ser capaz de conseguir aplicar forças e cadências cada vez maiores. Atualmente utiliza-se este mecanismo para fazer operações como por exemplo corte, embutidura, estampagem, puncionagem, cunhagem e prensagem [36] [37].

A prensa é o mecanismo responsável por permitir a compressão a quente, é essencial que a mesma possua os moldes com a geometria desejada e circuitos de aquecimento e arrefecimento dos mesmos, para conseguirmos atingir as temperaturas de cura das resinas e para conseguirmos arrefecer as peças antes de as transportarmos após a conclusão do processo. O molde inferior deve permanecer estacionário enquanto o molde superior vai ser movimentado pela aplicação da pressão por parte do cilindro hidráulico. É fundamental o controlo da pressão, temperatura e tempo para que seja possível obter peças com qualidade.

2.4.1. Princípio de Funcionamento

O funcionamento das prensas hidráulicas baseia-se na lei de pascal. Uma prensa tipicamente apresenta um cilindro de menores dimensões (A_1), de entrada, onde vai ser aplicada uma pressão inicial (P_1), por exemplo através de uma alavanca por parte de um homem, essa pressão vai ser transmitida na totalidade e de igual forma em todas as direções pelo óleo, um fluido incompressível, para um cilindro de saída (P_2), de maiores dimensões (A_2), no entanto, a força aplicada pelo cilindro maior (F_2) será superior à força aplicada no cilindro menor [38]. Isto baseia-se nas seguintes fórmulas:

$$P_1 = P_2 \quad (1)$$

$$P = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (3)$$

A transmissão de pressão para os moldes é feita através da atuação do cilindro hidráulico de saída, que utilizando óleo como fluido de compressão, dá origem ao movimento e à força do cilindro, que por sua vez, vai fechar o molde. As duas metades do molde vão ser encostadas e ser comprimidas, esmagando a mistura que se encontra no interior, forçando a que a mesma se espalhe e preencha as cavidades do molde [39].

Os moldes estão equipados com elementos que vão ser responsáveis pelo aquecimento dos mesmos até à temperatura de cura da matriz, o que em conjugação com a pressão vai permitir que a mistura se espalhe de forma homogénea e preencha todas as cavidades de moldação. Para além dos elementos de aquecimento o molde possui ainda elementos que vão ser responsáveis pelo seu arrefecimento bem como da mistura que se encontra no interior, esta fase de arrefecimento apenas acontece no fim do processo para que o operário possa manusear a peça resultante do processo a uma temperatura tolerável, sendo uma fase importante para aumentar a cadência de produção [39].

A aplicação de pressão e temperatura é feita durante um período de tempo que permita que a mistura que se encontra no interior dos moldes preencha todas as cavidades do molde de forma que se obtenha a peça desejada sem imperfeições.

Conforme se pode perceber, também sendo senso comum, trata-se de um processo com um nível de complexidade baixo e com custos reduzidos. Obviamente todo o processo pode ser mais ou menos automatizado o que tem influência na cadência de produção e no nível de autonomia do processo.

A Figura 11 ilustra um mecanismo de moldação por compressão a quente simplificado.

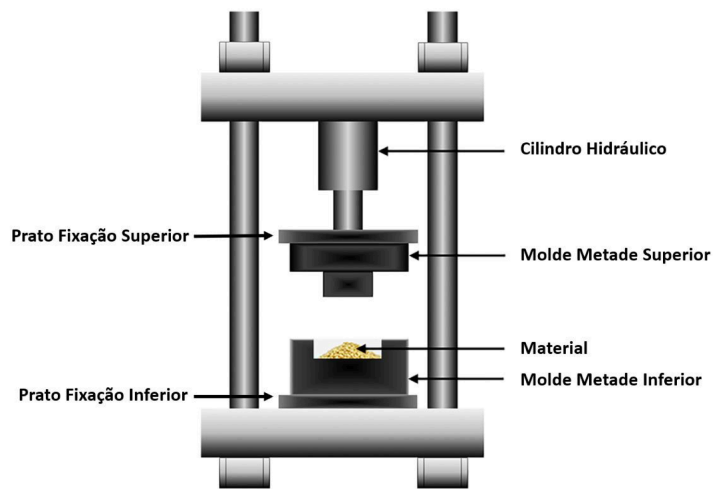


Figura 11- Exemplo de mecanismo de moldação por compressão, adaptado de [39]

2.4.2. Tipos de Prensas Existentes

As prensas podem ser classificadas de acordo com a forma como se origina o movimento do cilindro, o facto de serem manuais ou automáticas, a geometria da estrutura e o número de ações a que sujeitam o material [36] [37] [40].

Movimento do cilindro

No que diz respeito ao movimento do cilindro, existem as prensas mecânicas, em que tipicamente se provoca o movimento de um sistema do tipo biela-manivela, originando um movimento alternado com pouco controlo e existem as prensas hidráulicas e pneumáticas em que o movimento é obtido pela manipulação do fluido de compressão, originando o movimento do cilindro no sentido desejado, que pode ser controlado e personalizado [36] [37] [41]. Os dois tipos de prensas podem ser observados na Figura 12.

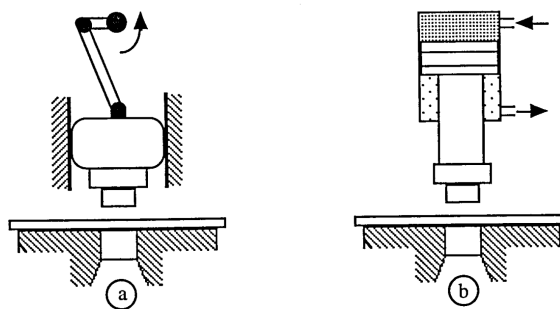


Figura 12- a) Prensa Mecânica; b) Prensa Hidráulica; adaptado de [36]

O estudo vai ser focado entre as prensas mecânicas e as hidráulicas. Existem alguns fatores a ter em conta quando se pretende escolher entre estes 2 tipos de prensas, a Tabela 3 explica as principais diferenças.

Tabela 3- Principais Diferenças entre Prensas Mecânicas e Hidráulicas, adaptado de [41]

	Prensa Mecânica	Prensa Hidráulica
Força	A força depende da posição em que se encontra o mecanismo	A força é igual em qualquer momento do avanço
Capacidade máxima de carga	Na ordem das 6000 Toneladas-força	Na ordem das 50000 Toneladas-força
Curso	Limitado	Capacidade de cursos baixos, médios ou altos
Recuo	Tipicamente é necessário finalizar o movimento para recuar	O recuo pode ser efetuado em qualquer momento
Versatilidade	Limitado nas tarefas que pode efetuar	Mais versátil

A flexibilidade e versatilidade são fatores extremamente importantes para a tomada de decisão sobre a compra de um mecanismo como uma prensa que podem atingir valores extremamente elevados, é por esse motivo que a escolha regularmente incide nas prensas hidráulicas. As velocidades de aproximação e de trabalho podem ser facilmente alteradas em função das necessidades da linha de produção e as forças aplicadas podem ser facilmente alteradas e podem ser dinâmicas em função da necessidade. A prensa pneumática, não se enquadra no projeto pela sua baixa capacidade de aplicar cargas elevadas quando de dimensões reduzidas [36] [41].

Prensas hidráulicas manuais ou automáticas

Nas prensas hidráulicas manuais usa-se uma alavanca que deve ser operada manualmente, aplicando força ao cilindro de entrada. Essa força será transmitida para o cilindro de saída e amplificada pelo efeito da lei de pascal. Neste tipo de prensas, para se aliviar a pressão do sistema, recorre-se a uma válvula manual e por exemplo molas para forçar o recuo do cilindro. Em geral as prensas manuais apresentam dimensões reduzidas e são mais limitadas nas forças máximas capazes de oferecer.

As prensas manuais apresentam tipicamente um preço inferior quando comparadas com as prensas automáticas, isto deve-se principalmente à sua simplicidade, no entanto, há outros fatores importantes quando se escolhe entre uma prensa manual ou automática. As prensas manuais necessitam de um maior esforço físico para operar e por esse motivo não são as mais indicadas para fluxos de trabalho intensos, para além disso, é difícil controlar com precisão os valores da força de um ensaio para o outro. Se a cadência de utilização for reduzida e se o minucioso controlo da pressão não forem fatores essenciais, então faz todo o sentido optar por uma prensa manual com um custo bastante mais reduzido, como será o caso deste projeto [38].

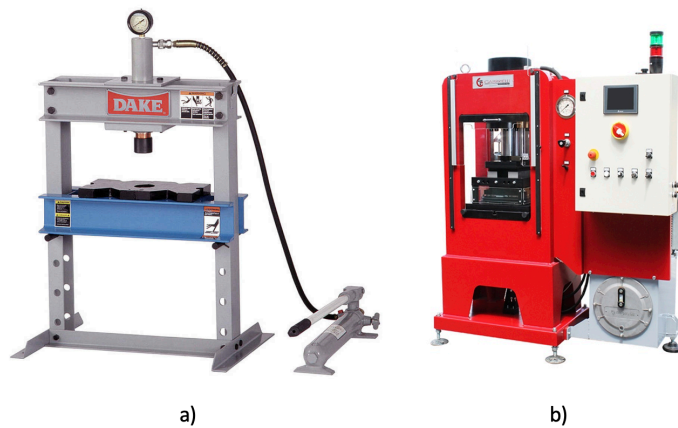


Figura 13- a) Prensa Hidráulica Manual [42] , b) Prensa Hidráulica Automática [43]

Nas prensas automáticas são usados motores elétricos que fazem atuar as bombas hidráulicas e o controlo é feito através de botões que executam as ordens desejadas.

Como é de prever as prensas automáticas são de longe as mais utilizadas pela facilidade de operação e pela versatilidade que apresentam. Os valores de pressão podem ser minuciosamente controlados, bem como muito superiores e os ciclos podem ser repetidos sem qualquer esforço por parte do operador, independentemente do tamanho da prensa [38].

Geometria da estrutura

No que diz respeito à geometria da estrutura do corpo da prensa, de forma simplificada, tipicamente encontramos 3 possibilidades, a estrutura de 4 colunas, a de 2 colunas e a estrutura em C. A primeira é adequada para prensas com elevada capacidade de carga e a segunda e terceira regularmente é utilizada para prensas de pequena ou média dimensão [37] [41].

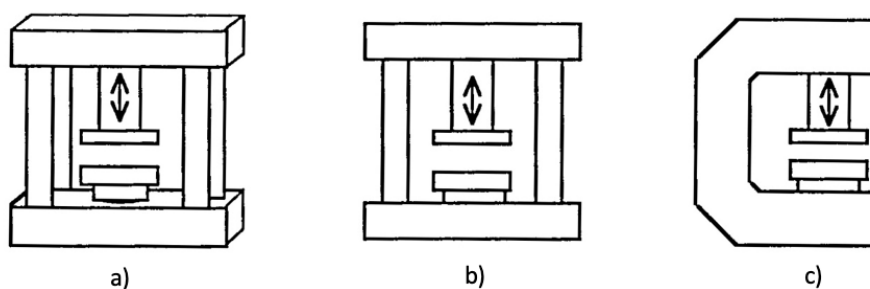


Figura 14- Geometria do Corpo da Prensa [36]

a) Estrutura de 4 colunas; b) Estrutura de 2 colunas; c) Estrutura em C;

Número de ações

As prensas podem ser classificadas quanto ao número de ações que impõem ao material, podendo ser de simples, duplo ou triplo efeito. Esta capacidade está relacionada com o número de cilindros hidráulicos que a prensa dispõe [41].

As prensas de simples efeito apenas conseguem aplicar uma força única às peças, as de duplo efeito conseguem aplicar duas forças distintas com movimentos diferentes e as de triplo efeito três forças distintas com movimentos distintos. Nesta última tipicamente temos dois efeitos na parte superior da prensa e um efeito na parte inferior.

As prensas de triplo efeito têm custos muito superiores às de simples ou duplo efeito e por isso não têm uma utilização tão generalizada.

2.4.3. Sistemas de Cilindros Hidráulicos para Prensas

A escolha do sistema hidráulico adequado é um fator essencial para o correto funcionamento de qualquer prensa, uma vez que, o cilindro hidráulico é um dos principais componentes deste sistema. Esta escolha deve ser baseada na força que se pretende aplicar às peças e no curso necessário.

Existem alguns sistemas hidráulicos que podem ser aplicados numa prensa hidráulica manual como a que se pretende desenvolver.

Optar-se-á por um macaco hidráulico, como representado na Figura 15, em que se aplica força numa alavanca que movimenta um cilindro pequeno e que por sua vez vai acionar o cilindro principal. São sistemas compactos em que o cilindro pequeno e a alavanca estão acoplados na mesma estrutura do cilindro principal. [44].



Figura 15- Macaco Hidráulico [45]

Existem sistemas mais refinados que o anterior que permitem que ponto de aplicação de força seja num local mais conveniente, acabando por se tornar um sistema versátil com perfeitas características para aplicação numa prensa manual. O sistema, que pode ser observado na Figura 16, consiste numa bomba hidráulica manual com uma alavanca operada manualmente

que pode ser posicionada onde for mais conveniente. A bomba hidráulica manual vai bombear o óleo até ao cilindro principal através de uma mangueira hidráulica que é flexível e que pode ter o comprimento desejado. Em qualquer ponto desta ligação é possível colocar um medidor de pressão. É ainda possível utilizar este sistema com uma bomba hidráulica manual operada pelo pé, ou até mesmo substituir a bomba hidráulica manual por uma bomba hidráulica elétrica, no entanto o preço de um sistema destes revela-se um fator limitativo quando em comparação com os macacos hidráulicos compactos [44] [46].

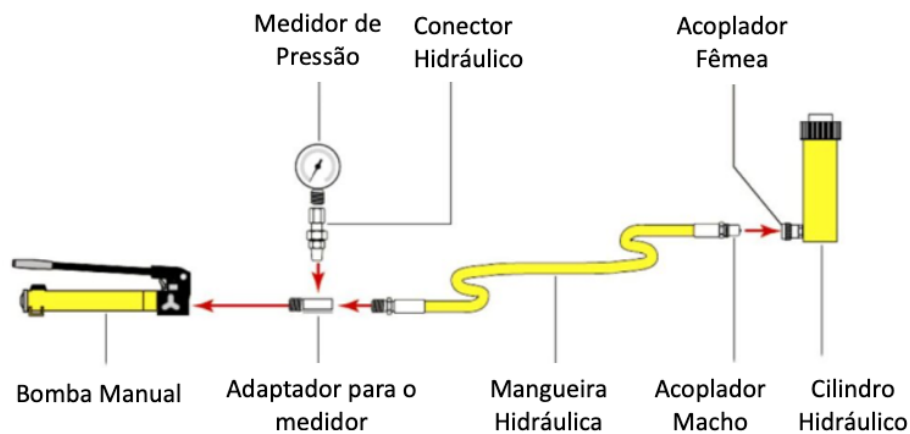





Figura 16- Sistema para cilindro Hidráulico, adaptado de [46]

Tipo de Cilindro Hidráulico

No que diz respeito à seleção do tipo de cilindro será apresentada a Tabela 4, que mostra de forma simplificada a diferença entre os tipos de cilindros hidráulicos mais comuns disponíveis no mercado.

Apesar de os cilindros de simples apresentarem algumas limitações quando em comparação com o de dupla ação, são perfeitamente adequados para a prensa hidráulica para compressão a quente que se pretende desenvolver, umas das principais limitações para o seu desenvolvimento será a questão financeira, e desta forma, um cilindro de ação simples é a opção pretendida.

Tabela 4- Tipos de cilindros hidráulicos existentes, adaptado de [47]

Ação Simples Retorno com carga	Ação simples Retorno com mola	Ação dupla Retorno hidráulico
		
Aplicação Utilização intermitente Apenas aplica força no avanço Recuo do cilindro tem de ser manualmente forçado	Aplicação Utilização intermitente Apenas aplica força no avanço Recuo do cilindro executado pela força da mola integrada	Aplicação Para utilização intensiva Pode aplicar força no avanço ou no recuo Solução mais versátil
Considerações O mais barato Pode ser controlado usando uma bomba hidráulica manual Pode existir maior dificuldade em efetuar o recuo do cilindro (principalmente em cilindros de maior capacidade)	Considerações Custo intermédio Pode ser controlado usando uma bomba hidráulica manual	Considerações O mais caro Exige a utilização de uma bomba elétrica de 4 válvulas

Sistema de medição de pressão

É extremamente importante possuir componentes na prensa que permitam que o operador controle a pressão que está a ser exercida sobre os moldes, pois a pressão é um dos parâmetros que se deve controlar no processo de compressão a quente.

Uma das formas de medir a pressão num sistema destes é através do controlo da pressão do sistema hidráulico, pois traduz a força que o cilindro está a aplicar, no entanto, deve se ter em consideração que o cilindro está a aplicar pressão numa superfície “grande” que são os moldes da prensa, e deste modo a pressão aplicada nestes não será exatamente igual à pressão aplicada pelo cilindro.

Irá ser utilizado um medidor de pressão hidráulica, integrado no circuito hidráulico, tal como foi ilustrado na Figura 16.

2.4.4. Molde e os seus Componentes

Molde

O molde é um dos principais elementos do processo de compressão a quente, no interior deste será colocada a mistura, ou composto de moldação com a matriz e as fibras escolhidas para o biocompósito e com a aplicação de pressão e temperatura durante um certo tempo, esse composto irá espalhar-se e acomodar-se à forma do molde, permitindo assim a obtenção de uma peça com a geometria desejada.

A seleção do material é um fator importante no desenvolvimento de um molde eficiente. Quanto mais complexa for a peça, mais impacto a escolha desse material terá no desempenho do molde. Tipicamente os materiais escolhidos devem possuir uma elevada condutividade térmica, o que permitirá uma rápida e uniforme condução de temperatura pelo molde. Obviamente a escolha do material não fica apenas limitada pela condutividade. É ainda importante garantir que o material escolhido é adequado para o fluxo de trabalho a que estará sujeito, tendo uma resistência ao desgaste que permita este fluxo [48].

O material escolhido para o molde será explicado posteriormente neste relatório.

Sistema de medição de temperatura

A temperatura a que se realiza o processo de compressão a quente é outro dos principais parâmetros que se deve controlar no processo de compressão a quente e tem influência direta na qualidade dos resultados obtidos [49].

Existem algumas tecnologias no mercado que permitem fazer o controlo da temperatura, temos sensores de contacto e sensores sem contacto.

Os sensores de medição sem contacto, tal como o nome indica, não estão em contacto com o objeto que queremos avaliar e são tipicamente mais caros. Normalmente, estes sensores são utilizados quando pretendemos medir a temperatura em objetos que se encontram em movimento, quando a temperatura é muito elevada, quando queremos medir a temperatura em substâncias por exemplo corrosivas, ou quando queremos medir temperaturas em áreas maiores.



Figura 17- Sensor de medição de temperatura sem contacto [50]

Os sensores de medição com contacto mais utilizados são os termopares, termómetros de resistência de platina e termístores. Em geral os sensores com contacto são mais acessíveis, duráveis e robustos do que os sem contacto [51].

Para aplicações que necessitem de uma grande precisão e estabilidade de medição são tipicamente utilizados termómetros de resistência de platina (PRTs), que conseguem medir temperaturas desde os -200°C até aos 500°C . Em geral são mais limitados na faixa de temperaturas, mais precisos e mais caros [51].

Os termístores têm grande sensibilidade em temperaturas entre os -50°C e os 100°C , sendo por isso bastante uteis quando se pretende detetar variações térmicas em ambientes “normais” como ar livre ou interior das casas. Não podem ser utilizados em temperaturas acima dos 300°C , sendo uma das suas principais desvantagens. Em geral são mais frágeis e exigem uma calibração cuidada [51].

Os termopares, são sem dúvida os mais utilizados na indústria, e mais versáteis, com estes é possível medir um largo espectro de temperaturas, se o material escolhido para os mesmos for bem selecionado para a peça ou fluido que se pretende estudar. O princípio de funcionamento dos termopares é relativamente simples e está representado na Figura 18. Dois fios de metais diferentes são unidos na extremidade, que estará em contacto com a peça e que queremos avaliar a temperatura, na outra extremidade os dois fios são ligados a um voltímetro. A diferença de temperatura que existe entre a extremidade que está na peça e a extremidade que está no voltímetro vai causar uma voltagem que traduz a diferença de temperatura entre os dois pontos. Os termopares em geral permitem medir grande espectro de temperaturas, têm tempos de resposta mais rápidos, têm custos tipicamente inferiores e necessitam de calibração. [51] [52] [53].

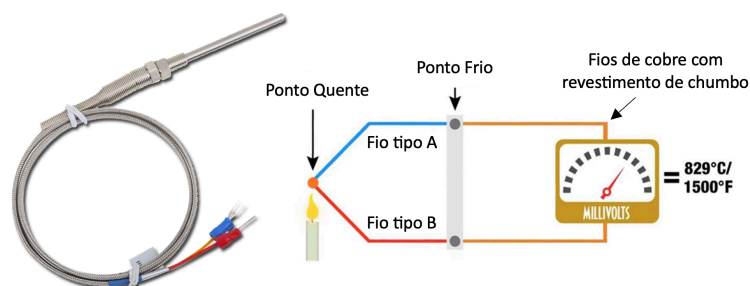


Figura 18- Termopar e princípio de funcionamento, adaptado de [54]

Existem vários tipos de termopares, com diferentes intervalos de medição de temperatura e com diferentes aplicações, na Tabela 5 são explicadas as principais diferenças.

Tabela 5- Diferenças entre termopares, adaptado de [55], [56]

Tipo K	Entre -200 e 1260°C	Recomendado para atmosferas continuamente oxidantes ou neutras
Tipo J	Entre 0 e 750°C	Recomendado para vácuo, atmosferas redutoras ou inertes
Tipo T	Entre -250 e 350°C	Podem ser usados em todo o tipo de atmosferas
Tipo E	Entre 0 e 870°C	Para atmosferas continuamente oxidantes ou inertes
Tipo N	Entre -270 e 1300°C	Para aplicações onde tipo K apresentar problemas
Tipo S	Entre 0 e 1450°C	Para aplicações a altas temperaturas
Tipo R	Entre 0 e 1450°C	Para aplicações a altas temperaturas
Tipo B	Entre 0 e 1700°C	Para aplicações a altas temperaturas

Em suma, para medição da temperatura no processo de compressão a quente, e depois de analisar os dados apresentados optou-se por utilizar um termopar tipo K, é a opção mais comum, mais acessível e durável que cumpre todos os requisitos necessários.

Sistema de controlo da temperatura

Os sistemas de controlo PID (proportional, integral and derivative) são o tipo de controlo mais utilizado a nível mundial, permitem resolver as necessidades dos fabricantes em conseguir controlos estacionários ou dinâmicos, tanto com *outputs* digitais como analógicos. Segundo estudos efetuados no Japão, em 1989, cerca de 90% dos controladores utilizados em processos industriais são controladores PID [57], [58].

Um exemplo prático da utilização dos sistemas PID são os sistemas *cruise control* que os carros possuem, em que o condutor define a velocidade que pretende manter, e o carro, através de sistemas PID irá fazer a gestão do motor em função das condições dinâmicas das estradas, por exemplo, se a estrada começar a subir, o sistema é capaz de analisar e adaptar a potência requerida ao motor de forma a manter a velocidade pedida. Os sistemas PID têm a capacidade de fornecer controlos dinâmicos ou mesmo estáticos em função das necessidades.

No caso da prensa que se pretende desenvolver, o sistema PID irá analisar o *input* do termopar, e ajustar de forma dinâmica o funcionamento dos elementos de aquecimento dos moldes, de forma a alcançar e manter a temperatura que o operador solicitar.

Existem ainda os sistemas de controlo *ON/OFF*, no entanto, estes apresentam algumas limitações face aos PID, são sistemas lineares, que não conseguem fornecer controlos dinâmicos, simplesmente podem dar uma ordem para ligar ou desligar aquilo que se pretende controlar. Por exemplo, se fosse aplicado a uma prensa como a que se pretende desenvolver, quando fosse atingida a temperatura requerida o sistema de controlo ia dar ordem aos

elementos responsáveis pelo aquecimento para se desligarem, quando a temperatura baixasse o sistema iria dar uma ordem para aquecer novamente. No fundo este sistema não é tão eficiente como os PID, pois não é capaz de manter a temperatura tão estável e acaba por ser energeticamente mais dispendioso.

Sistema de aquecimento do molde

Existem alguns sistemas de aquecimento no mercado adequados para aquecimento de moldes.

As resistências de cartucho, Figura 19, são regularmente utilizadas na indústria no aquecimento de moldes. Podem ser fabricadas com variados diâmetros e comprimentos, são capazes de atingir temperaturas elevadas, o aquecimento é uniforme ao longo de todo o seu comprimento e são bastante resistentes. É este tipo de sistema de aquecimento que será utilizado [59] [60].



Figura 19- Resistência de Cartucho [61]

As mantas de aquecimento, Figura 20, também são bastante utilizadas no aquecimento de moldes, principalmente com áreas grandes, no entanto são por norma mais caras e menos versáteis.



Figura 20- Manta de Aquecimento [62]

Sistema de Arrefecimento para o molde

O tempo total do processo de produção tem impacto direto na viabilidade financeira de um produto, sendo assim, pretende-se reduzir ao máximo o tempo necessário para a produção de cada peça. Reduzir o tempo de arrefecimento é uma das formas de reduzir eficazmente o tempo de produção, no entanto, as condições do arrefecimento têm impacto nas propriedades mecânicas e no acabamento superficial das peças. Essencialmente, se o produto em causa for uma peça complexa, com elevado rigor dimensional, o tempo de arrefecimento deve ser estudado, de forma a garantir que desse processo não resultam tensões internas indesejadas nas peças, que podem resultar em empenos ou fissuras. No caso de peças simples, em que a estabilidade dimensional não é um fator determinante para a qualidade do produto, o arrefecimento pode ser feito o mais rápido possível, de forma a maximizar capacidade de produção [48].

O tipo de fluido de arrefecimento utilizado é o principal elemento diferenciador dos vários tipos de sistemas de arrefecimento para moldes disponíveis no mercado. A água e o óleo são os fluidos mais comuns. No caso da água, esta pode ser utilizada desde que a sua temperatura esteja entre os 5° e os 90°C. O óleo por sua vez é utilizado quando se expõe o fluido a temperaturas muito maiores, até cerca dos 300°C. No entanto a água é de longe o fluido mais utilizado devido ao seu custo reduzido, fácil utilização, reduzida viscosidade. Neste projeto o fluido utilizado será a água [48].

3. Métodos e Aplicação para o Fabrico do Biocompósito por Compressão a Quente

Conforme foi descrito nos capítulos anteriores, o desenvolvimento desta dissertação vai passar por testar a viabilidade da produção de um biocompósito não estrutural e orgânico, recorrendo a resíduos de castanha, bem como o desenvolvimento de um protótipo de uma prensa de baixo custo para compressão a quente.

Neste capítulo serão apresentadas as matérias-primas, métodos, equipamentos e os procedimentos utilizados para o fabrico e otimização do biocompósito à base de castanha pelo processo de compressão a quente.

3.1. Matérias-Primas

Para o desenvolvimento e otimização do biocompósito feito à base de castanha, recorreu-se a castanhas provenientes do desperdício da indústria, ou seja, castanhas que não cumprem os padrões de dimensão ou aspeto que as fábricas exigem para comercialização. As castanhas foram fornecidas pela empresa Sortegel, uma empresa nacional localizada em Bragança. Foram fornecidas inteiras, tal como se verifica na Figura 21, com casca e miolo no seu interior. Existiu a necessidade de guardar as castanhas num recipiente grande, com pacotes de sílica, para evitar a criação de fungos, isto porque a castanha foi entregue com teores de humidade elevados.



Figura 21- Castanhas Recebidas

Para o fabrico de um compósito, geralmente é necessária uma matriz e fibras, tal como foi visto anteriormente nesta dissertação. Para que o biocompósito em questão se mantenha atrativo e tenha a pegada ambiental o mais reduzida possível, existiu um cuidado acrescido na escolha da matriz utilizada para ligar as fibras (resíduos de castanha). Como tal, tomou-se a decisão de que a matriz utilizada seria de origem natural, mesmo que isso tenha como consequência limitações no que diz respeito às propriedades mecânicas obtidas. A matriz será composta pelo amido que está presente no miolo da castanha e consideraram-se como opções o glicerol e água para melhorar as propriedades do ligante Figura 22.

O amido, considerado um bio polímero com comportamento termoplástico, tal como foi referido, encontra-se no miolo das castanhas, sendo por isso indissociável do biocompósito que se pretende estudar. A expectativa é que o amido natural da castanha ajude a impedir a fragmentação das fibras, fazendo o papel de matriz no biocompósito, no entanto, com o estudo efetuado, será averiguado se, por si só, é capaz de desempenhar esta função, ou se quando em conjunto com água ou glicerol resulta num melhor desempenho mecânico. A percentagem de amido presente no miolo das castanhas pode variar, dependendo da altura do ano em que a colheita é feita e da zona geográfica.

O glicerol (ou glicerina) é um composto orgânico abundante na natureza, sendo por isso barato. Pode ser encontrado em gorduras e óleos gordos, tratando-se de um líquido com elevada viscosidade, incolor e miscível com a água. É recorrentemente utilizado no fabrico do tabaco, com a funcionalidade de impedir a sua fragmentação [63]. No caso do nosso biocompósito servirá um propósito idêntico, pretendendo-se que seja capaz de impedir a fragmentação das fibras da castanha, servindo como um complemento ao amido natural presente nas castanhas.

A água dispensa apresentações e pretendemos estudar a sua influência nas características mecânicas do biocompósito em estudo, quando usada em combinação com o glicerol ou amido.

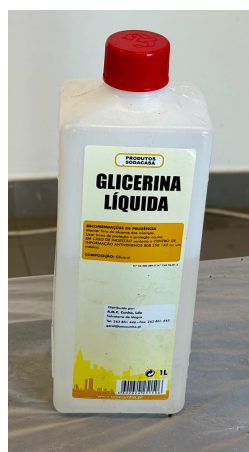


Figura 22- Glicerol Utilizado

3.2. Equipamentos e Procedimento para Produção do Biocompósito

Para produzir o biocompósito em causa foram necessários alguns equipamentos. A utilidade destes no processo de produção vai ser explicada ao pormenor de seguida.

Robô de cozinha e Moinho

As castanhas, tal como foi possível observar na Figura 21, foram entregues pela empresa tal como foram colhidas da castanheira, desta forma, foi indispensável possuir equipamentos capazes de as triturar de forma uniforme. Para isso fez-se uso do robô de cozinha, da marca Bimby, modelo TM6 e do moinho de café, pertencente ao Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP, ambos os equipamentos podem ser observados na Figura 23.

Tentou-se utilizar diversos equipamentos para triturar, no entanto, todos eles partiram as lâminas, os únicos que aguentaram foram o robô de cozinha e o moinho de café referidos. Desta forma utilizou-se o robô de cozinha para fazer uma trituração inicial, e o moinho de café, que acaba por ter um controlo manual mais preciso, para fazer a trituração final, de forma que o resultado final seja o mais homogêneo possível. Com equipamento mais adequado, seria possível obter um grão ainda mais homogêneo diminuindo ainda o tempo necessário para este processo.



Figura 23- a) Robô de cozinha; b) Moinho de café

Peneiros para controlo da granulometria

Ao triturar as castanhas existem grãos do miolo que são difíceis de triturar, e acabam por ficar com dimensões elevadas. Estes grãos de miolo com alguma dureza podem diminuir as propriedades mecânicas do biocompósito, desta forma, e com o objetivo de se atingir misturas o mais homogêneas possível, tentou-se efetuar o controlo da granulometria através dos peneiros disponíveis no GRAQ, Figura 24. O peneiro utilizado fez filtração até 2mm, com esta filtração foi possível a separação das fibras dos grãos de miolo com dimensões indesejadas. Inicialmente começou-se a testar peneiros maiores e foi-se reduzindo o tamanho até se chegar aos 2mm. Este processo foi feito de forma manual, o material triturado foi colocado no peneiro e com as mãos espalhou-se o mesmo, separando assim as fibras e os restantes grãos destes de

maiores dimensões. Os grãos com maiores dimensões e com elevada dureza, que não passaram no peneiro, não foram utilizados. Com equipamento mais adequado para triturar, possivelmente esta fase poderia ser removida, caso o grão fosse todo homogêneo.



Figura 24- Peneiro utilizado

Desidratador de alimentos

As castanhas que foram fornecidas pela fábrica apresentavam uma humidade elevada, e por isso, após estas serem peneiradas, passaram por um processo de desidratação antes de se efetuar a mistura. Para isto foi utilizado um desidratador de alimentos da marca Excalibur, modelo 9 Tray 600W, visível na Figura 25, a 42°C durante 4h.



Figura 25- Desidratador de alimentos da Excalibur

Molde para fabrico dos provetes

Foi decidido que nesta fase de testes se iriam produzir provetes em forma de disco com diâmetro de 160mm e 4mm de espessura. De cada um dos discos produzidos, pretende-se que seja possível cortar vários provetes retangulares para os ensaios mecânicos necessários. Para produzir estes discos, foi necessário desenvolver um molde. Para tal, decidiu-se utilizar os meios disponíveis no Laboratório de Tecnologia Mecânica do ISEP. Cortaram-se duas chapas de liga

de alumínio, 250x250mm com 2mm de espessura cada uma, com um furo ao centro de diâmetro 160mm. Estas duas chapas de seguida foram, sobrepostas, alinhadas e unidas recorrendo a soldadura por resistências, utilizando o equipamento de solda por pontos, da marca Annettoni, modelo NKLT28, do Laboratório de Tecnologia Mecânica do ISEP, resultando no molde visível na Figura 26.

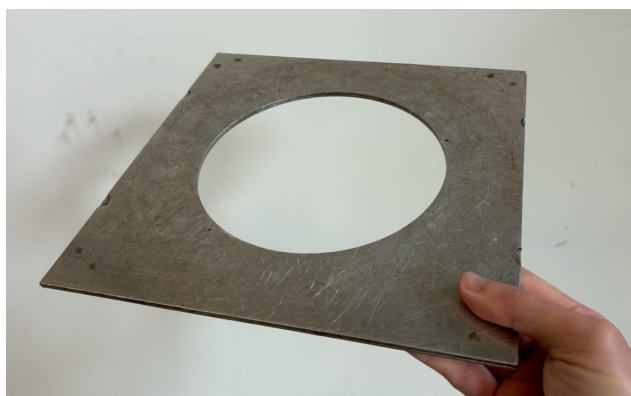


Figura 26- Molde para fabrico de provetes em forma de disco

A mistura (ou composto de moldação) que se pretende utilizar para desenvolver o biocompósito, deve ser colocada no centro do molde desenvolvido. A fase seguinte, consiste em colocar o molde na prensa hidráulica para compressão a quente, que vai aplicar a pressão e temperatura necessárias para que a mistura se consolide e adquira a forma desejada.

Prensa Hidráulica de Compressão a Quente

Para realizar os testes necessários para a otimização do biocompósito, foi extremamente importante a disponibilidade da prensa de compressão a quente do Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP, Figura 27. Nesta prensa de pratos quentes, foi possível variar todos os parâmetros necessários, temperatura, tempo e pressão de forma a otimizar a produção do biocompósito.

Quando se inicia o processo, os pratos quentes aproximam-se, e aplicam a pressão desejada no molde, que se encontra no meio de duas chapas, já com 185 gramas da mistura. Entre as chapas e o molde forma colocadas películas de filme desmoldante de silicone. A prensa possui a capacidade de repor a pressão de forma autónoma. À medida que o material fica compactado o seu volume pode diminuir e a prensa compensa esta variação de volume, mantendo sempre a pressão desejada. Os pratos, por sua vez, possuem resistências integradas, que permitem atingir e manter a temperatura necessária.

Em paralelo com o processo de otimização e produção do biocompósito, estava a ser desenvolvido o protótipo da prensa de compressão a quente, e por isso houve a necessidade de utilizar a prensa de pratos quentes do Laboratório de Materiais Compósitos.



Figura 27- Prensa de compressão a quente do Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP

O resultado deste processo pode ser observado na Figura 28. Após a extração do molde da prensa, é retirado o provete do biocompósito, em forma de disco e são cortadas as rebarbas derivadas do processo de compressão a quente, recorrendo a um X-ato. Foram fabricados provetes com diferentes temperaturas de processo, diferentes tempos e diferentes pressões. Os parâmetros utilizados podem ser observados nos resultados dos ensaios do Capítulo 5.



Figura 28- a) Mistura no molde; b) Provetes em forma de disco

Serra para corte dos provetes

Como referido, foram feitos provetes em forma de disco, com o objetivo de cortar os mesmos de forma a obter provetes retangulares para os ensaios mecânicos necessários. O processo de corte dos provetes não foi propriamente simples, para chegar à solução final foram feitos vários testes. Primeiro, tentou-se cortar os provetes com serra de corte do Laboratório de Materiais Compósitos, Figura 29, sem água, mas os provetes ficavam ligeiramente queimados e o disco da serra aquecia bastante, desta forma, tentou-se colocar água para ajudar no processo de arrefecimento do disco, no entanto, com este teste percebeu-se que o biocompósito ficava demasiado frágil quando sujeito a grandes quantidades de água, fragmentando-se. De seguida, tentou-se utilizar a guilhotina manual do Laboratório de Tecnologia Mecânica do ISEP, os resultados obtidos aqui dependiam da composição do biocompósito (os compósitos eram compostos por castanhas e glicerol, sendo que este último foi utilizado como complemento), quando o biocompósito era mais seco (com menos glicerol) fragmentava-se. Com isto, houve a necessidade de continuar a procurar alternativas para cortar os provetes, o passo seguinte foi experimentar utilizar uma ferramenta rotativa da marca Dremel, com esta ferramenta os resultados obtidos foram excelentes, no entanto, revelou-se um processo muito demorado e que produzia uma quantidade de fumo intolerável. Com isto e já com falta de soluções, voltou-se a tentar utilizar a serra de corte sem lubrificação, mas desta vez com mais precauções, o corte foi feito em várias fases, deixando o disco arrefecer. Após cerca de 1 minuto de corte deixou-se o disco arrefecer também cerca de 1 minutos. Chegou-se à conclusão de que este era o melhor método de corte disponível, apesar de ser demorado.



Figura 29- Serra de corte

Em jeito de resumo, o procedimento de fabrico destes biocompósitos passa pelos seguintes passos (tal como ilustrado na Figura 30):

1. Receção das castanhas
2. Pré moagem e moagem das castanhas
3. Utilização dos peneiros para controlo da granulometria
4. Redução de humidade das castanhas moídas
5. Adição do Glicerol
6. Colocação da mistura (composto de moldação) no molde
7. Introdução do molde na prensa para o processo de compressão a quente
8. Abertura do molde
9. Extração da peça
10. Corte dos provetes para realização de ensaios mecânicos



Figura 30- Esquema do procedimento de fabrico

3.3. Procedimento para Otimização do Biocompósito

Inicialmente, o conhecimento disponível sobre compósitos naturais feitos à base de castanhas era muito limitado, dessa forma a produção e otimização passou por várias fases de testes até se atingir um produto final. Estes testes foram feitos tendo em conta limitações no que diz respeito à quantidade matéria-prima disponível, bem como tempo de experimentação.

A primeira fase dos ensaios da otimização, consistiu na realização de testes preliminares. Com estes ensaios, pretendeu-se analisar o comportamento do biocompósito quando são feitas alterações na composição do biocompósito e nos parâmetros do processo, para servir de ponto de partida para a otimização. Nesta fase foi realizada uma análise qualitativa aos provetes em forma de disco.

Na segunda fase da otimização, testou-se o comportamento do biocompósito perante a variação da composição, aumentando-se a percentagem de castanha e diminuindo a de glicerol (a água aqui já se encontrava excluída da mistura), mantendo-se fixos os parâmetros do processo. Aqui, provetes retangulares, com as medidas definidas pelas normas foram cortados dos discos e foram submetidos a ensaios de flexão para determinar algumas das suas propriedades mecânicas e encontrar a mistura (castanha + glicerol) com maior potencial.

Com base nas informações retiradas dos testes anteriores, avançou-se para os testes finais. Nestes testes, delineou-se um conjunto de testes, com potencial para mostrar a melhor combinação (mistura+ parâmetros do processo) possível. Todos os provetes resultantes destes testes foram sujeitos a ensaios de flexão, de forma a permitir retirar as conclusões necessárias sobre as propriedades mecânicas.

Tendo a otimização do biocompósito concluída, foram realizados testes de forma a efetuar uma caracterização do biocompósito otimizado, no que diz respeito a propriedades químicas.

Todos os ensaios e testes realizados bem como resultados estão explicados ao pormenor no Capítulo 5.

Enquanto se realizavam os testes e os estudos necessários para otimizar e caracterizar o biocompósito, foi feito o estudo, desenho e conceção da prensa e do molde que também são alvo desta dissertação. Na fase final da dissertação, quando a prensa e o molde desenvolvidos estiverem operacionais, pretende-se testar a produção do biocompósito otimizado nestes equipamentos, obtendo assim a prova de conceito desejada.

Em jeito de resumo, a otimização do biocompósito consistiu em:

1. Primeira fase, ensaios preliminares, para analisar o efeito da variação da composição e dos parâmetros do processo nas propriedades mecânicas do biocompósito. Análise qualitativa.
2. Segunda fase, ensaios para avaliar o efeito do aumento da percentagem de castanha no biocompósito, fixando parâmetros do processo. Quantificação de propriedades, através de ensaios de flexão.
3. Ensaios finais para definir a combinação (mistura + parâmetros do processo) com melhores propriedades mecânicas, através da realização de ensaios de flexão.

3.4. Caracterização Mecânica do Biocompósito

Foram realizadas reuniões entre os vários intervenientes neste projeto, onde se discutiram quais as possíveis aplicações para o produto final, aquilo que se podia ambicionar e como seria o produto final. Nestas reuniões chegou-se à conclusão que nesta fase inicial do estudo do biocompósito iríamos optar por manter o produto 100% natural, mesmo que isso significasse propriedades mecânicas ou químicas inferiores, tal como falado anteriormente. Desta forma acordou-se que se iria produzir um artigo de decoração, sujeito a poucos esforços mecânicos, uma base para velas.

Com isto, surge a necessidade de realizar uma caracterização mecânica do biocompósito otimizado. Como o biocompósito em causa não possui estudos publicados que sirvam de base para as suas capacidades, é extremamente importante a realização desta caracterização mecânica, de forma a perceber, não só se este é capaz de desempenhar a função pretendida, mas também se existe a possibilidade de ambicionar aplicações mais exigentes para trabalhos futuros.

3.4.1. Ensaios de Flexão

Tal como referido anteriormente, os provetes dos biocompósitos serão submetidos a ensaios de flexão para estudar qual efetivamente a mistura e quais os parâmetros do processo de compressão a quente, que possibilitam melhores propriedades mecânicas.

Os ensaios de flexão de 3 pontos foram realizados com base na norma ISO 14125 no Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEM, na máquina SHIMADZU AG-I, recorrendo a uma célula de carga de 5 kN, que pode ser observada na Figura 31. Através destes ensaios é possível determinar algumas propriedades relevantes dos materiais tais como, módulo de flexão, resistência à flexão e deformação flexão.

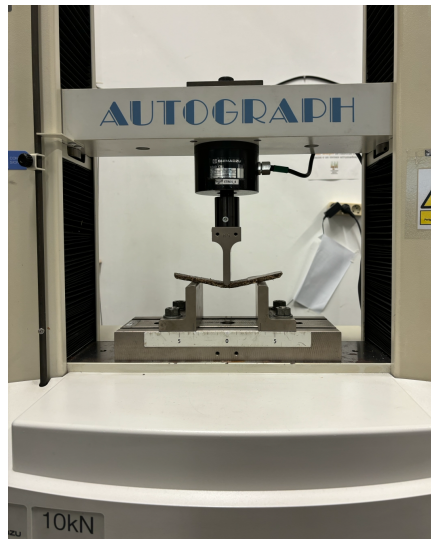


Figura 31- Ensaio de flexão aos provetes do biocompósito

Nos ensaios de flexão realizados, os provetes foram apoiados em dois pontos, com uma certa distância entre eles, de seguida o punção da máquina avança com uma velocidade constante, enquanto aplica uma força crescente no centro do provete, de forma a provocar flexão no mesmo.

Essencialmente, deste ensaio retiram-se os valores da força e do deslocamento. Através destes valores e com as equações (4) e (5) é possível obter a tensão de rotura à flexão e a deformação, respetivamente.

$$\sigma_f = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{6sh}{l^2} \quad (5)$$

Sendo que:

σ_f - Resistência à flexão ou tensão de rotura à flexão [MPa]

F - Carga [N]

l - Distância entre apoios [mm]

b - Largura do provete [mm]

h - Espessura do provete [mm]

ε - Deformação do provete no ponto de aplicação de carga

s - Deslocamento [mm]

É também relevante retirar o módulo de elasticidade através dos ensaios. Este valor é dado pelo declive da curva tensão-deformação para valores de deformação entre 0,0005 e 0,0025 MPa , para tal deve ser utilizada a Equação 6.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (6)$$

Onde:

E - Módulo de elasticidade [MPa]

$\Delta\sigma$ - Variação da tensão entre os pontos de deformação 0,0005 e 0,0025 N/mm

$\Delta\varepsilon$ - Variação de extensão entre 0,0005 e 0,0025 N/mm

Os provetes foram cortados com as dimensões definidas pela norma, retângulos 100x15mm. De cada composição do biocompósito, ensaiaram-se 3 provetes, em cada um deles realizaram-se 3 medições de largura e espessura, fazendo-se a média destas, estes valores médios foram os considerados para efetuar os cálculos para determinação de propriedades.

A velocidade de ensaio utilizada foi 2 mm/min, e a distância entre apoios 40 mm.

Segundo a norma ISO 14125, os compósitos são divididos em 4 classes em função do tipo de reforço e orientação das fibras.

O biocompósito a ser estudado enquadra-se na classe 1 da norma, tal como mostra a Tabela 6.

Tabela 6- Classes da norma ISO 14125 (adaptado da norma ISO 14125)

Classe 1	Termoplásticos reforçados com fibras descontínuas
Classe 2	Plásticos reforçados com mantas, tecidos contínuos e mistos (exemplos- DMC, SMC, GMT)
Classe 3	Compósitos unidirecionais transversais (90°); compósitos unidirecionais (0°); compósitos multidirecionais com $5 < E_{11} \setminus G_{13} \leq 15$ (exemplo- sistemas de fibra de vidro)
Classe 4	Compósitos unidirecionais (0°) e multidirecionais com $15 < E_{11} \setminus G_{13} \leq 50$ (exemplo fibra de carbono)

As classes da norma permitem definir alguns parâmetros para o ensaio, em especial a distância entre apoios, tal como se pode observar na Tabela 7, para uma classe de material 1 e para um ensaio de flexão em 3 pontos a distância entre apoios, é obtida multiplicando a espessura do provete (h) por 16. No caso dos provetes do biocompósito em causa temos uma espessura média de 7mm, o que significaria uma distância entre apoios de 112mm.

Tabela 7- Fator para determinar distância entre apoios (adaptado da norma ISO 14125)

Classe do Material	Três Pontos L/h
Classe 1	16
Classe 2	16
Classe 3	20
Classe 4	40

Dada a fragilidade do biocompósito em questão optou-se por reduzir a distância entre apoios para 40mm, de forma a proporcionar ao material condições para melhor resistir aos esforços impostos, obtendo assim valores mais adequados para o biocompósito em causa. Existiu esta necessidade de fazer adaptações uma vez que a norma não contempla compósitos idênticos ao estudado.

3.5. Caracterização Química do Biocompósito

Com o objetivo de produzir um produto final com este compósito para fins decorativos, mais precisamente, uma base para velas, surgiu ainda o interesse em fazer testes químicos ao material, para perceber as suas propriedades químicas e aquilo que se pode ambicionar deste material em trabalhos futuros.

3.5.1. Determinação da Humidade do Biocompósito

Como se sabe a castanha é um resíduo orgânico que pode estabelecer trocas de humidade com a atmosfera envolvente, desta forma achou-se relevante determinar percentagem de humidade do biocompósito após este estabilizar as trocas com a atmosfera. Para se determinar este valor foi utilizada uma balança de humidade do GRAQ, da marca KERN, modelo MLS, com resolução 0,001 gramas, visível na Figura 32 e um provete em forma de quadrado com 50mmx50mm com 4mm de espessura e com massa conhecida (11 gramas). O provete foi colocado na balança e esta, através da aplicação de temperatura retirou a humidade que estava presente no provete. Essa redução de humidade traduziu-se numa redução de massa, que é apresentada sobre a forma de percentagem no ecrã da balança.



Figura 32- Balança de Humidade KERN

3.5.2. Determinação da Condutividade Térmica do Biocompósito

Considerou-se que seria relevante conseguir determinar a condutibilidade térmica do biocompósito, uma vez que se trata de um produto novo, este tipo de caracterização serve para perceber o comportamento do mesmo. É importante comparar o valor obtido com os materiais já existentes.

Para determinar a condutibilidade térmica, fez-se uso de um dispositivo desenvolvido por um colega, Gabriel Natus Suedekum, no âmbito da sua dissertação, “Desenvolvimento De Equipamento Para Análise Da Condutibilidade Térmica De Materiais Compósitos Para O Uso Em Reservatórios De Águas Quentes Sanitárias”, desenvolvido em 2024, visível na Figura 33. O aparelho em causa foi testado com diversos materiais já conhecidos e tabelados e os valores determinados pelo aparelho foram de encontro aos valores tabelados.

O princípio de funcionamento do aparelho, de forma resumida, consiste numa caixa bem isolada termicamente, em que no seu interior existem várias resistências que garantem ao fim de algum tempo, uma temperatura uniforme em todo o interior da caixa, existem também vários termopares que medem a temperatura em pontos estratégicos. Uma amostra do biocompósito, com 38mm de diâmetro e 8mm de espessura, foi colocada no interior do aparelho, foi aplicada uma temperatura bem definida e foi acompanhada a evolução da temperatura de ambos os lados da amostra. Com isto foi determinada a condutibilidade térmica do biocompósito estudado.

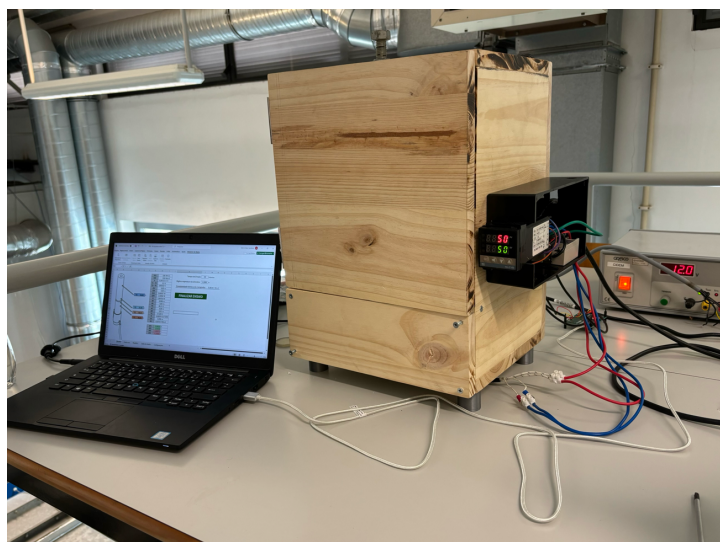


Figura 33- Aparelho para determinação de condutibilidade térmica

3.5.3. Ensaio de Degradação

O biocompósito estudado tem poucas ou nenhuma informação divulgada, e tratando-se de um produto 100% natural torna-se relevante estudar a degradação do mesmo quando chega ao fim do seu ciclo de utilização e potencialmente acaba no solo. Caso os resultados sejam positivos, pode haver um aumento significativo do interesse das indústrias no produto.

O ensaio de degradação é feito através da análise da perda de massa percentual do biocompósito ao longo do tempo quando em contacto com o solo (terra rica em nutrientes). Neste sentido foram cortados 10 provetes com dimensões 50 x 50 mm e 4mm de espessura, estes provetes foram pesados e colocados numa caixa com terra rica em nutrientes, a uma profundidade de cerca de 15cm e com humidade constante nos 35% em peso.

A cada 30 dias, dois provetes são retirados, lavados em água destilada e secos no desidratador de alimentos da marca Excalibur, modelo 9 Tray 600W a 40°C por 3 dias, por fim é medida a perda de massa do biocompósito. O teste será efetuado por elementos do GRAQ.

3.5.4. Comportamento do Revestimento em Contacto com Água

O biocompósito em estudo, tende a perder alguma consistência se estiver em contacto direto e prolongado com a água. Neste sentido, procurou-se revestir as peças, protegendo-as da humidade e da água, através da colocação de um produto que formasse uma película protetora. Obviamente o principal foco no estudo deste biocompósito é manter a composição 100% natural, tal como foi referido anteriormente nesta dissertação. Deste modo, após alguma pesquisa efetuada chegou-se á conclusão de que a goma laca seria uma boa solução para a aplicação pretendida.

A goma laca é uma substância resinosa que resulta do ciclo reprodutivo de um inseto, *Laccifera Lacca*, e que pode ser extraída principalmente em árvores na Índia ou Tailândia. É um excelente produto para criação de revestimentos com boa durabilidade e dureza. As suas principais aplicações são por isso, revestimentos de madeira e a impermeabilização de materiais porosos e absorventes, que se enquadra perfeitamente no biocompósito estudado [64].

A peça será pincelada com a goma laca, sendo aplicadas duas camadas, com 1 dia de secagem entre cada aplicação. Para avaliar a eficácia deste tratamento, será efetuado um teste de molhagem e uma medição da variação de massa após submersão prolongada, sendo este último o mais relevante.

No teste de molhagem, uma gota de água é colocada na superfície da peça e é feita uma medição do ângulo de contacto que a gota faz com a superfície, este ângulo irá permitir avaliar a molhagem da superfície, que dará indicação se temos uma impermeabilização da superfície eficiente. Um ângulo superior a 90° significaria que estaríamos na presença de uma superfície hidrofóbica, o que seria uma indicação de que a água não conseguiria molhar a superfície.

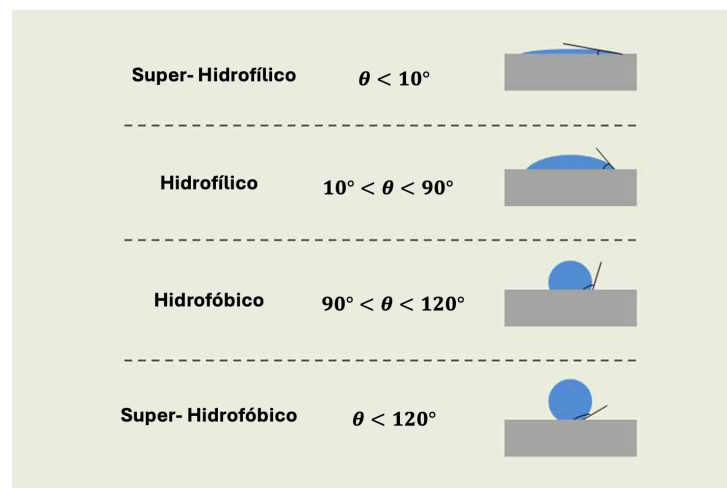


Figura 34- Intervalos de ângulos para teste da molhagem, adaptado de [65]

No teste da variação de variação de massa, pretende-se estudar, não a superfície do tratamento, mas sim a absorção de água por parte do material que foi protegido. O objetivo passa por medir a massa de provetes, com tratamento e sem tratamento, de seguida colocar esses provetes em água durante diferentes períodos de tempo, de seguida retirar os provetes, medir as suas massas, deixar secar e voltar a medir as massas. Isto permitirá perceber qual a eficácia do tratamento superficial em proteger a peça do contacto direto com a água.

4. Métodos e Aplicação para Desenvolvimento do Protótipo para Compressão a Quente

Para o desenvolvimento do protótipo da prensa hidráulica para compressão a quente de baixo custo, tomou-se a decisão de comprar uma prensa hidráulica simples e fazer as adaptações necessárias para dotar a mesma das características necessárias para efetuar o processo de compressão a quente. Esta decisão, não só irá permitir obter um resultado final mais acessível como também irá aumentar o tempo disponível para otimização do molde e do biocompósito em estudo.

A prensa hidráulica escolhida, visível na Figura 35, é da marca Mader. O modelo em questão tem uma capacidade de 20 toneladas e possui um manómetro para monitorização da pressão. Todas as adaptações necessárias para esta prensa vão ser explicadas ao pormenor de seguida. A montagem e todas as alterações foram efetuadas no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP.



Figura 35- Prensa Mader 20T com manómetro

4.1. Molde para Compressão a Quente

Um dos componentes mais importante no processo de compressão a quente é o molde, que deve incorporar sistemas de aquecimento e arrefecimento. O seu funcionamento será bastante simples. No seu interior colocar-se-á a mistura, com a composição que segundo os estudos efetuados é a que apresenta melhor potencial, posteriormente será definida a temperatura pretendida para o processo, que será proporcionada pelas resistências de cartucho integradas no molde. Ao fim do tempo de processo definido, as resistências deverão ser desligadas e o processo de arrefecimento através de água deverá ser iniciado, quando o arrefecimento estiver concluído o molde será aberto e a peça deverá ser extraída.

Antes do início do desenvolvimento do molde, foi importante definir qual a geometria que se pretendia produzir para a prova de conceito. Tal como foi dito anteriormente neste relatório, o produto será direcionado para a decoração de interiores de habitações, uma base para velas. Também foi referido anteriormente que se achou importante manter o produto 100% natural e acessível, mesmo que isso tivesse como consequência as limitações das propriedades mecânicas. Partindo de todas estas premissas, desenhou-se, recorrendo ao SOLIDWORKS, uma série de peças com as geometrias possíveis para o produto. Elaborou-se um cenário de uma casa moderna no SOLIDWORKS, onde se colocaram as peças como elementos decorativos e fizeram-se alguns renders de forma a obter uma perspetiva o próximo possível da realidade, Figura 36.

A geometria escolhida foi a forma de um hexágono com um furo ao centro para a vela, é possível juntar várias peças com esta geometria e formar padrões apelativos, tal como se pode verificar na Figura 36.



a)



b)

c)

Figura 36- Exemplo de geometrias para peça de decoração

- a) Vista geral de geometrias propostas, b) Vista pormenorizada 1, c) Vista pormenorizada 2

Estando a geometria definida decidiu-se produzir um protótipo da geometria através de impressão 3D, para ter noção do tamanho real da amostra, o protótipo pode ser visualizado na Figura 37. A impressão foi feita numa impressora 3D FlashForge3 e com filamento de PLA.

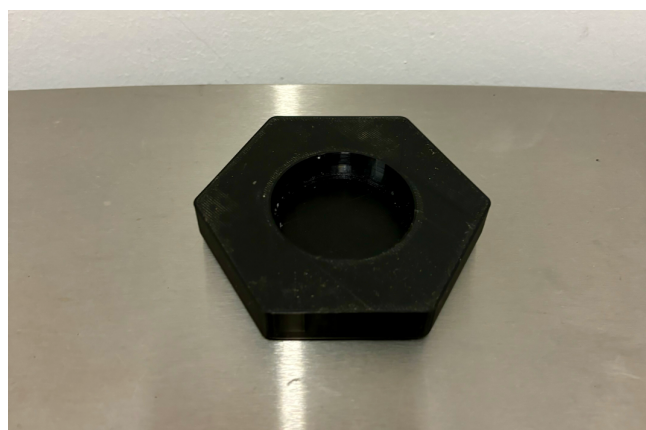


Figura 37- Protótipo do hexágono para suporte de velas

Com a geometria completamente definida, avançou-se finalmente para o desenvolvimento do molde, para tal efetuou-se a modelação 3D recorrendo ao SOLIDWORKS. O molde, que pode ser observado na Figura 38, é composto pelo molde superior e molde inferior (1 e 2), e pelo mecanismo de extração que é composto pela chapa (3) pela ferramenta para desmoldar (4).

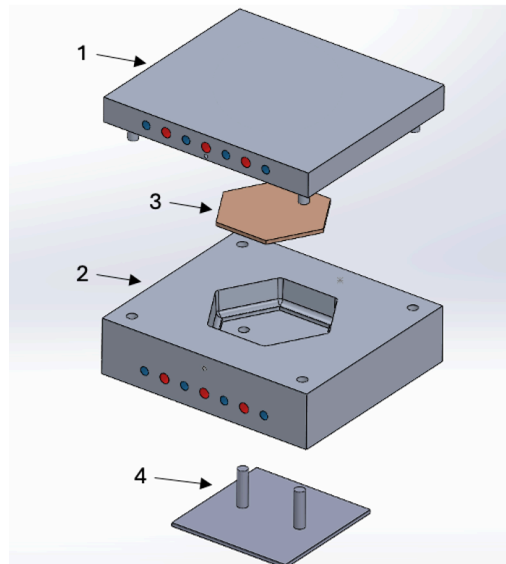


Figura 38-Molde para produção da base para velas

O molde superior (1), que pode ser analisado ao pormenor na Figura 39, é constituído por:

- 4 pinos cilíndricos (a), que vão garantir o alinhamento com o molde inferior
- Macho central (b), que vai ser responsável pelo buraco central onde se colocará a vela
- Macho “geral” (c), que terá como função compactar o resto da peça
- Canais de arrefecimento (d) onde irá circular água
- Furos para as resistências em cartuxo (e)
- Furo (f) onde irá ser colocado o termopar para medição da temperatura.

De notar que o macho (b) possui uma diminuição de diâmetro, de cima para baixo, resultante de uma inclinação de 3° que tem como objetivo facilitar a abertura do molde.

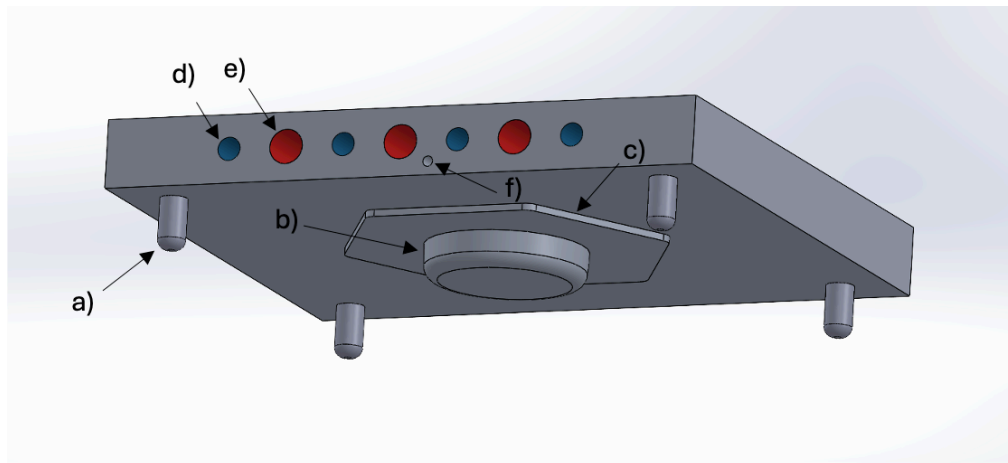


Figura 39- Molde Superior

O molde inferior (2), que está representado na Figura 40, possui:

- Canais de arrefecimento, com furo passante com 6,8mm diâmetro e rosca M8 x 0,75 com 15mm de comprimento de ambos os lados (d)
- Furos para as resistências de aquecimento, com furo passante com 10mm de diâmetro (e)
- Furo para termopar para medição de temperatura, furo com 3mm de diâmetro e 36mm de profundidade (f)
- Cavidade principal (g) com forma hexagonal, onde se vai colocar a mistura para fazer o biocompósito
- Uma segunda cavidade hexagonal (h), onde vai ser colocada a peça (3), formando uma base lisa para cavidade principal (g)
- Furos (i) que têm como função facilitar a remoção da peça do interior do molde no final do processo

De notar aqui que o furo central (g) possui também um ângulo de 3° que também serve para facilitar a extração da peça final do molde, para além disto, a aplicação de cera desmoldante nessa zona também irá facilitar a extração.

O sistema de extração é composto pelos ângulos de 3° aplicados quer no macho do molde superior (b), quer no furo central do molde inferior (g) e pelos componentes (3) e (4). Para fazer a extração da peça deve-se colocar e empurrar o componente (4) nos dois furos (i) que estão ao centro da peça no molde inferior, o componente (4) irá desta forma empurrar a base (3), que irá forçar a peça final a sair do furo central (g) sem a danificar. Os 3° abrem no sentido ascendente no molde inferior de forma a criar espaço para a peça final se movimentar com maior facilidade.

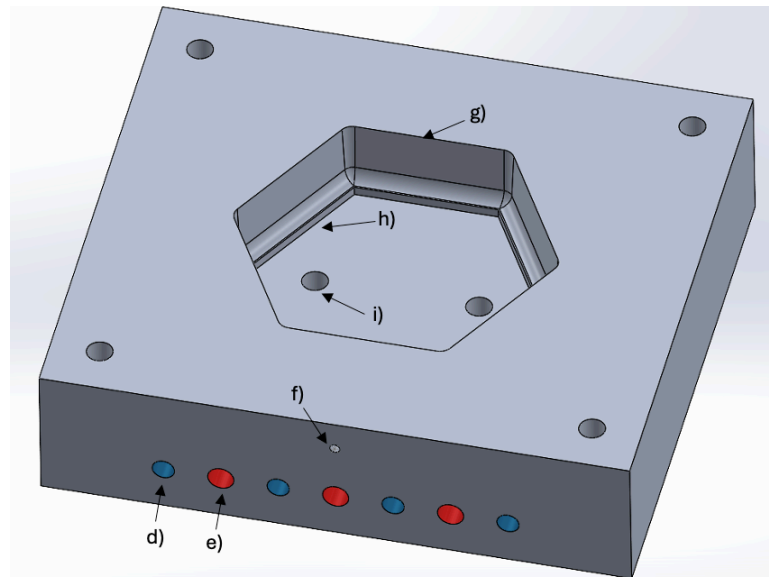


Figura 40-Molde Inferior

O molde será feito de liga de alumínio e maquinado na CNC da marca Haas modelo VF2 do Laboratório de Tecnologia Mecânica do ISEP, processo visível na Figura 41. Os blocos de alumínio foram comprados na Poly Lanema, com dimensões 45 x 170 x 190mm para o molde superior e 55 x 170 x 190mm para o molde inferior. Estes são de alumínio AW6082-T6 (Série 6), uma liga de média resistência mecânica, alta resistência à corrosão, com boa maquinabilidade e elevada condutividade térmica. O alumínio foi escolhido com ajuda da Poly Lanema em função das condições de trabalho a que o molde estará sujeito.

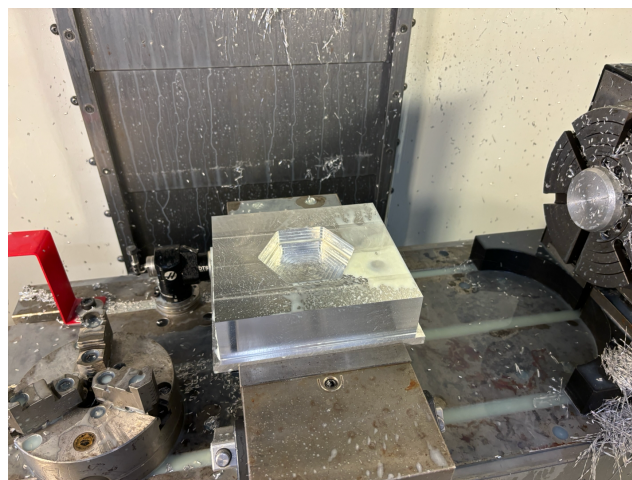


Figura 41- Molde em processo de maquinagem no DEM

Foram feitos desenhos de definição, com as tolerâncias necessárias, para as várias peças do molde que necessitaram de maquinagem, todos os elementos maquinados podem ser

visualizados na Figura 42. Como se pode observar, a base da ferramenta para desmoldar (4) foi maquinada numa forma circular, por sugestão do Laboratório de Tecnologia Mecânica, para reaproveitar uma peça redonda que não tinha utilidade. Estes desenhos de definição foram entregues no Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEM e podem ser consultados no APÊNDICE A da presente dissertação.

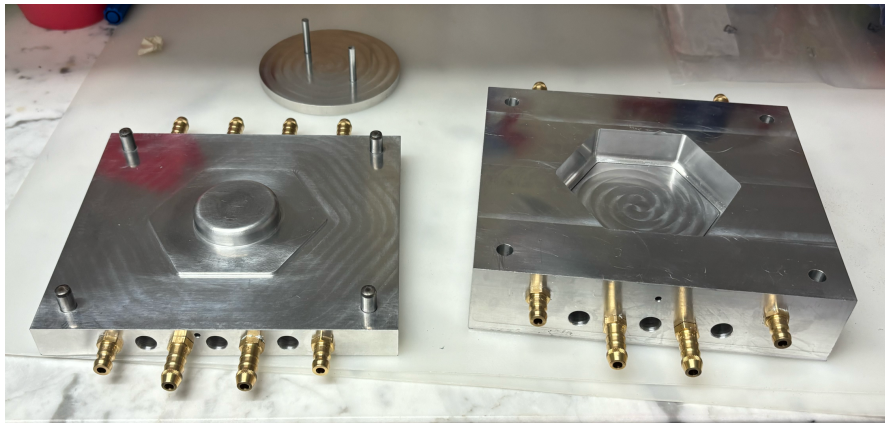


Figura 42- Peças maquinadas para molde

4.1.1. Sistema de Arrefecimento do Molde

No que diz respeito ao sistema de arrefecimento, todos os elementos utilizados foram comprados diretamente na HASCO, e podem ser observados na Figura 42 e Figura 43.

O componente (H1) (4 unidades) trata-se de um bocal de ligação com passagem livre, modelo Z81/9 x 8 x 0,75 que tem uma rosca M8 x 0,75 que irá roscar no molde, a outra extremidade do componente (H1) irá estabelecer o contacto com o componente (H2) (4 unidades) que é um acoplamento rápido com passagem livre, modelo Z801/9 que irá encaixar no componente (H1) numa das extremidades e na outra irá receber a mangueira através da qual a água chega e sai do molde. Por fim a circulação da água entre os vários canais de arrefecimento será feita através dos componentes (H3) (12 unidades) que são bocais de mangueira, do modelo Z87/9 x 8 x 0,75 que vão roscar no molde através de uma rosca M8 x 0,75 e ser interligados através de mangueiras. O sentido de circulação da água pode ser observado na Figura 43 pelas setas azuis. Como se pode observar, os circuitos de arrefecimento estão posicionados de forma simétrica em relação à zona onde será colocada a mistura, de forma que o arrefecimento da peça seja o mais uniforme possível, diminuindo assim as tensões internas derivadas do arrefecimento.

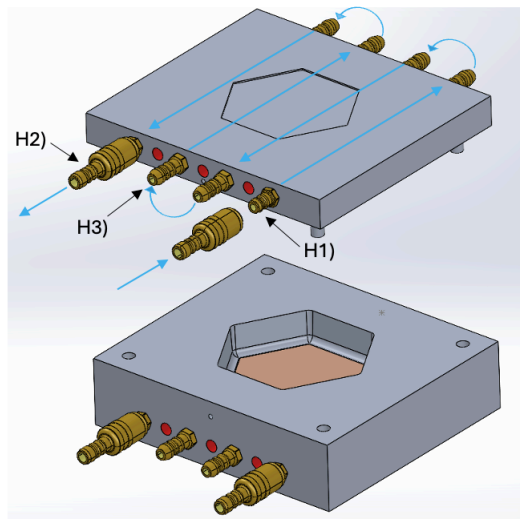


Figura 43- Molde com sistema de arrefecimento da HASCO

Na Figura 44, pode ser observado o molde equipado com todos os componentes da HASCO referidos anteriormente e por manguейras que permitem a circulação da água.

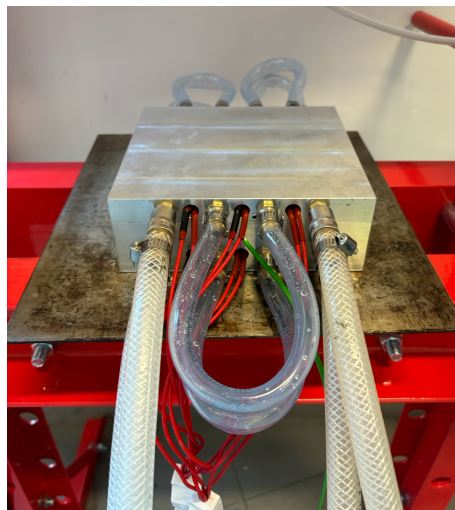


Figura 44- Molde projetado equipado com sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento será alimentado por uma máquina de recirculação de água da marca Regloplas modelo 90S, que permitirá obter um circuito fechado de água, diminuindo o desperdício. O aparelho em causa pertence ao Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP, e pode ser observado na Figura 45.



Figura 45- Bomba de recirculação de água

4.1.2. Sistema de Aquecimento do Molde

Já no caso do sistema de aquecimento, vai se recorrer a resistências em cartucho que serão colocadas no molde superior e molde inferior, de forma a se atingir um aquecimento o mais uniforme possível. Para as resistências é importante calcular, utilizando a Equação 7, a potência necessária para se atingir a temperatura pretendida no tempo pretendido.

$$W = \frac{m \times c_p \times \Delta T}{t} \quad (7)$$

Em que:

W - Potência [W]

m - Massa do molde [g]

c_p - Calor específico a pressão constante do material do molde [$J/g \cdot ^\circ C$]

ΔT - Variação Térmica que se pretende atingir [$^\circ$]

t - Tempo do processamento [s]

Este cálculo será realizado para o molde superior e para o molde inferior. Sabendo que a massa do molde superior é de 1560 g e do molde inferior 3100 g, valores obtidos de acordo com o programa SOLIDWORKS e de acordo com a densidade do alumínio utilizado AW6082, considerando o valor do calor específico (c_p) do 0,9 $J/g \cdot ^\circ C$, que é um valor que está no intervalo tabelado (0,882 até 0,918 $J/g \cdot ^\circ C$), usando uma variação de temperatura de 140 °, que representa uma situação limite em que se aqueça desde os 20° até aos 160 °C e considerando um tempo de processamento de 10 minutos (600 segundos), fazendo uso da equação 7 obtemos as potências necessárias.

$$W_{superior} = \frac{1560 \times 0,9 \times 140}{600} = 328 \text{ watts}$$

$$W_{inferior} = \frac{3100 \times 0,9 \times 140}{600} = 652 \text{ watts}$$

Mediante estes cálculos foram selecionadas resistências de 220 W com dimensões 10mm de diâmetro e 95 mm comprimento, visíveis na Figura 46, no caso do molde inferior, que exige uma potência superior, será necessário utilizar 3 resistências, o que representa uma potência disponível de 660 W. No caso do molde superior a potência necessária é metade, quando comparada com o molde inferior, no entanto, de forma a simplificar decidiu-se utilizar também 3 resistências de 220 W iguais às utilizadas no molde inferior.

Obviamente existem perdas associadas aos fenómenos de condução e convecção que vão ter impacto no processo. Com a colocação de 660 W no molde superior o sistema está sobredimensionado em 34%. O que deve ser suficiente para combater as pernas associadas aos fenómenos referidos. Desta forma o sistema fica com 1320 Watts disponíveis, o que permitiria, numa situação sem perdas aquecer o sistema dos 20 até aos 160°C em 440,8 segundos (8 minutos).

As resistências vão ser colocadas no interior do molde em furos feitos para o efeito, tal como se pode observar na Figura 44.

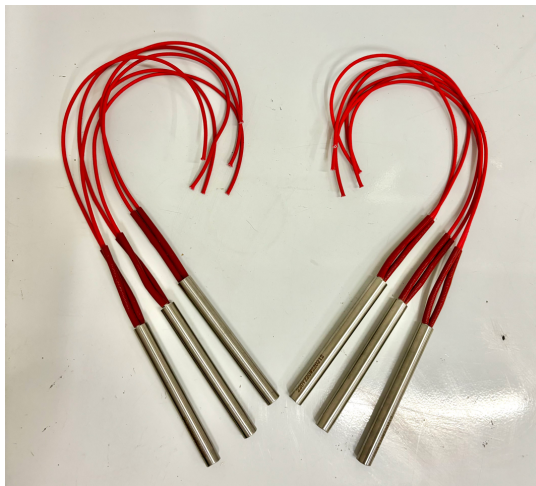


Figura 46- Resistências de Cartucho utilizadas

4.1.3. Controlo e Monitorização do Aquecimento do Molde

Com o sistema de arrefecimento e aquecimento explicado é agora importante falar sobre o desenvolvimento do sistema de controlo e medição de temperatura.

Primeiro será feita uma apresentação dos principais componentes deste sistema bem como as funções de cada um.

Num segundo momento, serão explicadas ao pormenor as ligações efetuadas para permitir o funcionamento do sistema.

Interruptor Principal ON/OFF e Luz Sinalizadora

Como qualquer equipamento cujo uso implica responsabilidade e tem perigos associados, deve existir sempre um interruptor que liga e desliga todo o sistema de forma rápida e simples. Desta forma o sistema de controlo e monitorização da temperatura possui um interruptor ON/OFF que liga e desliga a alimentação de todo o sistema. Ao lado deste interruptor existe uma luz sinalizadora que acende para indicar a prontidão do sistema, ou seja, indica que o interruptor está na posição ON e que existe corrente no circuito. Estes dois equipamentos podem ser observados na Figura 47.

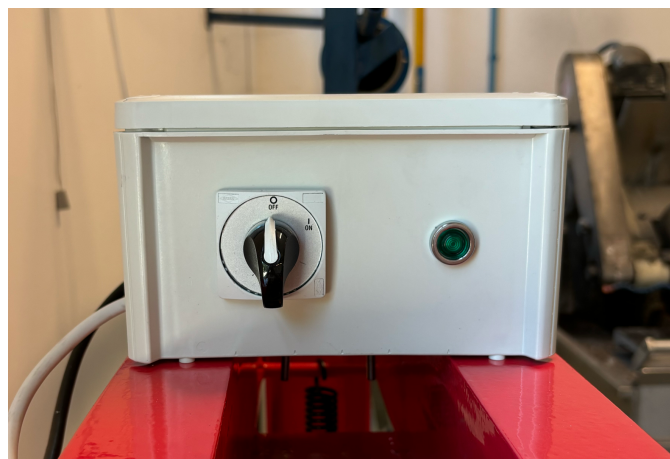


Figura 47- Interruptor ON/OFF e luz sinalizadora

Controlador Digital PID

Um dos principais componentes do sistema de medição e controlo da temperatura é o controlador digital com tecnologia PID. O aparelho utilizado é da marca REX, modelo C100FK02-V*DN.

Este equipamento, que pode ser observado na Figura 48, possui um ecrã e algumas teclas de controlo. O utilizador, através das teclas, define a temperatura que pretende alcançar no seu sistema de aquecimento e no ecrã pode consultar o valor que definiu bem como a temperatura atual do seu sistema. O funcionamento deste equipamento baseia-se na tecnologia PID, que foi explicada em maior detalhe na revisão bibliográfica desta dissertação. Consiste essencialmente numa evolução do sistema convencional *ON/OFF*, que permite controlo dinâmico de componentes, tal como o *cruise control* dos carros modernos.

No caso do projeto em estudo pretendemos aquecer o molde através das resistências de cartucho que estão inseridas no mesmo. A medição da temperatura atual do molde é essencial para o correto funcionamento deste controlador e é garantida pela utilização de um termopar do tipo K que é ligado diretamente ao aparelho. Se o utilizador pedir uma temperatura de 100°C e o controlador receber uma informação de 20°C por parte do termopar, vai existir uma ordem por parte do controlador para se aquecer as resistências. Assim que a temperatura atual do molde, medida pelo termopar, for igual ou muito próxima dos 100°C pedidos, o controlador vai dar ordem às resistências para diminuírem a potência aplicada ou até mesmo para se desligarem, de modo a manter a temperatura pedida.



Figura 48- Termostato Digital PID

Termopar do tipo K

O controlador PID referido anteriormente, de acordo com o seu manual, precisa de um termopar do tipo K para fazer a leitura correta da temperatura atual do molde. Seguiu-se esta indicação e instalou-se um termopar K que será colocado nos furos do molde destinados aos mesmos. Estes furos foram colocados em posições estratégicas, de forma a ficarem o mais próximo possível da cavidade do molde onde estará a mistura do biocompósito

Temporizador programável

Como sabemos, o processo de compressão a quente tem como parâmetros, a temperatura, o tempo e a pressão. A pressão é aplicada e controlada na prensa e a temperatura é aplicada pelas resistências em cartucho mediante ordem do termostato. O tempo deverá ser controlado pelo temporizador programável.

O temporizador programável utilizado, visível na Figura 49, acaba por funcionar como relé no sistema montado. O utilizador deverá definir no aparelho o tempo que pretende que a mistura seja aquecida, ao fim desse tempo a luz vermelha deverá acender, significando que o aparelho quebrou o circuito, retirando a alimentação das resistências. Para além da função programável o aparelho dispõe de um botão que permite dar ordem manual, sem necessidade de programação de tempo.



Figura 49- Temporizador programável

Caixa para controladores

Foi essencial personalizar uma caixa para colocar os controladores utilizados de forma organizada. Para esse efeito comprou-se uma caixa de derivação da marca OBO com dimensões 267x182x110mm e fizeram-se os cortes necessários para os equipamentos, Figura 50.



Figura 50- Sistema de controlo e monitorização do aquecimento

Com os principais componentes explicados acima, importa agora explicar as ligações feitas para garantir o funcionamento dos equipamentos. Para facilitar a interpretação será apresentado um esquema elétrico, Figura 51 e de seguida uma explicação detalhada das ligações.

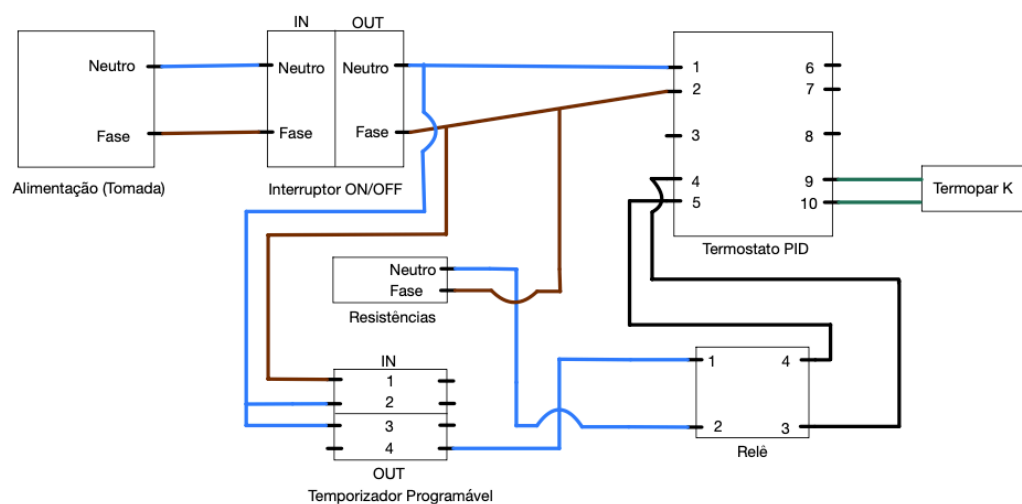


Figura 51- Esquema das ligações efetuadas

- A energia entra no sistema ligando a tomada à rede de eletricidade convencional, como em qualquer sistema, para haver fluxo de energia é necessário a fase e o neutro.
- A fase e o neutro que vêm da tomada passam pelo interruptor ON/OFF, se o interruptor estiver na posição OFF não existe passagem de corrente para o sistema, se estiver na posição ON a corrente entra no sistema. Deste aparelho temos um neutro e uma fase que estão disponíveis para alimentar o sistema.
- O termostato recebe fase e neutro nos seus terminais 1 e 2 desde que o interruptor ON/OFF esteja na posição ON, desta forma o aparelho inicia-se com o sistema. Nos terminais 4 e 5 são enviados *inputs* ao relê, dando ou não a ordem para aquecimento das resistências. Essa ordem depende do valor lido pelo termopar K que está ligado ao termostato nos terminais 9 e 10.
- O relê recebe então, nos seus terminais 3 e 4, os *inputs* por parte do termostato, dando a ordem para aquecer. No terminal 2 do relê chega o *input* por parte do temporizador programável para avançar. Caso os *inputs* que chegam do termostato e do temporizador programável sejam os desejados, sai do relê no seu terminal 1 o neutro para a resistência.
- A resistência recebe de forma contante a fase, recebendo só o neutro quando o termostato e o temporizador derem autorização. Recebendo ambos a resistência tem condições para funcionar.
- O temporizador programável, tal como o termostato, recebe fase e neutro nos seus terminais 1 e 2 desde que o interruptor *ON/OFF* esteja na posição *ON*.

Em resumo, o sistema descrito deverá funcionar da seguinte forma:

1. O molde deve ser colocado na prensa hidráulica
2. Deve-se aplicar a pressão desejada no molde através da prensa hidráulica
3. O utilizador deverá ligar o interruptor ON/OFF do sistema de controlo e monitorização
4. No termostato deverá ser escolhida a temperatura que se pretende para o processo
5. No temporizador deve ser definida a duração do processo
6. O sistema inicia após a definição deste último parâmetro
7. As resistências deverão manter a temperatura definida
8. Ao fim do tempo definido as resistências desligam-se, no entanto continua a ser possível verificar a temperatura atual do molde no termostato.

4.1.4. Controlo e Monitorização do Arrefecimento do Molde

O sistema de controlo e arrefecimento é muito mais simples do que o sistema de aquecimento e partilha alguns componentes com o mesmo.

Como foi referido anteriormente, o sistema funciona com água fria que circula no sistema com auxílio da bomba de recirculação do DEM. Relativamente à monitorização da temperatura, este é partilhado com o sistema de aquecimento, pois faz-se uso do termopar K e do controlador do para ler a temperatura atual.

5. Discussão de Resultados

No presente capítulo pretende-se apresentar todos os resultados teóricos e práticos relevantes, sobre o processo de otimização do biocompósito, obtidos durante todo o processo de elaboração da presente dissertação, bem com a respetiva discussão dos mesmos.

5.1. Discussão dos Resultados dos Ensaios de Otimização

Os ensaios preliminares foram os primeiros ensaios realizados com as castanhas no presente estudo, como tal, o conhecimento de base era muito reduzido. Com estes ensaios foi possível fazer alguma experimentação e retirar algumas conclusões qualitativas sobre o biocompósito, em função da variação dos parâmetros do processo e das percentagens dos seus componentes (castanha, glicerol e água). Foram analisados 14 discos onde se avaliaram questões como o aspeto, a flexibilidade e a consolidação, esta avaliação foi feita através de observação direta e manuseamento com as mãos. Os resultados podem ser observados no APÊNDICE B.

Com os ensaios preliminares tiraram-se algumas conclusões importantes para o estudo e otimização do biocompósito.

1. Em primeiro lugar, sabe-se que a compactação da mistura no molde é extremamente importante para obter uma peça final com qualidade. Desta forma, foi muito importante chegar a uma massa de mistura que permitisse uma boa compactação para o molde em utilização, massa essa que foi mantida constante, 185g, para o resto do estudo.
2. Pretendeu-se entender se a presença do glicerol e da água na matriz, implica melhores propriedades mecânicas do biocompósito. Estes dois componentes servem como complemento à matriz que é sempre composta pelo amido natural da castanha. Com estes ensaios percebeu-se que a água não apresentava grande influência no comportamento mecânico do biocompósito, pelo menos de forma significativa. Já o glicerol melhora significativamente as propriedades. Desta forma a água foi excluída do estudo.
3. A pressão é um dos parâmetros do processo de compressão a quente, no entanto, a partir de uma certa pressão deixa de ter influência no resultado final. Imagine-se o molde no meio dos pratos da prensa com a mistura no seu interior. Os pratos da prensa vão se aproximar e vão começar a aplicar força na mistura, existirá um ponto, a partir do qual, a mistura já foi de tal forma compactada, que a força dos pratos passará a ser

aplicada no molde. Qualquer pressão acima dessa resultará num resultado final constante.

4. Como foi referido, a matriz do biocompósito é sempre composta pelo amido natural do miolo da castanha, dependendo da altura do ano que a castanha foi colhida e da região geográfica, a quantidade de amido presente pode variar, o que irá influenciar a mistura. Quanto menos amido existir na castanha, mais glicerol é necessário colocar na mistura para obter bom comportamento mecânico. Imaginando um copo cheio das castanhas utilizadas que representam desperdício da indústria, esse copo nunca será uma amostra homogênea, dessa forma é impossível, com os métodos ao nosso dispor, determinar a quantidade média de amido que existe numa certa amostra de castanha. O que dificulta a obtenção de resultados homogêneos quando se muda o lote de castanhas utilizado. Nos ensaios preliminares existiu precisamente uma mudança de lote de castanhas, que revelou precisamente esta variação do amido.
5. Chegou-se à conclusão que, quando se mudava o lote de castanhas, se deveria produzir um provete composto apenas pelas castanhas e o seu amido natural, se o provete se encontrasse muito seco e quebradiço deixava indicação de pouco amido no lote, caso tivesse muito gelatinoso e escuro dava indicação de maior quantidade de amido. Para uma quantificação precisa deste tópico seria preciso um estudo dedicado.
6. Inicialmente foi utilizado glicerol com alto nível de pureza, o que resultava num custo acrescido. Com estes testes percebeu-se que com a utilização de amido comercial, muito mais acessível, os resultados não variavam significativamente, ou seja, produzindo provetes com as mesmas condições, apenas alterando o amido, as questões avaliadas (aspeto, a flexibilidade e a consolidação) mantinham-se equivalentes. Desta forma foi mantido o uso de glicerol comercial para o resto do estudo do biocompósito.

Se o lote de castanhas utilizado possuir muito amido e não for efetuado um ajuste na quantidade de glicerol utilizado, num caso extremo, com muito glicerol, o biocompósito começa a fluir excessivamente pelo molde, resultando numa peça defeituosa e pouco compactada, tal como se pode observar na Figura 52.



Figura 52- Material a fluir para fora do molde

O passo seguinte do estudo e otimização, consistiu em realizar ensaios de flexão para determinar algumas propriedades mecânicas. Desta forma, realizaram-se os ensaios “D”, presentes na Tabela 8. Nestes ensaios, as castanhas utilizadas foram todas do mesmo lote e o foi utilizado glicerol comercial. Os resultados podem ser observados no APÊNDICE C.

Foram avaliados 3 discos, com diferentes composições, mantendo as condições do processo constantes e foram recortados 3 provetes em cada disco. Os valores da resistência à flexão e do módulo de elasticidade encontram-se na Tabela 8.

Nos ensaios D1 até D3 testou-se a influencia do aumento da quantidade de castanha e diminuição de glicerol. Aqui percebeu-se que existiam melhores propriedades no ensaio D3 com 80% castanhas e 20% glicerol.

Estes ensaios mostraram que uma elevada quantidade de glicerol pode ser prejudicial para a mistura, tal como tínhamos verificado também pelo material que tinha escorrido para fora do molde nos ensaios preliminares.

Tabela 8- Resultados Ensaio Preliminares D

Ensaio	C (%)	G (%)	T (°C)	t(min)	P (ton-força)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
D1	<u>60</u>	<u>40</u>	100	35	6	0,32	19,4
D2	<u>70</u>	<u>30</u>	100	35	6	0,51	20,5
D3	<u>80</u>	<u>20</u>	100	35	6	1,29	30,9

Por fim avançou-se para os ensaios finais, visíveis na Tabela 9 até Tabela 11. Nestes ensaios, baseado nas aprendizagens que existiram com os ensaios anteriores, foram feitos alguns ajustes.

- Foi utilizado sempre o mesmo lote de castanhas bem como o mesmo glicerol.
- A quantidade de glicerol na mistura variou entre 0% e 30%, uma diminuição de glicerol ajustada ao lote de castanhas com maior quantidade de amido.
- Foram feitos ensaios para temperaturas acima e abaixo da testada anteriormente, de forma a chegar à melhor combinação (composição + parâmetros do processo) possível.

Tabela 9- Ensaios Finais 80°C

Ensaio	C (%)	G (%)	T (°C)	t (min)	P (ton-força)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
F1	<u>70</u>	<u>30</u>	80	30	6	0,18	4,31
F2	<u>80</u>	<u>20</u>	80	30	6	0,44	20,4
F3	<u>90</u>	<u>10</u>	80	30	6	1,4	40,9
F4	<u>100</u>	<u>0</u>	80	30	6	3,88	311

Tabela 10- Ensaios Finais 100°C

Ensaio	C (%)	G (%)	T (°C)	t (min)	P (ton-força)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
F5	<u>70</u>	<u>30</u>	100	30	6	1,04	30,8
F6	<u>80</u>	<u>20</u>	100	30	6	5,42	269
F7	<u>90</u>	<u>10</u>	100	30	6	6,38	590
F8	<u>100</u>	<u>0</u>	100	30	6	8,74	942

Tabela 11- Ensaios Finais 120°C

Ensaio	C (%)	G (%)	T (°C)	t (min)	P (ton-força)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
F9	<u>70</u>	<u>30</u>	120	30	6	3,57	64,2
F10	<u>80</u>	<u>20</u>	120	30	6	5,93	347
F11	<u>90</u>	<u>10</u>	120	30	6	4,17	194
F12	<u>100</u>	<u>0</u>	120	30	6	8,4	880

Segundo os ensaios finais, para este lote de castanhas, a melhor combinação (composição + parâmetros do processo) é 100% castanha (inclui o seu amido natural), 0% glicerol e processamento a 100°C.

Estes ensaios mostraram que para temperaturas inferiores a 100°C o comportamento mecânico do biocompósito é afetado negativamente. Já no caso do aumento da temperatura para cima dos 100°C, também existe uma degradação das propriedades, no entanto muito menos significativa. Dessa forma os 100°C mostraram ser a melhor temperatura para processar este biocompósito.

No caso da pressão, esta foi sempre mantida nas 6 toneladas-força, pois, tal como referido anteriormente, é uma pressão que garante que, para a quantidade de castanha utilizada, existe compactação e a força dos pratos passa a ser aplicada no molde.

O tempo do processo não foi alvo de otimização nesta fase do estudo, pois tem pouco impacto na qualidade do produto obtido. Isto porque, pretendem-se geometrias simples, aplicações não estruturais e dado o tipo de materiais utilizados para o biocompósito, o problema das tensões internas não é relevante. Para trabalhos futuros, poderá existir otimização.

No caso da composição, mais uma vez nestes ensaios ficou claro que uma grande quantidade de glicerol é prejudicial para o biocompósito. Sendo que estamos na presença de um lote com elevada quantidade de amido, a matriz composta somente por amido resultou em excelentes propriedades mecânicas.

Por fim, com estes estudos, conclui-se que:

- A quantidade de amido natural da castanha presente na matriz afeta a quantidade de glicerol necessária. Chegando mesmo a ser mais vantajoso a exclusão do glicerol, no caso de lotes de castanhas com muito amido.
- É importante em estudos futuros estudar uma forma eficiente de determinar a quantidade de amido em cada lote, otimizando assim a escolha da quantidade de glicerol necessária.
- Para aplicações não estruturais é possível obter produtos com propriedades mecânicas muito apelativas.

5.2. Discussão de Resultados da Caracterização Química

5.2.1. Determinação da Humidade do Biocompósito

O ensaio permitiu obter, através da balança de humidade do GRAQ, o valor da percentagem de humidade absorvida por uma determinada amostra do biocompósito. A amostra em causa foi fabricada com 80% de castanhas e 20% de glicerol. Desta amostra foi cortado um quadrado (50x50mm com 6mm espessura) e este foi deixado durante 3 dias a estabilizar a humidade com a atmosfera envolvente do laboratório, tendo uma massa final de 11 gramas. Por fim, o provete foi colado na balança de humidade, tendo sido determinado pela balança que 16,49% da massa é proveniente da absorção de humidade, tal como se pode observar na Figura 53.

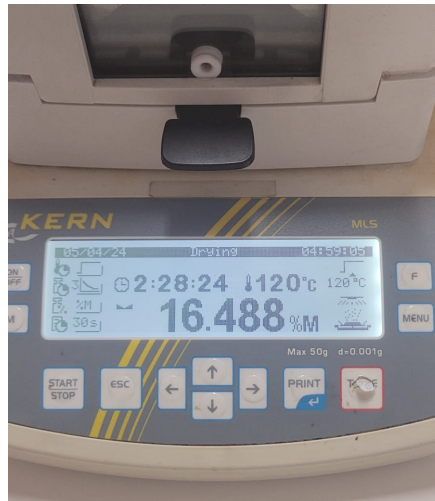


Figura 53- Absorção de Humidade do biocompósito

5.2.2. Determinação da Condutividade Térmica do Biocompósito

Com o ensaio de condutividade térmica efetuado foi possível determinar, ao fim de 53 minutos de ensaio que a condutividade do biocompósito feito com resíduos de castanhas é de 0,785 W/m.K.

Neste ensaio utilizou-se uma amostra com 80% Castanhas e 20% Glicerol.

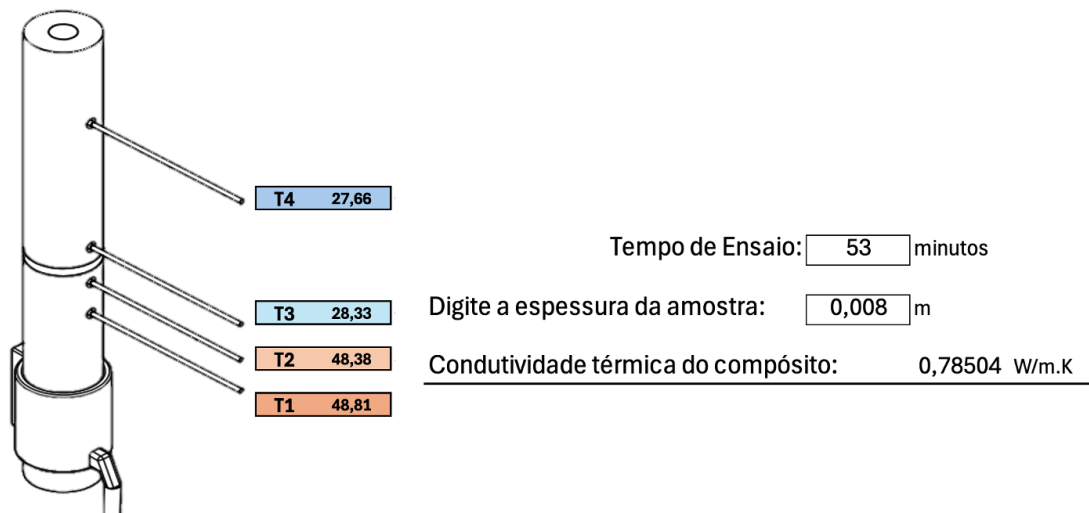


Figura 54- Resultados do ensaio de condutividade térmica

A Tabela 12, permite comparar o valor de condutividade térmica obtido no ensaio, com valores tabelados de materiais bem conhecidos.

Tabela 12- Comparação de valores de condutividade térmica

Material	Condutividade Térmica (k)
Cortiça	0,039 W/m.K (30°C)
Madeira (Carvalho)	0,16 W/m.K (30°C)
Tijolo	0,72 W/m.K (30°C)
Biocompósito estudado	0,785 W/m.K (48°C)
Vidro	1,4 W/m.K (30°C)
Alumínio 2024-T6	177 W/m.K (30°C)

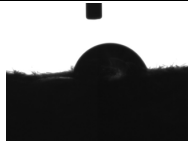

Como se pode observar o ensaio de condutividade térmica foi feito aplicando uma temperatura de 48°C ao biocompósito, no entanto, os valores tabelados dos outros materiais são para uma temperatura de 30°C. Considerou-se que para efeito de comparação é suficientemente ilustrativa, uma vez que as temperaturas não diferem muito.

5.2.3. Análise do Revestimento em Contacto com a Água

Tal como se referiu anteriormente nesta dissertação, o biocompósito quando está em contacto direto com a água por períodos prolongados começa a perder alguma consistência. Tendo isto em conta, foi muito importante aplicar um revestimento (goma laca) que protegesse o biocompósito desta deterioração e fazer ensaios para perceber a eficácia deste tratamento.

Foi realizado um teste de molhagem, num laboratório externo, em que se avaliou o ângulo de contacto de uma gota de água com a superfície do biocompósito com revestimento.

Tabela 13- Ensaio de molhabilidade

	Ângulo de contacto médio	Imagem da gota
Biocompósito sem revestimento	71,7°	
Biocompósito com revestimento	42,8	

Tal como se pode observar na Tabela 13, o ângulo de contacto da gota com a superfície foi superior no caso do biocompósito sem revestimento, o que significa que a superfície é mais hidrofóbica sem o tratamento. Este ensaio apenas serve para avaliar a superfície do tratamento e não permite perceber se o biocompósito está bem protegido da água.

Para avaliar se o biocompósito fica protegido pelo revestimento, é importante perceber se a água ultrapassa o revestimento e molha as fibras do interior. Para isso foi avaliado o aumento de massa de provetes submersos em água em intervalos de tempo variados.

Na Tabela 14 é possível analisar os resultados do ensaio de submersão em água do biocompósito sem e com revestimento. Como se pode observar, o biocompósito protegido com o revestimento de goma laca apresenta uma absorção de água muito inferior, quando em comparação com o biocompósito sem revestimento. Isto mostra que o tratamento aplicado é eficiente em proteger o biocompósito de exposição prolongada a água, tal como era esperado.

Tabela 14- Resultados dos ensaios de submersão

Tempo de submersão	Aumento de massa	
	Sem revestimento	Com revestimento
2 horas	12,4 %	3,60 %
24 horas	52,3 %	18,3 %
96 horas	67,4 %	26,1 %

5.2.4. Resultados dos Ensaio de Degradação

Com os testes de degradação realizados pelo GRAQ, visíveis na Tabela 15, foi possível verificar que ao fim de 120 dias o biocompósito desenvolvido degradou-se totalmente quando submerso por terra rica em nutrientes. Estes resultados são extremamente positivos pois reforçam a ideia de que o biocompósito estudado é 100% amigo do ambiente. Numa altura, em que a consciência social para os temas ambientais é crescente, um produto com estas características será sem dúvida apetecível.

Tabela 15- Resultados da degradação do material

Dia	Percentagem Medida (%)	Percentagem Medida (%)
	Com Goma laca	Sem Goma laca
0	0	0
30	35,8	33,7
60	68,5	64,8
90	95,3	94,8
120	100	100

Foi ainda possível verificar que o revestimento utilizado para impermeabilizar o biocompósito pouca influencia teve na degradação do material. O que deixa uma indicação de que a goma laca foi uma escolha acertada para manter o compósito 100% natural, mantendo-se atrativo.

6. Prensa Protótipo para Compressão a Quente

O protótipo da prensa para compressão a quente, visível na Figura 55, encontra-se 100% funcional e atingiu os objetivos propostos.

Considera-se que desenvolver uma base para facilitar a fixação e posicionamento do molde na prensa, seria uma adição importante para o protótipo em trabalhos futuros. Por questões de disponibilidade de tempo não foi possível desenvolver este elemento.

6.1. Sistema de Controlo e Monitorização da Temperatura

Todo o sistema de controlo e monitorização do aquecimento e arrefecimento que foi desenvolvido funcionou na perfeição. O operador apenas tem de ligar o sistema, colocar a temperatura desejada no controlador digital, programar o tempo do processo pretendido no temporizador e deixar o sistema funcionar de forma autónoma e completamente segura.

Como se pode observar na Figura 55, por cima do protótipo existe ainda um manual de instruções detalhado para facilitar a tarefa do operador e no protótipo foram colocados todos os sinais de perigo necessários para garantir a segurança de quem manuseia o protótipo.



Figura 55- Protótipo da prensa de compressão a quente

6.2. Sistema de Aplicação de Pressão

A prensa é capaz de aplicar valores de pressão muito superiores ao necessário, até 20 toneladas força. Para o biocompósito em causa e para fechar completamente o molde 6 toneladas força é mais do que suficiente para garantir que a pressão está a ser aplicada totalmente no molde, e que por isso, existe compactação total do composto de moldação. Para além do anteriormente referido, foi explicado nesta dissertação que normalmente neste tipo de sistemas é necessário repor a pressão no cilindro hidráulico de forma manual ao fim de algum tempo, no entanto, a pressão manteve-se constante durante um ciclo de produção de 45 minutos, o que vai além das expectativas.

6.3. Sistema de Aquecimento do Molde

De acordo com os cálculos efetuados para o dimensionamento do sistema de aquecimento, numa situação ideal, sem considerar as perdas associadas aos fenómenos de convecção e condução e considerando os 35% de sobredimensionamento aplicados ao sistema, seria de esperar que as resistências aquecessem o molde dos 20 até aos 120°C em 6 minutos. De acordo com a experimentação, com todas as perdas a influenciar o aquecimento, foi possível aquecer o molde dos 20°C até aos 120°C em 8 minutos. O que acaba por ser um resultado bastante positivo e mostra a eficiência do sistema. Considera-se que, para trabalhos futuros, se o molde for isolado termicamente será possível diminuir o tempo do aquecimento.

Com a produção da peça que exemplifica o potencial do biocompósito, foi ainda possível concluir que o sistema de aquecimento foi corretamente posicionado no molde, gerando um resultado final uniforme.

6.4. Sistema de Arrefecimento do Molde

No que diz respeito ao sistema de arrefecimento este revelou-se bastante eficiente, o molde é arrefecido dos 120 até aos 20°C em 4 minutos apenas. Ao fim deste tempo o molde já se encontra na sua totalidade frio e perfeitamente adequado para manuseamento.

Não foi criada uma expectativa, nem foram realizados cálculos, para saber quanto tempo é esperado para o arrefecimento, uma vez que, o arrefecimento não tem um papel fundamental na produção de um biocompósito desta natureza, em que tensões internas na peça não são relevantes. Trata-se principalmente de preparar o molde para um seguro manuseamento, contribuindo ao máximo para a diminuição do tempo total de produção.

Todas estas temperaturas referidas são medidas pelo termopar que está inserido no molde.

6.5. Abertura do Molde e Extração da Peça

A abertura do molde e extração da peça revelaram-se processos extremamente simples.

Para abrir o molde, basta retirar a pressão aplicada pelo atuador hidráulico da prensa, desligar as mangueiras de refrigeração, retirar as resistências, colocar o molde numa mesa de trabalho e levantar o molde superior de forma uniforme, com a mão, expondo assim a peça no seu interior, tal como pode ser observar na Figura 56.

Para extrair a peça basta utilizar a ferramenta de extração desenvolvida, esta deve ser colocada nos orifícios que se encontram na parte inferior do molde e este deve ser pousado em cima da ferramenta. O próprio peso do molde irá empurrar a ferramenta, o que irá resultar na desmoldagem da peça sem qualquer tipo de esforço. De salientar que o molde, antes de se colocar o composto de moldação deve ser preparado com cera desmoldante, o que irá facilitar muito a extração da peça no final do processo.

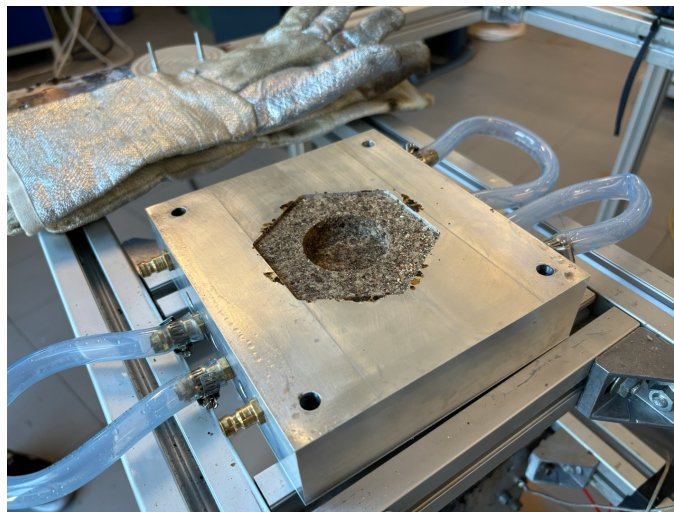


Figura 56-Abertura do molde

6.6. Peça Final Produzida com o Biocompósito Estudado

Por fim, tal como se pode observar na Figura 57, as peças extraídas do molde têm o aspeto desejado e estão prontas para receber o tratamento de impermeabilização, que consiste em duas camadas de goma laca.



Figura 57- Suporte para velas extraído do molde (sem impermeabilização)

Após tratamento de impermeabilização, a peça, prova de conceito, foi enquadrada e testada regularmente durante 1 mês num ambiente decorativo, a Figura 58 ilustra todo o seu potencial decorativo.

O resultado final foi além das expectativas, e sabendo que ainda existem margem para melhorias deixa uma perspectiva de futuro interessante para o biocompósito estudado.



Figura 58- Enquadramento da prova de conceito num ambiente decorativo

6.7. Estimativa de Custo do Protótipo

É importante avaliar o custo final deste protótipo, dessa forma, o preço de cada um dos principais componentes encontra-se aqui discriminado:

- Prensa Hidráulica Mader - 279,90€
- Blocos de alumínio para molde - 148,30€
- Maquinagem blocos de alumínio - Custos não contabilizados
- Peças Hasco para sistema de arrefecimento - 86,32€
- Resistências de Cartucho para sistema de aquecimento - 80€
- Caixa para os controladores - 33€
- Temporizador programável - 77€
- Relê- 10€
- Todos componentes elétricos (ligadores e cabos elétricos) - 45€

Sem considerar a maquinagem, atinge-se um valor total de 760€.

Deve-se considerar que para operar o equipamento será necessário uma ligação elétrica monofásica, ponto de ligação de água.

7. Conclusão

Neste último capítulo serão apresentadas as todas as conclusões retiradas com o desenvolvimento desta dissertação e serão ainda enumeradas todas as limitações sentidas, bem como sugestões para trabalhos futuros tendo como base o tema da presente dissertação.

7.1. Conclusões Finais

O estudo a otimização e o fabrico do biocompósito proposto através do processo de compressão a quente, numa parceria entre o centro M4S e o GRAQ mostrou ser viável e permitiu o fabrico dos biocompósitos. Foi possível, através deste processo reutilizar as castanhas que antes eram apenas desperdício alimentar e mostrar que neste desperdício ainda pode ser encontrado enorme potencial de retorno. O estudo mostrou ainda que a produção a nível industrial pode ser viável e que existe um caminho claro a percorrer para tornar este produto viável.

O objetivo de produzir um protótipo de uma prensa para o processo de compressão a quente de baixo custo e pequenas dimensões foi alcançado com êxito. Com um orçamento relativamente limitado, foi possível desenvolver um equipamento funcional e relativamente compacto. Todos os sistemas de controlo, de aquecimento e arrefecimento, foram estudados, projetados e montados, permitindo um funcionamento eficiente e seguro, tal como era esperado. O molde, que foi pensado, projetado e produzido de raiz, para permitir obter uma base para velas, foi um sucesso, permite a produção de peças com qualidade, com a geometria que foi proposta, uma base para velas e garante uma fácil extração da peça no fim do processo. Em suma o protótipo foi de encontro às expectativas, todos os sistemas funcionam de forma fácil e segura, em conjunto, permitindo através do molde feito obter uma prova de conceito exemplar

A presente dissertação pressupunha uma forte componente experimental, que se fosse realizada com sucesso, permitiria obter um produto final, prova de conceito, que seria o melhor indicador do sucesso da dissertação. Em muitos momentos questionou-se se seria possível e se na fase final todo o trabalho iria convergir numa peça com enorme potencial. Agora, na fase final, é possível afirmar que tudo isto se verificou, chega-se à fase final com todas as componentes desta dissertação a convergir fortemente para uma prova de conceito sólida que deixa grande promessas de potencial para o biocompósito estudado e indicação de sucesso no protótipo desenvolvido.

7.2. Limitações e Trabalhos Futuros

Obviamente como em tudo na vida, existe sempre margem para melhorar e há sempre coisas, que se fossem feitas de novo, seriam feitas de forma diferente. É isto que faz com que o mundo esteja em constante processo de inovação e melhoria.

Existiram algumas limitações sentidas e chega-se ao fim com uma ideia clara daquilo que seria necessário para trabalhos futuros sobre este tema.

Os equipamentos utilizados para tratar a castanha (triturar, peneirar, secar e cortar) nem sempre foram os mais eficientes, o que tornou o processo extremamente lento, roubando assim muito tempo, que poderia ter sido investido por exemplo a melhorar o processo de otimização. Para além disso, existe a certeza que, com equipamento mais indicado para triturar e peneirar seria possível obter peças com aspeto mais uniforme e certamente melhores propriedades mecânicas. Estas foram as principais limitações sentidas.

Para trabalhos futuros, sugere-se a consideração de estudos adicionais que, em virtude das circunstâncias atuais, não foram possíveis realizar.

- Sugere-se a realização de testes de inflamabilidade, pois o material apresentou elevadíssima potencialidade neste aspeto, de acordo com alguns ensaios realizados neste sentido.
- O controlo e quantificação do amido presente em cada lote de castanhas utilizado iria permitir definir de forma concisa a quantidade de glicerol que a mistura necessita para ter as melhores propriedades mecânicas. O processo disponível era muito demorado e por isso incompatível com a presente dissertação. Desta forma, aconselha-se o estudo de métodos mais rápidos e eficientes de determinar a quantidade de amido.
- O controlo e uniformização da castanha moída irá resultar num produto final com aspeto melhorado, isto, em conjunto com uma diminuição do tempo de produção seria um passo importante para aumentar a viabilidade da produção deste biocompósito em maior escala.
- A realização de testes para avaliar a durabilidade do tratamento superficial a longo prazo seria um estudo relevante para o futuro.
- No que diz respeito ao protótipo desenvolvido, a produção de uma base para fácil fixação e posicionamento do molde seria importante.
- A produção de uma peça que segure todas as resistências em conjunto na posição em que estas são colocadas no molde, iria facilitar a remoção e colocação das mesmas.
- A substituição das mangueiras do sistema de arrefecimento por tubos com curvas e mais resistentes a altas temperaturas, seria importante para alcançar temperaturas maiores no processo de compressão a quente.

Referências

- [1] Dominic Gates, "Boeing celebrates 787 delivery as program's costs top \$32 billion," *The Seattle Times*, Sep. 2011, Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.seattletimes.com/business/boeing-celebrates-787-delivery-as-programs-costs-top-32-billion/>
- [2] Brian McManus, "The Insane Engineering of the 787," Youtube Channel- Real Engineering, 2021. Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=lapFQl6RezA&t=489s>
- [3] William G. Roeseler, Branko Sarh, and Max U. Kismarton, "COMPOSITE STRUCTURES: THE FIRST 100 YEARS," in *16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS*, Japan, 2007.
- [4] Marcelo F. S. F de Moura, Alfredo B. de Moraes, and António G. de Magalhães, *Materiais Compósitos- Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2nd ed. Publindústria, Edições Técnicas, 2011.
- [5] David McCowen, "Porsche reveals new 911 GT3 RS." Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.news.com.au/technology/motoring/motoring-news/porsche-reveals-new-911-gt3-rs/news-story/0363c7b8bf6b17fe4bfa595c461631cb>
- [6] Isbo, "Isbo Pro Surf." Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://isboards.com/en/products/pro-surf>
- [7] Wilson, "Wilson-HOW TO CHOOSE A TENNIS RACKET." Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.wilson.com/en-gb/blog/tennis/how-tos/how-choose-tennis-racket>
- [8] Sika Industry, "Sika Industry- High Performance Composite Resin Systems." Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://industry.sika.com/en/home/advanced-resins/composite-resin-systems.html>
- [9] P. Esfandiari, "PRODUÇÃO DE PRÉ-IMPREGNADOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA E FIBRAS DE CARBONO: TRANSFORMAÇÃO POR PULTRUSÃO E COMPRESSÃO A QUENTE," 2016.
- [10] Derek Hull, *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, 1988.
- [11] A. R. Caixeiro and D. Carreiras, "PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS ECOLOGICAMENTE SUSTENTÁVEIS."
- [12] Russell Gold, "Thousands of Old Wind Turbine Blades Pile Up in West Texas," *Texas Monthly*, Aug. 2023, Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.texasmonthly.com/news-politics/sweetwater-wind-turbine-blades-dump/>
- [13] MICHAEL GOULDRICK, "What happens to end-of-life wind turbine blades?," *Spectrum News*, Aug. 2022, Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://ny1.com/nyc/all-boroughs/weather/2022/08/15/what-happens-to-end-of-life-windmill-blades->
- [14] IBERDROLA, "IBERDROLA- What is a wind turbine and how does it work?" Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/sustainability/wind-turbines-blades>
- [15] TWI, "TWI- HOW LONG DO WIND TURBINES LAST? CAN THEIR LIFETIME BE EXTENDED?" Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/how-long-do-wind-turbines-last>

- [16] R. Gold, "Texas Monthly- Thousands of Old Wind Turbine Blades Pile Up in West Texas." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.texasmonthly.com/news-politics/sweetwater-wind-turbine-blades-dump/>
- [17] J. Francisco and M. Gomes Da Silva, "PRÉ-IMPREGNADOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA: FABRICO E TRANSFORMAÇÃO POR COMPRESSÃO A QUENTE E ENROLAMENTO FILAMENTAR," 2005.
- [18] Clemens S., E. Western, and A. Handermann, "Materials Engineering, pp. 27-30," 1988.
- [19] Stuart M. Lee., *International Encyclopedia of Composites*, vol. 6. VCH Publishers, 1991. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6339-6_6.
- [20] James J. Licari and Dale W. Swanson, *Adhesives Technology for Electronic Applications*, 2nd ed. 2011.
- [21] S. Dixit, R. Goel, A. Dubey, and T. Bhalavi, "Natural Fibre Reinforced Polymer Composite Materials-A Review," in *Polymers from Renewable Resources*, vol. 8, 2017, pp. 43–78. doi: <https://doi.org/10.1177/204124791700800203>.
- [22] T. Kumbhar, S. S. Chavan, and S. M. Shendokar, "A Review On Natural Composites." [Online]. Available: www.iosrjournals.org
- [23] B. C. Suddell FIMMM and A. Rosemaund, "Industrial Fibres: Recent and Current Developments," in *Proceedings of the Symposium on Natural Fibres*, pp. 71–82.
- [24] J. Holbery and D. Houston, "Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications," 2006. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0234-2>.
- [25] J. Riswick, "Autoblog- The BMW iX interior is a futuristic feast for the eyes." Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.autoblog.com/2020/11/11/bmw-ix-interior/?gucounter=2>
- [26] European Commission, "Sweet chestnut." Accessed: Aug. 10, 2024. [Online]. Available: <https://forest.jrc.ec.europa.eu/en/european-atlas/qr-trees/sweet-chestnut/>
- [27] D. Rosa, F. Figueiredo, É. G. Castanheira, and F. Freire, "Life-cycle assessment of fresh and frozen chestnut," *J Clean Prod*, vol. 140, pp. 742–752, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.064.
- [28] Teresa Serafim and Jornal Público, "Árvore portuguesa de 2020 é o castanheiro de Vales," 2019. Accessed: Aug. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.publico.pt/2019/12/02/ciencia/noticia/arvore-portuguesa-2020-castanheiro-vales-1895857>
- [29] Science Photo Library, "Wildlife Photographs- Sweet chestnut." Accessed: Aug. 10, 2024. [Online]. Available: <https://sciencephotogallery.com/featured/sweet-chestnut-castanea-sativa-tree-science-photo-library.html>
- [30] D. Dörr *et al.*, "Rheological characterization and macroscopic modeling and simulation of the molding process of a PA6 Glass Mat Thermoplastic (GMT)," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, p. 107780, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107780.
- [31] X-T Pham, P. Bates, and A. Chesney, "Modeling of Thermoforming of Low-density Glass Mat Thermoplastic," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, pp. 287–298, 2005, doi: 10.1177/0731684405043556.
- [32] A. Trende, B. T. Åström, and G. Nilsson, "Modelling of residual stresses in compression moulded glass-mat reinforced thermoplastics," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 31, no. 11, pp. 1241–1254, Nov. 2000, doi: 10.1016/S1359-835X(00)00078-6.

- [33] K. Maghsoudi, E. Vazirinasab, G. Momen, and R. Jafari, "Advances in the Fabrication of Superhydrophobic Polymeric Surfaces by Polymer Molding Processes," *Ind Eng Chem Res*, vol. 59, no. 20, pp. 9343–9363, May 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.0c00508.
- [34] M. José and S. Maia, "PROJECTO DE MOLDE PARA PEÇA PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL," Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [35] J. Pedro and R. Novais, "FABRICO E TRANSFORMAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA," Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2021.
- [36] J. Mendes, "AUTOMATIZAÇÃO DE UMA PRENSA HIDRÁULICA DE ESTUDO DO CORTE DE CHAPA COM RECURSO A INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.
- [37] F. Jorge Mendes Portela and P. Francisco Jorge Teixeira de Freitas, "Automação de Prensa Hidráulica de Laboratório," 2015.
- [38] Specac, "Specac- Types of Hydraulic Press Explained." Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <https://specac.com/xrf-applications/types-of-hydraulic-press-explained/>
- [39] N. DE Miguel Barbosa Carvalho, "Otimização do Processo de Moldação de Cortiça por Compressão," Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2021.
- [40] A. Barata da Rocha and J. Ferreira Duarte, *Tecnologia da embutidura*. Porto: Associação Portuguesa das Tecnologias de Conformação Plástica, 1992.
- [41] A. Luísa Viana Mesquita Louro Dissertação de Mestrado, F. Gomes de Almeida Co-orientador, and J. Falcão Carneiro, "Atualização do sistema de comando de uma prensa hidráulica de triplo efeito," 2016.
- [42] Raptor Supplies, "DAKE CORPORATION 972200 Manual Hydraulic Press 10 Tons." Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.raptorsupplies.com.au/pd/dake-corporation/972200>
- [43] Gabbrielli, "Presses 80-225 Ton", Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.gabbrielli.com/en/prodotto/presses-80-225-ton/>
- [44] Anthony Esposito, "Hand- Operated Hydraulic Jack," in *Fluid Power With Applications*, 7th ed., V. Anthony, Ed., Pearson Education, 2007, pp. 72–78.
- [45] Eagle, "Hydraulic bottle jack." Accessed: Dec. 12, 2023. [Online]. Available: <https://toe-jack.com/products/product01/>
- [46] Enerpac, "How to Set-Up Your Single or Multi-Point Hydraulic System." Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: <https://blog.enerpac.com/how-to-set-up-your-single-or-multi-point-hydraulic-system/>
- [47] Enerpac, "How to Choose the Right Hydraulic Cylinder." Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.enerpac.com/en-us/US-Solutions/e/lifting-hydraulic-cylinders-buyers-guide?utm_source=EnerpacBlog&utm_medium=Banner&utm_campaign=+General+Lifting&utm_id=7015c000001aMYsAAM
- [48] I. Barros, "Modelação do Comportamento Térmico de Moldes de Injeção," 1997. Accessed: Jul. 08, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1822/22>
- [49] REGOPLAS, "Temperature control in plastic injection moulds." Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.regoplas.com/en/technologies/mould-temperature-control/temperature-control-in-plastic-injection-moulds>
- [50] LogicBus, "Sensor de temperatura de tipo Infrarrojos." Accessed: Dec. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.logicbus.com.mx/infrarrojos.php>

- [51] J. P. Bentley, "INSTRUMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY Temperature sensor characteristics and measurement system design," 1984.
- [52] T. J. Bajzek, "IEEE Instrumentation & Measurement Magazine Thermocouples: A Sensor for Measuring Temperature Part 3 in a series of tutorials in instrumentation and measurement," 2005. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MIM.2005.1405922>.
- [53] A. Ejaz, "What is a Thermocouple and How does it work?" Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.circuits-diy.com/what-is-a-thermocouple-and-how-does-it-work/>
- [54] Lixinc Eletronics, "What is a Thermocouple and How does it work?" Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.circuits-diy.com/what-is-a-thermocouple-and-how-does-it-work/>
- [55] Pyromation, "Thermocouple Types." Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.pyromation.com/products/Thermocouple/Thermocouple-Types.aspx>
- [56] OMEGA, "OMEGA Termopares." Accessed: Oct. 14, 2023. [Online]. Available: <https://br.omega.com/prodinfo/termopares.html>
- [57] Y. Li, K. H. Ang, and G. C. Y. Chong, "PID Control System Analysis and Design," *IEEE Control Systems Magazine*, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/MCS.2006.1580152>.
- [58] Unbehauen Heinz, *CONTROL SYSTEMS, ROBOTICS AND AUTOMATION*, vol. 2. EOLSS Publications, 2009.
- [59] IMC, "IMC Resistências Elétricas- Resistência de cartucho." Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.imcresistencias.com.br/post/resistencia-de-cartucho-entenda-onde-pode-ser-usada>
- [60] IMC, "IMC Resistências Elétricas- Tipos de Resistências." Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.imcresistencias.com.br/post/tipos-de-resistencia-veja-quis-as-principais-e-suas-aplicacoes>
- [61] Resistec, "Resistência de Cartucho." Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.resitec.pt/en/produtos/sondas-e-resistencias/resistencias-eletricas-para-diversos-fins/resistencias-de-cartucho>
- [62] Castro Composites, "Manta de Aquecimento." Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.castrocompositesshop.com/pt/reparos-pás-eólicas/1704-manta-aquecedora-de-0-a-90c-com-isolamento.html>
- [63] EVOLT, "EVOLT- GLICERINA LIQUIDA." Accessed: Sep. 25, 2024. [Online]. Available: <https://evolt.pt/produto/glicerina-liquida-20l-garrafa-de-20-litros-evolt/>
- [64] Paula Bibiana dos Santos Alegria Couto, "Estudo das propriedades mecânicas de compósitos de goma-laca termoformados," 2015.
- [65] ATRIA, "Qué es el ángulo de contacto?" Accessed: Aug. 22, 2024. [Online]. Available: <https://atriainnovation.com/blog/que-es-el-angulo-de-contacto/>

Declaração de Integridade

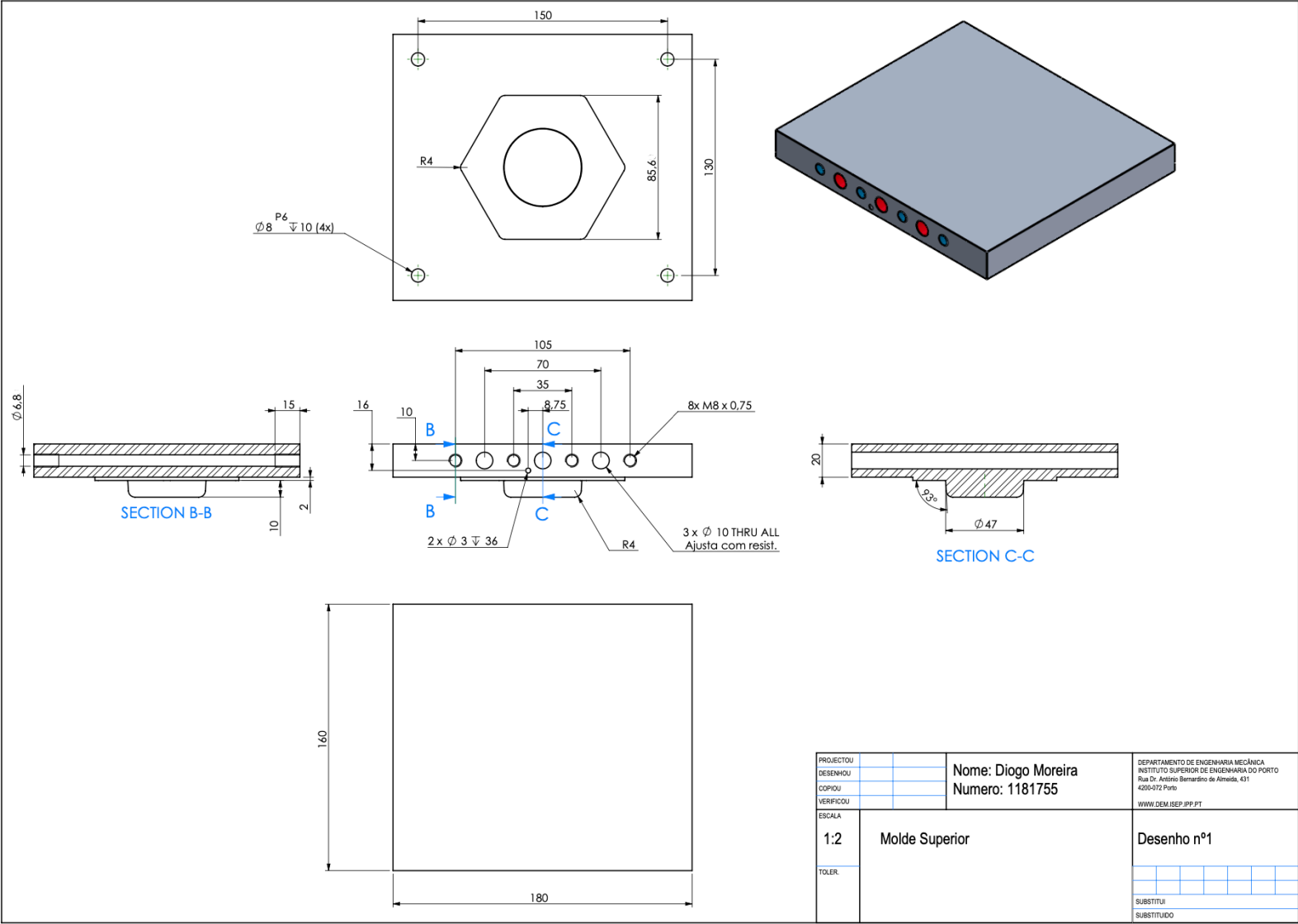
DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração. Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim. Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO. ISEP,

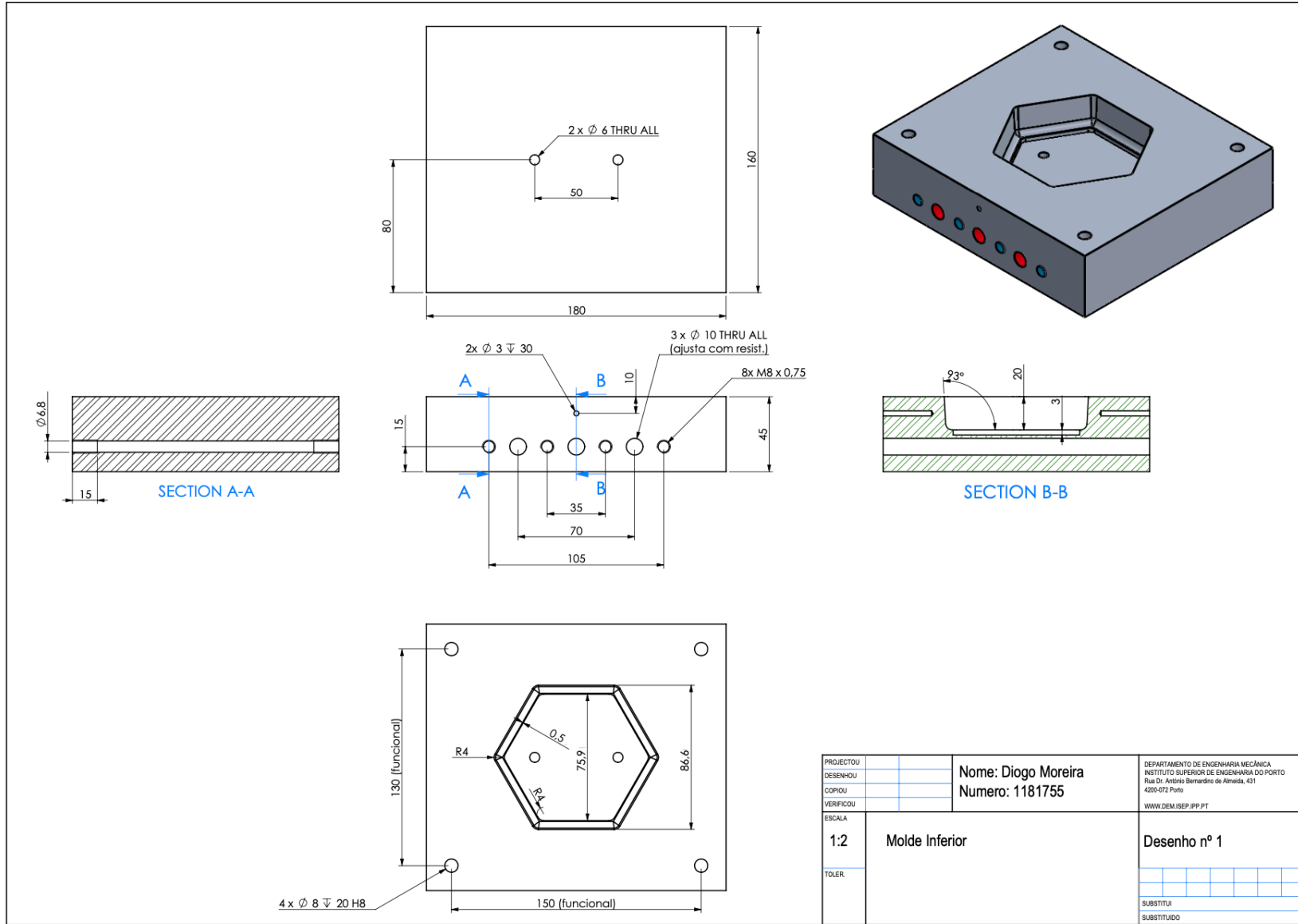
Diogo Miguel Carneiro Moreira

Porto, 13 de Setembro de 2024

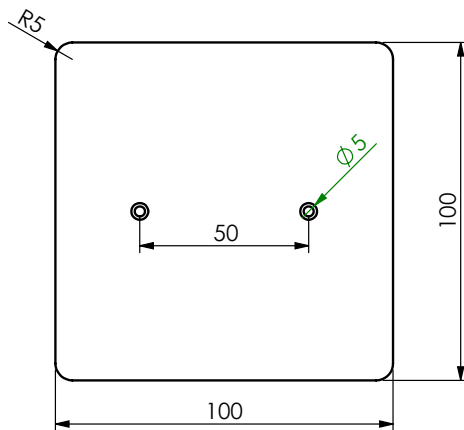
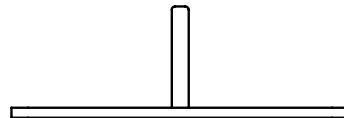
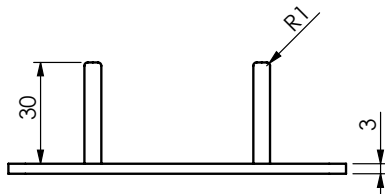
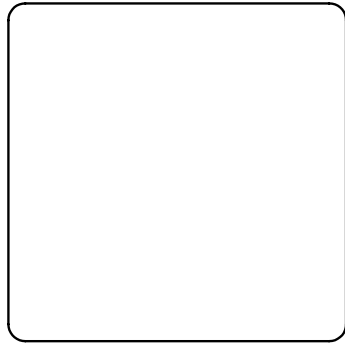
Apêndice A- Desenhos De Definição Do Molde



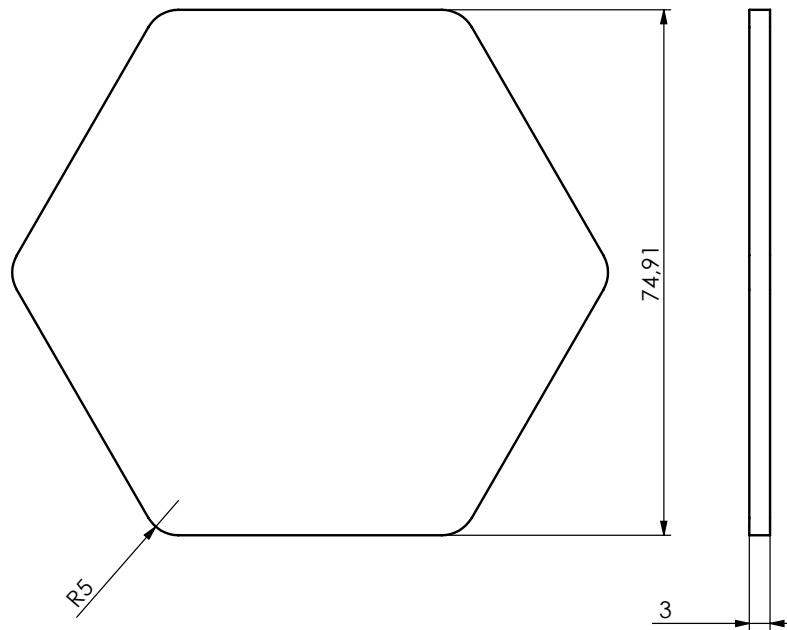
PROJECTO		Nome: Diogo Moreira Numero: 1181755	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. Antonio Bernardino de Almeida, 431 4205-012 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT
DESENHO			
COPOU			
VERIFICOU			
ESCALA	1:2	Molde Superior	Desenho n°1
TOLER.			
			SUBSTITUI
			SUBSTITUO



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



PROJECTOU		Nome: Diogo Moreira Numero: 1181755	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT			
DESENHOU						
COIOU						
VERIFICOU						
ESCALA	1:2	Peça para extração	Desenho nº 1			
TOLER.						
			SUBSTITUI			
			SUBSTITUIDO			



PROJECTOU		Nome: Diogo Moreira Numero: 1181755	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÁNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT																																
DESENHOU																																			
COPIOU																																			
VERIFICOU																																			
ESCALA	1:1	Chapa Fundo Molde	Desenho Nº1																																
TOLER.			<table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td colspan="10">SUBSTITUI</td> </tr> <tr> <td colspan="10">SUBSTITUIDO</td> </tr> </table>														SUBSTITUI										SUBSTITUIDO								
SUBSTITUI																																			
SUBSTITUIDO																																			

Apêndice B- Ensaios Preliminares

	C (%)	G (%)	A (%)	T(°C)	t(min)	P (ton/força)	V (cm ³)	Avaliação
A1	90	5	5	100	30	1	45,24	3
A2	60	20	20	<u>100</u>	<u>30</u>	<u>1</u>	45,24	4
A3	60	20	20	<u>130</u>	<u>30</u>	<u>2</u>	45,24	5
A4	60	20	20	<u>100</u>	<u>35</u>	<u>2</u>	45,24	6
A5	60	20	20	<u>100</u>	<u>35</u>	<u>2</u>	80,42	9
A6	70	<u>10</u>	20	100	35	6	80,42	6
A7	70	<u>0</u>	30	100	35	6	80,42	7
A8	60	<u>0</u>	40	100	35	6	80,42	4
A9	80	<u>0</u>	20	100	35	6	80,42	5
A10	70	30	<u>0</u>	100	35	6	80,42	7
A11	80	20	<u>0</u>	100	35	6	80,42	8
A12	90	10	<u>0</u>	100	35	6	80,42	8
A13	60	20	20	100	35	6	80,42	6

APÊNDICE C- ENSAIOS D

Ensaio de flexão		ESPESSURA	LARGURA	Média Espessura	Média Largura	Módulo de Elasticidade (E)	Média Módulo	Desvio Padrão Módulo	Resistência à flexão (MPa)	Média Flexão		
Provete 1	D1	6,4	21,78	6,45	22,11	11,79	19,40	7,61	0,44	0,32		
		6,29	21,77									
		6,65	22,78									
Provete 2		6,72	18,75	6,65	19,52	-			-		-	
		6,7	19,75									
		6,53	20,05									
Provete 3		6,72	21,48	6,87	21,80	27			-		-	0,19
		6,79	22,58									
		7,11	21,35									
Provete 1	D2	6,16	24,44	6,27	24,16	15,66	20,54	5,02	0,39	0,51		
		6,33	24,05									
		6,31	23,98									
Provete 2		6,27	24,5	6,32	24,37	18,52			-		-	0,53
		6,42	24,34									
		6,27	24,26									
Provete 3		6,2	25,6	6,21	24,74	27,45			-		-	0,62
		6,24	25,12									
		6,19	23,5									
Provete 1	D3	7,02	21,95	7,43	21,77	24,95	30,90	4,29	1,12	1,29		
		7,51	21,83									
		7,76	21,52									
Provete 2		7,31	19,63	7,27	19	32,9			-		-	1,10
		7,23	18,92									
		7,26	18,45									
Provete 3		7,33	22,34	7,15	23,24	34,86			-		-	1,66
		7,2	23,19									
		6,92	24,2									

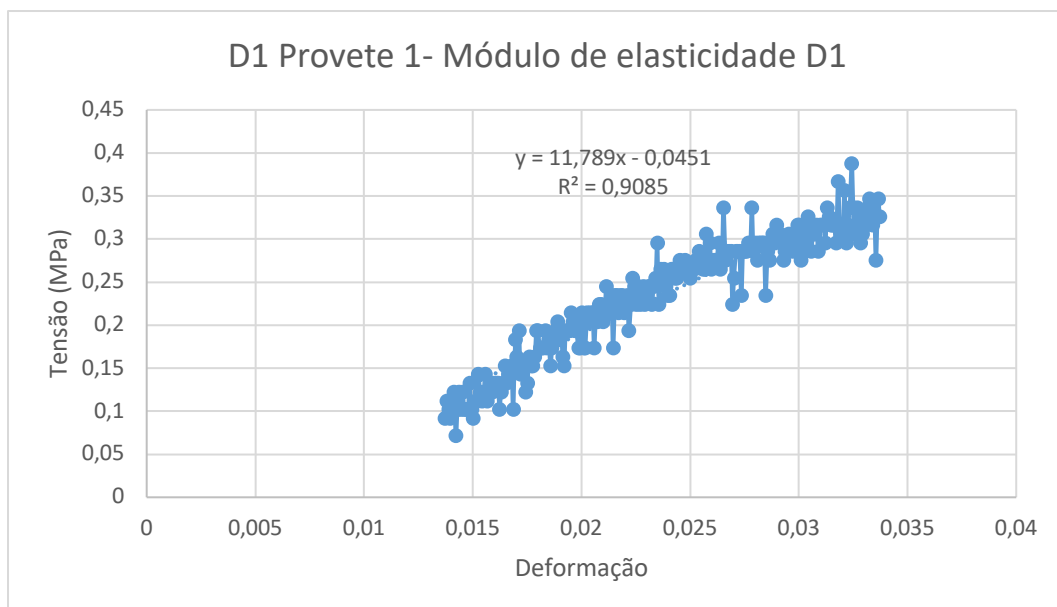
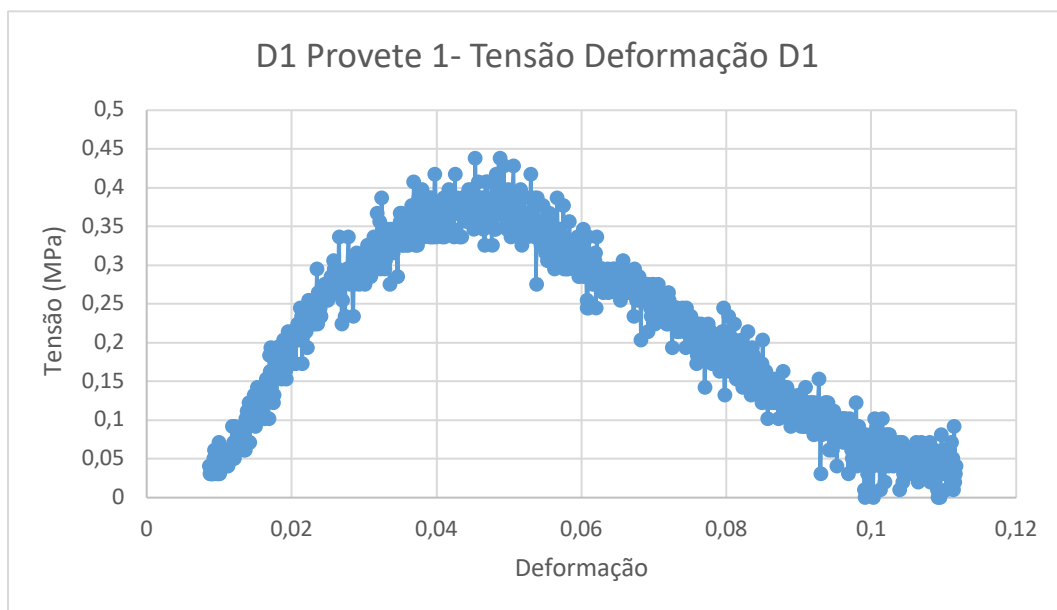
APÊNDICE D- RESUMO ENSAIOS FINAIS 80,100 E 120°C

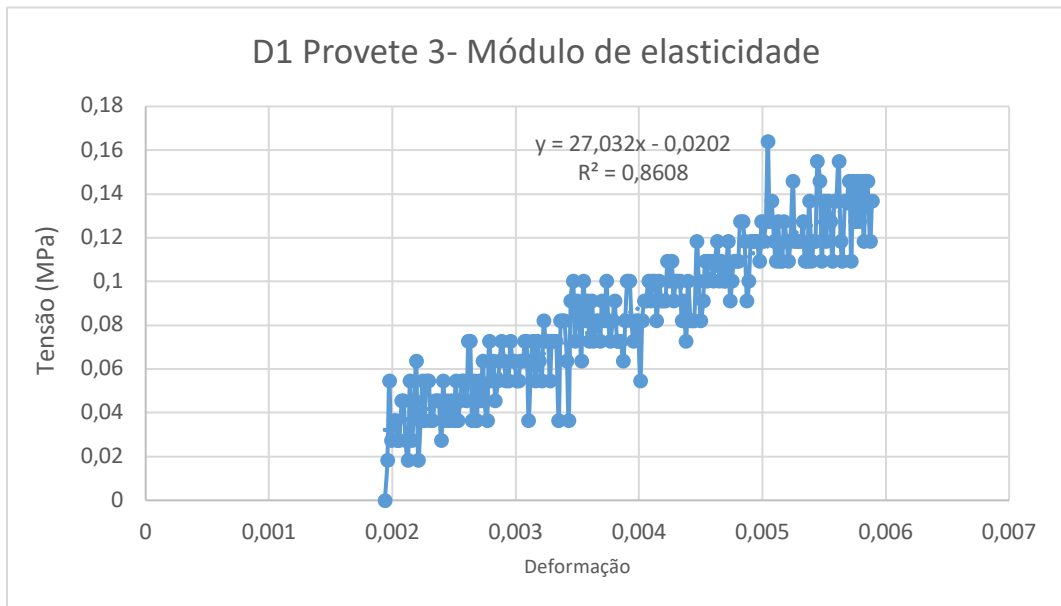
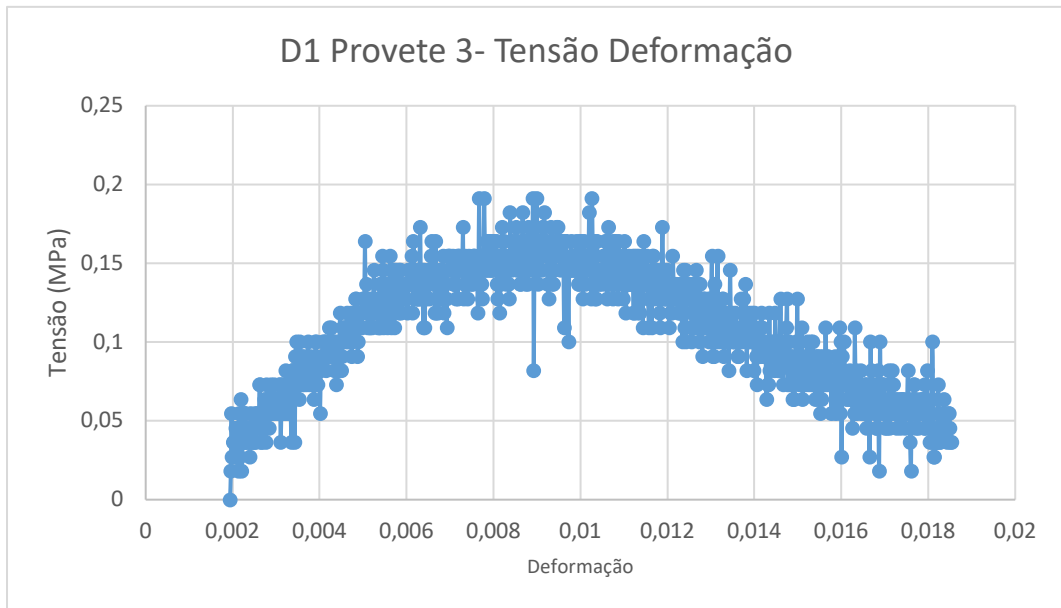
Ensaio de flexão	Composição (C-G)	ESPESSURA	LARGURA	Média Espessura	Média Largura	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média Módulo	Desvio Padrão Módulo	Resistência à flexão (MPa)	Média Flexão	Desvio Padrão Flexão	
Provete 1	F1	70-30 (80°C)	7,91	25,8	8,01	25,49	4,89	4,31	0,65	0,21	0,18	0,02
			8,09	25,9								
			8,04	24,76								
Provete 2			8,14	26,26	8,33	26,20	4,64					
			8,26	27,53								
			8,59	24,8								
Provete 3			8,05	25,57	8,05	23,48	3,41					
			8,01	22,47								
			8,1	22,41								
Provete 1	F2	80-20 (80°C)	6,92	26,31	6,92	25,13	21,418	20,38	11,25	0,44	0,44	0,15
			6,94	25,2								
			6,91	23,88								
Provete 2			6,35	25,09	6,58	24,63	6,12					
			7	24,67								
			6,4	24,12								
Provete 3			6,38	25,24	6,40	24,43	33,616					
			6,23	23,94								
			6,58	24,1								
Provete 1	F3	90-10 (80°C)	7,74	24,47	7,93	25,42	29,48	40,88	11,11	1,02	1,40	0,46
			8,03	25,1								
			8,01	26,68								
Provete 2			7,56	22,22	7,69	22,26	55,94					
			7,53	22,44								
			7,98	22,13								
Provete 3			7,48	22,67	7,77	23,95	37,205					
			8,27	22,73								
			7,57	26,46								
Provete 1	F4	100-0 (80°C)	6,52	23,28	6,66	23,35	371,1	311,30	59,80	5,71	3,88	1,71
			6,75	22,71								
			6,71	24,05								
Provete 2			6,6	23,7	6,72	24,39	251,5					
			7	24,36								
			6,56	25,11								
Provete 3			6,47	26,15	6,53	24,97	550,3					
			6,48	24,72								
			6,64	24,05								

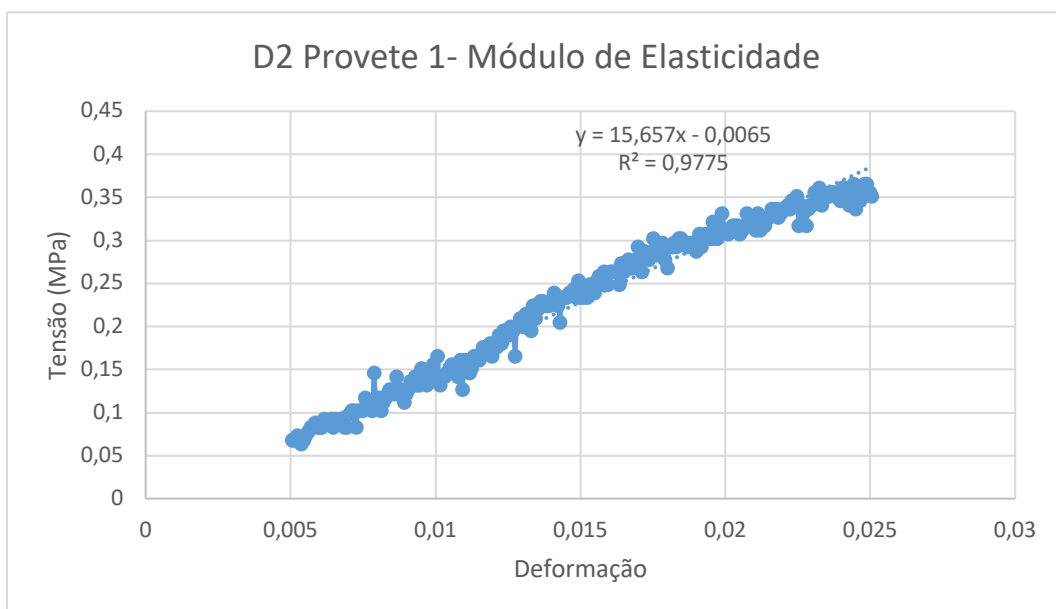
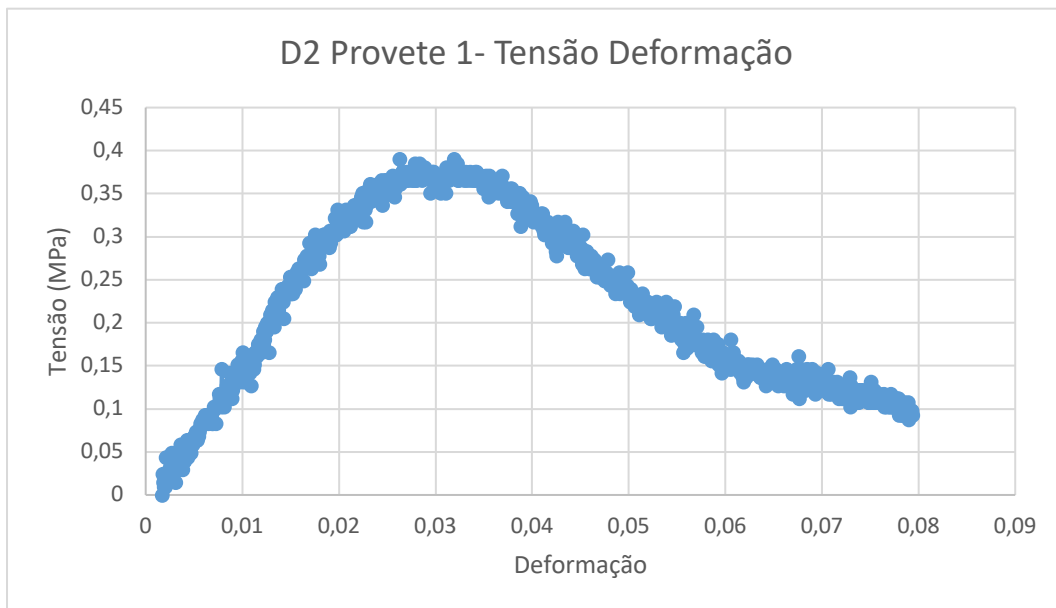
Ensaio de flexão		Composição (C-G)	ESPESSURA	LARGURA	Média Espessura	Média Largura	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média Módulo	Desvio Padrão Módulo	Resistência à flexão (MPa)	Média Flexão	Desvio Padrão Flexão
Provete 1	F5	70-30 (100°C)	7,67	25,03	7,49	24,54	35,6	30,76	5,30	1,33	1,04	0,20
			7,46	24,87								
			7,34	23,73								
Provete 2			7,17	26,45	7,28	25,07	33,3					
			7,47	24,61								
			7,2	24,14								
Provete 3			7,36	23,33	7,45	24,29	23,39					
			7,76	24,01								
			7,23	25,54								
Provete 1	F6	80-20 (100°C)	7,43	23,22	7,23	23,41	167,54	268,88	72,87	4,68	5,42	0,53
			7,65	23,4								
			6,61	23,62								
Provete 2			6,77	24,46	6,68	24,62	335,8					
			6,64	24,81								
			6,62	24,59								
Provete 3			6,65	22,95	6,51	23,66	303,29					
			6,44	24,11								
			6,44	23,93								
Provete 1	F7	90-10 (100°C)	7,02	24,9	7,02	25,60	755,21	589,85	131,73	7,36	6,83	0,78
			7,07	24,99								
			6,96	26,91								
Provete 2			6,87	23,88	6,97	24,60	432,87					
			7,15	24,41								
			6,88	25,5								
Provete 3			6,58	24,85	6,70	26,18	581,46					
			6,72	25,61								
			6,79	28,07								
Provete 1	F8	100-0 (100°C)	5,71	25,41	5,63	24,60	689,55	942,08	227,00	7,3	8,74	1,02
			5,77	24,5								
			5,42	23,9								
Provete 2			5,41	23,13	5,45	22,97	1240					
			5,52	23,05								
			5,42	22,73								
Provete 3			5,33	25,38	5,51	25,51	896,69					
			5,82	25,6								
			5,38	25,56								

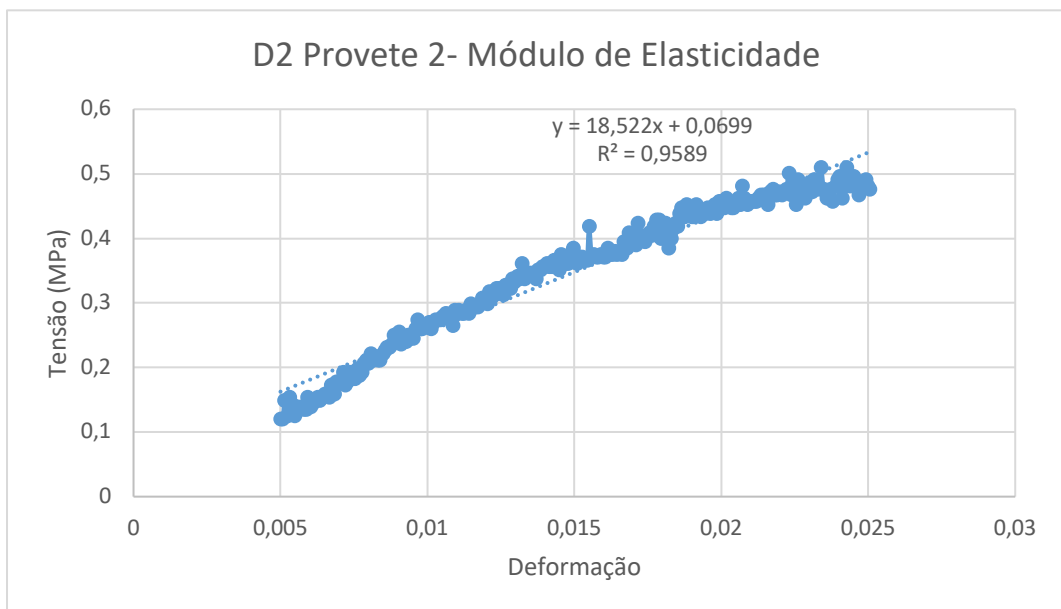
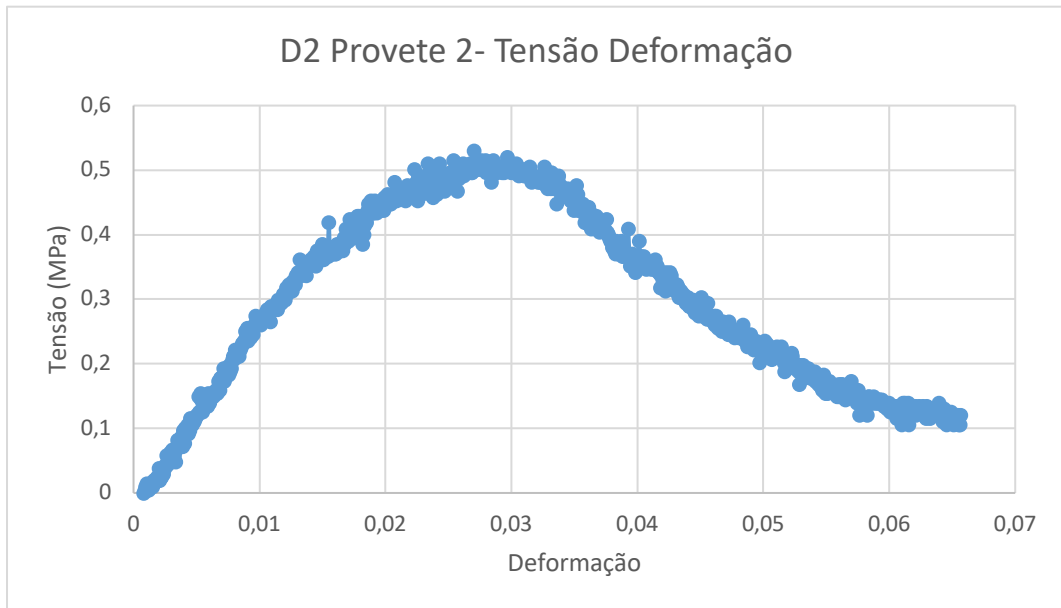
Ensaio de flexão		Composição (C-G)	ESPESSURA	LARGURA	Média Espessura	Média Largura	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média Módulo	Desvio Padrão Módulo	Resistência à flexão (MPa)	Média Flexão	Desvio Padrão Flexão
Provete 1	F9	70-30 (120°C)	6,34	24,41	6,31	24,65	59,123	64,17	17,98	7,57	3,57	2,85
			6,36	24,34								
			6,24	25,21								
Provete 2			6,57	23,54	6,40	23,89	88,27					
			6,26	24,52								
			6,38	23,62								
Provete 3			6,12	24,42	6,20	25,36	45,11					
			6,25	24,85								
			6,22	26,82								
Provete 1	F10	80-20 (120°C)	5,46	23,35	5,43	24,45	508,45	346,78	116,44	7,57	5,93	1,33
			5,46	24,41								
			5,37	25,6								
Provete 2			5,39	21,44	5,37	22,43	293					
			5,32	22,48								
			5,41	23,37								
Provete 3			5,29	21,64	5,37	21,80	238,88					
			5,35	21,8								
			5,47	21,95								
Provete 1	F11	90-10 (120°C)	6,42	24,91	6,65	23,92	179,32	193,62	15,38	3,67	4,17	0,36
			6,92	23,56								
			6,6	23,3								
Provete 2			6,68	22,02	6,50	22,34	186,59					
			6,38	22								
			6,45	23,01								
Provete 3			6,22	24,3	6,29	24,10	214,96					
			6,34	24,01								
			6,32	24								
Provete 1	F12	100-0 (120°C)	5,82	22,42	5,78	22,10	508	845,12	275,16	10	9,90	0,14
			5,87	22,1								
			5,66	21,77								
Provete 2			5,65	22,48	5,73	23,65	1182					
			5,82	23,74								
			5,73	24,72								
Provete 3			5,93	24,8	5,90	25,80	845,35					
			5,92	26,23								
			5,85	26,38								

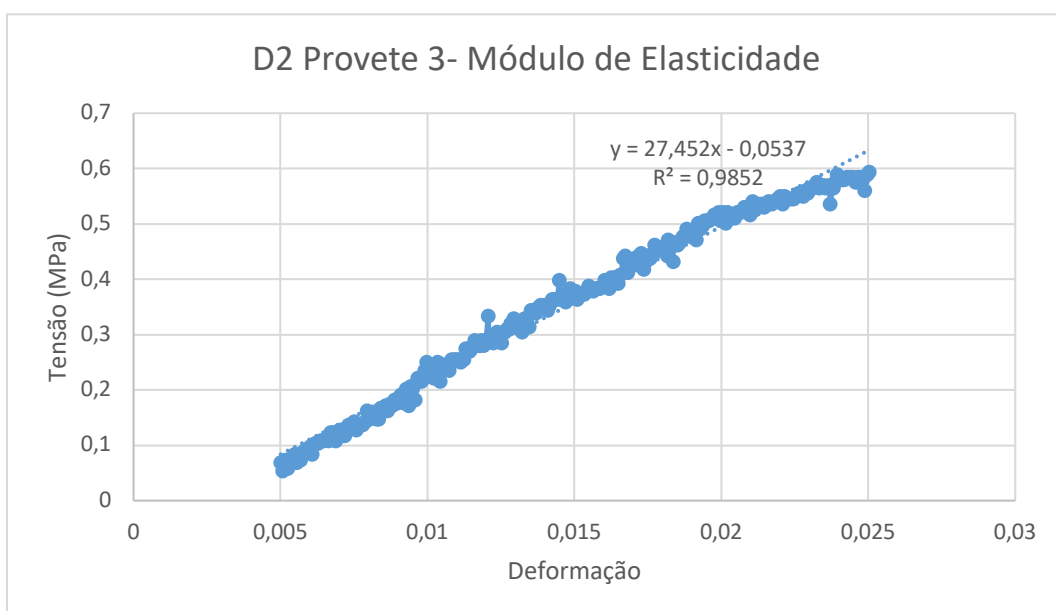
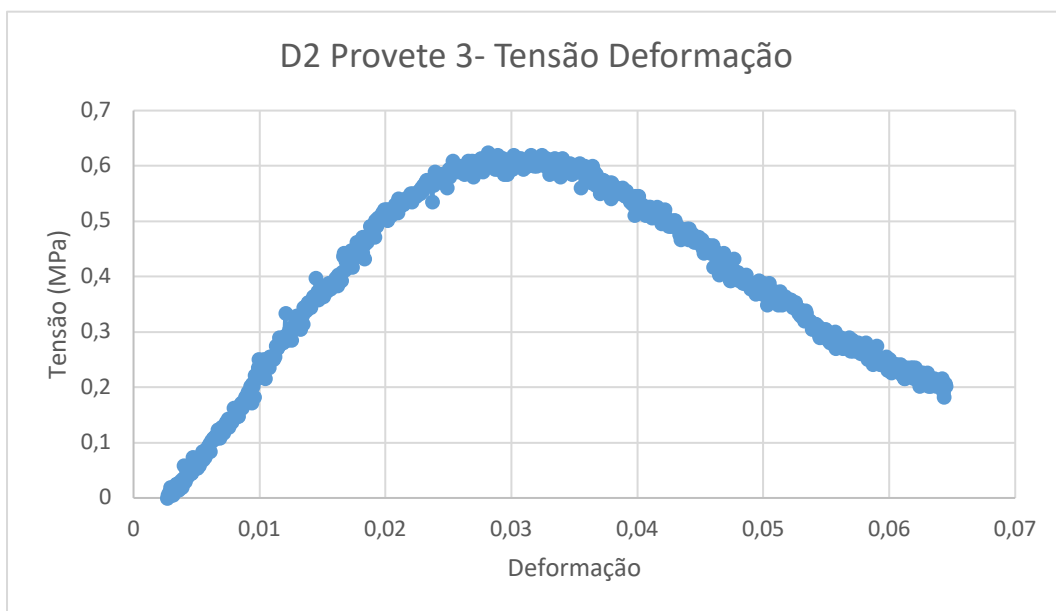
APÊNDICE E- GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO

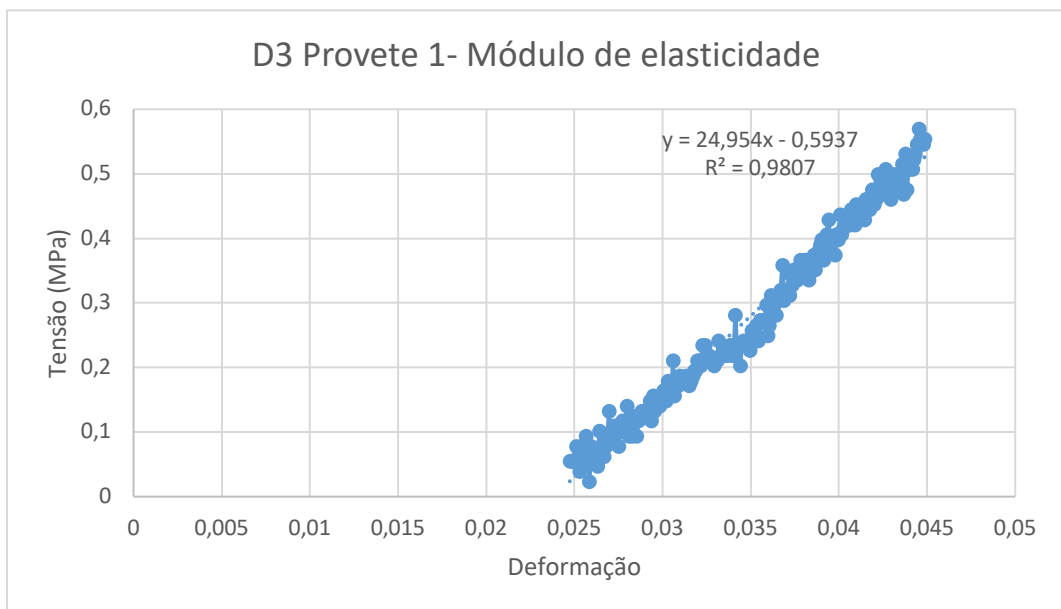
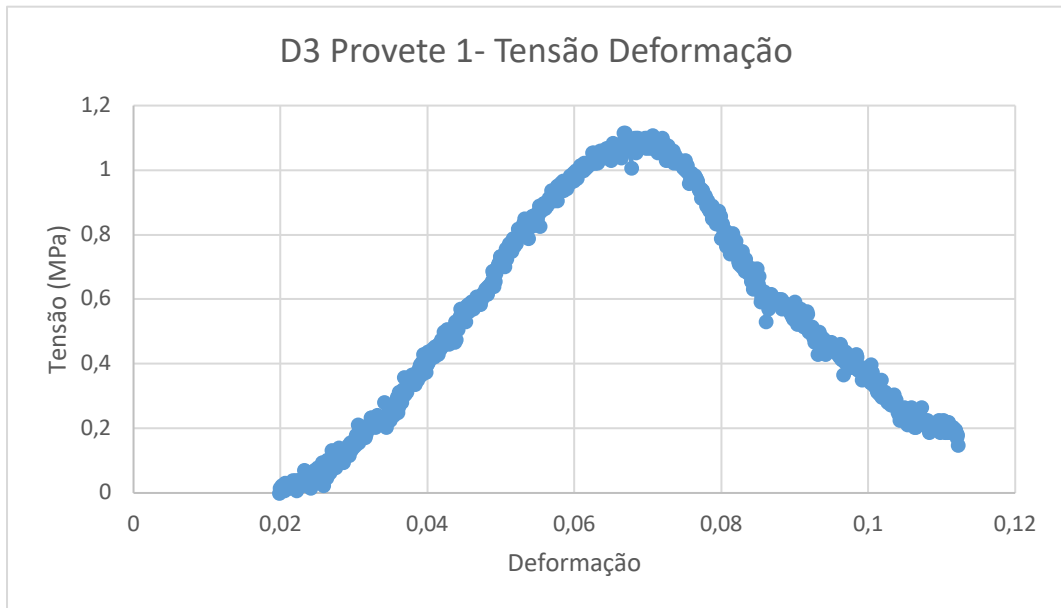


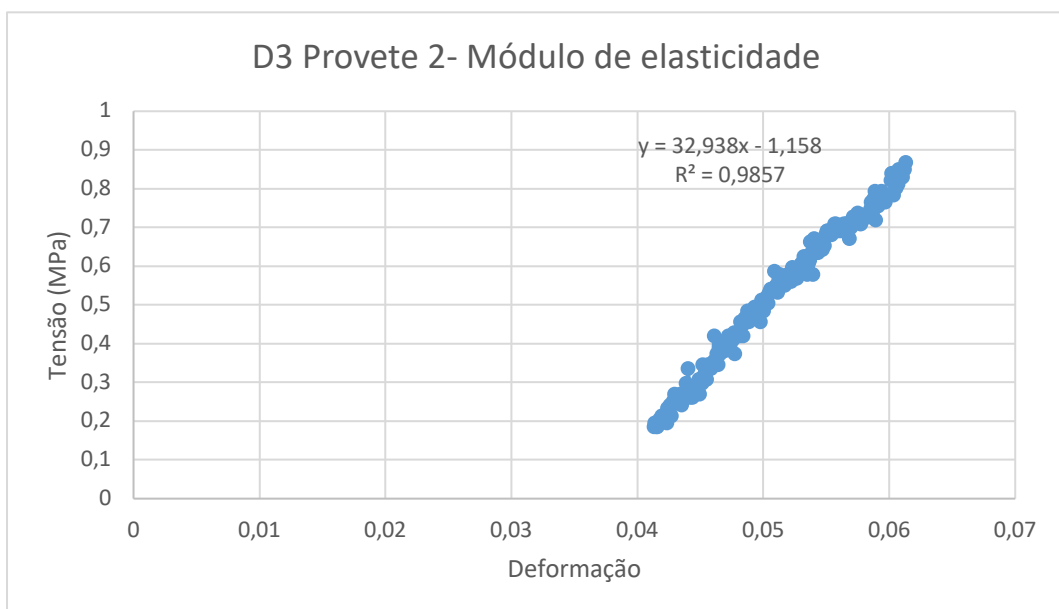
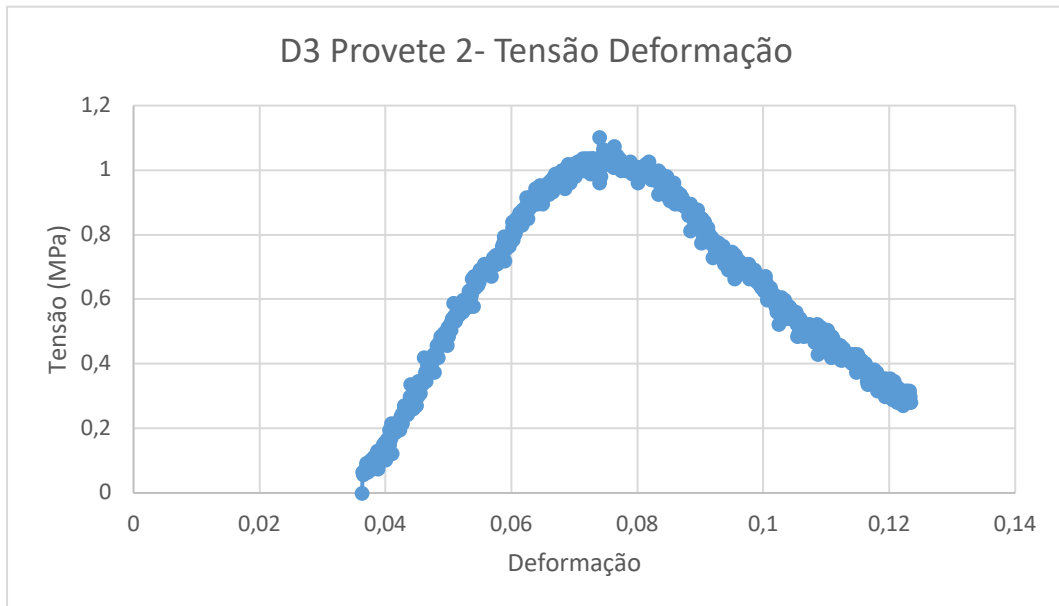


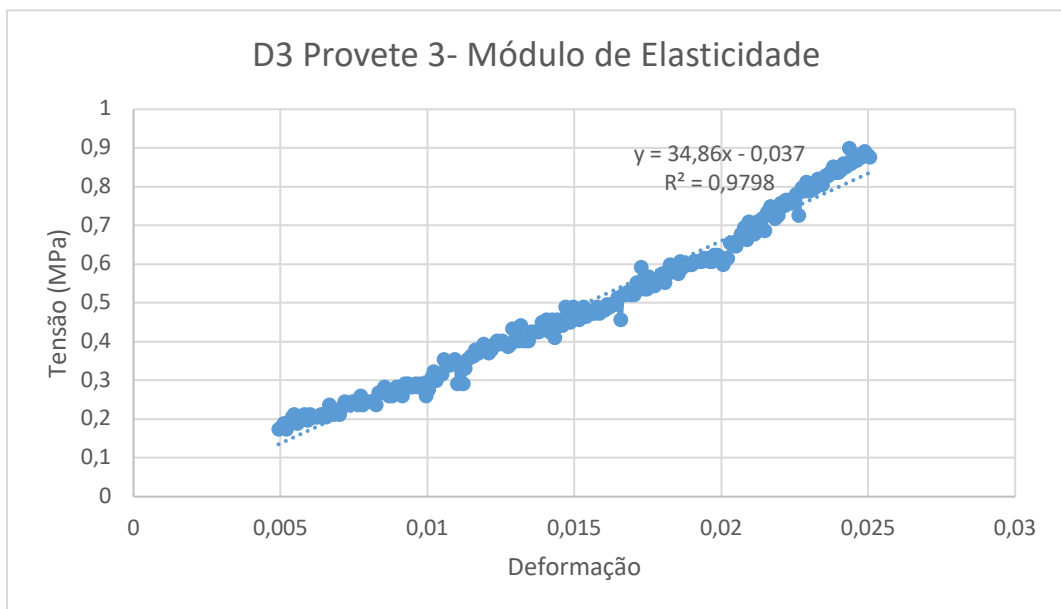
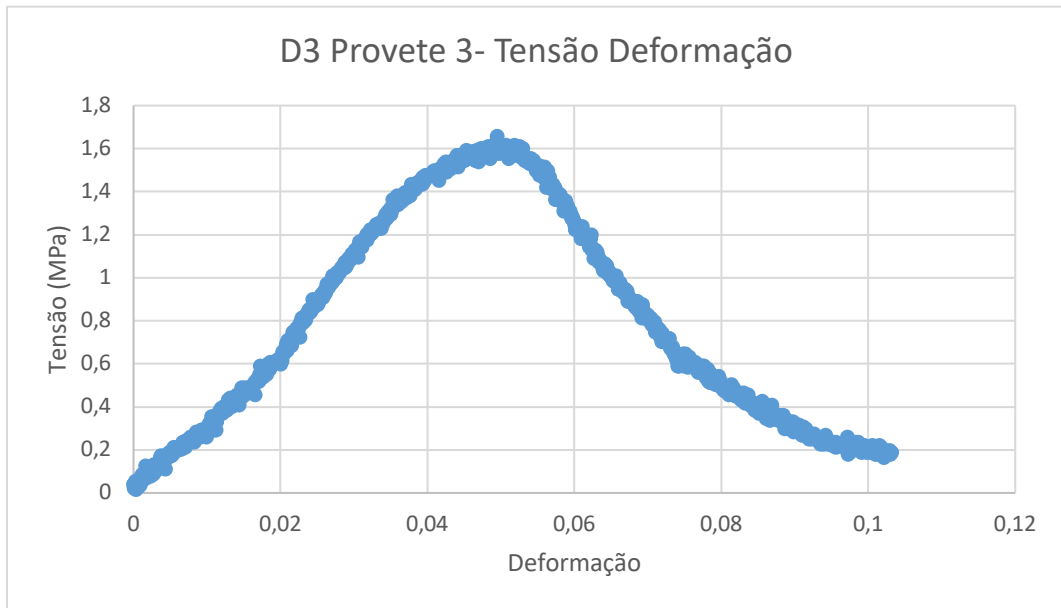


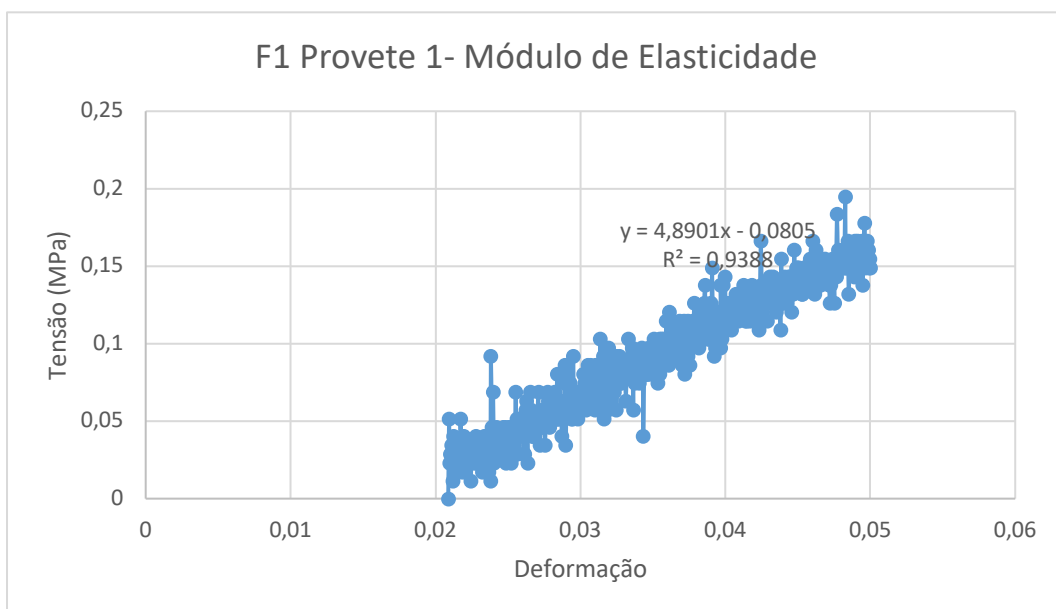
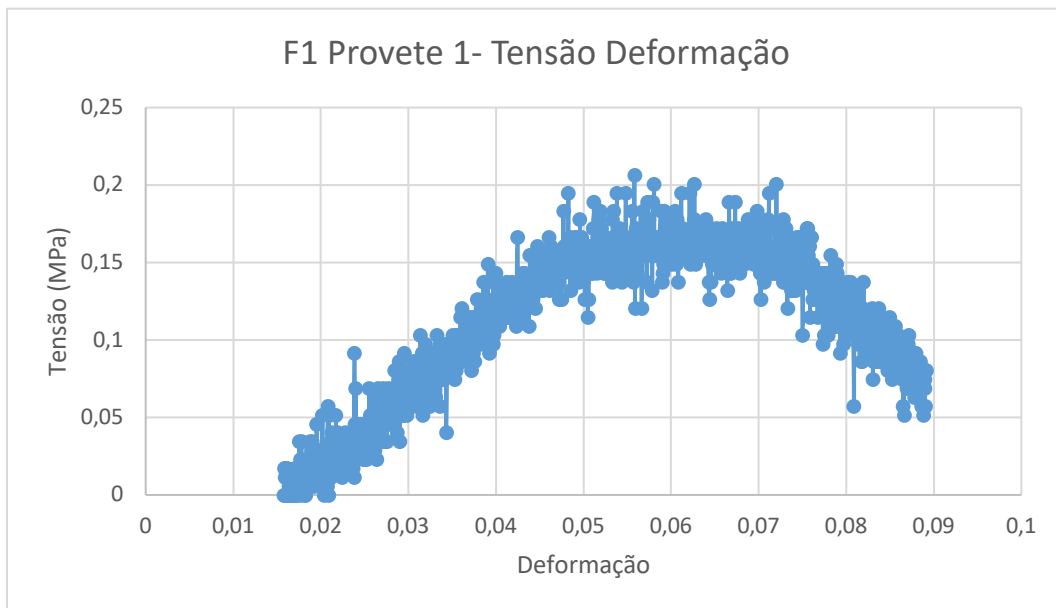


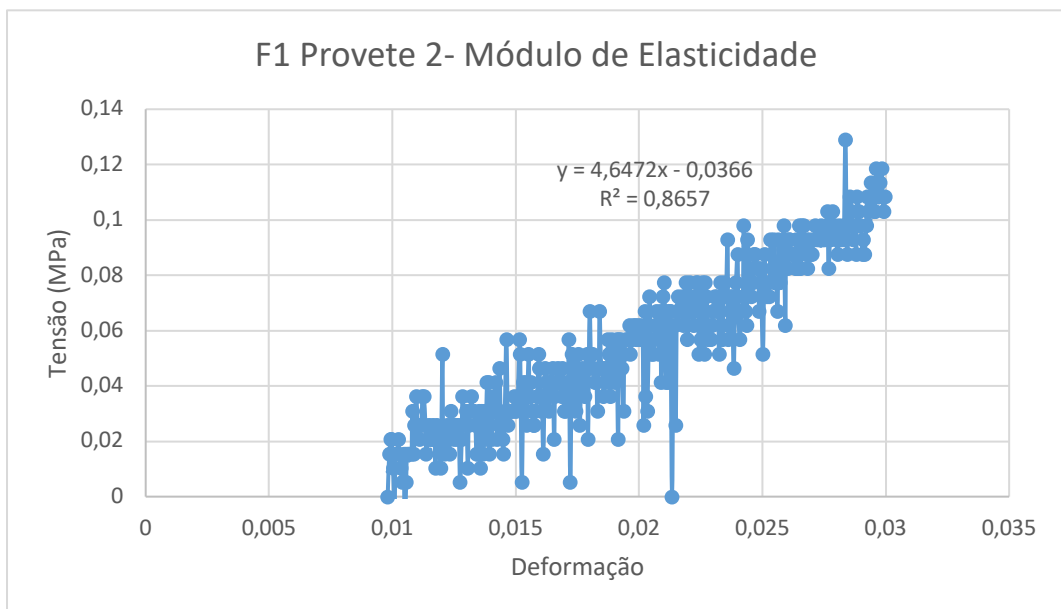
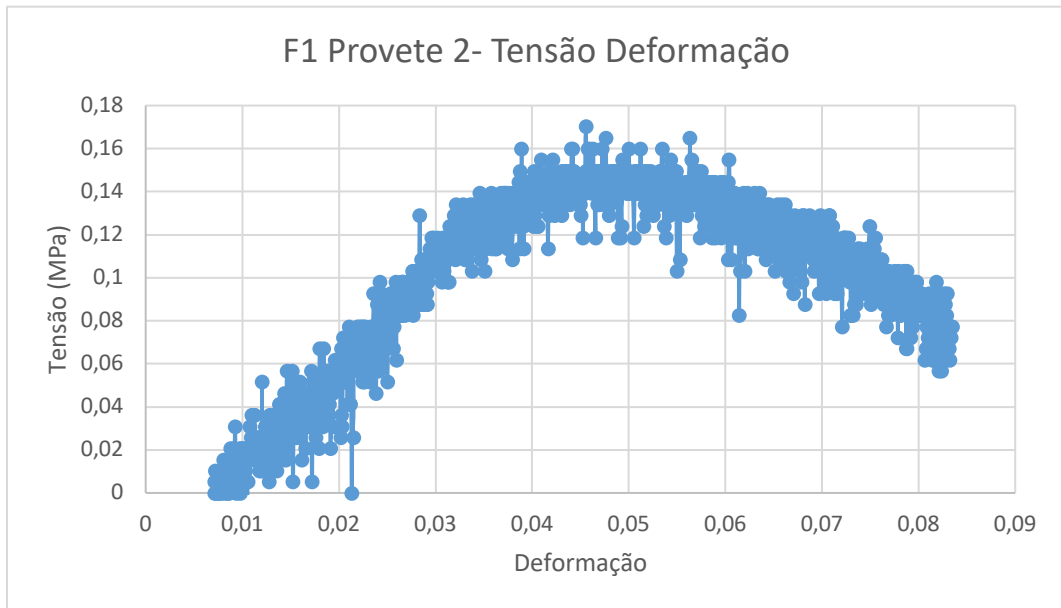


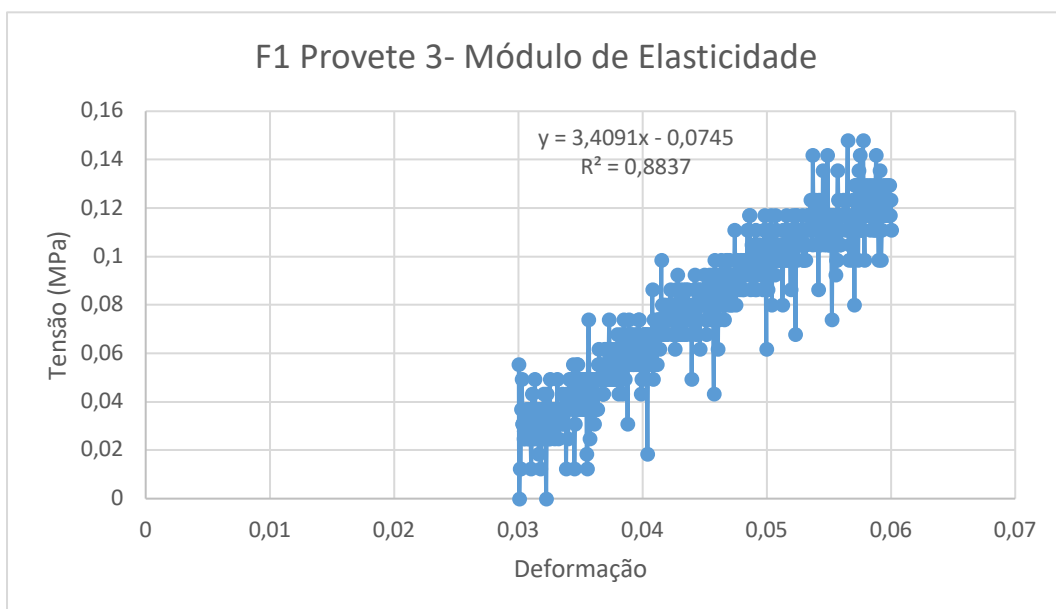
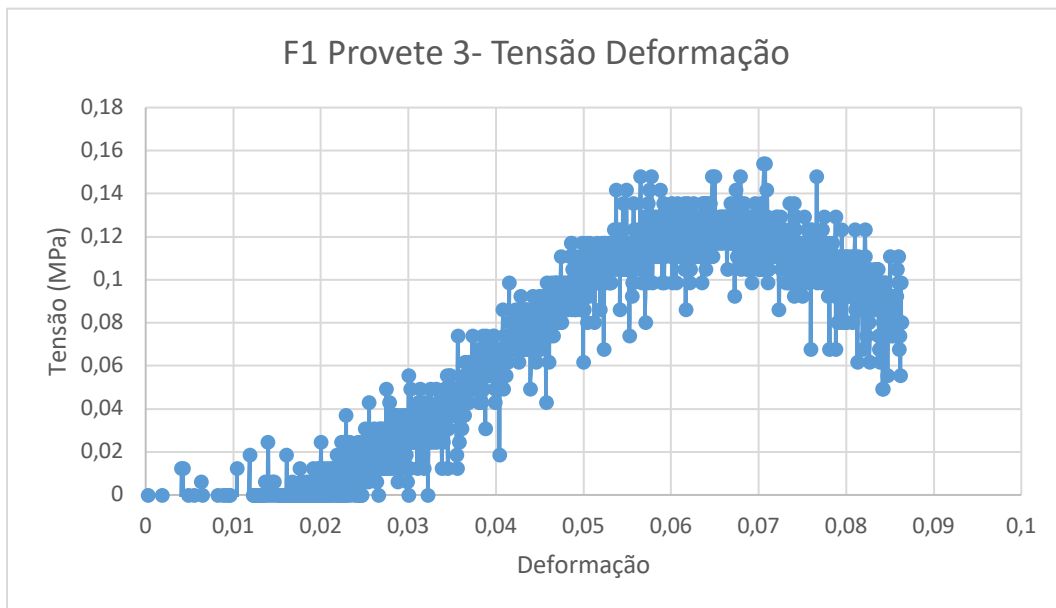


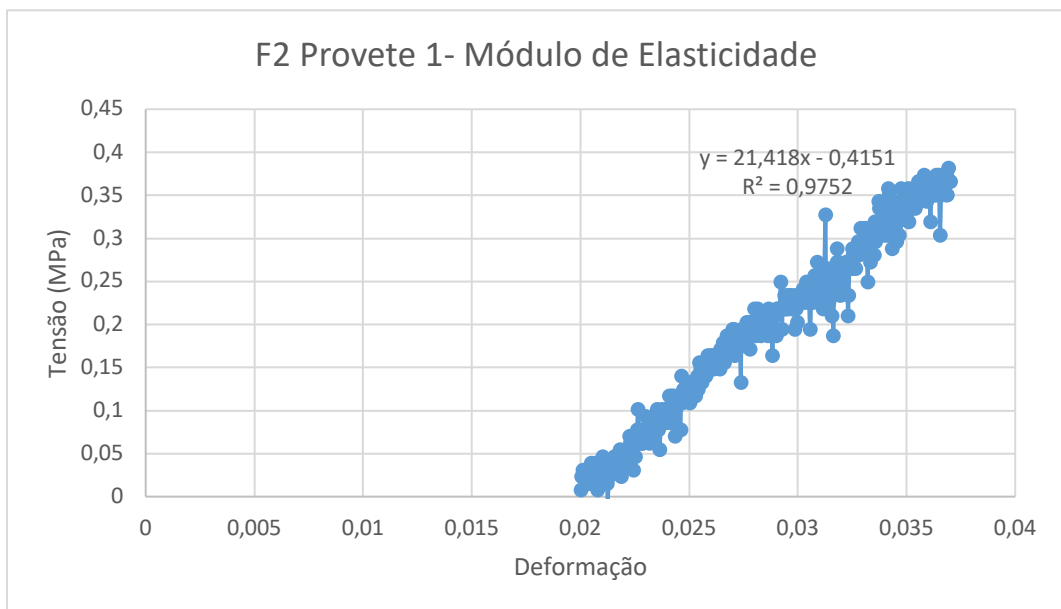
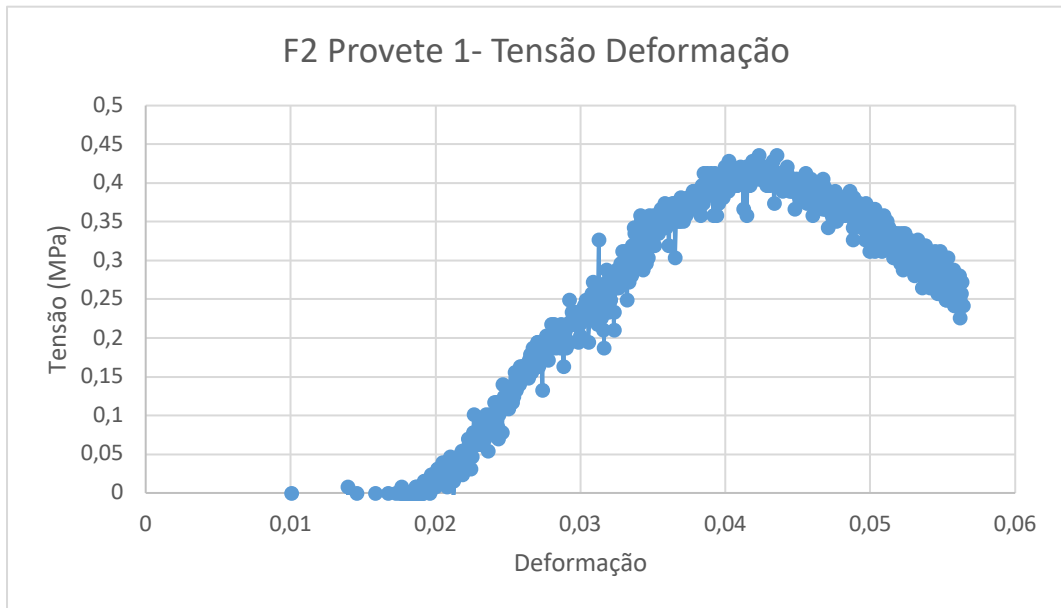


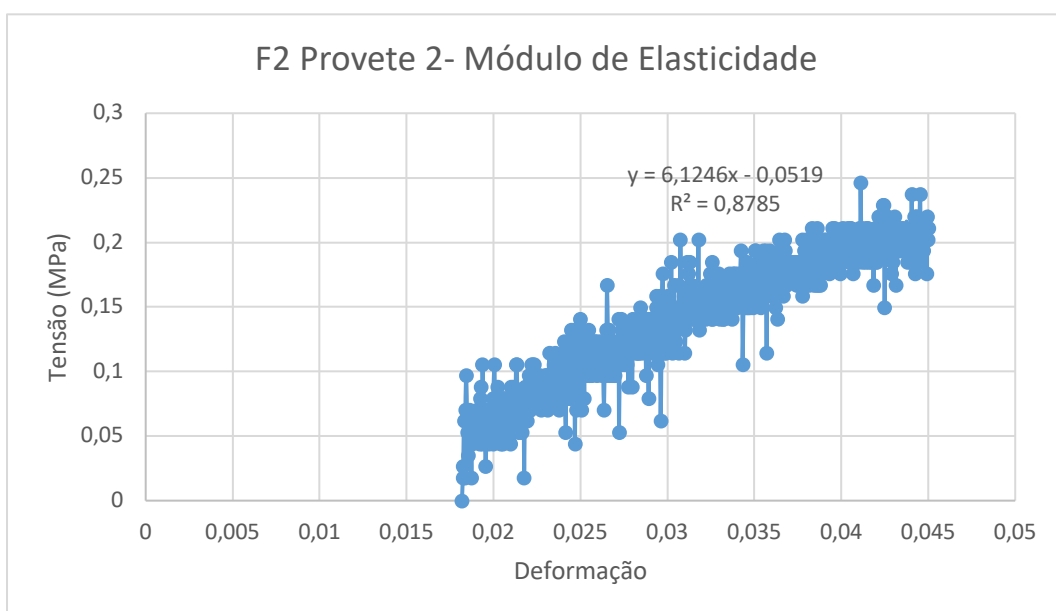
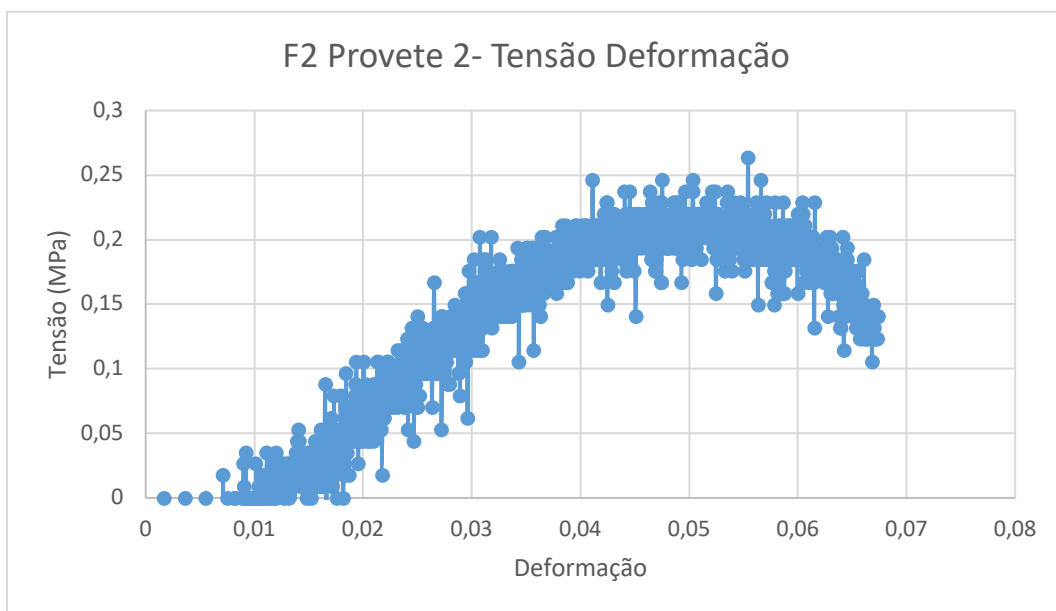


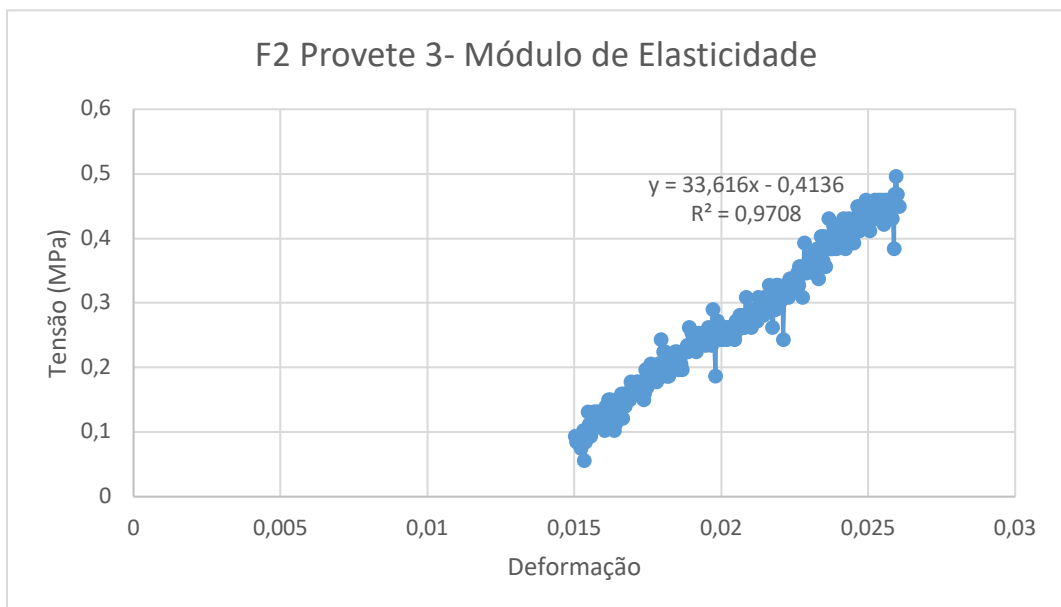
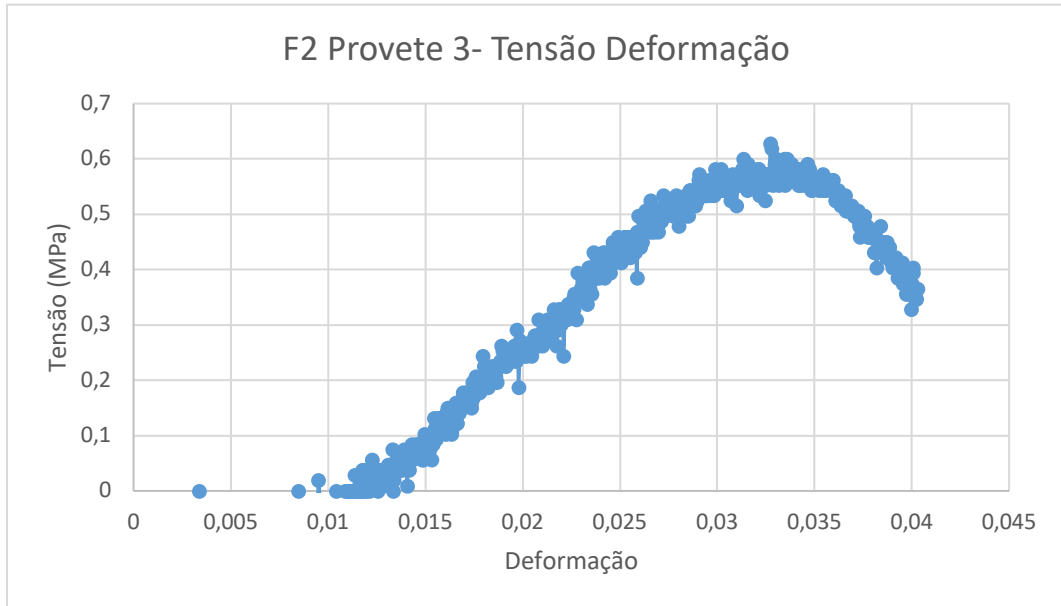


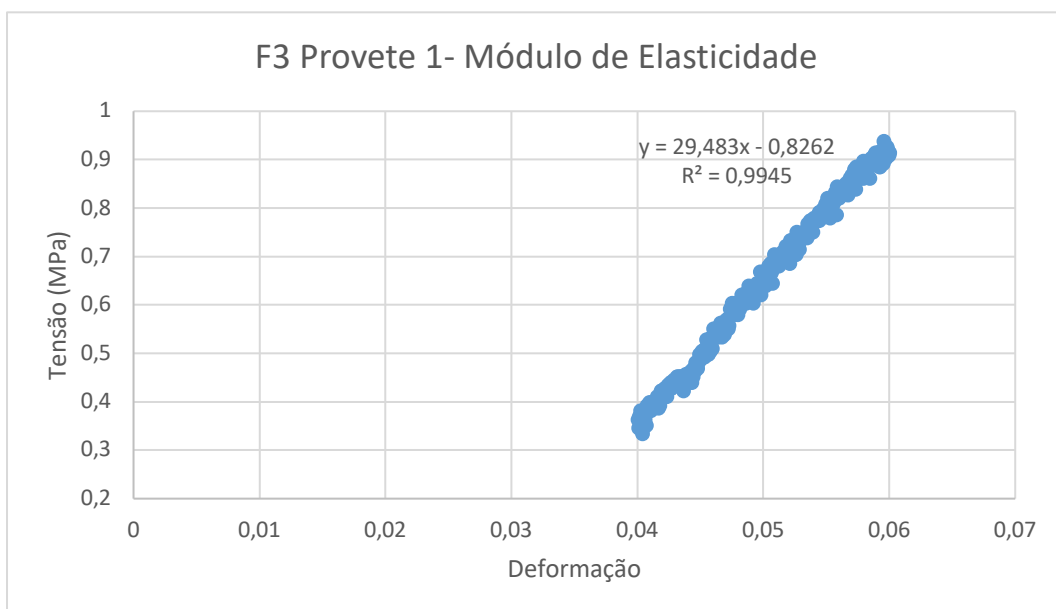
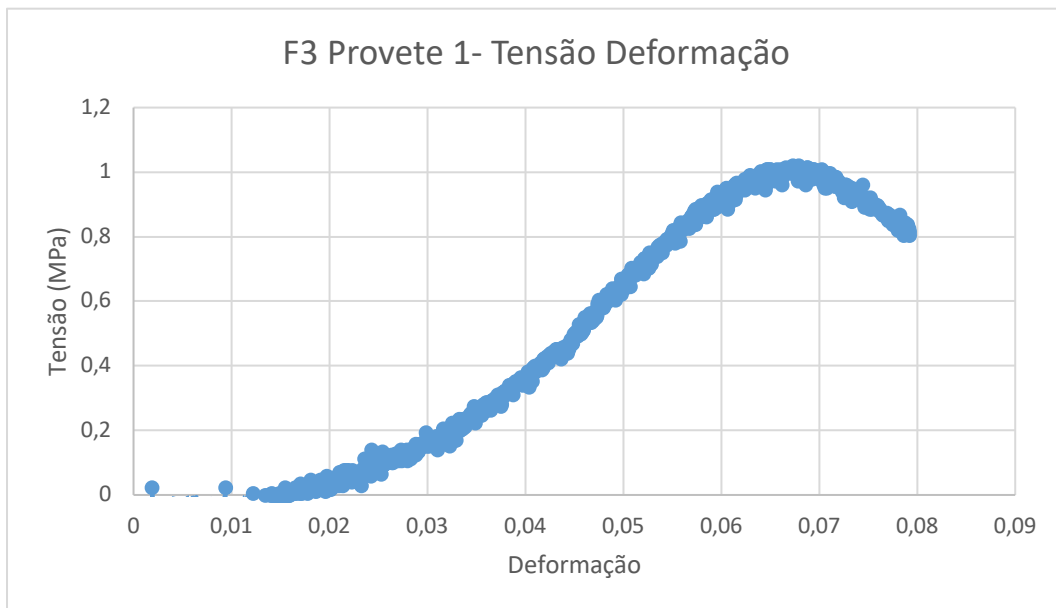


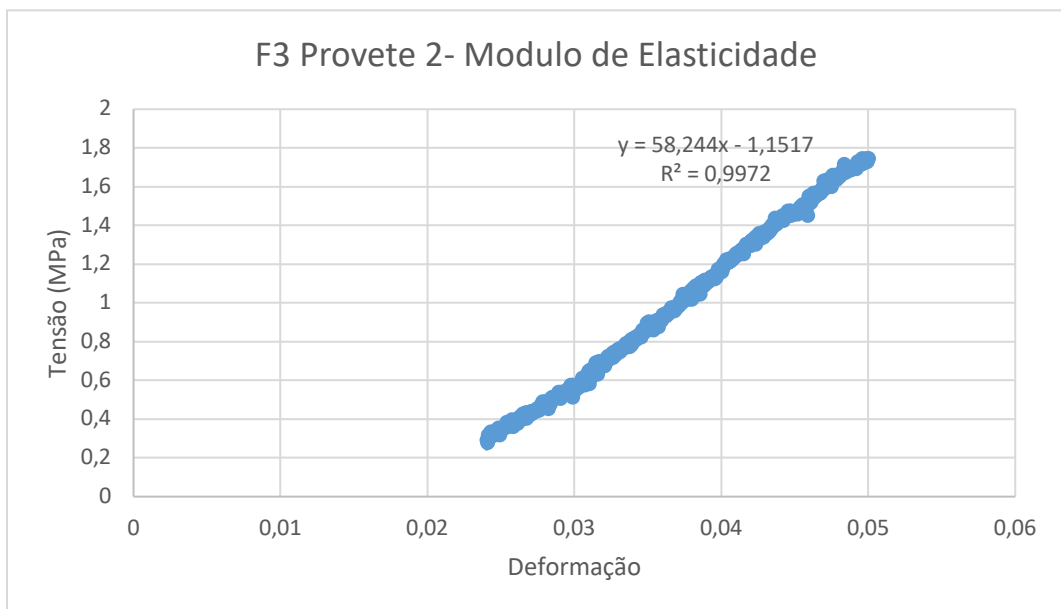
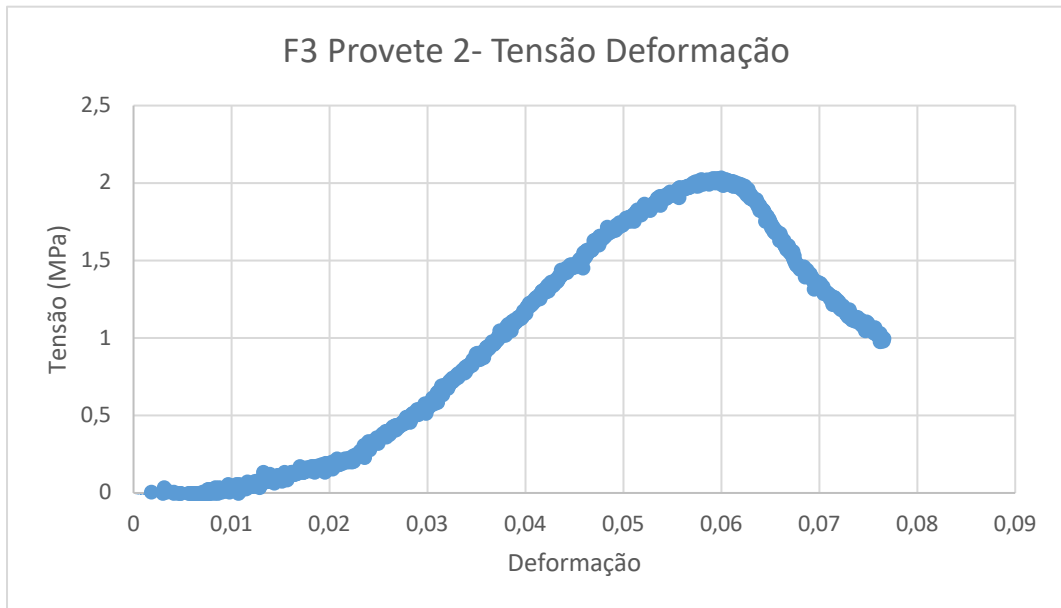


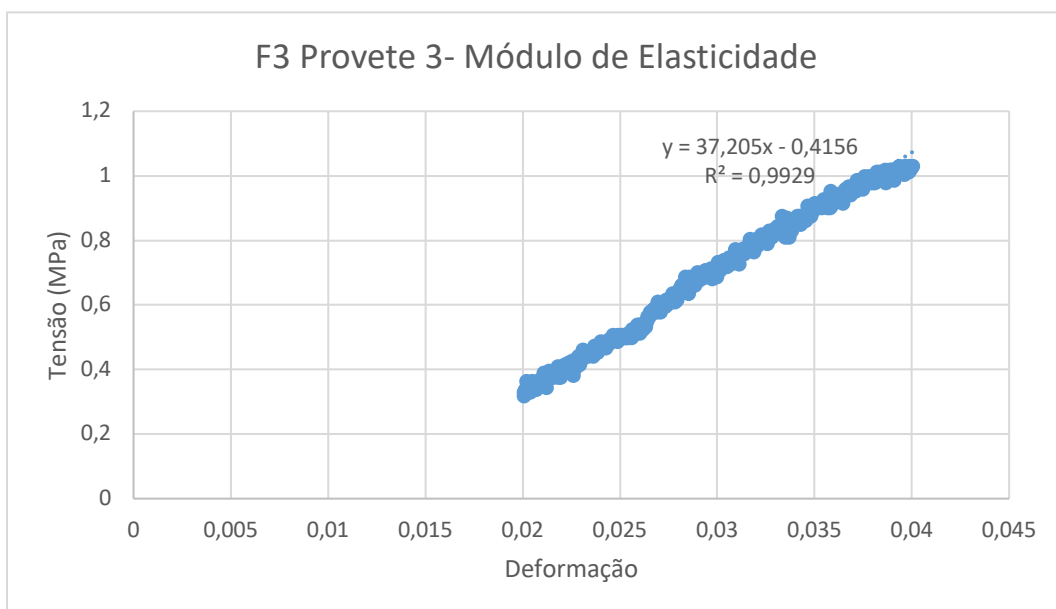
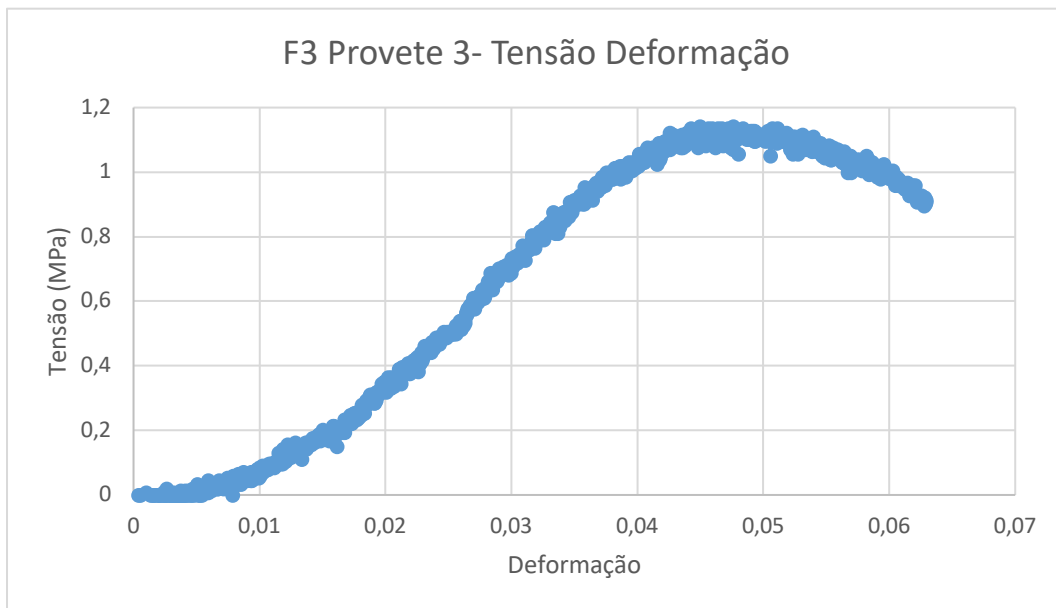


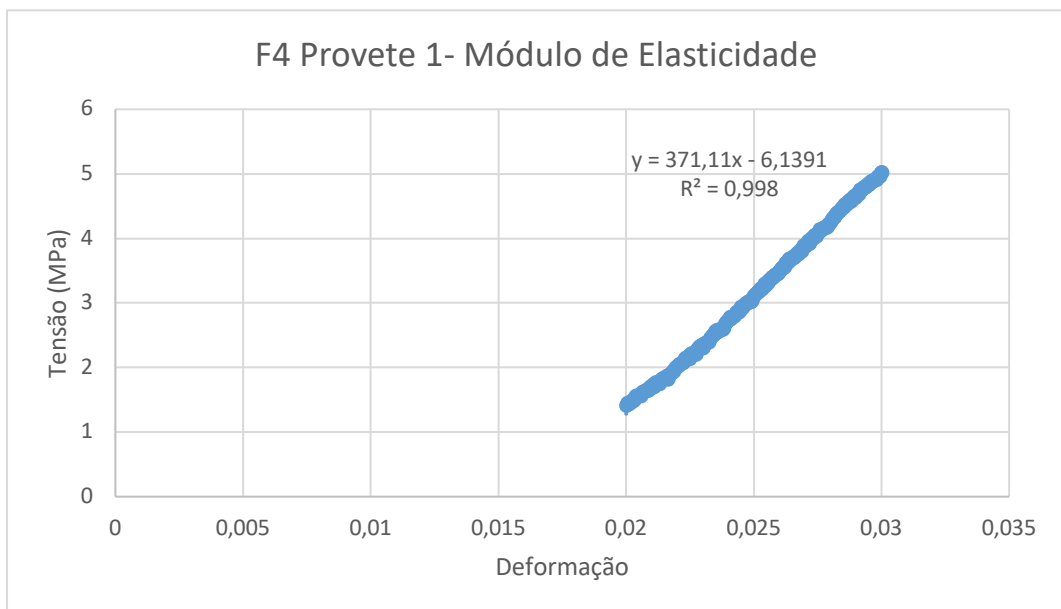
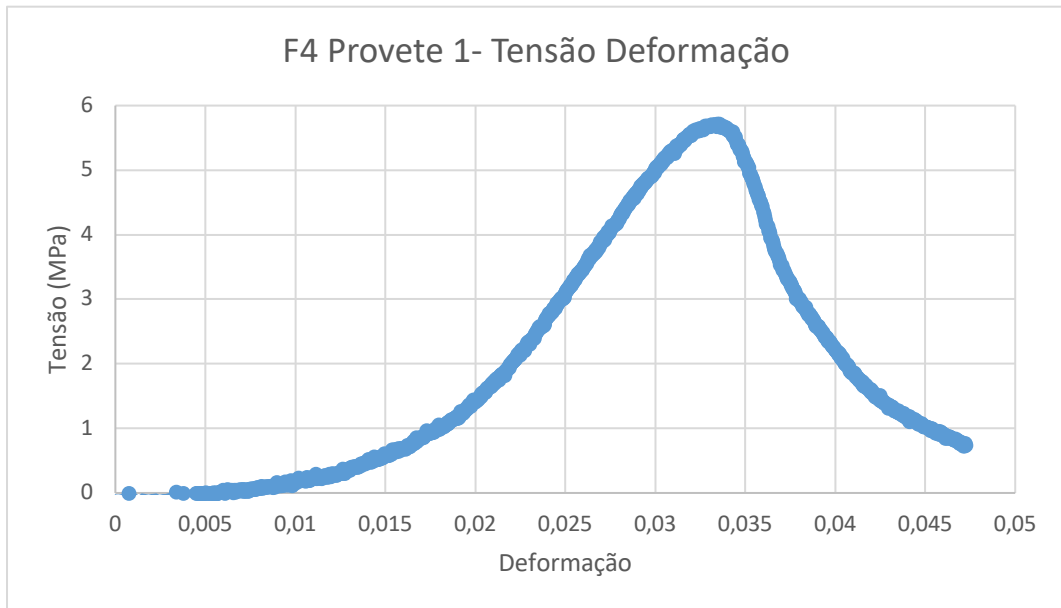


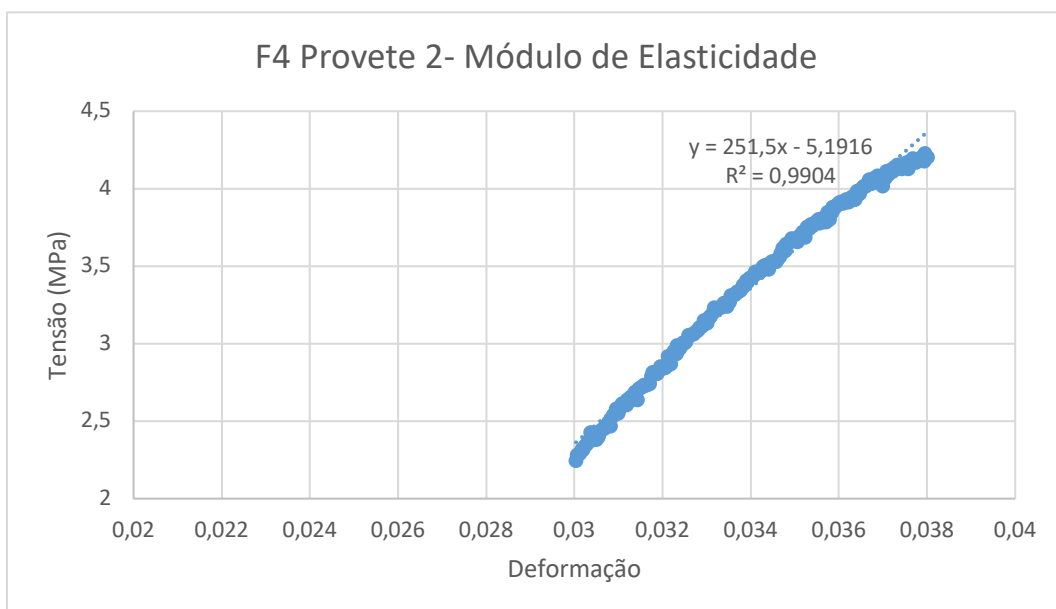
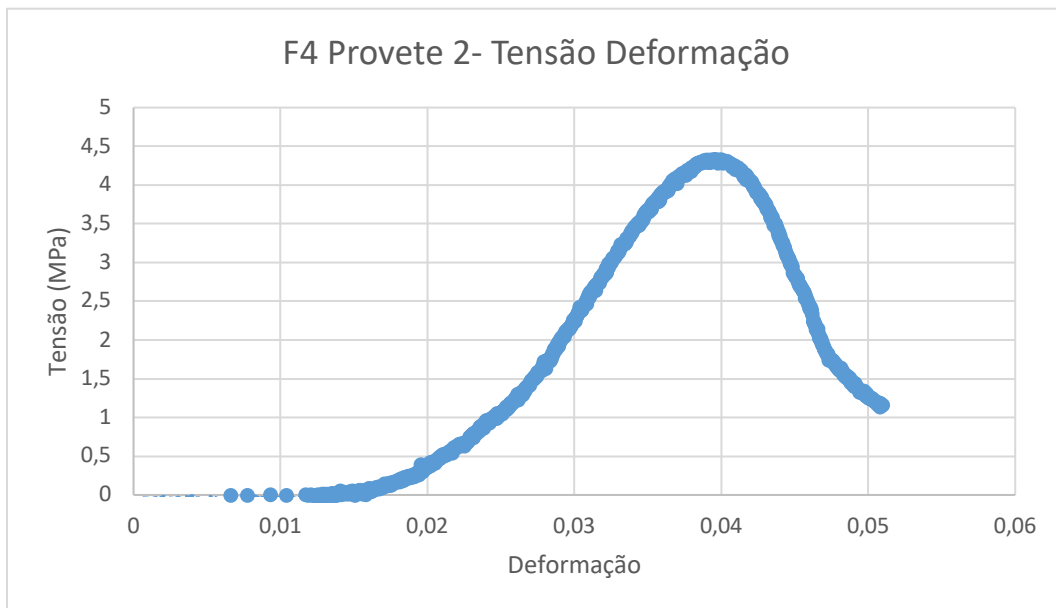


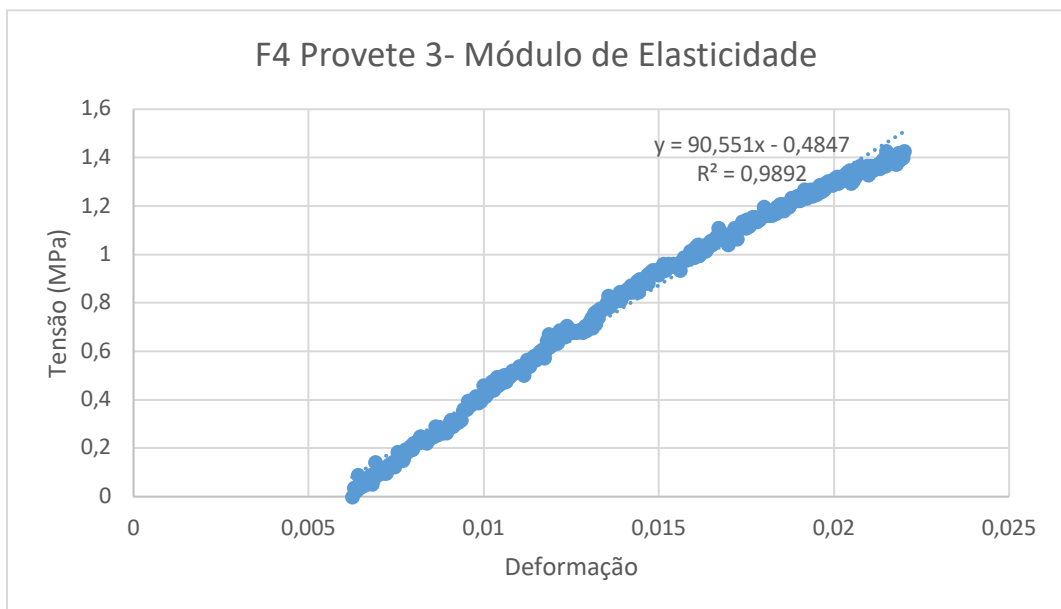
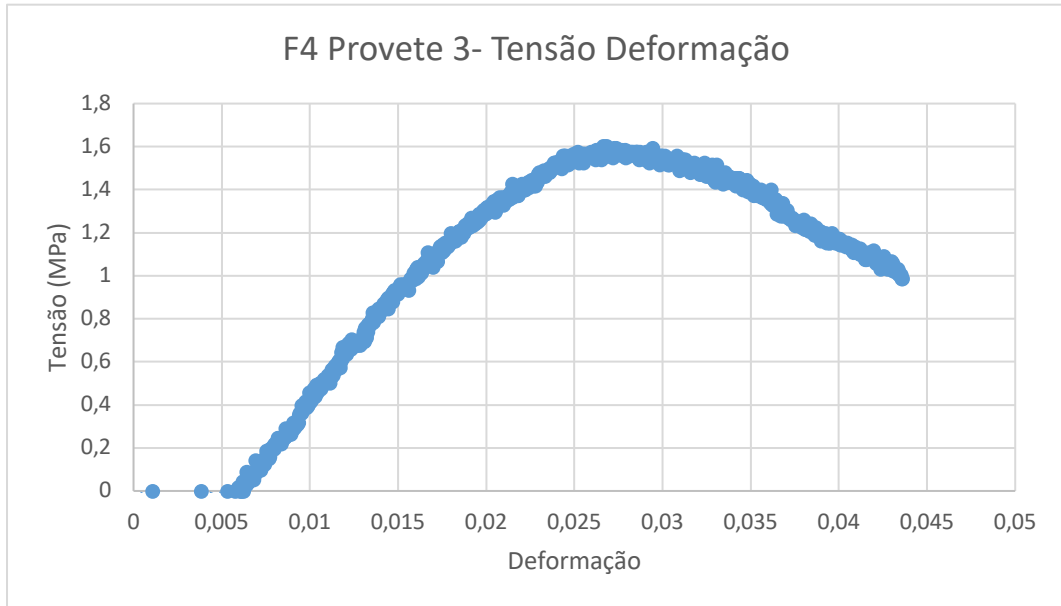


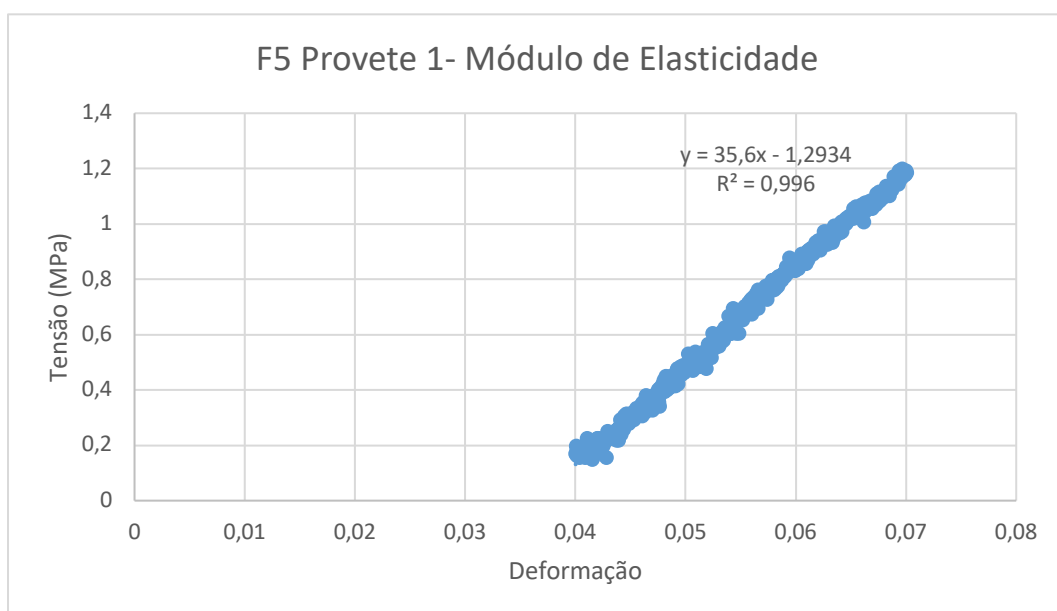
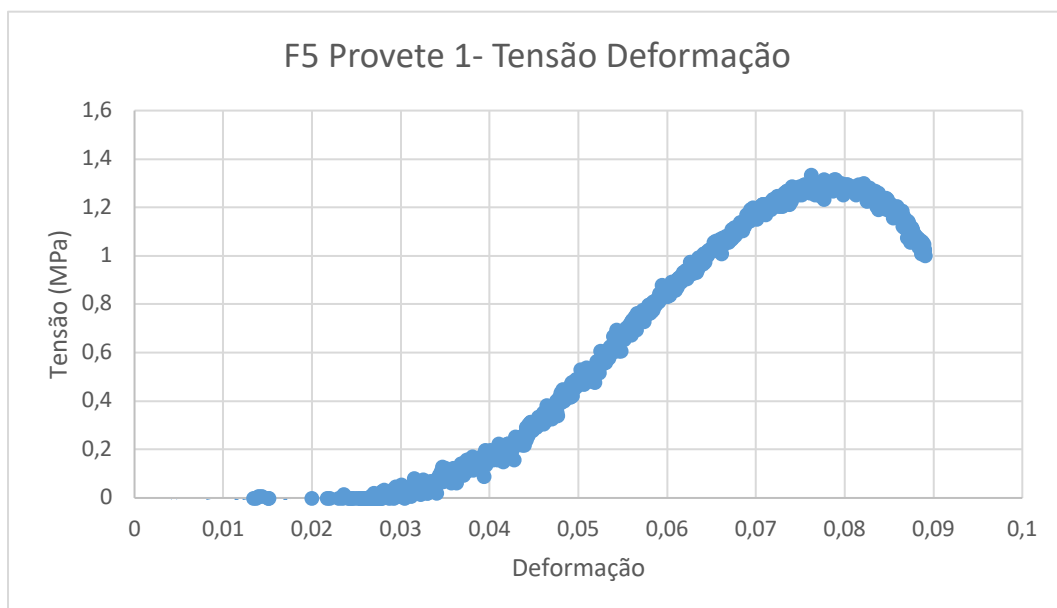


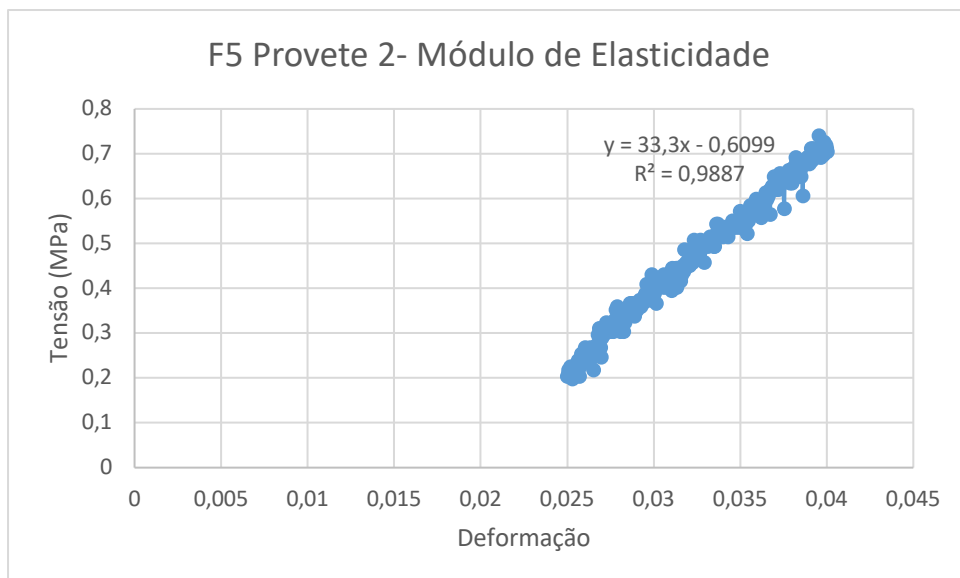
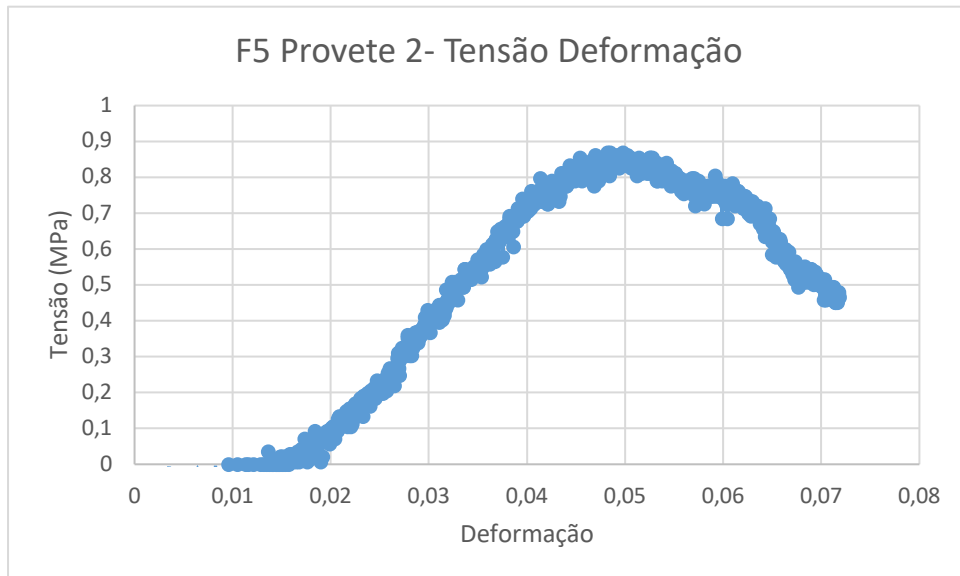


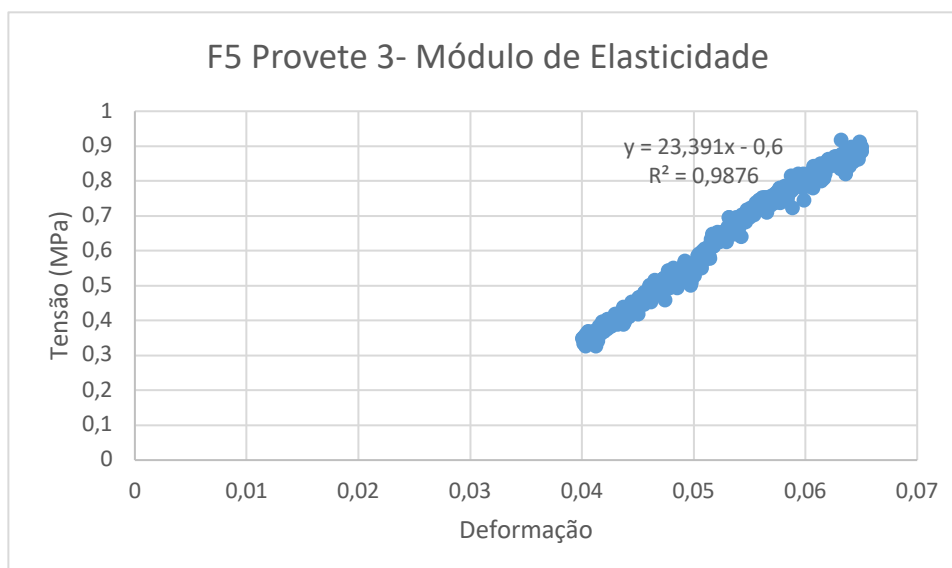
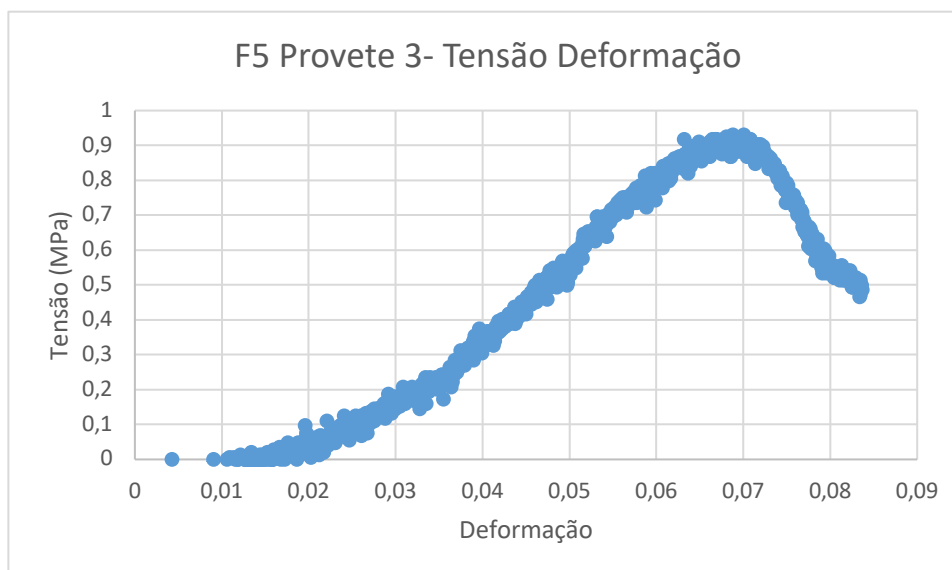


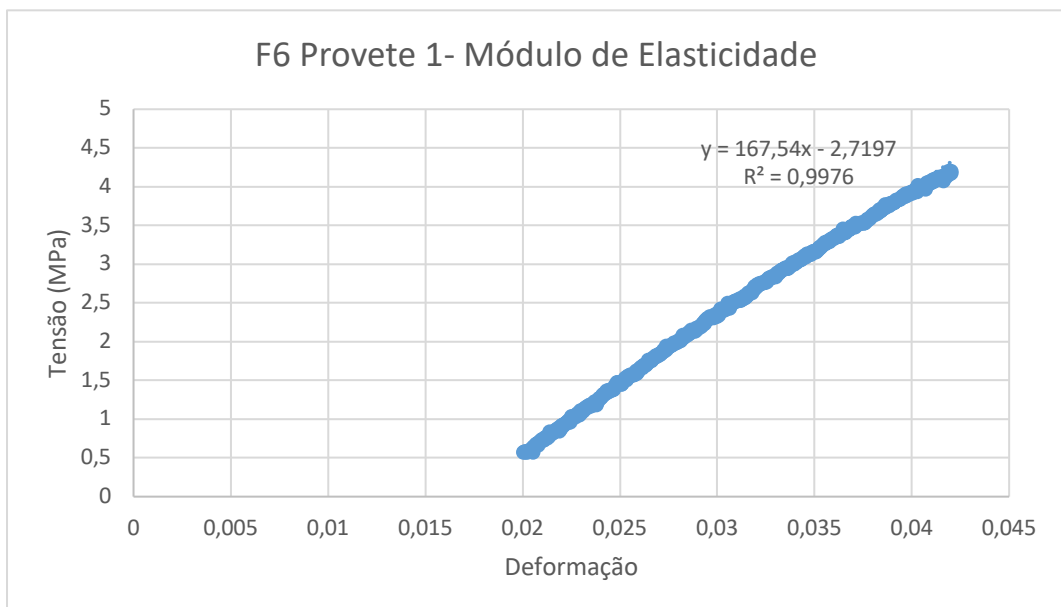
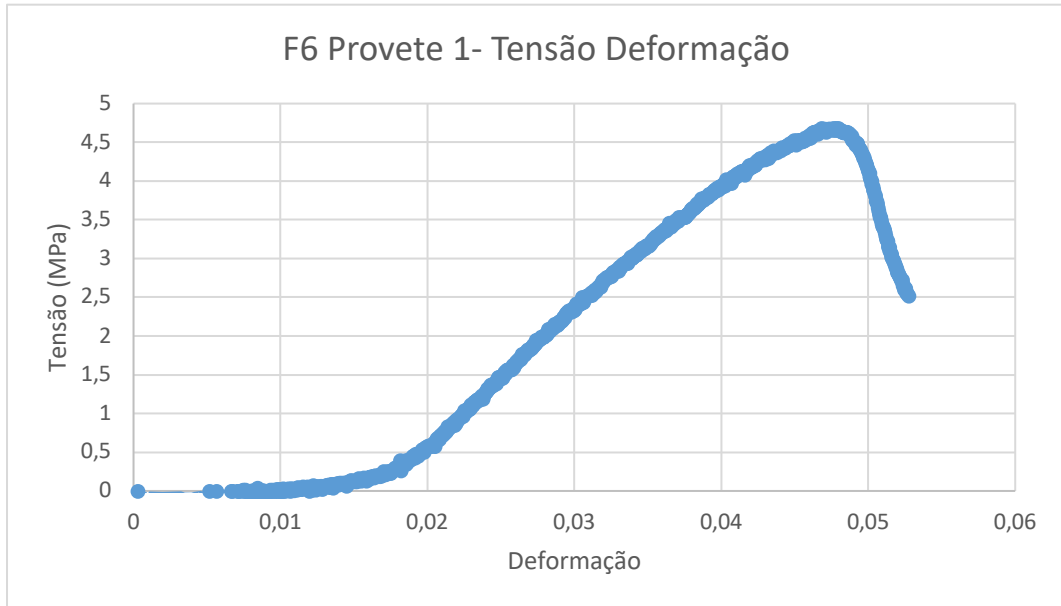


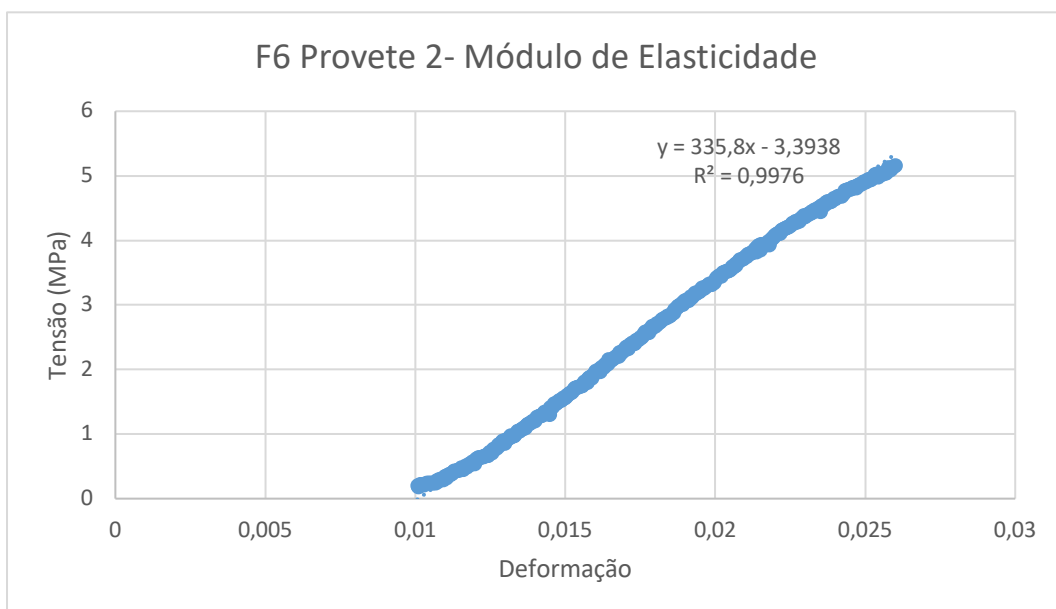
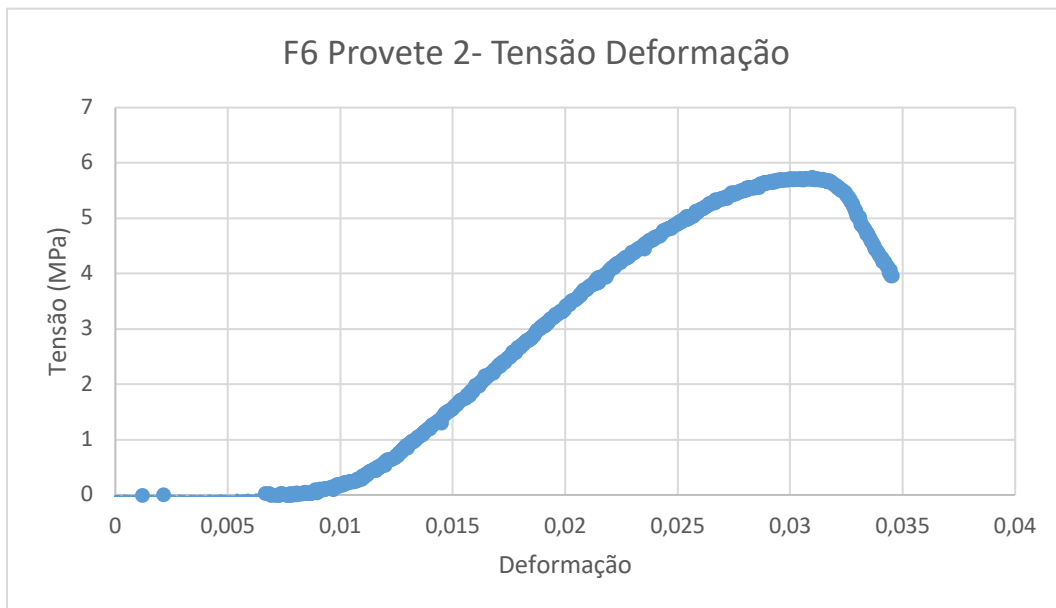


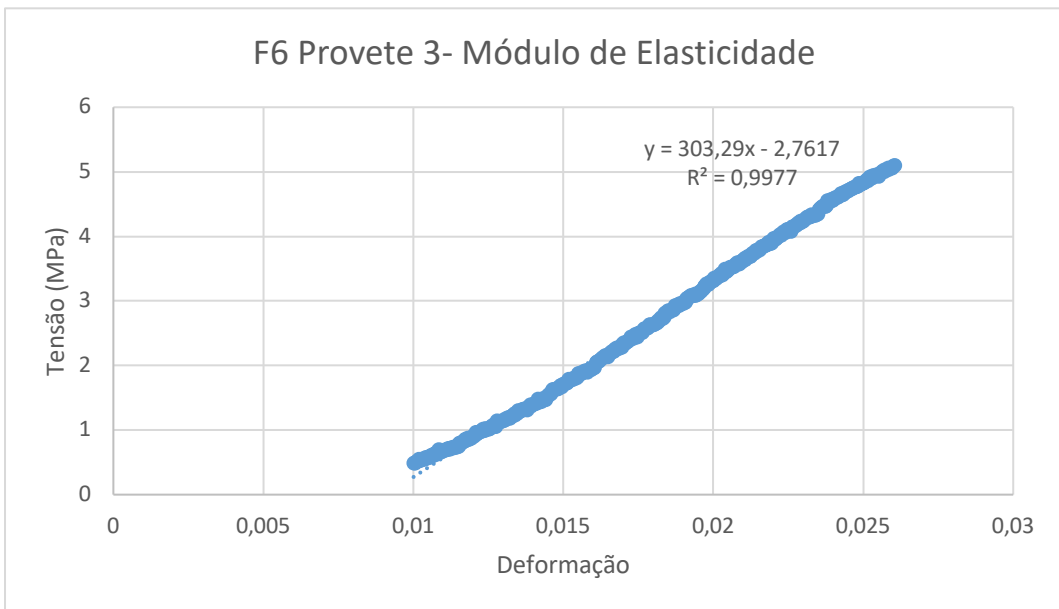
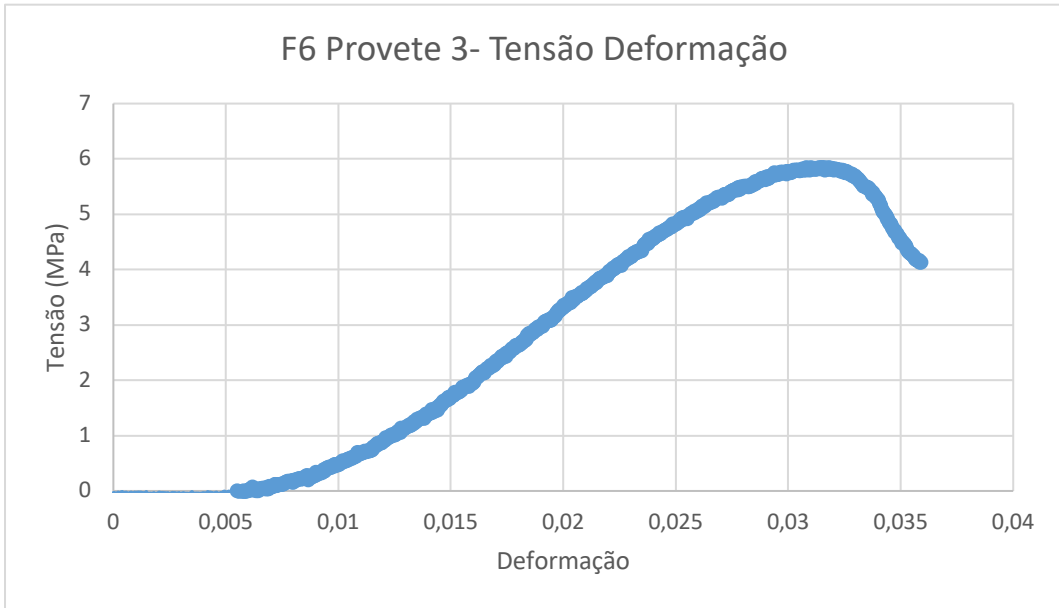


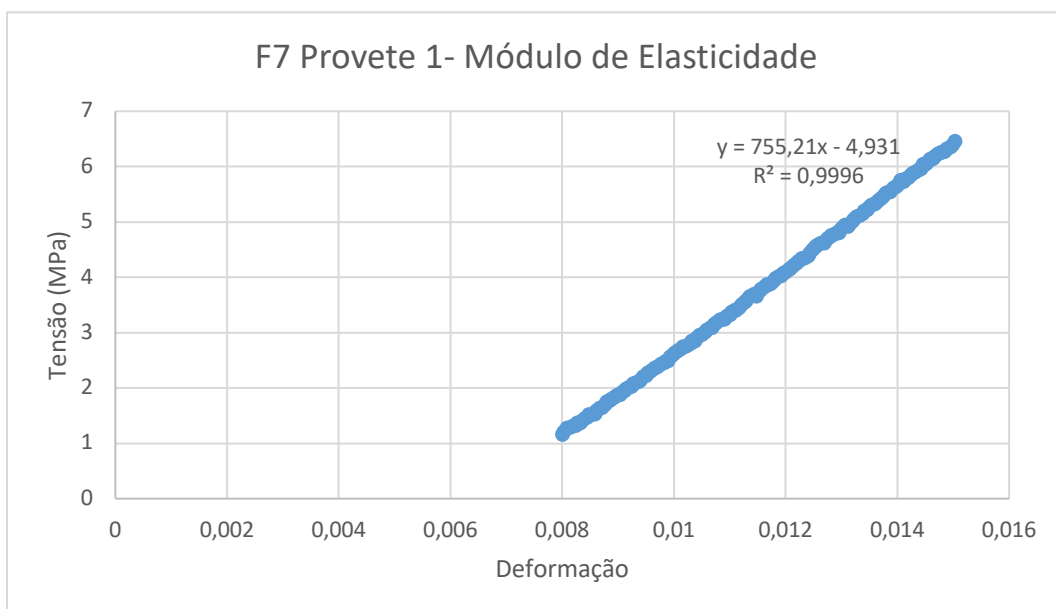
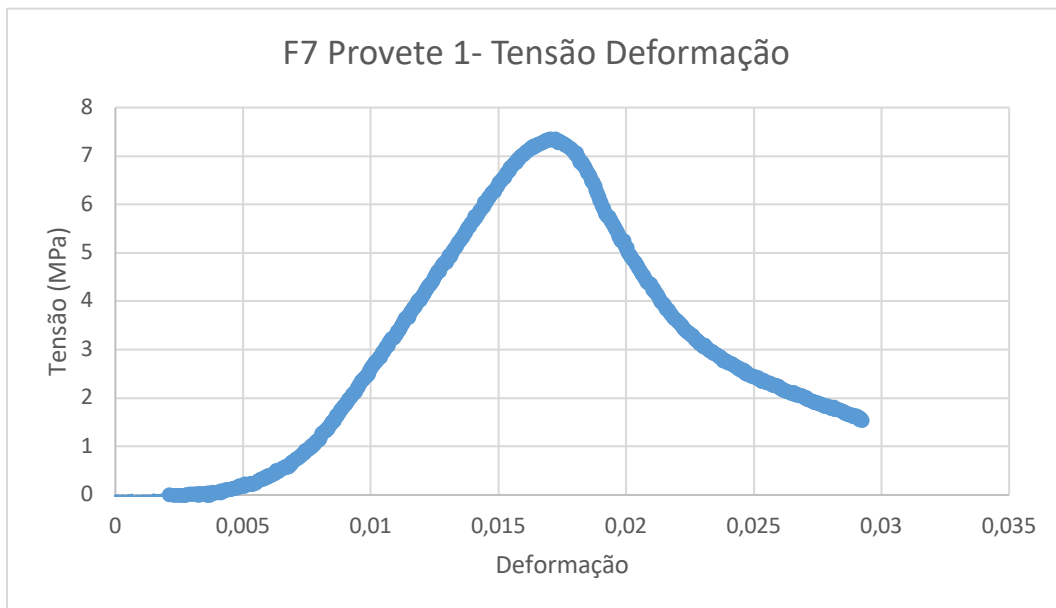


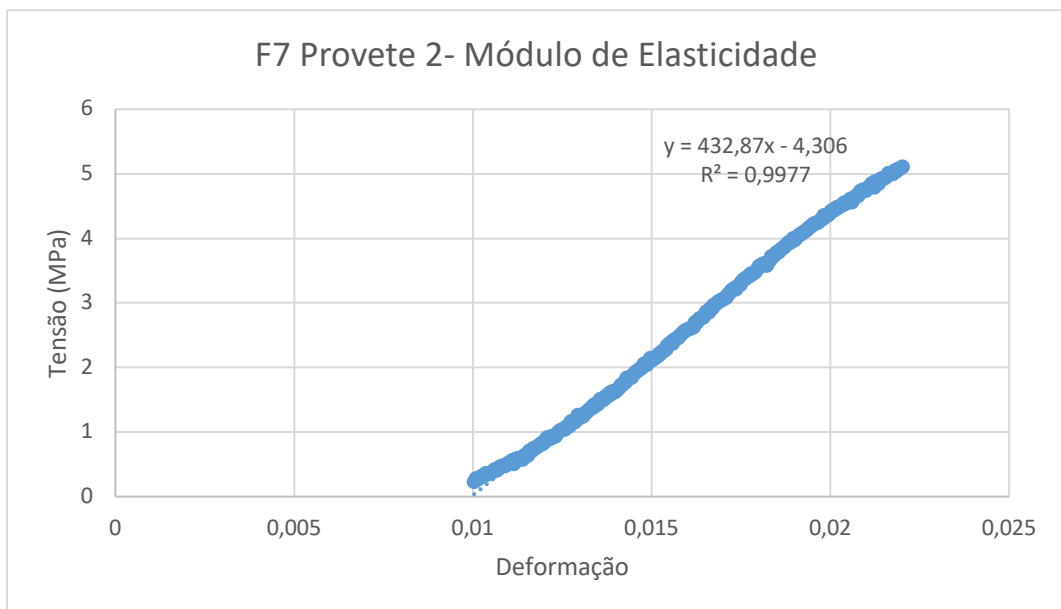
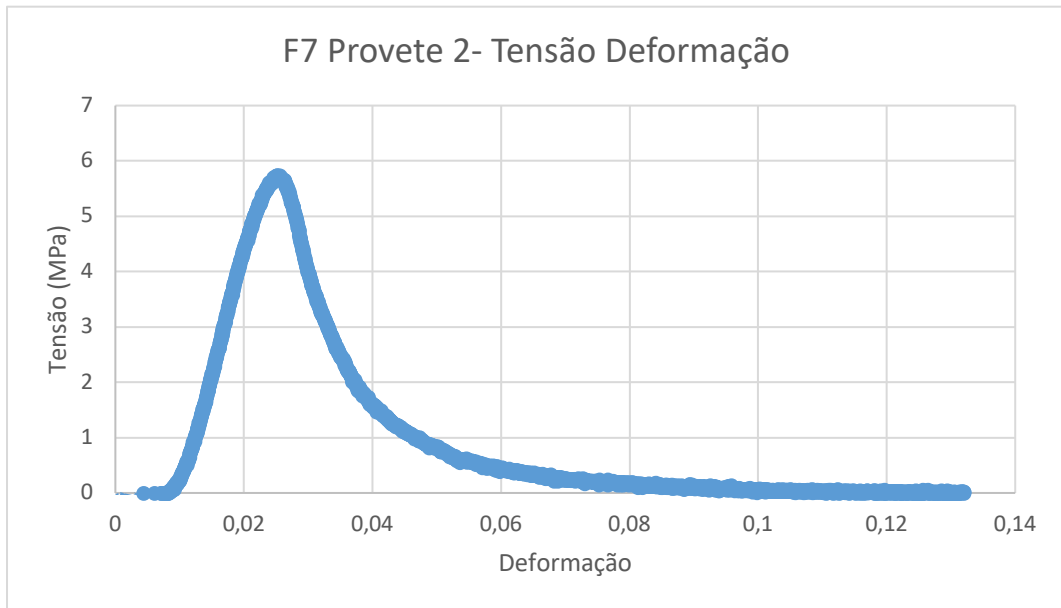


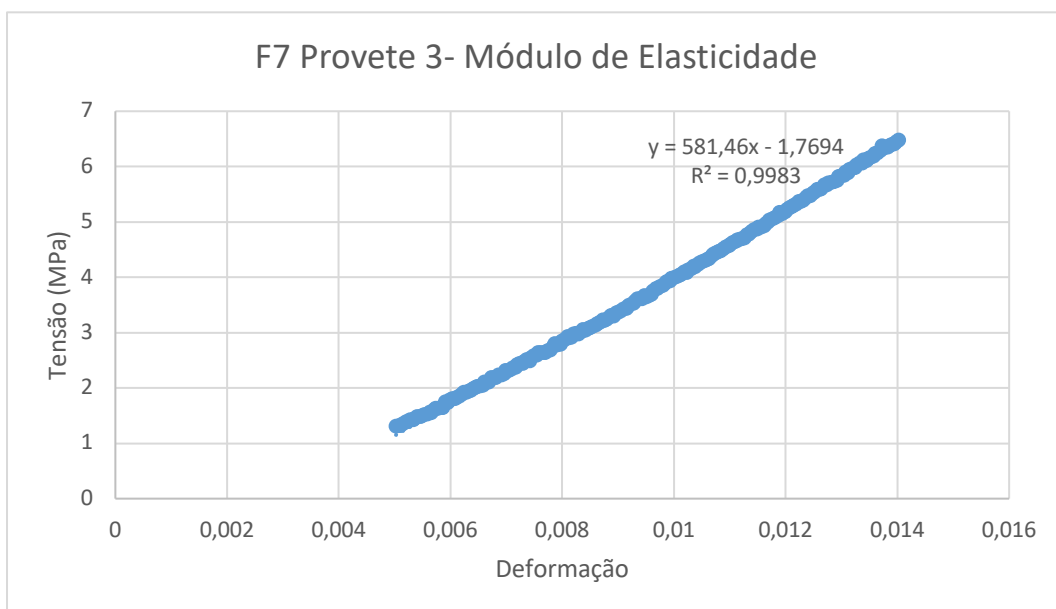
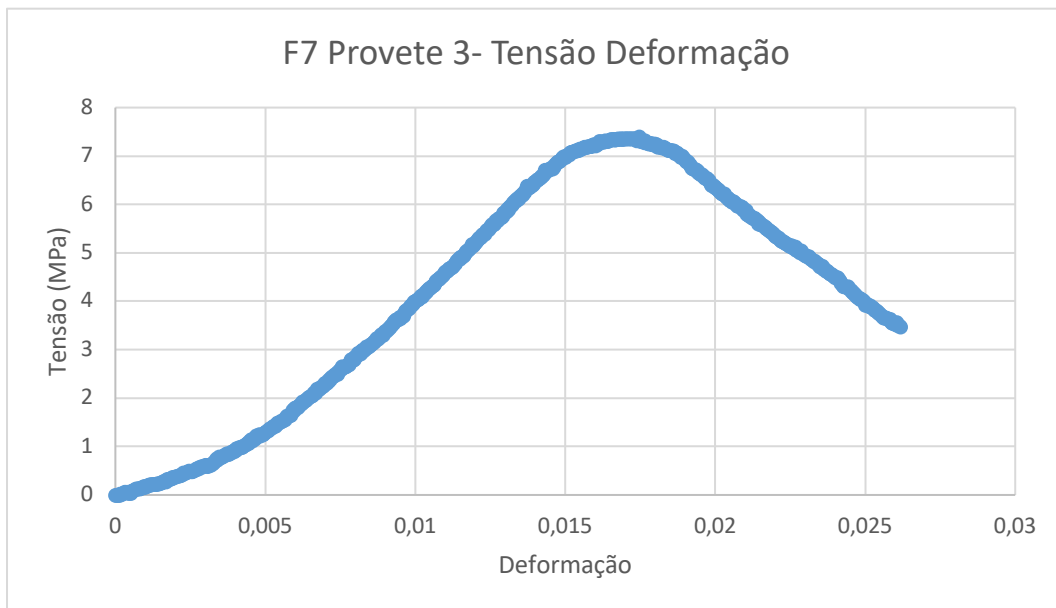


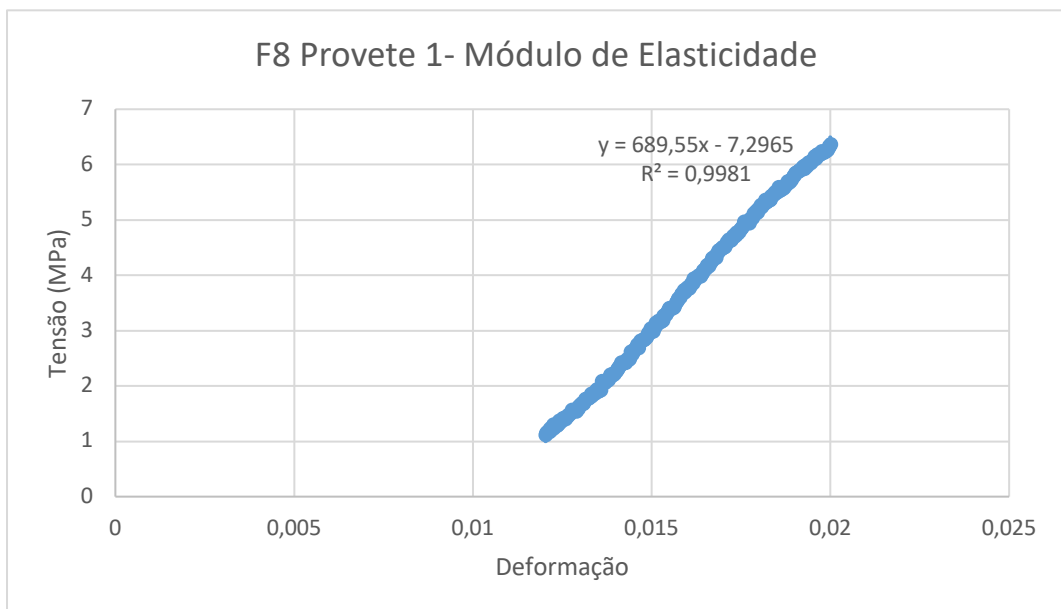
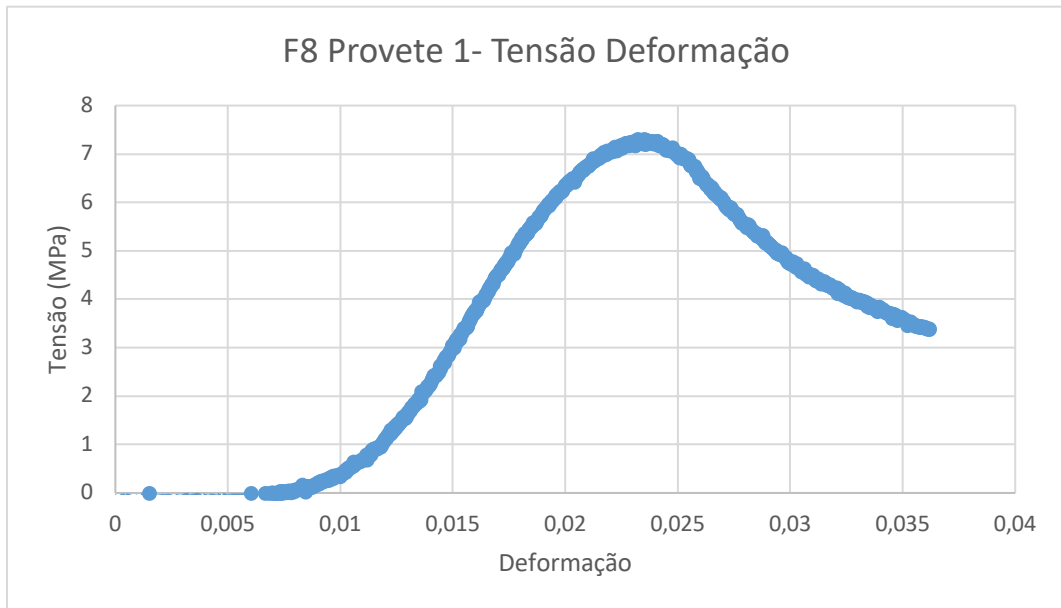


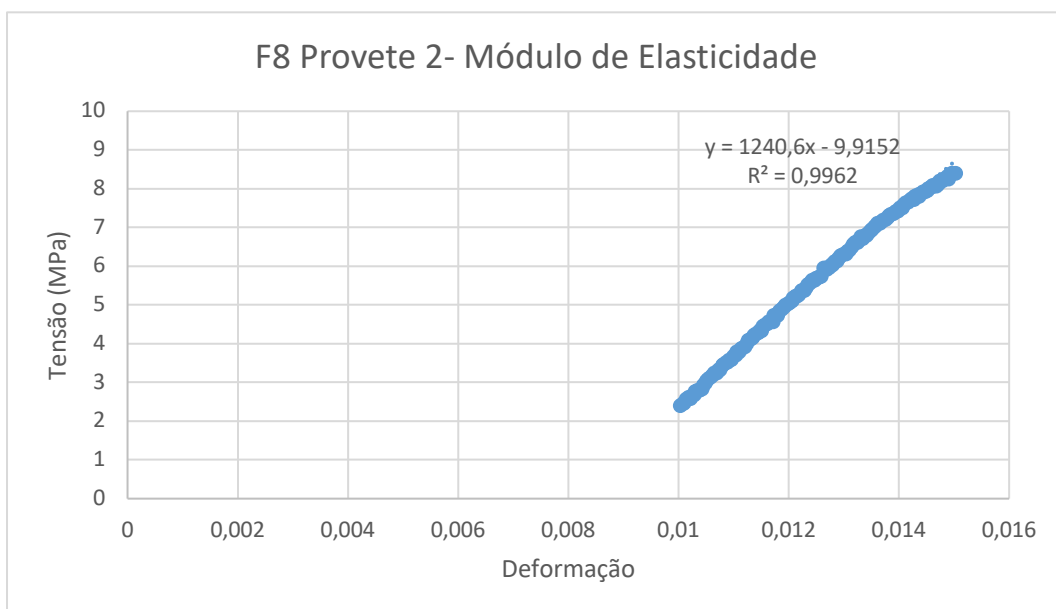
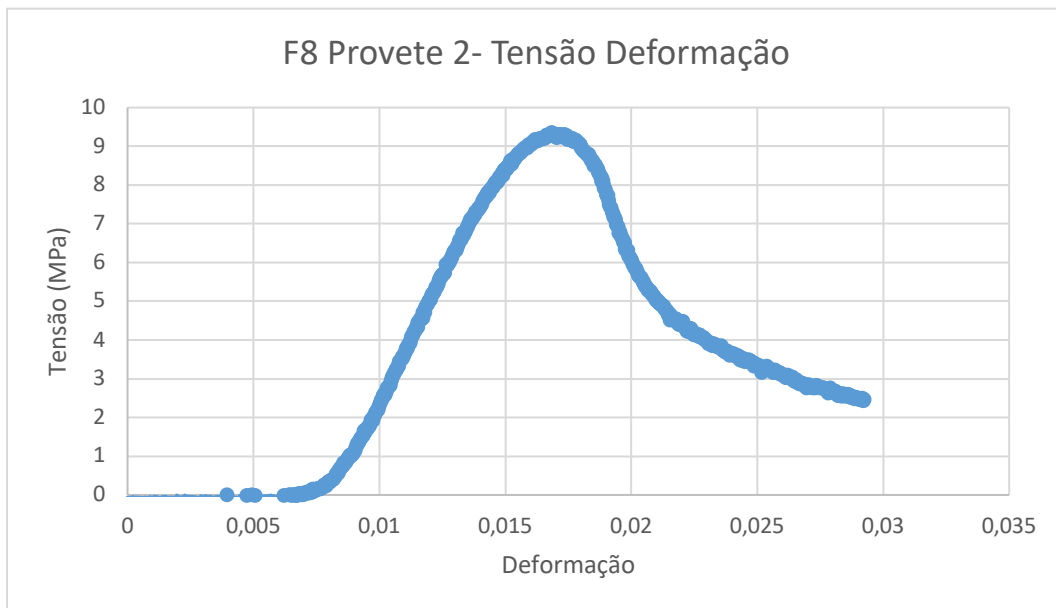


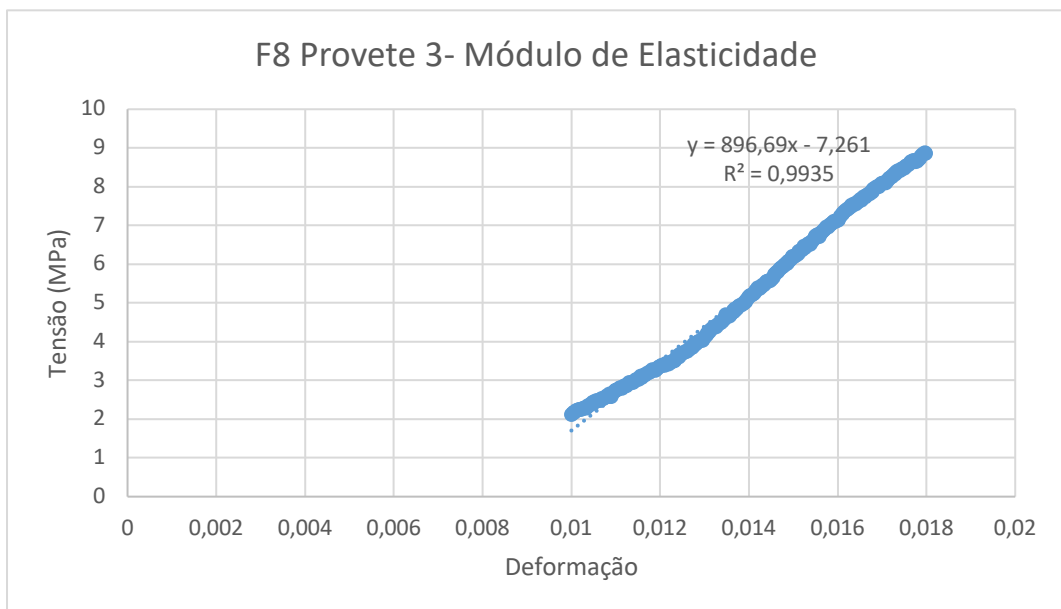
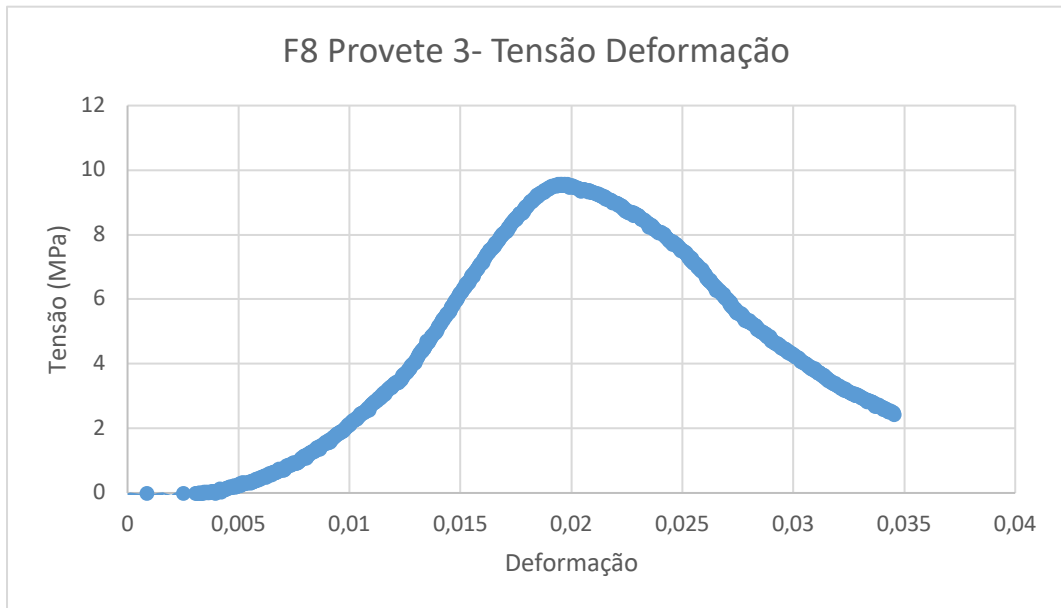


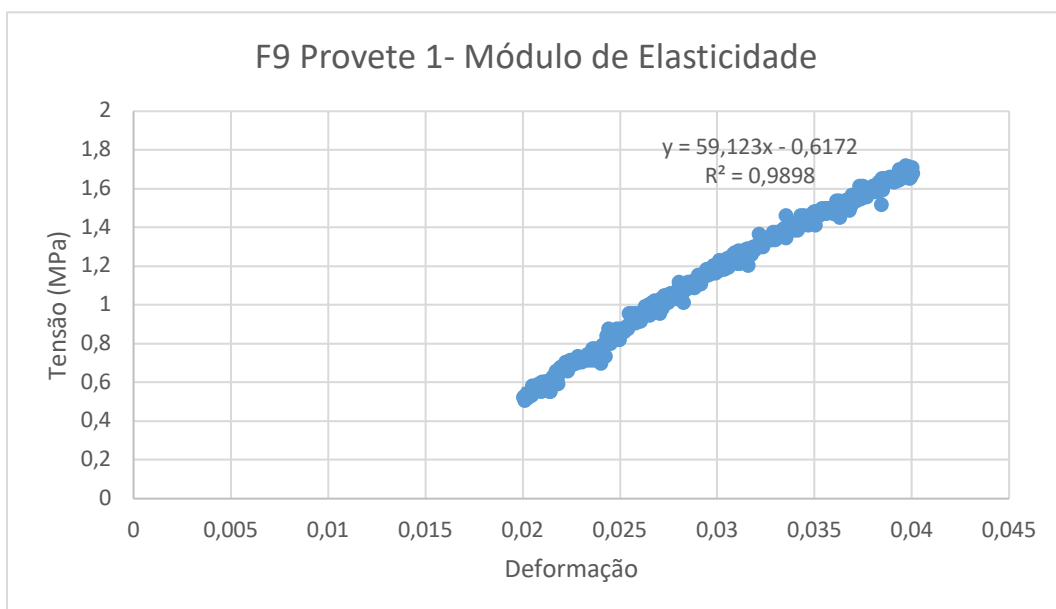
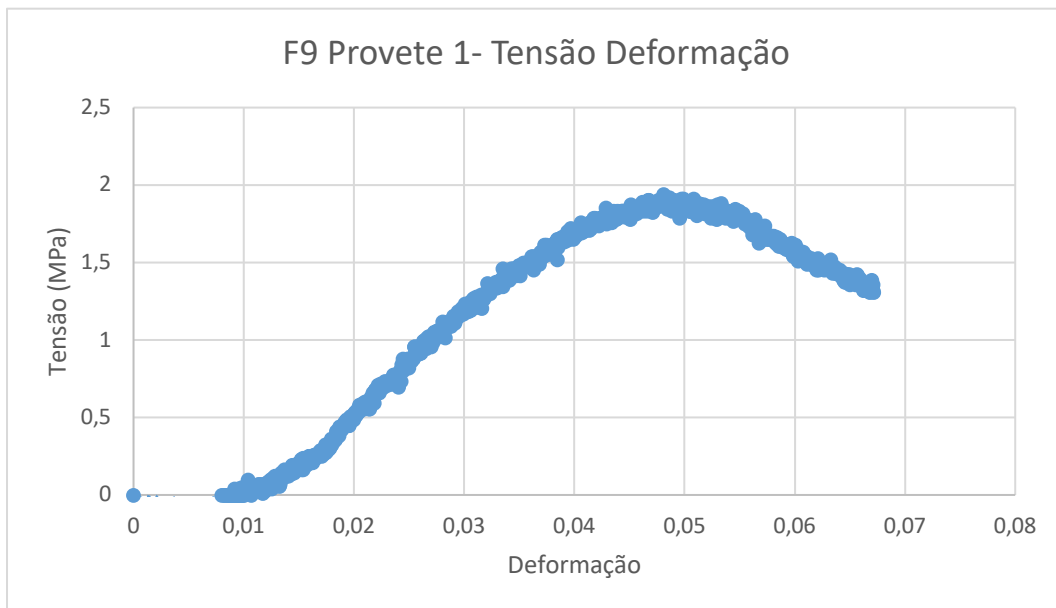


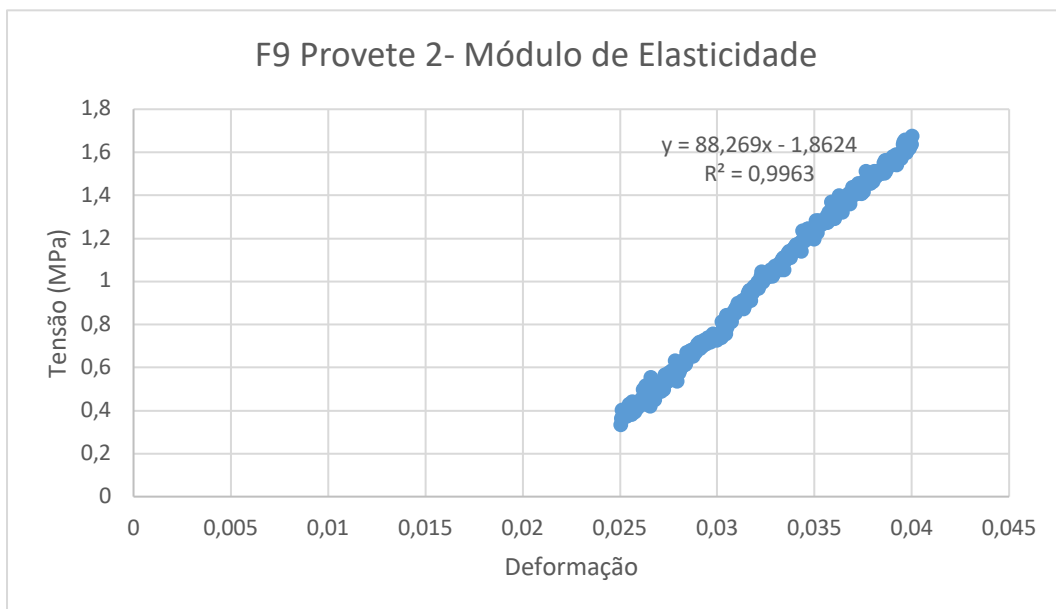
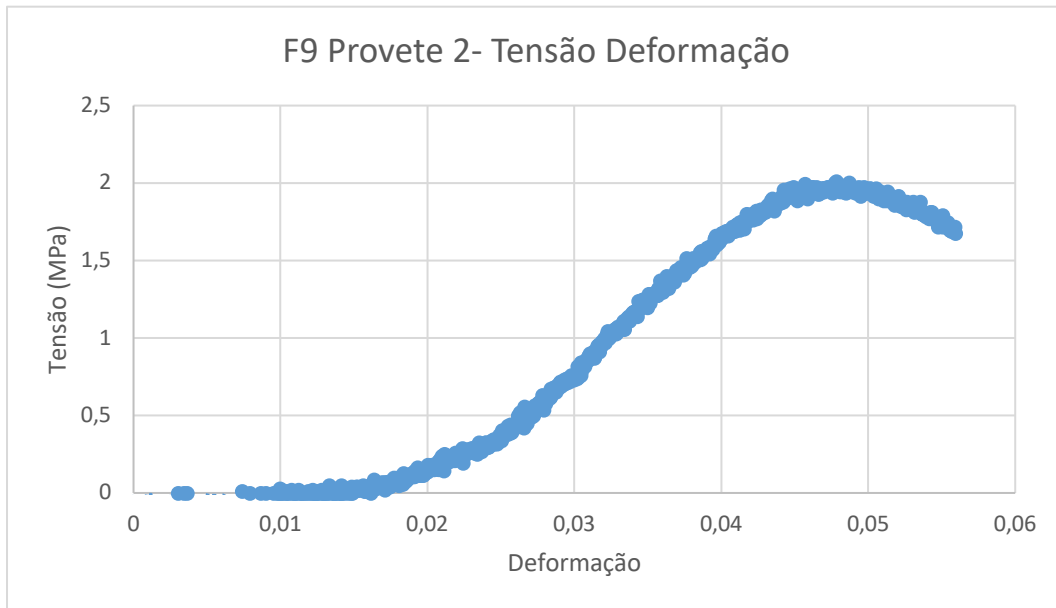


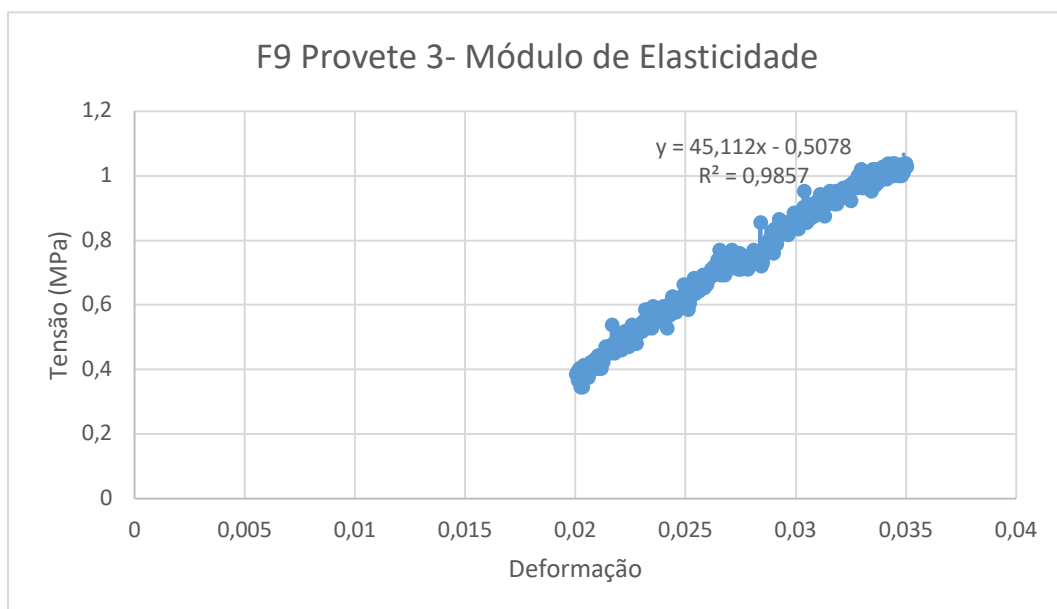
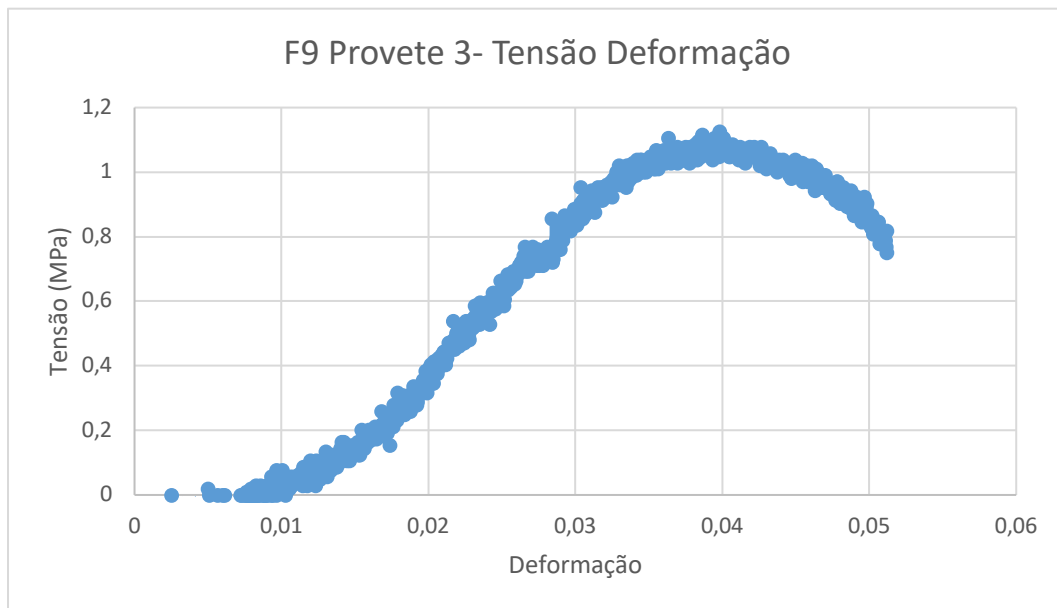


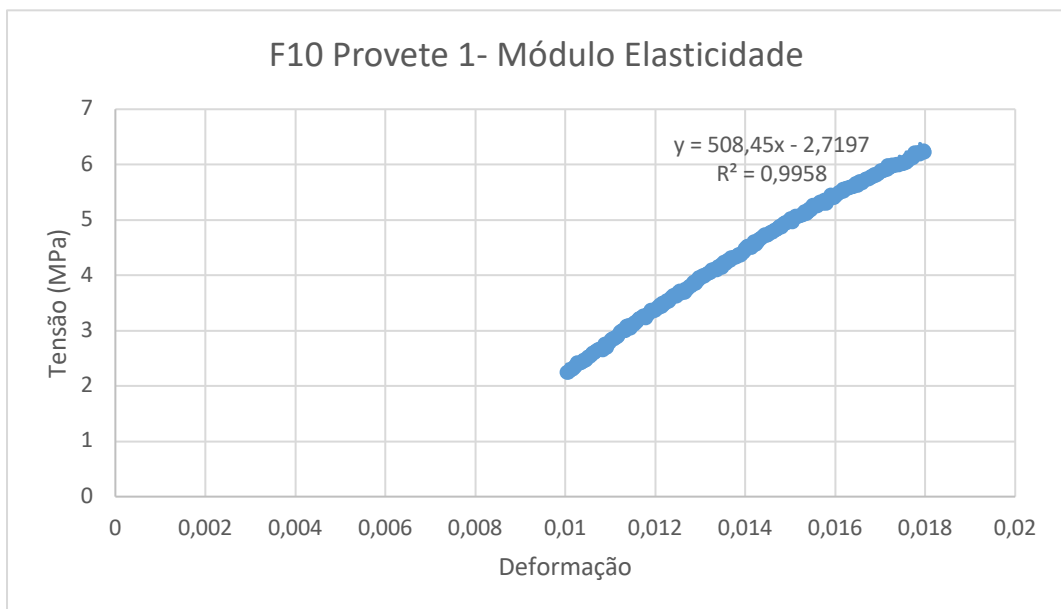
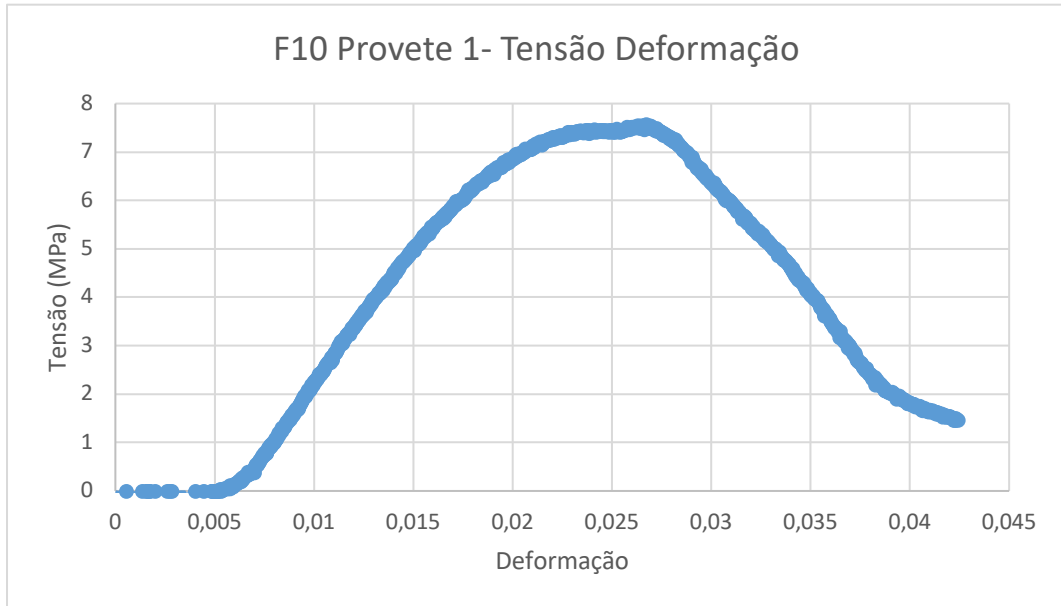


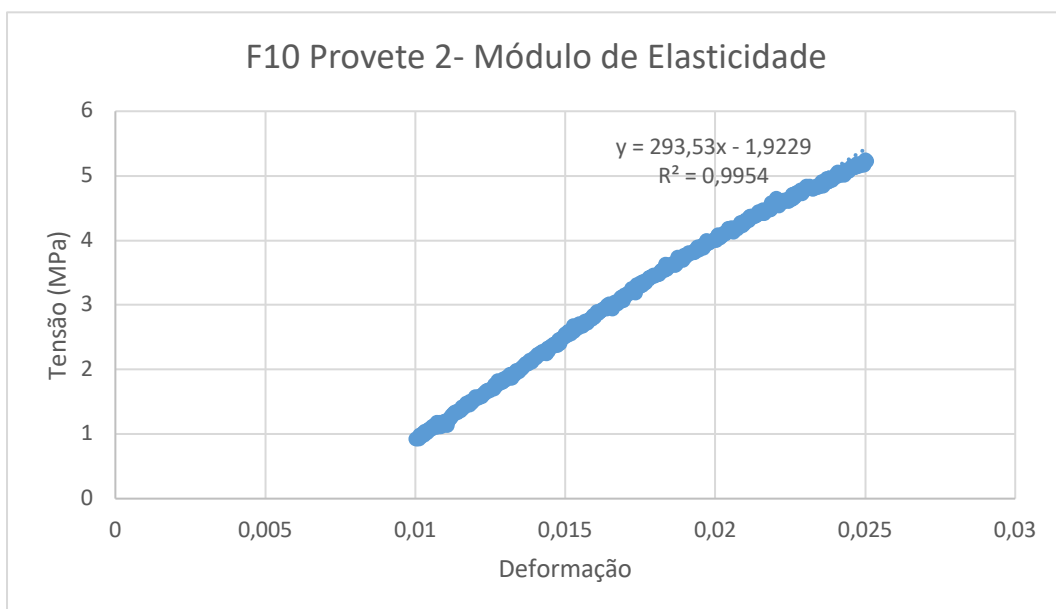
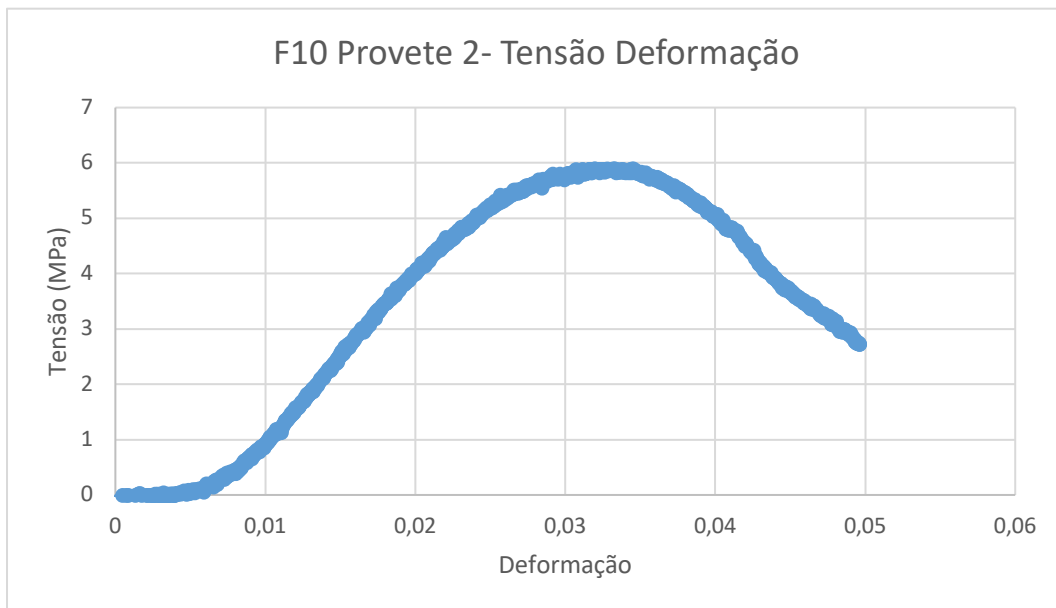


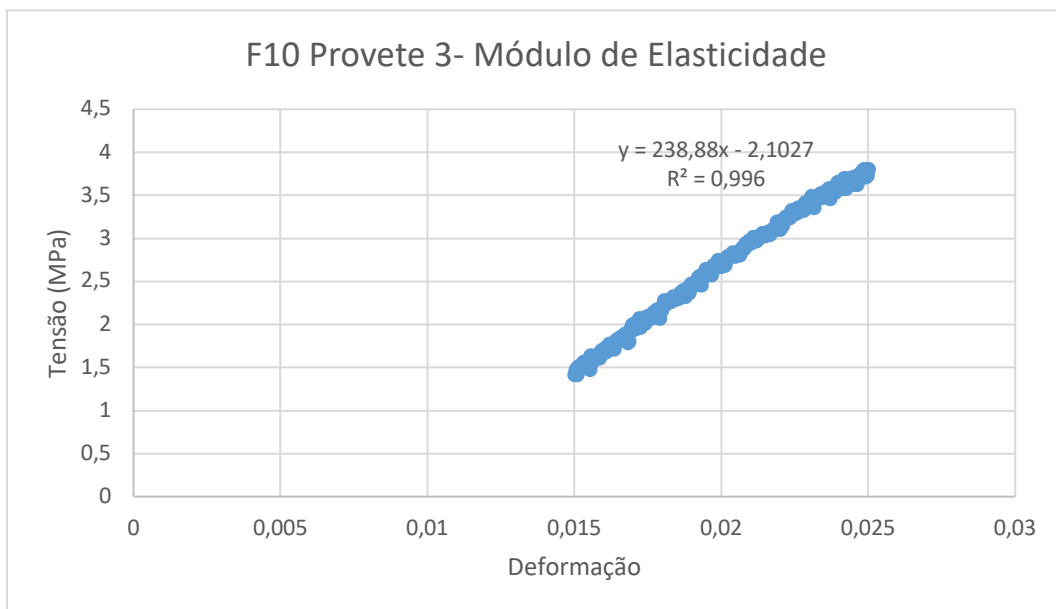
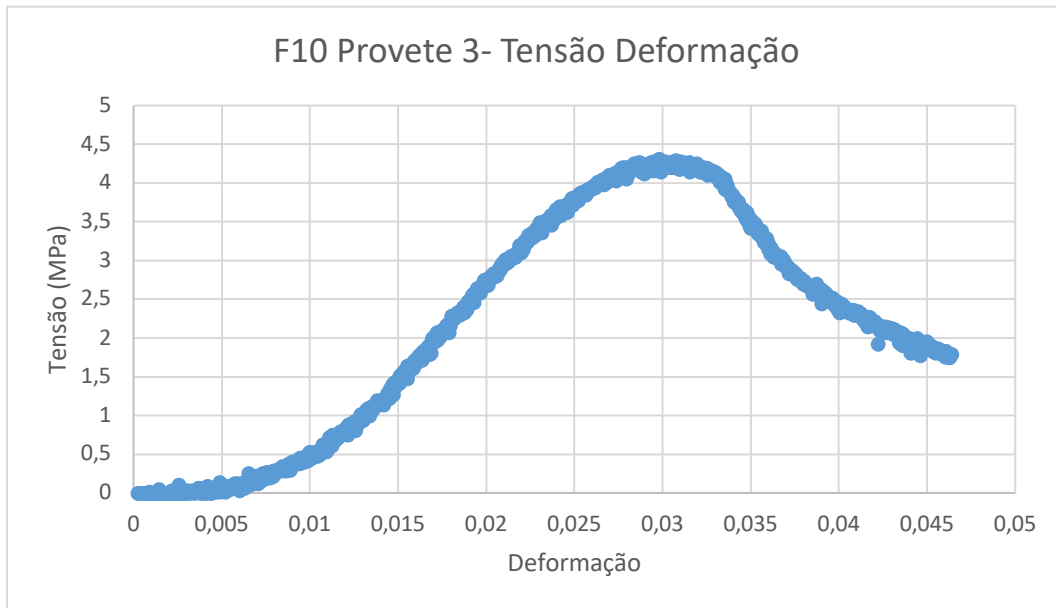


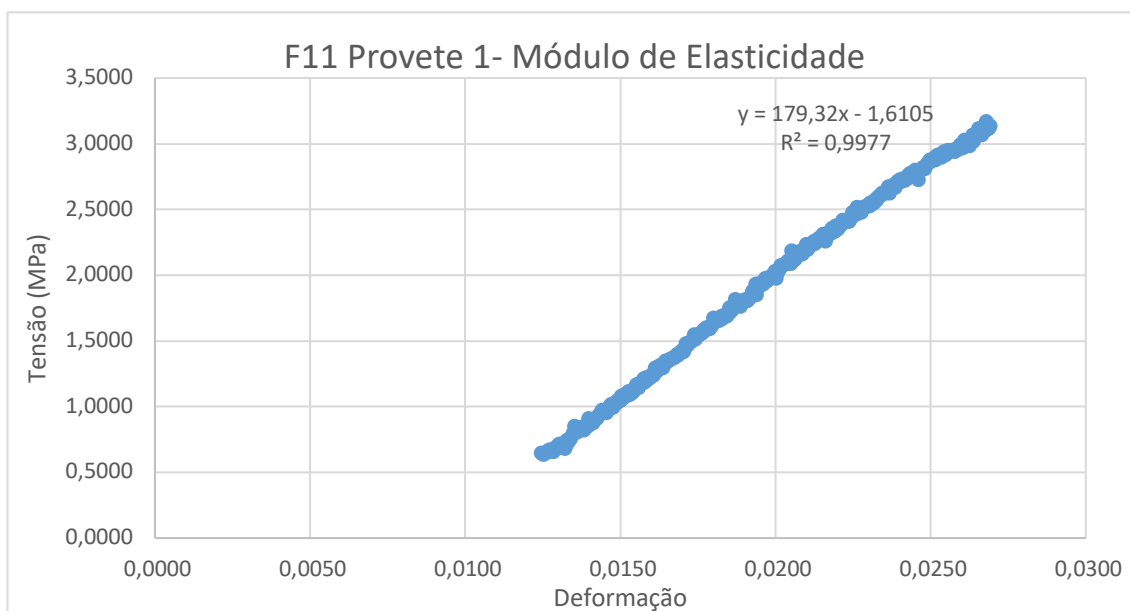
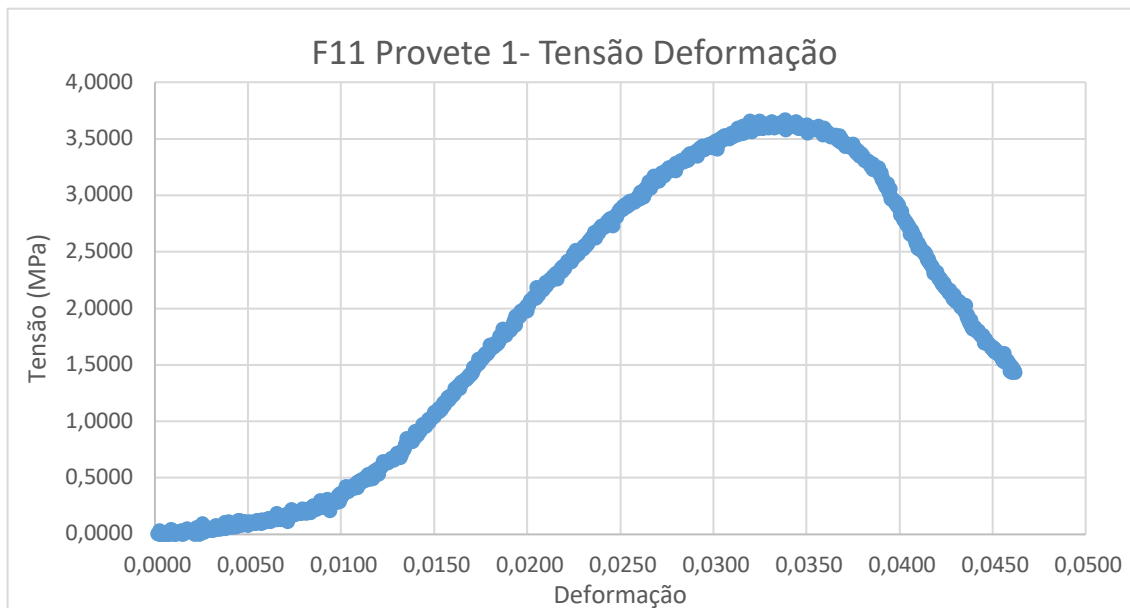


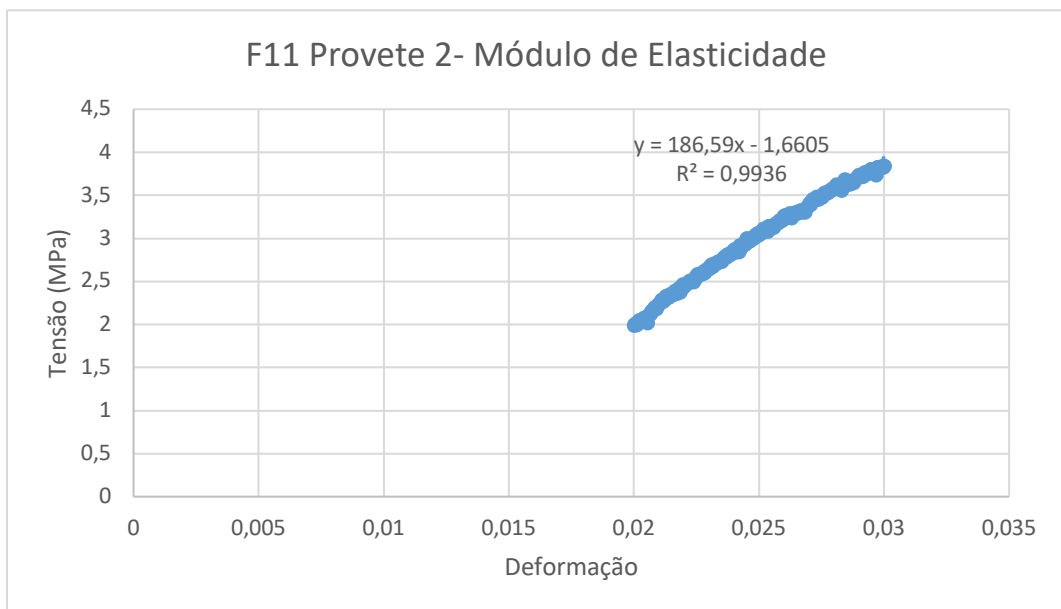
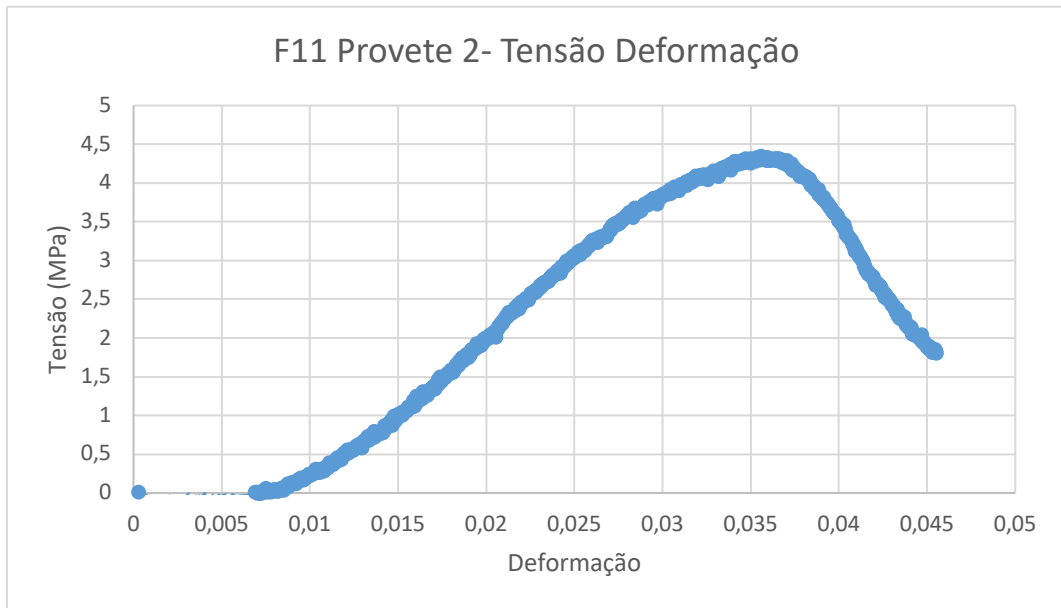


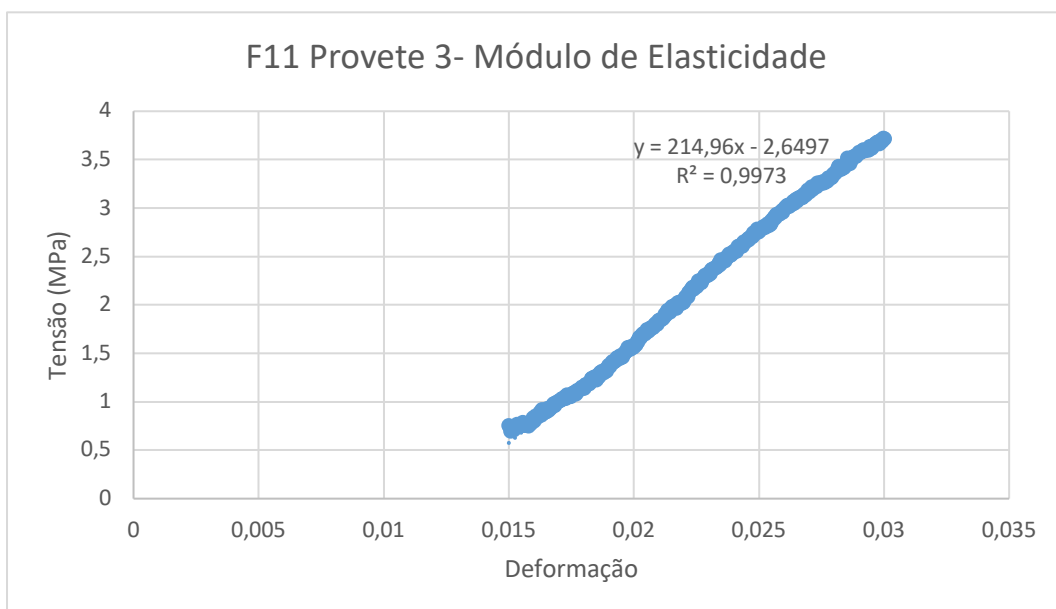
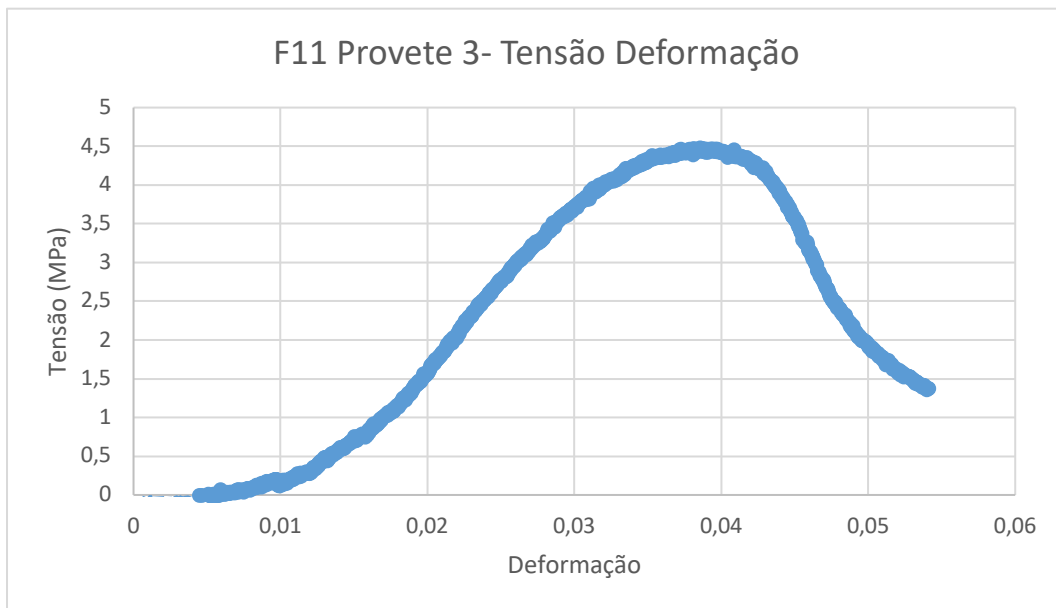


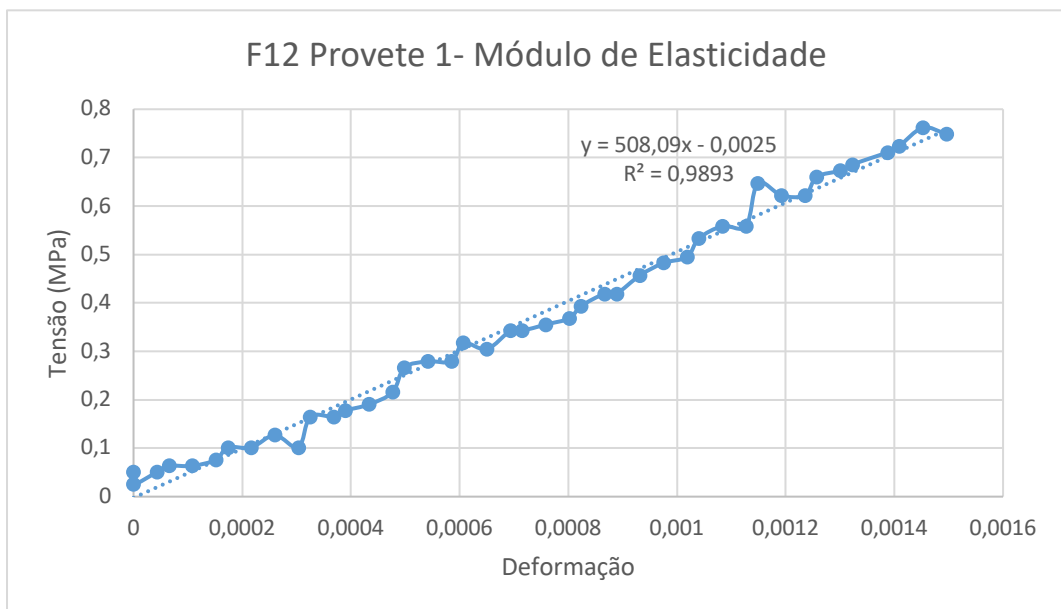
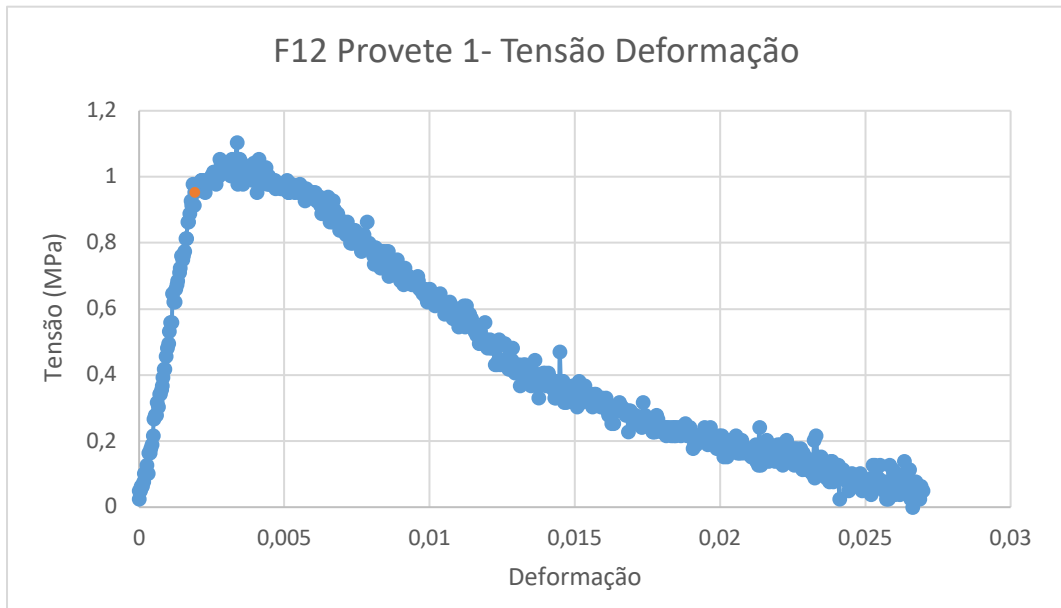


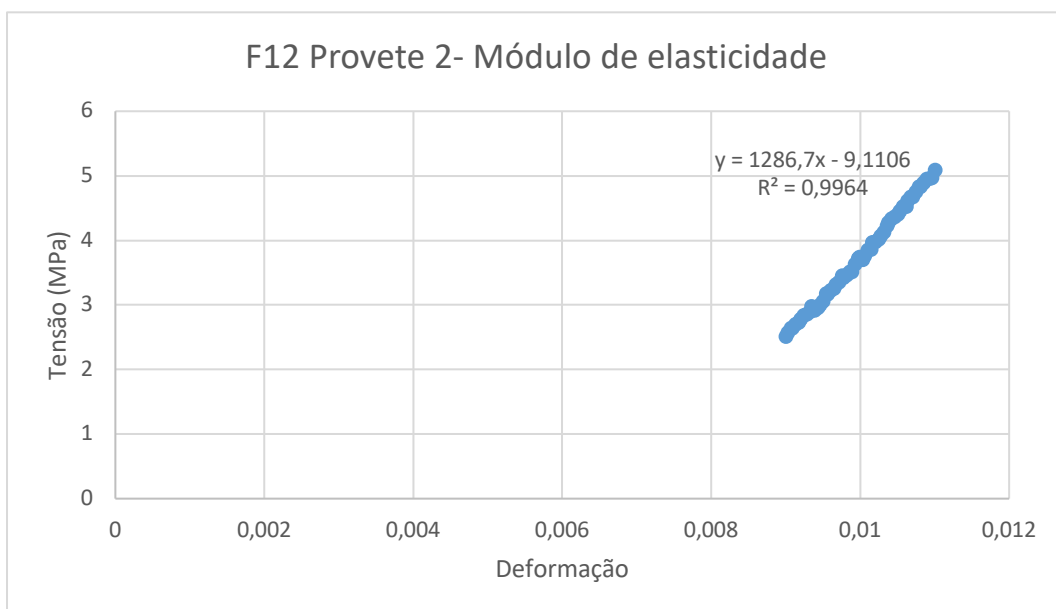
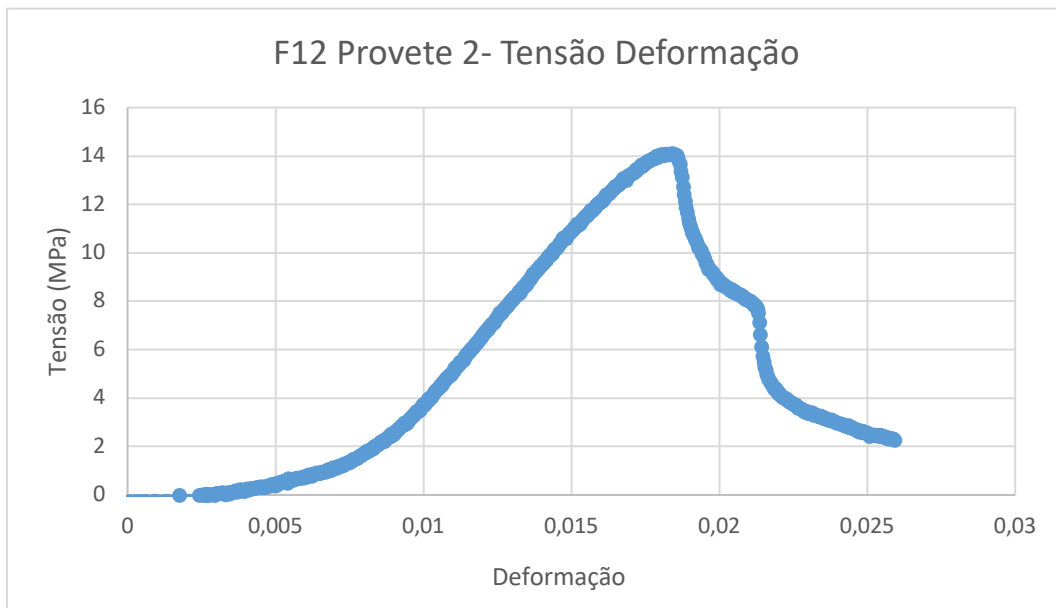


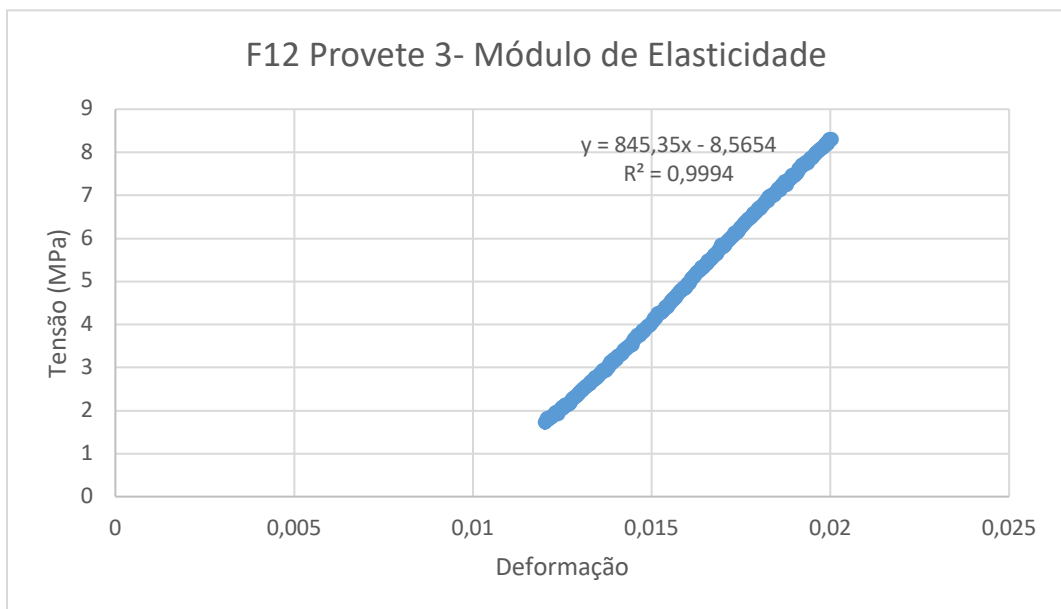
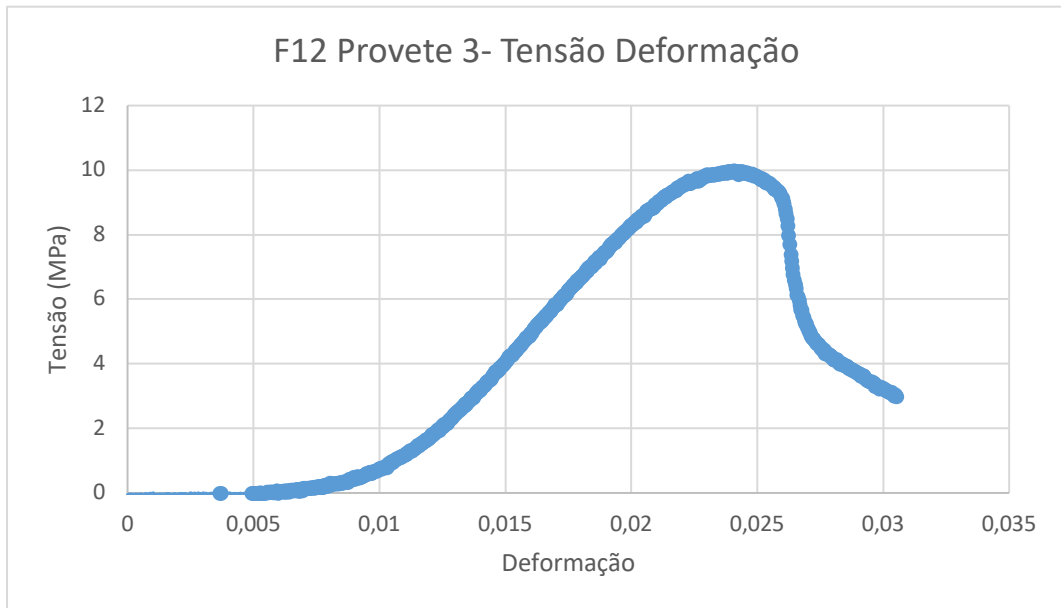




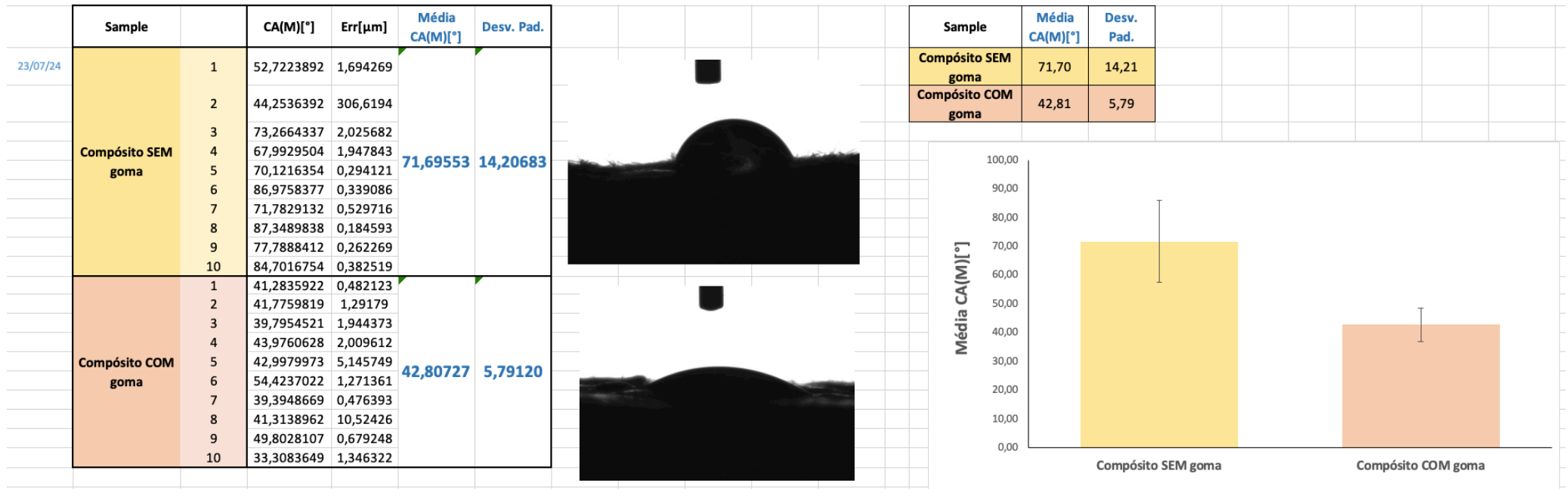








APÊNDICE F- ENSAIO DE MOLHABILIDADE



APÊNDICE G- ENSAIO DE AUMENTO DE MASSA POR ABSORÇÃO DE ÁGUA

Massa inicial (g)		Massa final (g)			Aumento de massa (%)			Aumento de massa médio (%)		
Sem revestimento	Com revestimento	Tempo (h)	Sem revestimento	Com revestimento	Tempo (h)	Sem revestimento	Com revestimento	Tempo (h)	Sem revestimento	Com revestimento
15,3	15,9	2	17,1	16,3	2	11,8%	2,5%	2	12,4%	3,6%
14,8	16,6		16,9	16,9		14,2%	1,8%			
15	18,4		16,7	19,6		11,3%	6,5%			
		24	23,3	18,8	24	52,3%	18,2%	24	52,3%	18,3%
			22,6	19,8		52,7%	19,3%			
			22,8	21,6		52,0%	17,4%			
		96	25,8	21,5	96	68,6%	35,2%	96	67,4%	26,1%
			24,3	21,5		64,2%	29,5%			
			25,4	20,9		69,3%	13,6%			

$$\text{Increase in weight (\%)} = \frac{\text{Wet weight} - \text{Conditioned weight}}{\text{Conditioned weight}} \times 100$$

