



Revestimento de componentes produzidos por FDM na indústria automóvel

Mestrado em Engenharia Automóvel

Rui Miguel Conde Pedrosa

Leiria, setembro de 2022



Revestimento de componentes produzidos por FDM na indústria automóvel

Mestrado em Engenharia Automóvel

Rui Miguel Conde Pedrosa

Trabalho de Projeto sob a orientação da Professora Doutora Maria Leopoldina Mendes
Ribeiro de Sousa Alves e do Professor Doutor Henrique de Amorim Almeida

Leiria, setembro de 2022

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Automóvel, no ano letivo 2020/2021, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Dedicatória

A todos os que me apoiaram nesta etapa e que acreditaram que seria possível completá-la.

Agradecimentos

Quero agradecer aos que me são próximos que me permitiram completar esta etapa, sem os quais não seria possível

Primeiramente quero agradecer à minha família e amigos pelo apoio moral que me deram ao longo de todo o percurso. Alguns deles serviram também de inspiração, por se encontrarem também a desenvolver a tese de mestrado. Um agradecimento especial ao meu pai, irmã e avós pela compreensão demonstrada, especialmente na última fase.

Quero atribuir um especial agradecimento aos meus orientadores, Professora Leopoldina Alves e Professor Henrique Almeida, e técnica Engenheira Fernanda Carvalho, pela disponibilidade e prontidão para tudo o que fosse necessário. O Engenheiro Jorge Domingues foi também incansável na preparação dos ensaios de tração.

Aos que me apoiaram nesta etapa, um muito obrigado!

Resumo

A fabricação aditiva encontra-se atualmente num estado de desenvolvimento considerável para quase todos os métodos de fabrico. Um desses métodos é o FDM (*Fused Deposition Modeling*), utilizado neste projeto. Como todos demais métodos, também este apresenta algumas limitações, sendo que uma delas resulta do próprio processo de impressão, nomeadamente a porosidade dos componentes.

Este projeto apresenta um estudo à alteração da permeabilidade de componentes produzidos por FDM quando em contacto com fluídos de refrigeração e lubrificação de automóveis, recorrendo para o efeito a ensaios laboratoriais de provetes em materiais poliméricos: ABS, PC e PC-ABS. Estes foram revestidos por uma camada de resina epoxídica, com o objetivo de diminuir a absorção do fluído externo com o qual estejam em contacto num automóvel. Posteriormente, os provetes foram mergulhados em gasóleo e óleo multigraduado, por períodos distintos, às respetivas temperaturas mais usuais que se observam num veículo em funcionamento. A massa dos provetes antes e após o mergulho nos dois fluídos foi registada e os mesmos foram submetidos a ensaios laboratoriais de tração, dos quais foram retirados os valores de tensão e deformação.

Com a análise dos resultados obtidos, e após alguns cálculos, foi possível comparar os valores de deslocamento e resistência à tração dos provetes revestidos e não revestidos, imersos tanto no óleo como no gasóleo. Pôde-se assim concluir quais os tipos de provetes que mais alterações tiveram ao serem revestidos pela camada de resina. Numa fase final, foram também anunciados os trabalhos futuros previstos para este projeto

Palavras-chave: FDM, ABS, ABS-PC, PC, tração, permeabilidade

Abstract

The additive manufacturing faces nowadays an large development at all the methods included. One of this method's is FDM (Fused Deposition Modeling), which was used in this project. As all the methods, FDM has it's limitations as well, being one of them associated to the printing process itself, which brings porosity to the components.

This project presents a study to the permeability changes in components produced by FDM technology, when in contact with automotive coolant and lubricant fluids. To do so, tests were made to test pieces in different polymeric materials: ABS, PC and PC-ABS. These were covered by a layer of epoxydic resin, with the aim of reducing the fluid absorption. After being covered, all the .test pieces were merged in diesel and engine oil, during different periods, at the regular temperatures observed on a running car. Both weights, before and after the immersion, were registered, and the test pieces were submitted to a traction test, analysing the force and strain resultant.

Analysing the results, and after some calculations, it was possible to compare the displacement and strain for the covered and non-covered test pieces, dipped in both engine oil and diesel. It was possible to conclude which test pieces presented more changes when covered by the resin layer. At a final stage, future tasks for this project were announced.

Keywords: FDM, ABS, ABS-PC, PC, traction, permeability

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	x
Lista de tabelas	xvi
Lista de siglas e acrónimos	xvii
1. Introdução	1
2. Estado da arte	5
2.1. Contextualização	5
2.2. Fabrico aditivo	8
2.2.1. Princípio de funcionamento	10
2.2.2. Vantagens e desvantagens do fabrico aditivo	12
2.2.3. Adesão ao fabrico aditivo nas empresas	14
2.2.4. Processos de fabrico aditivo	18
2.3. Degradação de polímeros	33
2.4. Métodos de pós-processamento - revestimento	34
2.4.1. Fumigação	34
2.4.2. Mergulho	35
2.4.3. Infiltração de Resina.....	36
2.4.4. Resinas	37
2.5. Flúidos	39
2.5.1. Fluido lubrificante	39
2.5.2. Combustível	41
2.5.3. Corrosão associada a fluidos	42
3. Equipamento, materiais e métodos	44
3.1. Metodologia experimental	44
3.2. Equipamento	44
3.2.1. Impressora	44
3.2.2. Estufas	45

3.2.3.	Balança	46
3.2.4.	Equipamento de ensaios universais	47
3.3.	Materiais.....	48
3.3.1.	ABS	48
3.3.2.	PC-ABS	49
3.3.3.	PC	49
3.3.4.	Resinas.....	50
3.4.	Procedimentos.....	51
3.4.1.	Modelação e impressão dos provetes	51
3.4.2.	Duração dos ensaios	59
3.4.3.	Revestimento dos provetes	61
3.4.4.	Remoção do excesso da resina	63
3.4.5.	Imersão dos provetes em fluídos	64
3.4.6.	Ensaio de tração	66
3.4.7.	Registo da variação da massa dos provetes	68
4.	Análise e discussão de resultados	69
4.1.	Ensaio de tração	69
4.2.	Varição de massa	80
4.	Conclusão e Trabalhos Futuros	85
5.	Bibliografia.....	87
	Anexo A – Registo das massas de fluído	90
	Anexo B - Ensaio de tração.....	92
	Anexo C – Parametrização da impressão.....	96
	Anexo D - Curvas Força-Deslocamento – Ensaio tração	101

Lista de Figuras

Figura 1 – Porsche 959 (Tomé, Razão Automóvel, 2021)	6
Figura 2 – LSEV visto do exterior e interior (Giantomaso, 2018)	7
Figura 4 - Ferrari SP48 Única (Autonews, 2020)	7
Figura 3 - Grelha frontal produzida através do fabrico aditivo (Autonews, 2020)	7
Figura 6 - Processos de fabrico aditivo segundo a norma ASTM F42, por estado de material (A. Ahmadi Nadooshan, 2007)	10
Figura 7 - Representação do <i>stair stepping</i> e erro <i>chordal</i> (Chohan, 2020).....	11
Figura 8 - Utilização da impressão 3D por setores (sculpteo, 2018).....	14
Figura 9 - Comparação do orçamento investido em tecnologias de impressão 3D, entre 2017 e 2018, em percentagem (sculpteo, 2018)	15
Figura 10 - Utilização da impressão da impressão 3D em percentagem (sculpteo, 2018)	16
Figura 11 - Comparação da utilização da impressão 3D entre 2017 e 2018, em percentagem (sculpteo, 2018)	16
Figura 12 - Lucros, em milhões de dólares, de produtos (a azul) e serviços (a roxo) provenientes do fabrico aditivo (tecnometal, 2016)	17
Figura 13 - Processos de fabrico aditivo mais comuns, consoante o tipo de material e modo de deposição (filament2print, 2015)	18
Figura 14 - Esquematização do princípio de funcionamento de um equipamento de SLA (SLA 3 PRINTING , 2020)	19
Figura 15 - Fabrico de um para-choques recorrendo a SLA (materialise, 2019)	20
Figura 16 – Representação de um processo de SLS (Herderick, 2015)	21
Figura 17 – componentes fabricados em SLS	22
Figura 18 - Processo de impressão por FDM (unlimited, 2022)	24
Figura 19 - Peça em fabrico aditivo com suportes (filament2print, 2015).....	25
Figura 20 - Processo de fumigação em polímeros (Kwang-Ho Jo, 2016).....	34
Figura 21 - Esquematização do processo de fumigação numa peça em ABS (Kwang-Ho Jo, 2016)	35
Figura 22- Esquematização do processo de mergulho numa peça em ABS (Kwang-Ho Jo, 2016).....	36
Figura 23 - Processo de Infiltração de resina (Kwang-Ho Jo, 2016)	37
Figura 24- Gama de temperaturas de óleo multigraduado (centre, 2020)	41
Figura 25 – Esquematização do procedimento experimental adotado	44

Figura 26 – Equipamento Prusa i3 mk3 S	45
Figura 27 - Estufa HEK-GMBH MCP-Vacuum	46
Figura 28 - Estufa P Selecta	46
Figura 29 – Balança do Kern F08.....	46
Figura 30 – Balança AG204.....	46
Figura 31 – Equipamento de ensaios Zwick 100.....	47
Figura 32 – Rolo de ABS marca Filo Alfa	48
Figura 33 – Rolo de PC-ABS da marca Filo Alfa	49
Figura 34 Rolo de PC da marca RepRap.....	49
Figura 35 - Resina Sicomin SR1500	50
Figura 36 - Endurecedor SD 2503.....	50
Figura 37 - Geometria e dimensões do provete, segundo o tipo IV da norma ASTM D638.....	51
Figura 39 – Dimensões do provete	52
Figura 38 – Provete modelado.....	52
Figura 41 – orientação horizontal das camadas.....	52
Figura 40 – orientação vertical das camadas	52
Figura 43 – Disposição do provete na horizontal, no <i>software prusa</i>	53
Figura 42 – Disposição do provete na vertical, no <i>software prusa</i>	53
Figura 44 – Provete produzido na vertical, com suportes.....	54
Figura 45 – Provete produzido na horizontal, sem suportes.....	54
Figura 46 – conjunto de 4 provetes de PC impressos	54
Figura 47 – Comparação do provete com camada de 0.3mm (à esquerda) e 0.15mm (à direita).....	55
Figura 48 – <i>Brim</i> de um conjunto de 4 provetes de ABS	56
Figura 49 – Temperaturas de impressão para PC-ABS	57
Figura 50 – Temperaturas de impressão para PC	57
Figura 51 – Temperaturas de impressão para ABS	57
Figura 52 Provetes de PC impressos com peno devido a parâmetros não ideais.....	58
Figura 53– Provete de PC com zonas de fixação	58
Figura 54 – Seleção de provetes de PC	59
Figura 55 – Esquematisação do número de provetes necessários e os períodos de mergulho	60

Figura 57 – Recipiente de resina Sicomin SR1500.....	61
Figura 56 – Registo da massa de resina	61
Figura 58 – Adição da massa de endurecedor respeitando a relação indicada.....	62
Figura 59 – Provetes na estufa HEK-GMBH MCP-Vacuum.....	62
Figura 60 – Material utilizado e disposição do provete no processo de remoção do excesso de resina.....	63
Figura 61 – Provetes antes e após a remoção do excesso de resina	63
Figura 62 – Óleo multigraduado Total 5w30 utilizado no mergulho dos provetes	64
Figura 64 – Provetes mergulhados em gasóleo.....	65
Figura 63 – Provetes mergulhados em óleo.	65
Figura 65 - Ensaio de tração para provete de ABS virgem	67
Figura 67 - Ensaio de provete ABS.....	68
Figura 66 - Provetes em material virgem	68
Figura 68 - Deslocamento dos provetes de ABS em óleo	70
Figura 69 - Deslocamento dos provetes de ABS em gasóleo.....	70
Figura 70 – Resistência à tração para ABS em óleo	71
Figura 71 - Resistência à tração para ABS em gasóleo.....	71
Figura 72 – Deslocamento em PC-ABS em óleo	73
Figura 73 – Deslocamento para PC-ABS em gasóleo.....	73
Figura 75 – Resistência à tração para PC-ABS em gasóleo	75
Figura 74 – Resistência à tração para PC-ABS em óleo	75
Figura 77 - Provetes em PC não revestido mergulhados em óleo	77
Figura 76 – Provetes em PC revestido mergulhados em óleo	77
Figura 78 – Deslocamento para PC em gasóleo.....	78
Figura 79 – Resistência à tração para PC em gasóleo	79
Figura 81 - Variação de massa em provetes de ABS mergulhados em gasóleo.....	80
Figura 80 – Variação de massa em provetes de ABS mergulhados em óleo	80
Figura 82 – provete de ABS revestidos, mergulhados em óleo, ao 7 ° dia.....	81
Figura 83 – provetes de ABS revestidos, mergulhados em óleo ao fim do 28° dia.....	81
Figura 84 – Variação de massa para provetes de PC em gasóleo.....	82
Figura 85 – Provete PC revestido mergulhado em gasóleo.....	83

Figura 86 - Variação de massa em provetes PC-ABS mergulhados em óleo	83
Figura 87 – Variação de massa em provetes PC-ABS mergulhados em gasóleo	83
Figura 88 - provetes de PC-ABS revestidos mergulhados em óleo ao fim de 7 dias	84
Figura 89 - provetes de PC-ABS revestidos mergulhados em óleo ao fim de 28 dias	84
Figura 90 – Registo da massa de óleo em provetes dos vários materiais	90
Figura 91 - Registo da massa de óleo em provetes dos vários materiais	90
Figura 92 - Registo da massa de gasóleo em provetes dos vários materiais.....	91
Figura 93 - Registo da massa de óleo em provetes dos vários materiais	91
Figura 94 – Geometria do provete usado em ensaios de tração.....	92
Figura 95 – Gráfico da curva tensão - deformação.....	94
Figura 96 – Seleção da altura de cada camada	96
Figura 97 – Seleção de cada material	96
Figura 98 – Seleção da impressora Prusa MK3S+	97
Figura 99 – seleção de impressão sem suportes	97
Figura 100 – Parâmetros para a primeira camada impressa	98
Figura 101 – Densidade de cada camada.....	98
Figura 102 – Definição das dimensões do <i>brim</i>	99
Figura 103 – Procedimentos de impressão na <i>PRUSA MK3S+</i>	100
Figura 104 – Impressora em funcionamento	100
Figura 105 – Gráficos força – deslocamento para provetes em ABS virgem.....	101
Figura 106 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 7 dias em óleo	102
Figura 107 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 7 dias em óleo.....	103
Figura 108 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 7 dias em gasóleo.....	104
Figura 109 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 7 dias em gasóleo.....	104
Figura 110 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 14 dias em óleo	105
Figura 111 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 14 dias em óleo.....	105
Figura 112 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 14 dias em gasóleo....	106
Figura 113 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 14 dias em gasóleo.....	107
Figura 114 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 21 dias em óleo	108
Figura 115 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 21 dias em óleo.....	108

Figura 116 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 21 dias em gasóleo	109
Figura 117 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 21 dias em gasóleo	110
Figura 118 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 28 dias em óleo.....	110
Figura 119 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 28 dias em óleo	111
Figura 120 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 28 dias em gasóleo	112
Figura 121 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 28 dias em gasóleo	112
Figura 122 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes em PC virgem	113
Figura 123 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC 7 dias mergulhados em gasóleo	114
Figura 124 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC 7 dias mergulhados em gasóleo	115
Figura 125 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC 14 dias mergulhados em gasóleo	116
Figura 126 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC 14 dias mergulhados em gasóleo	116
Figura 127 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC 21 dias mergulhados em gasóleo	117
Figura 128 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC 21 dias mergulhados em gasóleo	118
Figura 129 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS virgem	119
Figura 130 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 7 dias mergulhados em gasóleo	120
Figura 131 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC 7 dias mergulhados em óleo	121
Figura 132 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 7 dias mergulhados em gasóleo	121
Figura 133 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 7 dias mergulhados em gasóleo	122
Figura 134 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 14 dias mergulhados em óleo.....	123
Figura 135 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC 14 dias mergulhados em óleo	123
Figura 136 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 14 dias mergulhados em gasóleo	124
Figura 137 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 14 dias mergulhados em gasóleo	125
Figura 138 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 21 dias mergulhados em óleo.....	125

Figura 139 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 21 dias mergulhados em óleo.....	126
Figura 140 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 21 dias mergulhados em gasóleo.....	127
Figura 141 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 21 dias mergulhados em gasóleo.....	128
Figura 142 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 28 dias mergulhados em óleo.....	129
Figura 143 - - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 28 dias mergulhados em óleo.....	130
Figura 144 - - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 28 dias mergulhados em gasóleo.....	130
Figura 145 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 28 dias mergulhados em gasóleo.....	131

Lista de tabelas

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos materiais usados em produtos do cotidiano	27
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos materiais usados em produtos na área da engenharia	28
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens dos materiais usados em produtos de elevada <i>performance</i>	29
Tabela 4 – Determinação da massa de endurecedor.....	61
Tabela 5 – Valores de deslocamento e resistência à tração para provetes ABS.....	73
Tabela 6 - Valores de deslocamento e resistência à tração para provetes PC-ABS.	76
Tabela 7 – Valores de deslocamento e resistência à tração nos provetes de PC	79

Lista de siglas e acrónimos

3D	Tridimensional
µm	Micrómetro
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
CAD	<i>Computer-aided Design</i> (Desenho assistido por computador)
DSLM	<i>Direct Metal Laser Sintering</i> (Sinterização laser de metal direta)
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelação por deposição fundida)
LSEV	<i>Low Speed Electric Vehicle</i> (Veículo elétrico de baixa velocidade)
PAEK	Poliarletocercetona
PC	Policarbonato
PC-ABS	Policarbonato – Butadieno-Estireno
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
PET	Politereftalato de etileno
PLA	Poliácido láctico
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros automóveis)
SLA	<i>Stereolithography</i> (Estereolitografia)
SLM	<i>Selective Laser Melting</i> (Fusão Seletiva a Laser)
SLS	Selective laser sintering (Sinterização seletiva por laser)
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i> (Poliuretano termoplástico)

1. Introdução

Os processos de fabricação aditiva surgiram na década de 1980 e têm vindo a aumentar bastante a sua popularidade no decorrer dos últimos anos, pelo conjunto de novas possibilidades que oferecem, comparativamente aos denominados processos convencionais (subtrativos, de conformação plástica e de ligação). Esta tecnologia tem vindo também a ser alvo de constantes pesquisas, tanto no âmbito académico como industrial. A simplicidade do processo e os baixos custos associados a praticamente todos os processos tornam a impressão 3D adequada a diversas áreas onde sejam exigidos produtos com geometrias mais complexas ou, por exemplo, seja necessário produzir poucas unidades que não justificam o recurso aos processos convencionais. O princípio de impressão camada sobre camada, que elimina a necessidade da criação de moldes, ou a possibilidade de reproduzir várias texturas e utilizar vários materiais no mesmo componente atraem também várias indústrias.

Os processos de fabrico aditivo permitem a transformação de materiais em componentes de elevado desempenho, com bastante detalhe e para número de unidades reduzidas. Tenha-se como exemplo protótipos para as áreas automóvel e aeroespacial, impressão de modelos estruturais na área da arquitetura ou ainda próteses dentárias e sistemas de libertação de fármacos na área da medicina. Devido à sua versatilidade quando aplicada em polímeros, a também designada fabricação aditiva atraiu a atenção de engenheiros, químicos e especialistas em materiais. Com possibilidade de alcançar elevados níveis de pormenor em objetos com dimensões bastante reduzidas, esta tecnologia torna-se adequada às áreas da, entre outras, robótica, biomédica e cirúrgica. (Ali Bagheri, 2019).

Existe um conjunto de materiais aplicados atualmente, que variam consoante a aplicação do componente produzido e o processo utilizado. Para objetos mais usuais, presentes no nosso quotidiano, são muito usados o PLA (*Polylactic Acid*) e o ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*). Para áreas da engenharia, onde são exigidas melhores características, recorre-se normalmente a PET (*Polyethylene Terephthalate*) e TPU (*Thermoplastic Polyurethane*). Para objetos com elevado desempenho, utilizados em áreas como indústria aeronáutica ou áreas cirúrgicas, recorre-se com frequência ao PEEK (*Polyetheretherketone*) (Matmatch, 2020).

Com a popularização da fabricação aditiva, os preços dos equipamentos e materiais baixam, mas evidenciam-se problemáticas. Estas problemáticas podem estar associadas à conceção do componente, requerendo alterações dos parâmetros de impressão, ou desvantagens mecânicas, associadas às características dos materiais e do próprio processo. O objetivo deste projeto passa por avaliar uma dessas desvantagens mecânicas do processo: a porosidade característica de objetos fabricados em FDM, provocada pelo princípio de impressão camada sobre camada. Esta porosidade é avaliada estudando as influências do contacto de longa duração entre um componente automóvel fabricado por fabrico aditivo e um fluído existente num veículo.

No âmbito do presente projeto, foi utilizado como material em estudo o ABS, PC-ABS (Policarbonato – Butadieno-Estireno) e PC (Policarbonato), tendo em consideração as características de cada um. Começando pelo ABS, este foi escolhido tendo em conta a aplicabilidade do mesmo na indústria automóvel, assim como a sua elevada resistência ao impacto. A resistência ao impacto é relevante quando se trata desta indústria, através do qual se pretendem componentes duradouros, mesmo quando sujeitos a esforços e impactos contínuos. Já o PC teve lugar neste projeto tendo em conta não só a sua elevada resistência mecânica, mas como a sua baixa variação volúmica, uma vez que este polímero não absorve humidade nem altera muito as suas dimensões. Por último, o PC-ABS foi utilizado neste projeto uma vez que, sendo uma conjugação do PC e do ABS, prevê-se que beneficie das melhores características de ambos: elevada resistência ao impacto e boa flexibilidade.

Os provetes que foram produzidos e ensaiados laboratorialmente neste projeto são modelados num *software CAD (Computer-aided Design)*, seguindo a geometria definida na norma ASTM D638. O ficheiro *CAD* permite a criação dos ficheiros necessários à impressão dos componentes, sendo a informação convertida para um ficheiro do tipo *slice*, suportado pela impressora que produz os provetes. Para tal recorre-se ao equipamento presente no Laboratório de Prototipagem Rápida e Engenharia Inversa da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria e a rolos de filamento dos materiais selecionados, adquiridos propositadamente para este projeto.

Pela aplicação de uma camada de resina epoxídica, capaz de isolar o material do provete do fluído externo no qual foram mergulhados os provetes, avalia-se a alteração da permeabilidade do objeto. Para tal, fabricaram-se provetes, que serão revestidos e mergulhados por períodos distintos em fluídos presentes num automóvel com motor de

combustão interna, nomeadamente óleo e gasóleo. Posteriormente, os mesmos serão submetidos a ensaios de tração, analisando a variação do deslocamento do provete, bem como a alteração da sua resistência à tração. Os registos das massas são realizados, por forma a ajudar a concluir se a camada de resina aplicada causa variações na permeabilidade dos provetes.

1.1 Objetivos

O projeto desenvolvido tem como objetivo avaliar as alterações provocadas pela adição de uma camada de resina epoxídica na permeabilidade de componentes fabricados por processos de fabrico aditivo, quando em contacto com fluidos presentes num veículo movido por um motor de combustão interna.

1.2. Organização do Documento

O presente documento encontra-se estruturado em 5 capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução à temática abordada, assim como são explicitados os objetivos do trabalho e a organização do presente documento.

Já no segundo capítulo inclui-se toda a pesquisa que permite enquadrar este projeto no tema onde se insere. Deste modo, sob o título de “estado da arte”, introduz-se brevemente a pertinência do fabrico aditivo na indústria automóvel, fundamentada com exemplos de aplicações desta tecnologia. Posteriormente, descreve-se o impacto que os processos de fabrico aditivo têm atualmente na indústria. São também mencionadas as etapas e diferentes tipos de processos de fabrico aditivo, bem como as vantagens, desvantagens e materiais utilizados em cada um deles. É dada especial atenção aos materiais utilizados neste projeto. São também apresentados dados que refletem a adesão dos processos de fabrico aditivo em empresas.

Ainda no segundo capítulo é apresentada a pesquisa sobre os processos de revestimento. Os fluidos utilizados no procedimento experimental são também estudados neste capítulo

No terceiro capítulo são apresentados os equipamentos, materiais e métodos utilizados neste processo. São também descritos os procedimentos envolvidos na impressão dos provetes, revestimento e mergulho dos mesmos. Por fim, são descritos os ensaios de tração realizados.

O quarto capítulo incide sobre a análise e discussão dos resultados obtidos, nomeadamente sobre os ensaios de tração e variação de massa registada nos provetes.

Por fim, no quinto capítulo, são retiradas conclusões sobre os resultados obtidos, bem como apresentados os trabalhos futuros previstos.

2. Estado da arte

2.1. Contextualização

Em pleno século XXI, ao decorrerem mais de 150 anos desde o fim da primeira revolução industrial, observam-se, como seria de esperar, avanços incontáveis nos processos de fabrico. À medida que se torna necessário colocar no mercado quantidades maiores de objetos, num menor espaço de tempo, ou por outro lado, se desenvolvem novos materiais, com propriedades mais específicas e adequadas a novas aplicações, surge também a necessidade de adaptar os processos de fabrico aplicados.

Especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento de geometrias bastante complexas, os processos de fabrico aditivo trazem para o mercado uma revolução significativa, uma vez que pela adição de camadas, torna-se possível a elaboração de geometrias mais exigentes, como se explicará ao longo deste documento. Os processos de fabrico aditivo trazem ainda outra vantagem bastante significante: a possibilidade de fabricar componentes já não disponíveis no mercado. Ou seja, pela simplicidade associada a estes processos de fabrico aditivo, que não dependem da elaboração de moldes nem acarretam desperdício significativo de material, torna-se acessível produzir componentes para equipamentos antigos e cujas peças se encontram fora de produção. Pela medição da peça antiga que se pretende reproduzir, consegue imprimir-se uma nova peça, num vasto leque de materiais, em relativamente pouco tempo. Existem ainda novos avanços, que permitem reproduzir uma nova peça, sem a necessidade de recorrer a processos de modelação direta. Para tal, basta colocar a peça desgastada ou danificada numa superfície com diversas câmaras, que captam a geometria da mesma para sua reprodução, corrigindo zonas em falta ou desgastadas (recuperação de carros antigos, 2020).

O restauro e reparação de veículos clássicos tira bastante partido desta tecnologia, tendo em conta que muitas das peças necessárias não se encontram disponíveis, ou são bastante dispendiosas. Pela modelação das peças necessárias, os colecionadores e oficinas de restauro conseguem agora reparar os seus veículos. As próprias marcas estão já a adotar esta técnica para reproduzir peças para modelos antigos, de forma que os seus clientes se sintam apoiados e mantenham os modelos clássicos nas estradas. A *Porsche*, conceituada fabricante de veículos desportivos da Estugarda, está atualmente a recorrer a processos de

impressão 3D para reproduzir peças de modelos clássicos e icônicos, como por exemplo a embraiagem do modelo 959, do qual foram produzidas apenas 292 unidades (Figura 1). Fabricada a partir de metal fundido, a marca alemã alega que este novo componente tem a mesma reação ao contacto com fluídos lubrificantes e resistência às variações de temperatura, descansando os proprietários que possam vir a necessitar de tal componente (recuperação de carros antigos, 2020).



Figura 1 – Porsche 959 (Tomé, Razão Automóvel, 2021)

A *StartUp* chinesa *Polymaker*, inovadora em técnicas de impressão 3D, produziu um protótipo de um veículo elétrico, o *LSEV* (*Low Speed Electric Vehicle*), construído quase na totalidade a partir de um processo de impressão 3D. Em parceria com a italiana *X Electrical Vehicle* (*XEV*), o objetivo seria produzir um veículo de baixa velocidade, citadino, que se adeque às exigências das deslocações nas grandes metrópoles (Figura 2). No entanto, a grande vantagem encontra-se no tempo de produção: estima-se que um *LSEV* consiga ser produzido, de raiz, em 3 dias, e que os seus componentes sejam até 5 vezes mais resistentes do que aqueles produzidos por métodos convencionais. Este veículo atingirá uma velocidade máxima de 69 km/h e terá baterias que atribuem uma autonomia de 150 km. Apenas o motor elétrico, pneus, baterias, janelas e bancos não serão produzidos através de processos de fabricação aditiva (Giantomaso, 2018).

O peso do *LSEV* é também bastante reduzido, com cada veículo a pesar cerca de 450kg. Segundo o *CEO* da *XEV*, a comercialização deste veículo permitirá ainda a personalização de acordo com os gostos do cliente muito mais avançada do que a que se verifica na atualidade, uma vez que se torna fácil construir estes itens personalizáveis (Giantomaso, 2018).



Figura 2 – LSEV visto do exterior e interior (Giantomaso, 2018)

Como último exemplo tem-se a Ferrari, fabricante de automóveis de *Maranello*, que utiliza técnicas de fabricação aditiva nos seus modelos mais exclusivos. É o caso de uma das suas mais recentes criações, o *SP48 Única*, do qual foi fabricada apenas uma unidade (Figura 3). Este automóvel baseia-se num modelo já existente da marca, contudo possui linhas mais fluídas e arrojadadas. Para tal, foi necessário redesenhar os faróis, a grelha e para-choques frontais, pelo que os engenheiros da marca italiana se apoiaram em técnicas de fabrico aditivo, que permitiram o *design* irreverente deste carro (Figura 4). Tendo em conta que só foi produzida uma unidade deste veículo e o prestígio da marca, as vantagens do fabrico aditivo tornam-se favoráveis (Autonews, 2020).



Figura 4 - Grelha frontal produzida através do fabrico aditivo (Autonews, 2020)



Figura 3 - Ferrari SP48 Única (Autonews, 2020)

2.2.Fabrico aditivo

Nos seus primórdios, o fabrico aditivo era designado por prototipagem rápida. Este nome provém do pouco desenvolvimento verificado na época, no que diz respeito a equipamentos existentes, pelo que se dedicava sobretudo à elaboração de protótipos de uma forma rápida e bastante mais facilitada quando comparada com os métodos convencionais (tecnometal, 2016).

Contudo, com o desenvolvimento das tecnologias de fabrico aditivo, surge uma questão fundamental: como podem os metais, minerais e a comunidade contribuir para um crescimento acelerado, mas responsável, tendo em consideração o estado de desenvolvimento desta tecnologia? A chave para a implementação a sua industrial consiste num conhecimento completo da interação entre o material e o processo. Existem, contudo, poucos processos ou materiais considerados totalmente desenvolvidos. Para um reconhecimento completo de todo o potencial do fabrico aditivo é ainda necessário perceber a correlação entre o processo adotado, a microestrutura do componente e as propriedades do material adotado. Quando tal acontecer, torna-se possível expandir a gama de materiais e de processos de fabrico aditivo. Desse modo, será possível selecionar materiais específicos e combinações de processos, de forma a alargar significativamente as aplicações do fabrico aditivo (Herderick, 2015).

Numa era de grande progresso tecnológico, a indústria enfrenta o que é considerada por muitos uma revolução industrial, com constantes evoluções surpreendentes. Surgem assim novos processos de fabrico, com tecnologias revolucionárias, que permitem obtenção de produtos mais avançados, ora por serem mais ecológicos, mais leves, ou com uma geometria mais complexa (Miriam R. Simon Cater, 2014).

No centro desta evolução industrial, designada por indústria 4.0, encontram-se as técnicas de fabrico aditivo. O princípio destes processos, tal como o seu nome indica, consiste no fabrico de uma peça pela adição de camadas sucessivas do material que a constituem, ao contrário dos processos convencionais, nomeadamente os processos subtrativos, que partem de um bloco do material desejado, ao qual é retirado material, por diversos processos, até se chegar à geometria desejada (tecnometal, 2016).

Segundo a norma ASTM F42 em fabrico aditivo, são assim definidas rotas distintas no processo de fabrico aditivo. Como seria expectável, cada um desses processos tem as suas próprias vantagens e desafios, que resultam do ciclo térmico e químico existente no processo e a microestrutura do componente resultante. Qualquer decisão relativamente ao processo adequado para a construção de um componente envolve sempre a composição do material utilizado, a rugosidade da superfície da peça final e ainda a possibilidade de manter as tolerâncias definidas na elaboração do protótipo. Impõem-se ainda questões relativamente aos custos associados e a capacidade de fornecimento de material para a produção (A. Ahmadi Nadooshan, 2007).

O grande entusiasmo gerado pelo fabrico aditivo centra-se no facto de, adotando este tipo de processos, os *designers* podem agora concentrar-se em desenhar componentes funcionais, deixando de parte as limitações de geometria existentes nos processos de fabrico convencionais. Associada à adoção de processos de fabrico aditivo surge também o teste rápido de novos protótipos, uma vez que não existe a dependência de produção de moldes metálicos, que demorariam algum tempo a serem produzidos (A. Ahmadi Nadooshan, 2007).

Os *Designers* sempre utilizaram protótipos, pelo que a rapidez com que se obtêm e redução de custos associada aos processos de fabrico aditivo torna-os apelativos. Para além disso, técnicas de fabricação aditiva podem também ser utilizadas para fabricar ferramentas específicas sem depender de fornecedores externos. A grande maioria dos protótipos elaborados a partir de técnicas de fabrico aditivo requerem assim bastante menos tempo para serem produzidos, dependendo da sua dimensão e complexidade, quando comparadas com as semanas ou mesmo meses necessários para produzir protótipos a partir dos métodos convencionais. Estes avanços na redução do tempo necessário permitiram aos engenheiros trazer para o mercado peças inovadoras mais rapidamente e menos dispendiosas (A. Ahmadi Nadooshan, 2007).

Na atualidade, segundo a norma ASTM F42, são sete as técnicas de fabrico aditivo comercializadas, cada uma com características únicas, que se adaptam a utilizações específicas (Figura 5). Estas técnicas distinguem-se pelo estado físico em que o material é fornecido, bem como o próprio método usado para o fabrico dos componentes (A. Ahmadi Nadooshan, 2007)



Figura 5 - Processos de fabrico aditivo segundo a norma ASTM F42, por estado de material (A. Ahmadi Nadooshan, 2007)

2.2.1. Princípio de funcionamento

A partir de um ficheiro de modelação elaborado previamente, é possível obter produtos com ótimos parâmetros funcionais, através da utilização de uma quantidade reduzida de material, reduzindo-se também as etapas necessárias durante o processo de fabrico. Desta forma, com o fabrico aditivo, é possível fabricar geometrias bastante mais complexas, até então impensáveis. Com esta característica, devido à precisão destes processos, é agora possível redimensionar e atribuir outras geometrias, de forma a poupar peso e economizar material, mantendo as características funcionais dos produtos.

Apesar das técnicas distintas existentes, todos os processos de fabrico aditivo têm em comum algumas tarefas, desde a modelação da peça, até à impressão do modelo final (Miriam R. Simon Cater, 2014):

1. Modelação do componente utilizando ferramentas *CAD (Computer Aided Design)*;
2. Conversão para *STL (Stereolithography)*;
3. Importação do ficheiro para *software* do equipamento de impressão
4. Manipulação do ficheiro *STL*;
5. Criação do ficheiro *Slice* (em equipamentos de *low-cost*, o ficheiro *g code*);
6. Impressão do modelo;
7. Pós-processamento (se aplicável).

O processo de fabrico por adição de camadas é aliado à conversão do modelo *CAD* para um modelo poligonal, criando uma representação da geometria em quantidades enormes de pequenos triângulos, afetando a qualidade do acabamento superficial da peça criada. Assim, geometrias perfeitamente circulares/esféricas, são agora formadas por pequenos triângulos, que contêm pequenas arestas, designado por erro *chordal* (Figura 6). Esta geometria, ao ser transportada para o componente físico final, contém ainda mais diferenças relativamente ao modelo inicial, uma vez que contém as zonas de transição entre as diversas camadas sobrepostas (*stair stepping*). Todo este processo prejudica a qualidade do acabamento superficial da peça (Chohan, 2020).

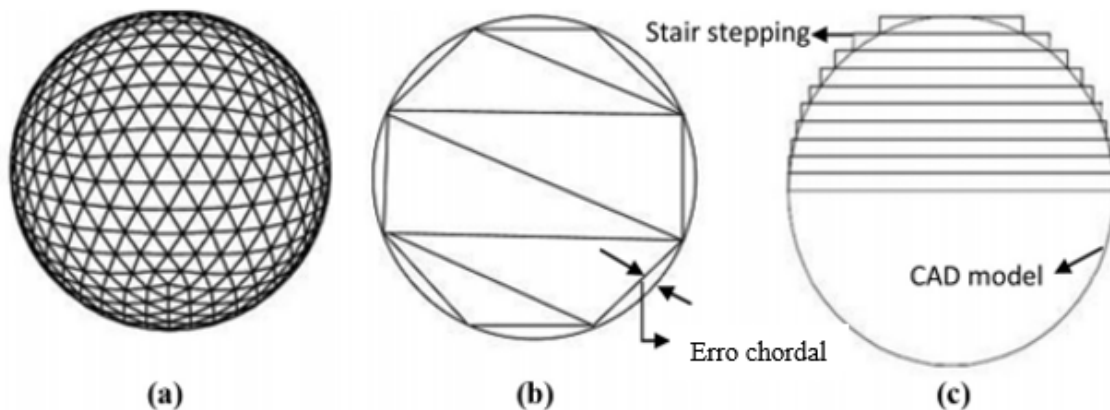


Figura 6 - Representação do *stair stepping* e erro *chordal* (Chohan, 2020)

O erro *chordal*, para além de afetar severamente a rugosidade superficial do componente fabricado, diminui também a resistência mecânica do material, criando pontos de rutura nas zonas situadas entre as camadas adicionadas sucessivamente na impressão do modelo *CAD*. Além disso, os pontos de transição entre camadas que surgem no momento da impressão do componente, *stair stepping*, aumentam a porosidade da peça. Esta porosidade pode comprometer a aplicabilidade do componente em sistemas com fluídos (Figura 6) (Miriam R. Simon Cater, 2014).

De uma perspetiva mais técnica, um componente em fabrico aditivo surge com base num ficheiro *CAD*, guardado sob o formato de (.stl), sendo este posteriormente dividido nas diversas camadas que irão formar a peça final. Esse mesmo ficheiro “.stl” baseia-se na conversão de um modelo 3D, numa “Shell” formada pelos inúmeros triângulos já

mencionados (Figura 6). Esses mesmos triângulos são calculados através de um algoritmo baseado na tabela ASCII ou em código binário. O *software* utilizado no equipamento de impressão lê então o ficheiro “.stl”, a “casca”, convertendo estes dados para um modelo formado pelas diversas camadas que serão impressas posteriormente (Miriam R. Simon Cater, 2014).

2.2.2. Vantagens e desvantagens do fabrico aditivo

Associado a cada processo de fabrico aditivo surgem diversas vantagens e desvantagens, que os tornam adequados a determinadas aplicações, quando comparados com os restantes processos de fabrico industriais. Contudo, considerando as características comuns, reúnem-se vantagens partilhadas entre todos eles (Ferreira, 2020).

1. Custos reduzidos – com os processos de fabrico aditivo eliminam-se alguns custos, como na aquisição e substituição de ferramentas, como ocorre nos processos de fabrico convencionais, que recorrem a ferramentas de corte. Os custos são também reduzidos pelo pouco desperdício de material;
2. Tempo de entrega reduzido: com a utilização de processos de fabrico aditivo, o tempo de entrega das peças é bastante mais reduzido, uma vez que não é necessário depender de moldes e, muitas vezes, de fornecedores externos. Desta forma, o componente pode ser fabricado num curto espaço de tempo. Tenha-se como exemplo ferramentas para algum equipamento, que podem ser impressas rapidamente no local;
3. Menor desperdício de produto: tendo em conta o princípio de funcionamento destes processos, ou seja, adição sucessiva de camadas do material escolhido, existe muito pouco material desperdiçado;
4. Eliminação do processo de montagem. Com a utilização dos processos de fabrico aditivo, as peças são fabricadas de uma vez só, segundo um modelo que representa a peça final. Não é assim necessário recorrer a soldaduras ou outro processo para completar a peça final;

5. Pouca complexidade: nos processos de fabrico convencionais, além dos custos para a produção do artigo, tem-se mais custos à medida que a complexidade da peça vai aumentando. No fabrico aditivo, a complexidade da peça apenas determina o tempo aplicado na modelação e impressão da peça;
6. Versatilidade: além das novas geometrias, o fabrico aditivo permite também aplicar, na mesma peça, diversas cores e rugosidades.

Com esta tecnologia, os custos associados à fase de pré-produção da peça são bastante menores, sendo estes os custos maioritários na produção de um componente usando métodos não aditivos. Além disso, é possível prever erros de produção na fase de projeção, onde nos processos não aditivos é comum existir pouca informação. Este fator pode poupar bastante tempo e reduzir os custos (Ferreira, 2020).

Contudo, a fabricação aditiva acarreta desvantagens, sendo uma das limitações as dimensões da peça produzida, que dependem do equipamento de impressão disponível, entre outras:

1. Variedade de materiais utilizados limitada: como já referenciado, são poucos os processos de fabrico aditivo que já atingiram a sua maturidade, existindo ainda materiais a ser explorados;
2. Operações de pós-processamento: dependendo das propriedades mecânicas da peça produzida, pode existir a necessidade de aplicar técnicas de pós-processamento, para melhorar o acabamento superficial ou atribuir alguma estanquicidade à peça;
3. Volumes de produção baixos: apesar das técnicas de produção por fabrico aditivo permitirem a elaboração de protótipos bastante mais rápido, sem a necessidade de moldes, estes processos não são adequados a produções em grande escala (Ferreira, 2020).

2.2.3. Adesão ao fabrico aditivo nas empresas

Analisadas as vantagens e desvantagens dos processos de fabrico aditivo, é importante perceber se as empresas que incluem processos de fabricação 3D nas suas linhas de produção ponderam continuar a aplicar esta tecnologia, ou mesmo aumentar o recurso à mesma.

Assim, por forma a analisar a adesão a processos de fabrico aditivo na atualidade, a *Sculpteo*, empresa francesa especializada em impressão 3D, enviou inquéritos a empresas de praticamente todos os continentes, por forma a que os resultados fossem globais. Com base em respostas a inquéritos elaborados a empresas que aplicam nos seus processos de fabrico tecnologias de impressão 3D conclui-se que, de entre as 1000 respostas obtidas, 17% destas dedicam esta tecnologia a componentes industriais, 12% a artigos para o consumidor final, 7% para a indústria aeronáutica e aeroespacial, e 6% a acessórios para a área da saúde (Figura 7) (sculpteo, 2018).

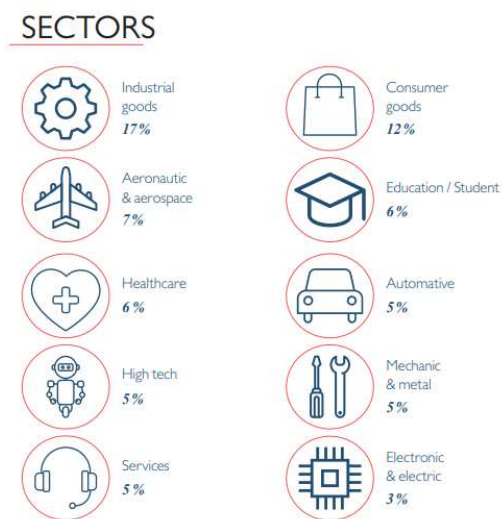


Figura 7 - Utilização da impressão 3D por setores (sculpteo, 2018)

De acordo com este inquérito, em 2018, as empresas investiram, em média, mais 11% do seu orçamento, em processos de fabrico aditivo, revelando que uma parte significativa do seu investimento se dedica a este tipo de processos de fabrico, principalmente quando comparados com os dados de 2017. Tais dados revelam também que as empresas estão cada vez mais conscientes das vantagens deste tipo de fabricação. Em 2018, 38% das empresas dispensou entre 1001 e 1000 \$ em tecnologias de fabrico aditivo, que representa um aumento de 5% face ao ano anterior, 2017 (Figura 8) (sculpteo, 2018).

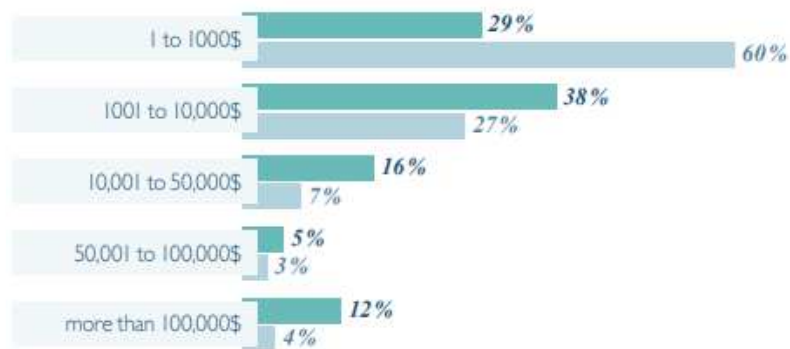


Figura 8 - Comparação do orçamento investido em tecnologias de impressão 3D, entre 2017 e 2018, em percentagem (sculpteo, 2018)

Em 2018, 48% dos inqueridos utilizam as tecnologias de prototipagem rápida maioritariamente para produzir geometrias complexas, aliado ao facto de ser uma tecnologia pouco dispendiosa. Logo em seguida, observam-se 39% dos inqueridos a optar pelos processos de impressão 3D para reduzir o tempo de produção, provavelmente pela área da indústria a que se dedicam. Para as percentagens mais baixas, com 9 e 8%, tem-se inqueridos que utilizam esta tecnologia para produções esporádicas e de forma a otimizar o fornecimento para as produções em série, respetivamente (Figura 9) (sculpteo, 2018).

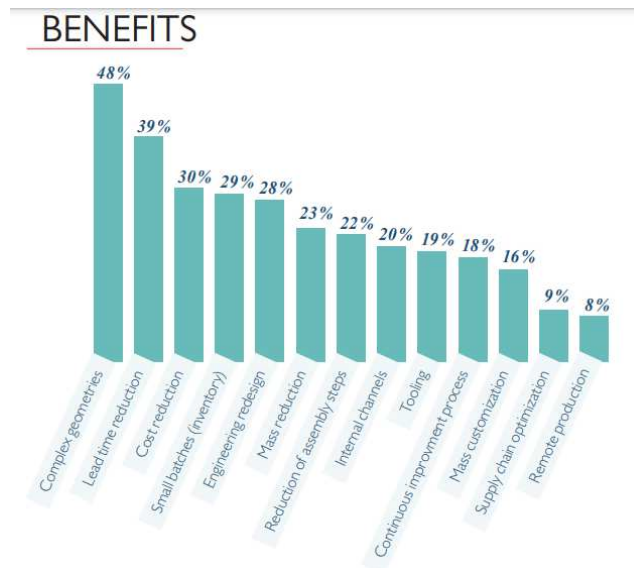


Figura 9 - Utilização da impressão da impressão 3D em percentagem (sculpteo, 2018)

Os profissionais estão a utilizar este tipo de tecnologia para um maior número de aplicações, confirma o estudo. Tanto em 2017 como em 2018, a impressão 3D era maioritariamente utilizada para prototipagem e produção. Contudo, em 2018 esta percentagem subiu bastante, indicando confiança neste tipo de processos pelos empresários e engenheiros (Figura 10).

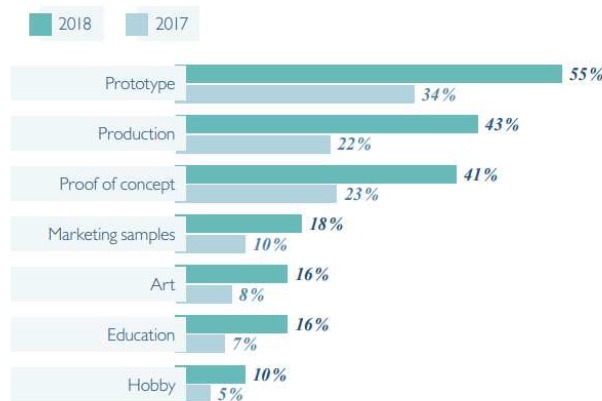


Figura 10 - Comparação da utilização da impressão 3D entre 2017 e 2018, em percentagem (sculpteo, 2018)

Estas percentagens ascendentes entre os anos de 2017 e 2018 mostram que as vantagens do fabrico aditivo aliciam cada vez mais as indústrias, o que faz com que estes métodos se tornem cada vez mais usuais. Com isso, os preços dos materiais têm tendência a baixar, que por sua vez aumenta ainda mais a procura por este tipo de processos de fabrico.

A Figura 11 reflete também a adesão às tecnologias de processo de fabrico. Nesta figura são apresentados os lucros, em milhões de dólares, por produtos (representados a azul) e por serviços de fornecimento de tecnologias de impressão 3D, desde 1993 até 2015. Como se pode constatar, durante a época de 1990, a tecnologia estava ainda a começar a ser divulgada, fazendo com que a indústria tomasse uma atitude um pouco cética face à sua adoção. Contudo, conforme foram sendo dadas provas das suas vantagens, os processos de fabrico aditivo começaram a ser adotados e os lucros associados a subir. De 2010 a 2015 os lucros subiram bastante, numa fase em que os processos já estão mais perto da otimização e os materiais e equipamentos apresentam preços ainda mais favoráveis (tecnometal, 2016).

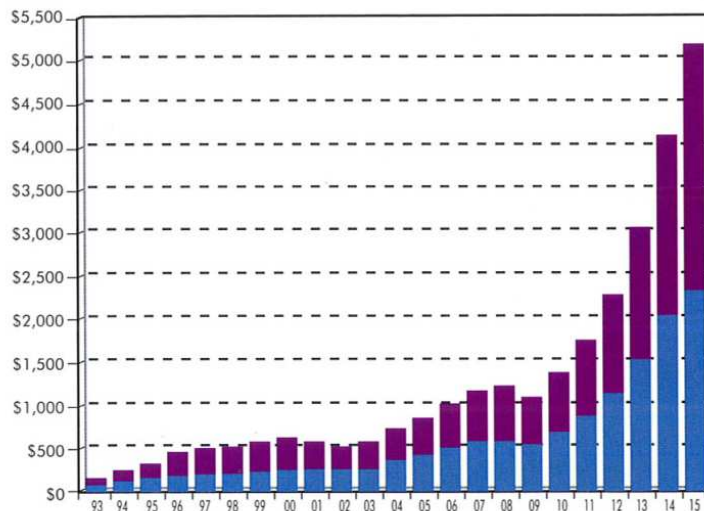


Figura 11 - Lucros, em milhões de dólares, de produtos (a azul) e serviços (a roxo) provenientes do fabrico aditivo (tecnometal, 2016)

2.2.4. Processos de fabrico aditivo

Em cada categoria de processos de fabrico aditivo encontram-se diversos processos, cada um com as suas vantagens e desvantagens. No entanto, os mais comuns em utilizações industriais são os seguintes (Herderick, 2015):

1. Fotopolimerização de resinas fotossensíveis (SLA e DLP);
2. Fusão de pós – sinterização e fusão (SLS e SLM);
3. Deposição de material fundido (FDM).

Os materiais usados nestes processos podem encontrar-se no estado sólido, líquido ou sob a forma de pó. Existem já casos em que os materiais fornecidos são polímeros sob a forma de filme ou filamento (omnexus, 2020).

Assim, conjugando os processos de fabrico mais usuais com o estado do material fornecido, obtém-se (Figura 12):

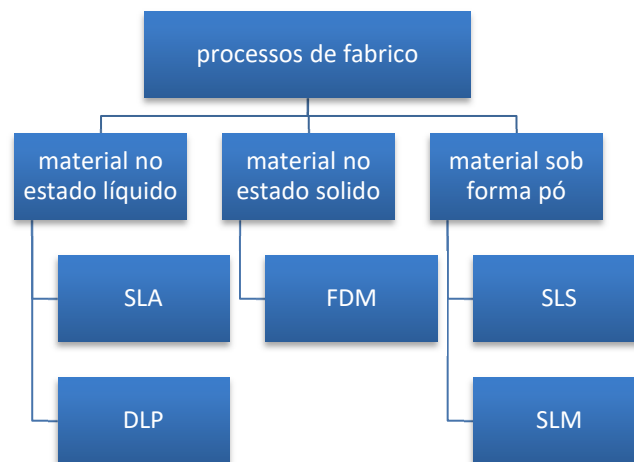


Figura 12 - Processos de fabrico aditivo mais comuns, consoante o tipo de material e modo de deposição (filament2print, 2015)

De um modo geral, o utilizador tende a escolher em primeira instância o processo que mais se adequa às suas necessidades, e apenas posteriormente decide qual o material que vai utilizar.

Apesar da tecnologia mais adotada ser o FDM, devido também a equipamentos de baixo custo, a tecnologia SLA e SLS têm vindo a aumentar a popularidade nos últimos anos, uma vez que os equipamentos têm diminuído o preço.

2.2.4.1. Fotopolimerização de resinas fotossensíveis (SLA e DLP)

A fotopolimerização seletiva de resinas é a segunda tecnologia mais adotada, a seguir ao FDM. Esta tecnologia insere-se na categoria polimerização VAT (Processos de Fotopolimerização em câmara), em conjunto com a tecnologia DLP (*Digital Light Processing*) (Schoffer, setembro de 2022).

Esta tecnologia recorre à fotopolimerização de uma fina camada de resina, através de laser, que solidifica apenas a estrutura programada do componente. É possível obter camadas com até 25 μm , uma resolução muito superior à que se obtém em peças fabricadas em FDM. Quando é terminada a solidificação de uma camada de resina, a peça sobe, de forma a ser solidificada a camada seguinte (Schoffer, setembro de 2022).

Dentro das tecnologias VAT, o SLA é o processo mais antigo, que utiliza espelhos que refletem o laser, por forma a solidificar a resina nos pontos pretendidos para criar a geometria (Figura 13). DLP é uma evolução deste processo, que emite radiação laser diretamente para a resina, solidificando todos os pontos de cada camada ao mesmo tempo. As peças produzidas por DLP são bastante idênticas às produzidas por SLA, mas num período mais reduzido. De forma a obter propriedades mecânicas apropriadas, é frequente recorrer a técnicas de pós-processamento. (Schoffer, setembro de 2022).

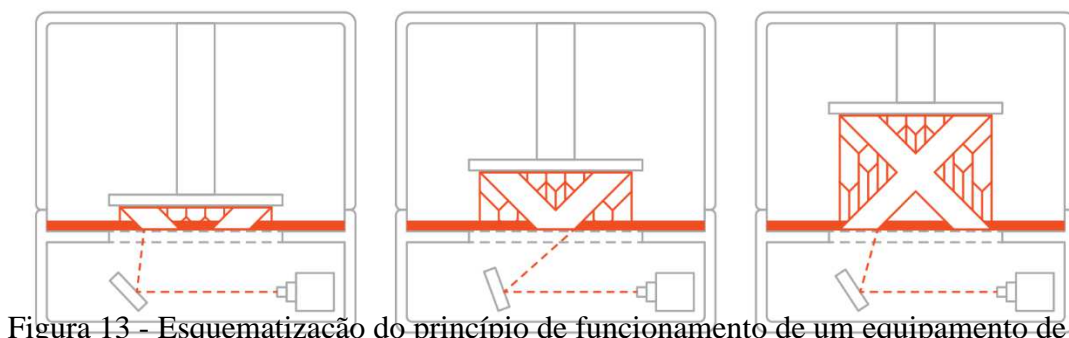


Figura 13 - Esquemática do princípio de funcionamento de um equipamento de SLA (SLA 3 PRINTING , 2020)

Como não recorre a temperaturas tão elevadas como o FDM, as variações de volume são mais reduzidas. Assim, o SLA é aplicado para produzir peças com dimensões bastante grandes. Existem marcas a produzirem tabliers e para-choques completos recorrendo a este processo, tendo em conta também que o acabamento superficial é muito bom, considerando-se mesmo o melhor de entre todos os processos de fabrico aditivo (Figura 14) (Schoffer, setembro de 2022).

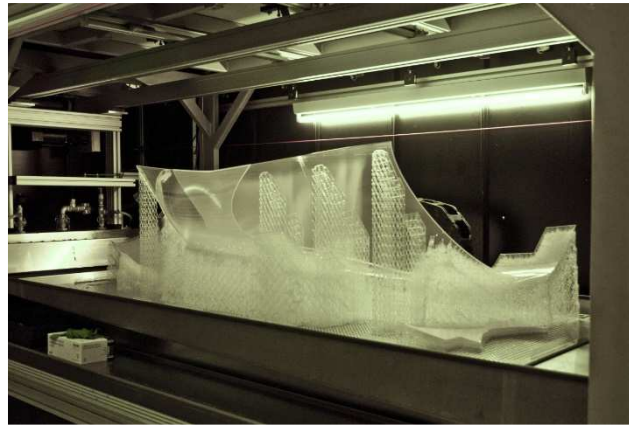


Figura 14 - Fabrico de um para-choques recorrendo a SLA (materialise, 2019)

Devido ao excelente acabamento superficial, o SLA é também utilizado para brinquedos para crianças e na indústria eletrónica. Qualquer peça com elevado nível de detalhe pode ser produzida por SLA.

A desvantagem deste processo é, tal como no FDM, tem a necessidade de criar suportes de apoio à geometria, que obriga à sua posterior remoção, aumentando o tempo decorrido até à peça estar concluída, bem como o custo. Para além disso, as peças são sensíveis à radiação UV, pelo que se degradam rapidamente ao longo do tempo. O processo torna também os componentes produzidos sensíveis às variações de temperatura, pelo que as peças produzidas são normalmente protótipos e não peças funcionais (Schoffer, setembro de 2022).

2.2.4.2. Fusão de pós – sinterização e fusão (SLS e SLM)

O processo de Sinterização Seletiva por Laser insere-se nos processos de fabrico aditivo com base em materiais sob a forma de pó. É uma das tecnologias de fabrico aditivo mais antigas em ambientes industriais, contudo é provavelmente a tecnologia menos conhecida entre todas. Tal deve-se ao facto de, até recentemente, os equipamentos serem bastante dispendiosos e as condições para a instalação dos mesmos serem bastante específicas. Contudo, nos últimos anos, e à semelhança do que já se verificava nas tecnologias de FDM e SLA, surgiram equipamentos para SLS em formato *desktop*, que tornaram este processo mais apelativo (Ali Bagheri, 2019).

O processo de sinterização dos pontos a unir ocorre normalmente sob condições de temperatura e pressão elevadas, fazendo com que cada partícula de material seja sinterizada com a partícula vizinha. É depositada uma camada de pó na mesa do equipamento, onde um feixe laser de dióxido de carbono causará a sinterização das partículas, apenas nos pontos desejados. Quando uma camada é terminada, é colocada outra dose de pó, espalhada uniformemente pela base onde ocorre a construção. Todo o processo acontece sob uma atmosfera de nitrogénio, para que a câmara de construção seja uniforme e não ocorra oxidação dos materiais (Figura 15). Após o processo de construção da peça, a sua temperatura baixa e a camada de pó em excesso cuidadosamente retirada. Por forma a melhorar o acabamento superficial, a peça pode ser polida (Ben Benwood, setembro de 2022).

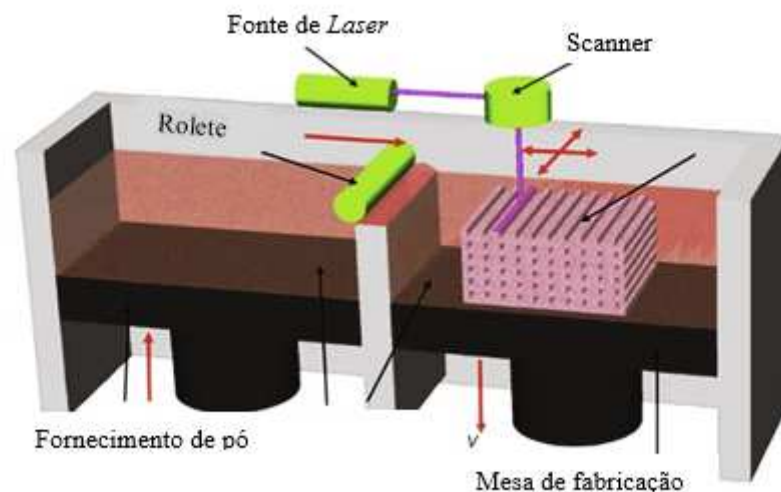


Figura 15 – Representação de um processo de SLS (Herderick, 2015)

Os materiais mais frequentemente utilizados no processo de SLS são polímeros e pós metálicos revestidos com polímeros. A utilização de polímeros é bastante comum devido ao baixo ponto de fusão e à elevada condução térmica (Ben Benwood, setembro de 2022).

O processo de SLS é bastante indicado para componentes com elevada resistência mecânica e geometria complexa. Podem ser obtidos protótipos para processos de injeção, em diversas áreas, tais como automóvel ou medicina (Figura 16).

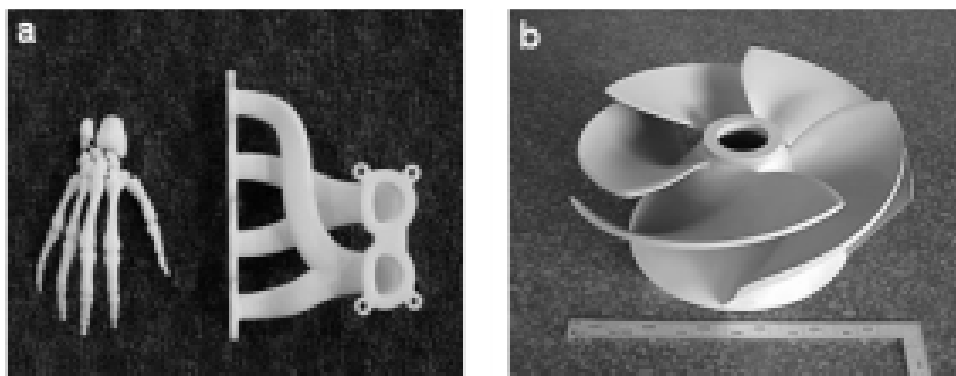


Figura 16 – componentes fabricados em SLS

Tal como outras tecnologias, também esta sofreu avanços significativos no sentido em que consiste numa tecnologia capaz de processar pó metálico diretamente. Neste caso em específico, trata-se de uma tecnologia baseada na fusão de pós e não na sinterização de pós. A tecnologia é designada por *Selective Laser Melting* (SLM). Similar ao processo de SLS, o processo SLM utiliza um laser em câmara fechada sobre uma plataforma de pó para a produção da peça metálica, com a diferença da potência do laser ser superior e a câmara ser inerte e termicamente controlada. Devido às semelhanças entre estes dois processos, serão mencionadas de seguida as vantagens e limitações referentes a SLS (Ben Benwood, setembro de 2022).

Como em qualquer outro processo, ao optar pelo SLS, é necessário ter em consideração o balanço entre as vantagens e desvantagens associadas. Existe um conjunto de vantagens associadas a este processo, sendo que a principal é a possibilidade de produzir peças com elevada resistência. Como a base de pó é sinterizada pelo laser, a estrutura do componente é criada diretamente, sem a necessidade de suportes, ao contrário dos outros processos (Ben Benwood, setembro de 2022).

Os materiais utilizados nos processos de SLS apresentam geralmente elevada resistência química. Ao aliar este fator, com a grande isotropia dos componentes produzidos, concluiu-se que o SLS é adequado para a produção de peças funcionais

Um processo de SLS é normalmente mais longo que o de SLA ou FDM. Além de ser necessário mais tempo para produzir a peça, é necessário que esta arrefeça. Com a temperatura da peça estabilizada, é necessário ainda recorrer a métodos para remover todo o pó em excesso, que não foi sinterizado. No entanto, o pó em excesso é reaproveitado, pelo que praticamente todo o material é utilizado neste processo, anulando praticamente o desperdício.

O SLS é também um processo geralmente mais dispendioso que o FDM ou SLA. Trata-se de um processo industrial, com equipamento dispendioso, e executado por operadores experientes, que necessitam de ferramentas específicas.

Por fim, importa também referir que o SLS, apesar de permitir geometrias bastante complexas, produz componentes com um acabamento superficial fraco. Devido às temperaturas envolvidas no processo, as peças produzidas têm tendência a variar o seu volume e a empenar (Ben Benwood, setembro de 2022).

2.2.4.3. Deposição de material fundido (FDM)

A Deposição de Plástico Fundido (FDM) é a tecnologia de fabrico aditivo mais popular entre todas e, sendo o método aplicado para a impressão dos provetes neste trabalho prático, captou especial atenção. Este processo enquadra-se na categoria que recorre a materiais sólidos (sob a forma de filamento). *Stratasys*, empresa que atribuiu o nome a este processo, define o FDM como “um processo que cria peças pela extrusão de um termoplástico fundido em camadas finas, de forma a criar a peça camada a camada” (Miriam R. Simon Cater, 2014). O ar existente na câmara de impressão é mantido a uma temperatura ligeiramente superior à temperatura de solidificação do material termoplástico, de forma que a peça solidifique quase instantaneamente após a impressão (Taylor, 2022).

Num equipamento de fabrico por FDM, encontramos um rolo de material que alimentará o bico extrusor, sendo este último um dos componentes mais importantes da

máquina. O rolo contém material em filamento, com espessura entre os 1.75 e os 3mm, que é levado por roletes até ao bico de extrusão. Devido à presença de uma câmara de aquecimento, o material chega ao bico extrusor a uma temperatura superior à de fusão. Posteriormente, o material é depositado na mesa, também esta aquecida, camada sobre camada, até que se obtém a geometria pretendida (Figura 17). A criação de suportes é necessária, caso a geometria da peça ou do número de peças que se pretende produzir assim o exija. Esta necessidade de suportes gera um aumento do material utilizado (Taylor, 2022).

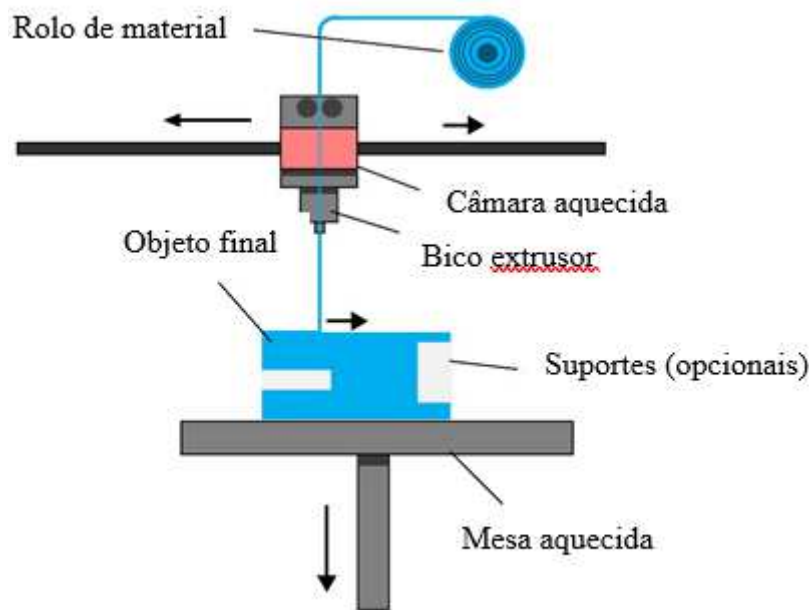


Figura 17 - Processo de impressão por FDM (Taylor, 2022)

Existe assim, sistemas de fabrico por FDM industriais e *desktop*, que se diferenciam principalmente pela capacidade de impressão e custos de equipamento. Os equipamentos industriais estão aptos a completar impressões de peças com dimensões muito superiores e num período mais reduzido, sendo por isso equipamentos muito mais dispendiosos, aplicados a indústrias que necessitam de um grande número de peças produzidas num curto espaço de tempo. Os sistemas industriais não permitem a alteração dos parâmetros de impressão durante um processo, uma vez que estes são previamente estudados para que se obtenham peças com a maior qualidade possível, não existindo espaço para ensaios intermédios até se encontrar a solução ideal. Por outro lado, os sistemas *desktop*, mais pequenos e acessíveis, são muitas vezes acompanhados por *software* livre, que permite a

alteração dos parâmetros. Contudo, o utilizador pode não ter a experiência necessária para operar o sistema. Com a popularização destes sistemas, os materiais baixaram os preços. O FDM é assim um processo de fabrico com custos reduzidos, que produz peças rapidamente (Miriam R. Simon Cater, 2014).

Devido aos princípios que estão na base de um processo envolvido no FDM, podem existir equipamentos com área de impressão superior a 1 metro, capazes de produzir peças de dimensões razoáveis. atualmente está a ser testada a possibilidade de produzir componentes termoplásticos, conciliados com materiais metálicos, permitindo a produção de circuitos integrados. Desta forma, o FDM é um processo que abrange uma vasta gama de materiais (Schoffer, setembro de 2022).

Apesar de ser o processo mais comum, este é também um pouco complexo e limitado. Estas limitações começam por afetar o *design* do próprio objeto, obrigando muitas vezes a uma nova projeção da geometria. Este facto afeta, em algumas situações, a viabilidade da aplicação deste método. Tal como no SLS, existem variações de temperaturas, sendo que no FDM estão associadas à temperatura de extrusão de material elevada. Tal provoca empenos da peça final, assim como um acabamento superficial mediano (Schoffer, setembro de 2022).

Outra limitação deste processo prende-se com o facto de o material não poder ser depositado no ar, sem qualquer estrutura de apoio. Deste modo, são necessários suportes, para que seja possível reproduzir pontes ou saliências (Figura 18). Com isto, impõe-se a utilização de maior quantidade de material, além de mais tempo, necessário para remover os suportes colocados previamente (Ferreira, 2020).



Figura 18 - Peça em fabrico aditivo com suportes (filament2print, 2015)

2.2.4.4. Materiais utilizados no FDM

No que diz respeito aos materiais utilizados neste processo de fabrico, existe já um vasto leque de possibilidades, que se diferenciam, como seria de esperar, pela aplicação da peça final produzida, ou ainda dependendo, se se pretende fabricar um protótipo ou uma peça final.

Os materiais utilizados para aplicação do fabrico por FDM variam desde materiais mais comuns na indústria, como o plástico ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) ou o PLA (*Polylactic Acid*), a materiais com características melhoradas aplicados principalmente em áreas de engenharia, como exemplo o PC (Policarbonato), TPU (*Thermoplastic Polyurethane*), PET (*Polyethylene Terephthalate*), ou ainda materiais de elevado desempenho, como o PEEK (*Polyetheretherketone*), um termoplástico orgânico transparente. Nas tabelas abaixo resumem-se as vantagens e desvantagens associadas a cada um destes materiais.

Alguns dos materiais mais comuns para utilização em FDM, utilizados para fabricar produtos do quotidiano, são o ABS e PLA (Tabela 1). O PLA é um termoplástico biodegradável fabricado a partir de fontes renováveis, como aveia ou cana-de-açúcar. Este é o material mais utilizado nas impressões 3D no momento. Devido às suas origens alimentares, o PLA é também adequado a embalagens de produtos alimentares (Matmatch, 2020).

O ABS é assim o segundo material mais utilizado para impressões 3D, a seguir ao PLA. O ABS é adequado para o fabrico de objetos que sofram variações de temperaturas e carga cíclicas. Este material é utilizado, maioritariamente, em aplicações cirúrgicas, brinquedos e protótipos (Matmatch, 2020).

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos materiais usados em produtos do quotidiano

	Vantagens	Desvantagens
PLA	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado em equipamentos de baixo custo • Biodegradável • Requer temperaturas de impressão baixas • Pouca variação de volume depois de impresso • Disponível no mercado em várias cores e texturas 	<ul style="list-style-type: none"> • Brilho elevado • Baixa dureza e longevidade • Entupimento dos injetores da impressora
ABS	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência ao impacto • Boa resistência à tensão • Durabilidade elevada • Bom isolador elétrico • Bom acabamento superficial 	<ul style="list-style-type: none"> • Produção de gases tóxicos • Pode ser danificado por luz solar

Existem também materiais utilizados para FDM cujas propriedades mecânicas são melhores do que os materiais usados em objetos para utilizações diárias. Estes materiais são normalmente utilizados em áreas de engenharia, destacando-se o PET e o TPU (Tabela 2) (Matmatch, 2020).

O PET é um termoplástico derivado do petróleo, da família do poliéster. Uma das suas variações, o PETG (*Polyethylene Terephthalate with glycol*), é um dos materiais mais comuns na impressão 3D, acompanhado do ABS e PLA. A sua transparência, impermeabilidade, e resistência química tornam este material indicado para recipientes para líquidos e embalagens alimentares (Matmatch, 2020).

O TPU é um material termoplástico bastante flexível, resistente à erosão e versátil, utilizado em múltiplas aplicações industriais. Devido à sua flexibilidade, que lhe permite dobrar e alongar sem quebrar, torna-se o material que faz o transporte entre plásticos rígidos e borrachas elásticas (Matmatch, 2020).

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos materiais usados em produtos na área da engenharia

	Vantagens	Desvantagens
PET	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência química • Boa impermeabilidade • Bom acabamento superficial • Pouca deformação do material 	<ul style="list-style-type: none"> • Pode empenar durante a impressão • Resistência mecânica limitada • Propício a desgaste
TPU	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada elasticidade e flexibilidade • Boa durabilidade e resistência • Elevada resistência à erosão 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldades na impressão devido à sua flexibilidade

Existem ainda materiais com elevado desempenho, utilizados em áreas onde propriedades mecânicas elevadas são exigidas. O material mais comum é o PEEK (Tabela 3). Este termoplástico é membro da família PAEK (poliarletocercetona) e tem um conjunto de propriedades mecânicas adequadas para a área aeroespacial, automóvel e de medicina. Componentes de substituição de naves espaciais e próteses médicas são exemplos de objetos produzidos usualmente com recurso a PEEK.

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens dos materiais usados em produtos de elevada *performance*

Vantagens	Desvantagens
<p>PEEK</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estabilidade química e biológica • Resistência térmica superior • Pode ser esterilizado 	<ul style="list-style-type: none"> • Fraca resistência a radiação UV • Difícil processamento • Requer equipamento de impressão dispendioso e experiência do operador

Considerando os materiais utilizados neste projeto, exploram-se de seguida com mais detalhe as características e aplicações do ABS, PC e PC-ABS.

ABS

O plástico ABS é uma resina termoplástica derivada do petróleo, formado pela copolimerização de 3 componentes: acrilonitrila (monômero sintético produzido a partir do hidrocarbonato propileno e amoníaco), butadieno (obtido a partir da desidrogenação do butano – de 5% a 15%) e o estireno (produzido a partir da desidrogenação do etilbenzeno – de 40% a 60%). O ABS pode ser considerado a base de praticamente todos os plásticos que usamos no nosso quotidiano. Este plástico é frequentemente utilizado na indústria, maioritariamente por motivos económicos. Contudo, o ABS apresenta boa resistência ao impacto, à tração e abrasão. Tem ainda boa resistência ao calor, suportando também baixas temperaturas. Dentro das aplicações mais usuais encontra-se a indústria automóvel, sendo que o ABS é usado no fabrico de peças variadas para, entre outros, o interior do veículo (painéis, grelhas de ventilação, assentos) (polimeros, 2020).

O plástico ABS é assim um dos materiais utilizados frequentemente na produção de peças por FDM. Termoplásticos como o ABS são bastante estáveis quando em contacto com o meio ambiente, sendo que os empenos são reduzidos, tal como as alterações de dimensões e absorção de humidade. Este material, quando utilizado no FDM, torna-o um dos processos capazes de produzir peças com maior precisão (Engineers, 2012).

Existem assim algumas variantes deste termoplástico, todos eles utilizados no processo de FDM: uma delas é o termoplástico ABS Plus, estável quando em contacto com o meio ambiente e 40% mais resistente que o ABS convencional;

Outra variante é o termoplástico ABS-M30i. Este é entre 25 e 70% mais resistente que o ABS convencional, tendo também maior tensão de cedência,

Existe ainda o ABSi Termoplástico, ideal para aplicações na indústria automóvel, estando disponível em transparente, vermelho e cor âmbar;

Por último, o PC-ABS Termoplástico: este material tem as propriedades mais vantajosas, tanto do ABS como do Policarbonato (PC), tendo boas propriedades mecânicas e resistência ao impacto. Como já mencionado, este é um dos termoplásticos utilizados neste projeto (Engineers, 2012).

Policarbonato

O policarbonato refere-se a um grupo de polímeros termoplásticos que têm grupos de carbono na sua constituição. Existiu, contudo, um intervalo de cerca de 50 anos entre as primeiras descobertas relativas ao policarbonato e o conhecimento atual das características deste material. Tal teve origem sobretudo na falta de conhecimento no que diz respeito às necessidades existentes na indústria para este poliéster, ao qual se aliou a escassa quantidade de aplicações presentes no mercado que necessitassem das capacidades que o policarbonato tem. No entanto, *D.W.Fox* e *H. Schnell*, que trabalhavam em projetos bastante distintos, descobriram o policarbonato e as suas características únicas, que o tornaram no polímero mais interessante existente no mercado até então (Legrand & Bendler, 2010).

O policarbonato tem elevada transparência, mesmo em peças com bastante espessura. Esta característica, aliada à elevada resistência ao impacto, fazem com este material seja severamente utilizado na construção civil. O policarbonato tem, à semelhança do ABS e PC-ABS, elevada resistência térmica, boa capacidade retardadora da chama e ainda bom isolamento térmico (Legrand & Bendler, 2010).

O policarbonato é um termoplástico utilizado em múltiplas áreas da indústria. Pela sua elevada resistência ao impacto e estruturalmente forte, adequa-se a aplicações onde seja necessário uma elevada transparência, resistência e durabilidade, como óticas dos

automóveis e viseiras de capacetes, candeeiros de rua e claraboias. A sua elevada resistência à variação de temperaturas torna-o também adequado a aplicações médicas, onde seja necessário a esterilização de equipamento. Policarbonato e resinas de policarbonato são muitas vezes aplicadas em objetos para replicar características do vidro, sem a sua fragilidade e peso (como, por exemplo, em copos) (Xometry, 2022).

Existem assim diversos tipos de policarbonato, maioritariamente destinados a aplicações na construção civil: alveolar, compacto e ainda o policarbonato corrugado (Legrand & Bendler, 2010).

Peças produzidas em policarbonato através de FDM são estruturalmente estáveis, ou seja, não apresentam grandes variações dimensionais, nem absorvem humidade. Este material de alto desempenho suporta maiores esforços que as peças em ABS, tornando o policarbonato ideal para peças de uso final, e não apenas protótipos (Legrand & Bendler, 2010).

PC-ABS

O PC-ABS concilia algumas das características do PC e do ABS. Uma das principais características é a sua transparência, quando polido devidamente. A este material pode também ser alterada a cor facilmente, seja pintado ou alterando a pigmentação do filamento. O PC-ABS tem também uma elevada resistência à variação de temperatura, atribuída pelas características do PC (que o ABS isolado não pode fornecer). Esta característica aumenta a versatilidade deste material (Xometry, 2022).

O PC-ABS tem também uma boa resistência química, isto é, é capaz de resistir a ácidos, a reações químicas, entre outros. Por outro lado, este material tem uma fraca resistência a solventes e oxidações, podendo ser melhorada pelo revestimento com fibras ou outro aditivo (Xometry, 2022).

Outra característica relevante deste material é a sua elevada resistência ao impacto, ou seja, consegue absorver elevadas quantidades de energia dentro do seu regime plástico, sem fraturar. O PC-ABS consegue também resistir a impactos a baixas temperaturas sem quebrar. A flexibilidade do ABS e a resistência do PC aliadas, fazem com que o PC-ABS dobre, mas sem partir, ou seja, uma curva no regime plástico bastante interessante. Esta

característica torna o PC-ABS indicado para componentes dos interiores dos automóveis, bem como componentes elétricos (Xometry, 2022).

Com isto, o PC-ABS é um material apelativo para o mundo da engenharia, pela sua versatilidade. É aplicado com frequência em protótipos, tendo em conta que os *designers* conseguem trabalhar livremente este material e alterar a sua pigmentação. O seu bom acabamento faz também com que o protótipo se assemelhe bastante ao produto final. O PC-ABS é bastante utilizado na impressão 3D, proporcionando peças mais funcionais e resistentes do que o ABS e PC (Xometry, 2022).

Novos avanços

Em desenvolvimentos recentes na área da inovação de materiais aplicados ao FDM, elaborados pela Universidade de *Rutgers*, nos Estados Unidos da América, surgem materiais cerâmicos e metálicos aplicáveis no processo de Depósito de Metais Fundidos, dando origem a uma variante do FDM: *Fused Deposition of Ceramics* (FDC). Nestes desenvolvimentos foram utilizados diversos materiais metálicos e cerâmicos para o fabrico de peças, tais como Nitrato de Silicene, Óxido de Alumínio e ainda Aço Inoxidável, numa série de aplicações estruturais, electro cerâmicas e bio cerâmicas (Engineers, 2012).

Nestes desenvolvimentos foram utilizados pós cerâmicos em conjunto com revestimentos orgânicos. As propriedades do material de fornecimento presente no equipamento de impressão conjugam a flexibilidade, resistência ao impacto e viscosidade necessários para um processo de fabrico por FDM eficiente. No entanto, as peças produzidas utilizando estes materiais requerem um pós-processamento de forma a retirar a camada orgânica que ainda está presente.

Existem ainda novos desenvolvimentos, por parte da *Virginia Tech*, Universidade estadual do Estado da Virginia, nos Estados Unidos da América. Os estudos envolvem o desenvolvimento de um compósito termoplástico de elevado desempenho, envolvendo polímeros termotrópicos líquidos cristalinos (*Thermotropic Liquid Crystalline Polymers - TLCP*). A resistência deste material é cerca de 4 vezes superior à do ABS, fazendo com as peças fabricadas através deste processo sejam mais funcionais do que as fabricadas utilizando outros materiais convencionais (omnexus, 2020).

2.3.Degradação de polímeros

As borrachas e os plásticos são materiais que têm como componente principal uma macromolécula denominada de polímero. Estes materiais poliméricos estão presentes no nosso quotidiano em praticamente tudo o que utilizamos, ao ponto de ser bastante difícil encontrar uma atividade praticada pelo ser humano que não envolva este tipo de materiais. No entanto, estes materiais não têm uma duração ilimitada, sendo afetados por processos de degradação. Em 1861 comprovou-se que o oxigénio estava associado ao processo de perda das características da borracha, sendo atribuído assim o termo “oxidação”. Foi também o termo “antioxidante” para as substâncias capazes de retardar o processo de degradação natural dos materiais. Surgem assim também dois termos, bastante utilizados na atualidade, associados a esta temática: degradação e estabilização (Paoli, 2008).

Degradação: qualquer reação química que altera características inerentes ao uso de um determinado objeto de um material polimérico ou de um composto polimérico. Podem ser considerados, por exemplo, a flexibilidade, a resistência elétrica, o aspeto visual, a resistência mecânica, a dureza, entre outros.

Estabilização: operação que inibe o processo específico de degradação. Também depende do uso específico do objeto feito com um material polimérico. Isto significa que, para cada tipo de polímero e de aplicação é necessário adotar uma estratégia específica para inibir a degradação.

Deste modo, a degradação nos polímeros deve-se a reações químicas de diversos tipos, intermoleculares ou intramoleculares. Pode ser um processo de despolimerização, de oxidação, de reticulação ou de quebra de ligações químicas. Basicamente, qualquer que seja o tipo de degradação, estará sempre relacionada com a quebra de uma ligação covalente (partilha de um par de elétrons por dois átomos), seja esta quebra na cadeia principal ou lateral da molécula. Esta rutura gera espécies reativas, que serão responsáveis pela propagação do processo. Na grande maioria das situações, estas espécies reativas são denominadas de radicais livres. O aparecimento destas espécies e a sua consequente propagação pode ser gerada pelo calor, luz, radiação de alta energia, tensão mecânica, entre outros fatores (Paoli, 2008).

2.4. Métodos de pós-processamento - revestimento

De forma a combater a degradação dos materiais provocada pelo meio envolvente, assim como melhorar o acabamento superficial dos componentes fabricados, reduzindo o já designado *stair stepping*, foram estudadas e adotadas diversas opções de pós-processamento, dentro das quais se sugerem o revestimento dos componentes ou o polimento dos mesmos. Existem vários métodos para revestir as peças, alguns deles bastante semelhantes.

2.4.1. Fumigação

O processo de fumigação é um dos processos de melhoria da rugosidade superficial através do vapor de acetona. O princípio deste processo consta na formação de um gel em torno da peça que se pretende revestir, ao entrar em contacto com o solvente escolhido, normalmente acetona, através de um *swelling process* (Figura 19). A acetona, no estado líquido, ao contactar com a superfície do objeto mergulhado sob temperaturas mais elevadas, torna-se num gel. Nestas circunstâncias, a tensão existente entre os elementos que formam a superfície do objeto diminui, permitindo assim a formação de uma camada que reveste o objeto, melhorando significativamente o acabamento superficial (Kwang-Ho Jo, 2016).

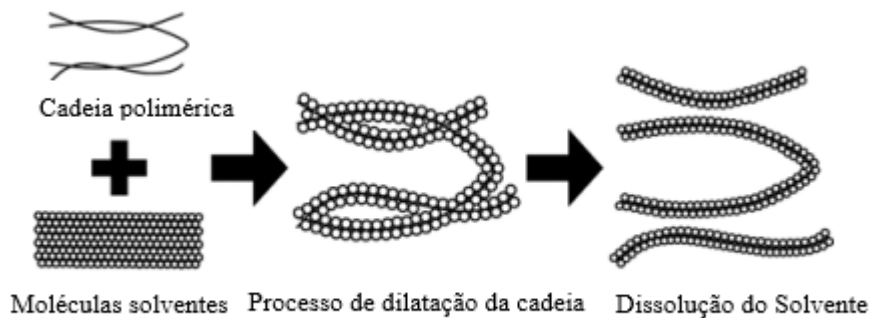


Figura 19 - Processo de fumigação em polímeros (Kwang-Ho Jo, 2016)

Neste processo, o componente a revestir é suspenso num recipiente com acetona, sem entrar em contacto com a mesma. Em seguida, ao aquecer todo este sistema, é provocada a evaporação da acetona, com cerca de 99.5% de pureza, provocando a infiltração do vapor de acetona na peça, precisamente nas zonas de *stair stepping*, através do já denominado *swelling process*, melhorando o acabamento superficial da peça.

Neste processo deve aquecer-se a acetona até aos 58 °C, de modo a obter-se uma reação rápida (Kwang-Ho Jo, 2016).

No entanto, o mergulho contínuo do material no solvente provoca a diminuição do volume, através do processo de dissolução da camada acetona, quando a temperatura diminui. Este processo de dissolução é mais uma vez representado na Figura 20.

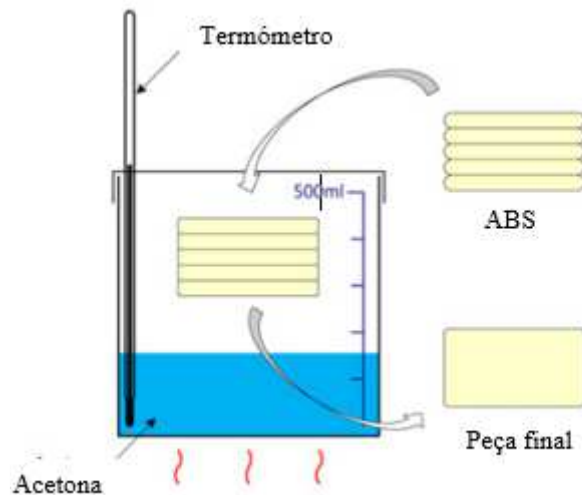


Figura 20 - Esquematização do processo de fumigação numa peça em ABS (Kwang-Ho Jo, 2016)

2.4.2. Mergulho

O processo de mergulho é em tudo muito semelhante ao processo de fumigação. Recorre também à utilização de acetona com pureza de cerca de 99.5%, no entanto sem a necessidade de aquecimento de todo o sistema. Neste processo, a peça a revestir é simplesmente mergulhada na acetona, provocando a adesão do fluído nas zonas críticas (Figura 21). Deste modo, é também melhorado o acabamento superficial da peça, uma vez que não existe variação de volume, nem temperaturas elevadas. Neste processo deve manter-se uma temperatura da acetona de cerca de 20 °C.

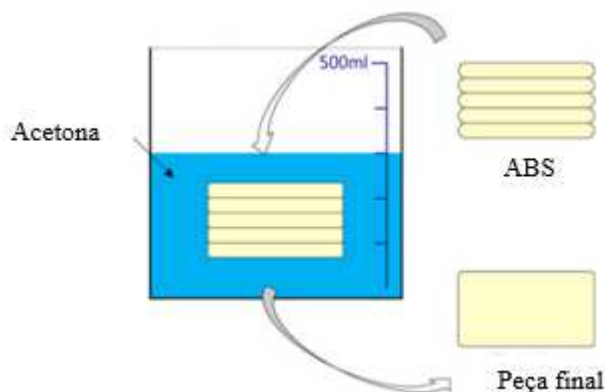


Figura 21- Esquematização do processo de mergulho numa peça em ABS (Kwang-Ho Jo, 2016)

2.4.3. Infiltração de Resina

O processo de infiltração de resina permite o melhoramento do acabamento superficial de um componente, aumento da resistência mecânica e impermeabilidade, pela introdução, por processos térmicos, de resina nas superfícies porosas dos objetos a revestir (Kwang-Ho Jo, 2016).

Ao colocar o componente a revestir num recipiente com resina e aumentando a temperatura do sistema, com o auxílio de uma tomada de vácuo, provoca-se a infiltração da resina nas zonas porosas da peça, eliminando os pontos de menor resistência, que diminuiriam também a estanquicidade do objeto (Figura 22) (Kwang-Ho Jo, 2016).

Neste processo, a viscosidade da resina afeta o tempo necessário para que ocorra o processo de infiltração e a espessura da camada de revestimento. Deste modo, o aumento da qualidade da superfície do componente relaciona-se com as especificações da resina utilizada (Kwang-Ho Jo, 2016).

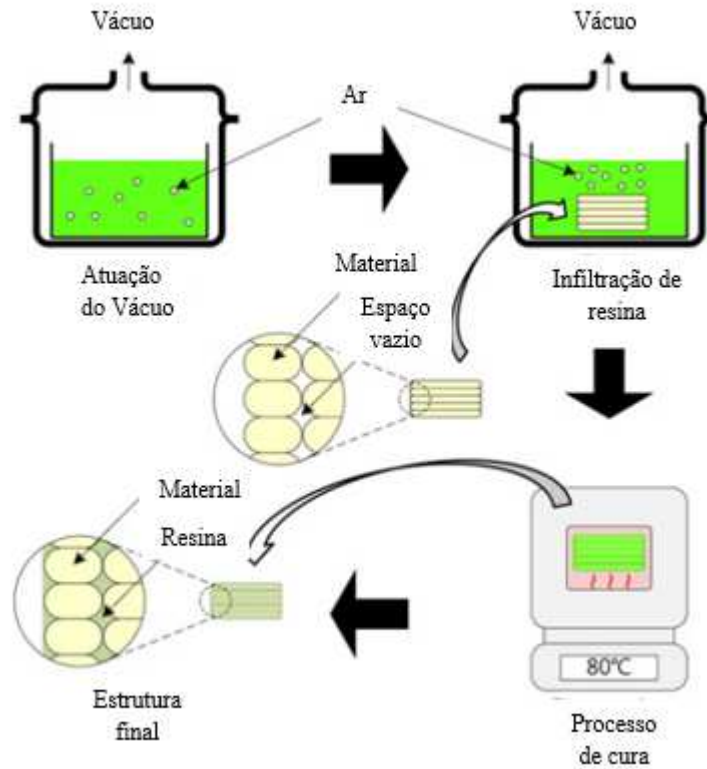


Figura 22 - Processo de Infiltração de resina (Kwang-Ho Jo, 2016)

2.4.4. Resinas

Como resultado do princípio de impressão camada sobre camada correspondente aos métodos de fabrico aditivo, as peças produzidas podem ter características pouco adequadas à comercialização para o consumidor final. Como forma de otimizar o processo de fabrico aditivo, e ainda alargar as aplicações do processo, as peças podem ser revestidas com isolantes e testadas posteriormente. Assim, terminada a apresentação dos principais processos de revestimento de materiais, é importante entender o que se deve ter em consideração no processo de escolha da resina que os reveste.

Recomendam-se algumas considerações na escolha de um revestimento aplicado em peças produzidas em fabrico aditivo. Alguns dos métodos de revestimento são simplesmente para melhoramento estético da peça, enquanto outros têm o propósito de melhorar a impermeabilidade da mesma (Miriam R. Simon Cater, 2014).

As considerações aconselhadas na escolha do revestimento incluem (Miriam R. Simon Cater, 2014):

1. Custo dos produtos;
2. Tempo necessário para completar todo o processo;
3. Aptidão necessária pelo operador;
4. Geometria e tamanho da peça;
5. Viscosidade do produto utilizado;
6. Pressão aplicada na peça;
7. Sensibilidade à temperatura.

Como já demonstrado, existem métodos usuais no revestimento de peças produzidas por fabrico aditivo, que incluem o uso de acetona. O uso de acetona reduz a porosidade de peças, nomeadamente, em ABS produzidas por FDM, tornando-a indicada para produção de peças que resistentes à água. Tal deve-se ao impedimento da passagem da água entre as diversas camadas que formam a peça, para além de permitir a redução da malha para cerca de 250 μm . Por outro lado, este processo tem também algumas desvantagens, na medida em que acetona não diluída dissolve rapidamente o ABS, eliminando características essenciais da peça. O contacto do operador com a solução de acetona pode provocar danos à sua saúde. Por estas razões, a acetona não foi incluída no processo de revestimento dos provetes (Miriam R. Simon Cater, 2014).

2.5.Fluídos

O objetivo deste trabalho concentra-se no estudo da alteração da permeabilidade de componentes produzidos por FDM aplicados em automóveis, quando em contacto com fluídos. Deste modo, considerando um automóvel comum, movido por um motor de combustão interna, consideraram-se que os principais fluídos presentes são:

1. Combustível;
2. Líquido de refrigeração;
3. Fluído lubrificante;
4. Óleo de travões;
5. Óleo de engrenagens.

Considerando a quantidade de componentes em cada uma das secções acima mencionadas e as condições de funcionamento que se encontram nos mesmos, ou seja, tendo em conta a aplicabilidade de cada uma delas ao objetivo deste trabalho, considera-se que o circuito de lubrificação do motor e o circuito de alimentação de combustível são os circuitos de maior interesse para o desenvolvimento deste trabalho prático, pelo que serão utilizados óleo e gasóleo nos ensaios laboratoriais realizados.

2.5.1. Fluído lubrificante

Todos os motores de combustão interna, devido ao elevado número de peças móveis que têm e altas temperaturas que atingem, necessitam de ter um fluído lubrificante competente o suficiente para garantir o seu bom funcionamento. Para tal, é necessário que este consiga manter as suas propriedades durante um longo período, assim como manter a sua viscosidade a qualquer temperatura, garantindo uma lubrificação eficiente. Deve ter uma compatibilidade com os materiais de vedação do motor, de modo que o óleo não os degrade (oleo de motor: como escolher o oleo certo, 2020).

Existem assim três tipos de óleo aplicáveis a motores de combustão interna (Alves, 2020):

Óleo mineral: tipo de óleo aplicado na maioria dos automóveis mais antigos, tendo em conta que é indicado para motores com elevado desgaste. Este tipo de óleo tem uma fraca resposta a grandes amplitudes térmicas, tendo caído um pouco em desuso na atualidade, devido a alternativas superiores (Alves, 2020).

Óleo sintético: tipo de óleo que tem na sua constituição alguns produtos além do petróleo refinado, como o etileno. Tem um índice de viscosidade superior, pelo que se adequam a motores que operam em condições mais exigentes, como motores de competição. São mais resistentes aos processos de oxidação e evaporação, prolongando a vida útil do mesmo e, conseqüentemente, os períodos de troca (Alves, 2020).

Óleo semissintético: resultam da combinação de bases minerais e sintéticas, com proporções típicas de 60% a 80 de óleo sintético, e o restante em óleo mineral. Este tipo de óleo tem desempenhos ligeiramente inferiores aos óleos sintéticos. A sua aplicabilidade e utilização no presente deve-se principalmente ao preço mais baixo que o óleo sintético. A sua viscosidade, resistência a amplitudes térmicas e preço mais baixo tornam este tipo de óleo adequado a motores com utilizações diárias não muito exigentes (Alves, 2020).

A viscosidade de um óleo é apresentada sob a classificação SAE. Esta classificação é uma tipologia regulamentada e padronizada pela *Society of Automotive Engineers* (SAE). O seu método de classificação é baseado principalmente na viscosidade do óleo, mas também categoriza os componentes do lubrificante. Para medir a viscosidade, o óleo é submetido a temperaturas abaixo de zero e acima de 100°C (Alves, 2020).

Esta classificação divide também o óleo em dois tipos (Alves, 2020):

Óleo monograduado: tipo de lubrificante desenvolvido para operar numa gama de temperaturas específicas. A sua denominação é representada apenas por um número e a letra “W” (Alves, 2020).

Óleo multigraduado: tipo de lubrificante concebido para suportar amplas variações de temperatura. Na sua denominação existe 2 números separados pela letra “W”. O primeiro número indica a viscosidade a temperaturas baixas, e o segundo número a temperaturas elevadas. Existem assim 20 tipos diferentes de óleo multigraduado, indicados para gamas de temperaturas distintas (Figura 23) (Alves, 2020)

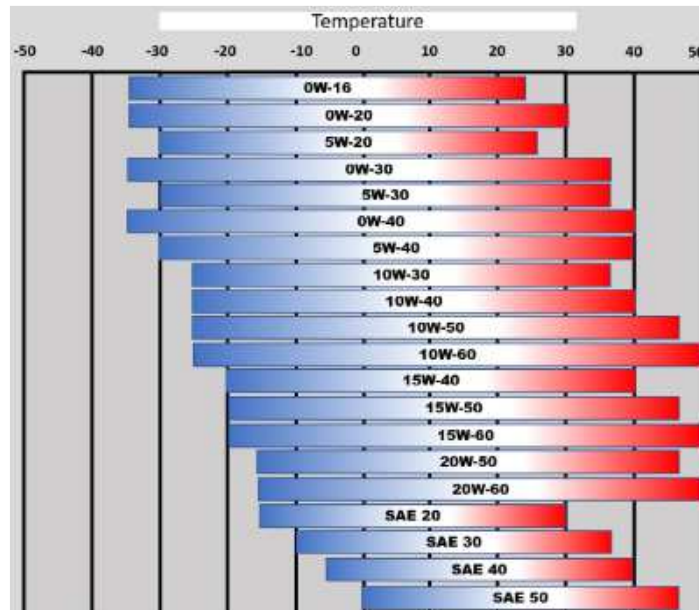


Figura 23- Gama de temperaturas de óleo multigraduado (centre, 2020)

2.5.2. Combustível

Apesar dos automóveis elétricos constituírem na atualidade uma porção bem notável dentro de todos os veículos que circulam nas estradas, são ainda os automóveis movidos por um motor de combustão interna que predominam em todo o mundo. Deste modo, estudos severos aplicados ao melhoramento da eficiência dos combustíveis fósseis, tais como gasóleo e gasolina, são levados a cabo por forma a tornar estes fluídos menos agressivos com os materiais com que contactam, assim como com o ambiente. Contudo, os combustíveis continuam a ter alguma agressividade, provocando corrosão dos materiais com os quais contactam (magazine, 2020).

Segundo dados da Associação Europeia dos Construtores Automóveis, os veículos a diesel representaram 29.5% do mercado de ligeiros novos, no último trimestre de 2020. Por outro lado, os veículos a gasolina representaram 57.3% durante o mesmo período. No que diz respeito a alternativas elétricas carregáveis, os números ficam-se pelos 4.4% entre outubro e dezembro de 2019 (magazine, 2020).

Para a escolha do combustível a utilizar na realização dos ensaios laboratoriais, importa saber qual terá maior influência sobre os provetes. Deste modo analisa-se a

corrosividade dos diversos tipos de combustíveis comercializados. A corrosão é definida como “o ataque destrutivo de um metal por uma reação com o seu meio”. A presença de corrosão provoca danos nos materiais, levando à necessidade da sua substituição, gerando também a necessidade de cuidados especiais quanto à descarga dos fluídos corrosivos (magazine, 2020).

2.5.3. Corrosão associada a fluidos

Gasolina

A gasolina é aplicada em motores de combustão interna por explosão. A sua constituição baseia-se em hidrocarbonetos que são refinados numa gama de temperaturas entre os 30 e 220 °C. Na constituição da gasolina consta também enxofre, embora em pequenas quantidades. As suas propriedades são influenciadas pelos processos de refinamento envolvidos, assim como a qualidade do petróleo que a origina (Alessandra Regina Pepe Ambrozin, 2015).

Estudos desenvolvidos relativos à corrosão associada à gasolina demonstram que a corrosão está severamente associada à quantidade de enxofre, ácidos e bases de água presentes no combustível. Aditivos oxigenados presentes na gasolina provocam a oxidação de alguns dos seus hidrocarbonetos, levando ao aumento da acidez do meio, aumentando consequentemente a corrosividade da gasolina (Alessandra Regina Pepe Ambrozin, 2015).

Gasóleo

O diesel mineral, assim como outros tipos de gasóleo utilizados em motores de combustão interna por compressão, apresentam baixa condutividade elétrica, o que dificulta o uso de técnicas eletroquímicas para avaliação da corrosão (Alessandra Regina Pepe Ambrozin, 2015).

Devido à composição do diesel, onde consta enxofre, pode ocorrer corrosão por ação desta substância, nomeadamente pela degradação microbiana do diesel, que diminui o pH do combustível. Sabe-se que os tanques de combustível podem ser degradados pela ação de diesel degradado (Alessandra Regina Pepe Ambrozin, 2015).

De um modo geral, os principais micro-organismos associados com esse tipo de corrosão são bactérias anaeróbicas reductoras de sulfato, bactérias aeróbicas e fungos.

Concluindo, seja gasolina, diesel ou um derivado destes, como biodiesel e respetivas misturas, todos eles apresentam ação corrosiva sobre alguns materiais. A corrosão associada ao diesel mineral está intensamente associada aos compostos de enxofre e ao pH do combustível. Já a corrosividade da gasolina, apesar de ser baixa, está associada também aos compostos de enxofre, mas também ácidos e bases de água.

Com a corrosividade da gasolina a ser mais reduzida que a do gasóleo, opta-se por realizar os ensaios mergulhando os provetes neste combustível, ou seja, no gasóleo (Alessandra Regina Pepe Ambrozin, 2015).

3. Equipamento, materiais e métodos

Neste capítulo são apresentados os equipamentos e materiais utilizados no desenvolvimento do processo experimental, assim como todos os procedimentos adotados, desde a impressão dos provetes, até aos ensaios realizados.

3.1. Metodologia experimental

Terminada a pesquisa bibliográfica, onde foi possível adquirir e consolidar conhecimentos relativos ao fabrico aditivo, descrevem-se resumidamente as etapas envolvidas no procedimento experimental.

O presente trabalho foi desenvolvido com base em 3 etapas distintas (Figura 24):

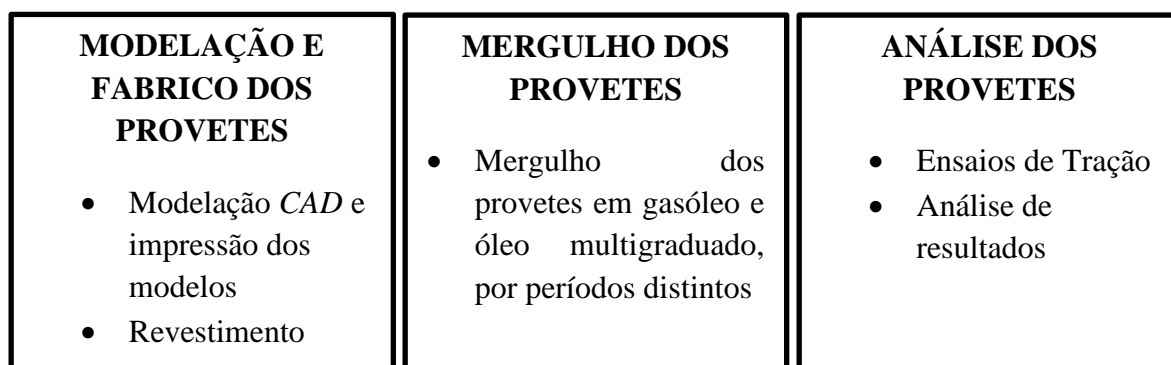


Figura 24 – Esquematização do procedimento experimental adotado

3.2. Equipamento

No decorrer do processo laboratorial foi necessário utilizar diverso equipamento disponível no laboratório de engenharia mecânica.

3.2.1. Impressora

Para a impressão dos provetes utilizou-se a impressora Prusa i3 mk3s, incorporada com uma mesa aquecida mk52 (Figura 25).

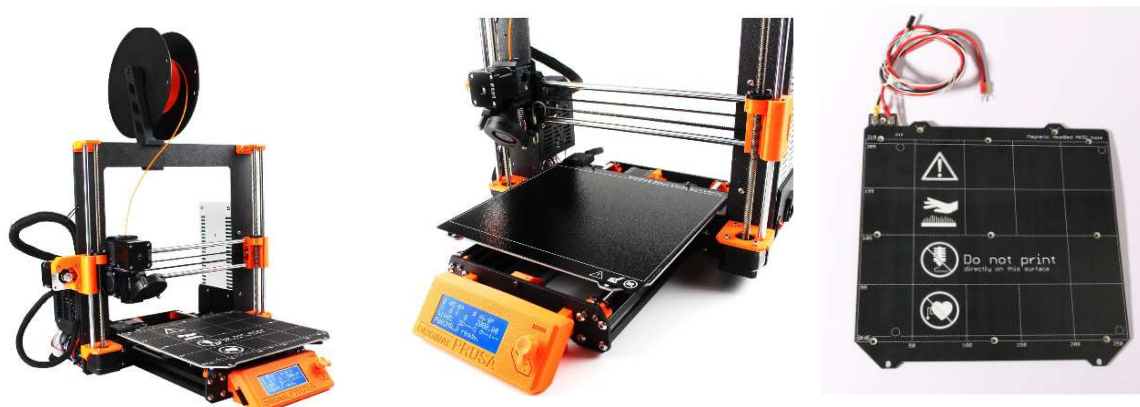


Figura 25 – Equipamento Prusa i3 mk3 S

A Prusa I3 MK3S surge como sucessora da já revolucionária MK2S, sendo considerada a melhor impressora 3D lançada pela marca até à atualidade. Tem na sua constituição uma mesa aquecida com auto nivelamento e um sistema de calibração do filamento integrado. Esta impressora permite também a criação de peças com maior detalhe face aos modelos mais antigos da marca (Forbes, 2020).

3.2.2. Estufas

Para replicar as temperaturas verificadas num veículo, os provetes mergulhados nos diversos fluídos foram colocados em duas estufas presentes no Laboratório de Fabrico Rápido. Tal é necessário para que se armazenem os recipientes com gasóleo numa das estufas e os recipientes com óleo noutra estufa, por forma a não existir contaminação dos fluídos. Foi para tal utilizada a estufa *HEK-GMBH MCP-Vacuum-Casting-System* (Figura 26) para secar os provetes após serem revestidos com resina (a 60 °C por 18 horas) e para armazenar os provetes mergulhados em óleo (a 110 °C pelos diversos períodos estabelecidos). A outra estufa, *P Selecta* (Figura 27), foi utilizada para armazenar os provetes mergulhados em gasóleo, também durante os diversos períodos estabelecidos, à temperatura ambiente.



Figura 26 - Estufa HEK-GMBH MCP-
Vacuum



Figura 27 - Estufa P Selecta

3.2.3. Balança

Para o registo das diferentes massas dos provetes produzidos e ensaiados laboratorialmente, foram utilizadas duas balanças. Para registar a massa de fluído utilizada para o mergulho dos provetes, utilizou-se a balança presente no Laboratório de Fabrico Rápido (Figura 28), com uma resolução de 0.5g, tendo em conta a sua localização (evitando a deslocação dos recipientes com óleo e gasóleo) e resolução suficiente para o processo. Para o registo da massa dos provetes, analisando a variação da mesma antes e depois do mergulho, utilizou-se a balança presente no Laboratório de Materiais, com uma resolução de 0.1 miligrama (Figura 29 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**).

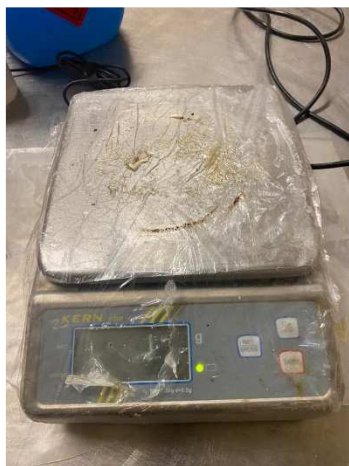


Figura 28 – Balança do
Kern F08



Figura 29 – Balança
AG204

3.2.4. Equipamento de ensaios universais

Após a impressão de todos os provetes, revestimento dos mesmos e imersão nos fluídos durante os períodos definidos, atinge-se então o momento de os testar, de forma a comparar os diversos resultados.

Opta-se apenas por realizar ensaios de tração, por forma a serem obtidos valores de tensão e deformação, indicados para retirar conclusões pretendidas. Para tal, é necessário seguir os parâmetros presentes na norma ASTM D638.

Para realizar os ensaios de tração foi utilizada a máquina de ensaios universais presente no Laboratório de Materiais, Zwick Z100 (Figura 30**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), com os provetes presos pelas amarras e testados à temperatura ambiente.

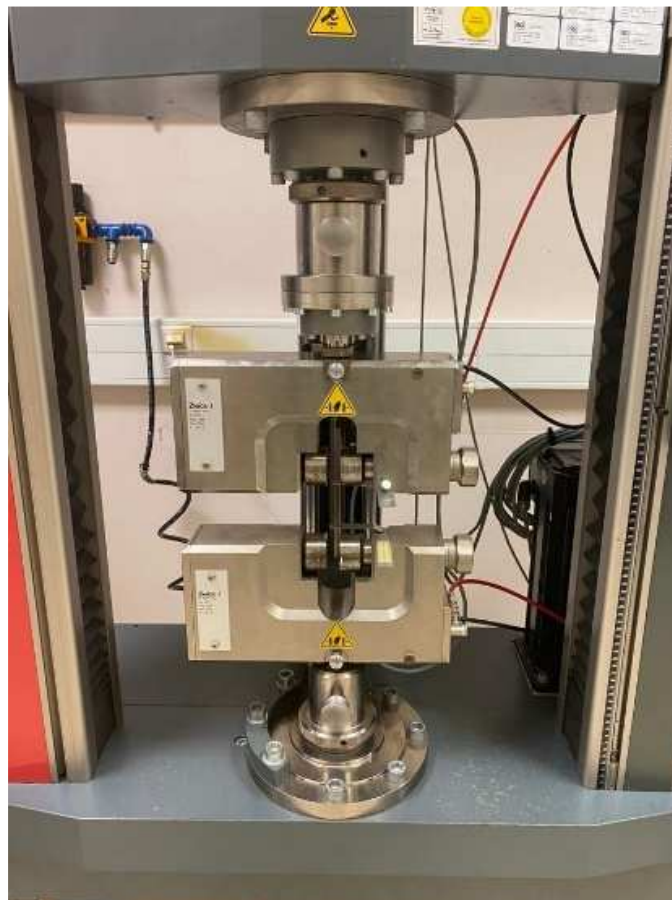


Figura 30 – Equipamento de ensaios Zwick 100

3.3. Materiais

Tendo em conta as características dos materiais, assim como a disponibilidade no mercado, foram utilizados os seguintes materiais para a impressão dos provetes:

1. ABS;
2. PC-ABS;
3. PC.

No que respeita aos materiais e quantidades utilizadas, foram requisitados:

3.3.1. ABS



Figura 31 – Rolo de ABS marca Filo
Alfa

Quantidade adquirida:

- 2 rolos 700g e 1.75mm (Figura 31)

Características:

- Resistente ao impacto
- Possível polimento
- Resistente a temperaturas baixas

Impressão:

- Temperatura do injetor: 250 – 290 °C
- Temperatura da mesa: 70 – 110 °C
- Não necessita de refrigeração

3.3.2. PC-ABS



Figura 32 – Rolo de PC-ABS da marca
Filo Alfa

Quantidade adquirida:

- 2 rolos 700g e 1.75mm (Figura 32)

Características:

- Resistente ao impacto
- Acabamento fosco
- Resistente ao desgaste

Impressão:

- Temperatura do injetor: 240 – 260 °C
- Temperatura da mesa: 80 – 110 °C
- Necessita de refrigeração

3.3.3. PC



Figura 33 Rolo de PC da marca
RepRap

Quantidade adquirida:

- 2 rolos 500g e 1.75mm (Figura 33)

Características:

- Grande resistência
- Boa transparência
- Resistente a temperaturas até 140 °C

Impressão:

- Temperatura do injetor: 270 – 290 °C
- Temperatura da mesa: 100 – 110 °C
- Temperatura de amolecimento: aprox. 145 °C

3.3.4. Resinas

Relativamente aos revestimentos, apesar dos vários processos de revestimento apresentados anteriormente, os provetes foram mergulhados numa mistura de resina e endurecedor à temperatura ambiente, num processo manual e individual para cada provete.

De forma a selecionar a resina e endurecedor, foi analisado o tipo existente no laboratório de materiais, por forma a perceber se este conjunto se adequa à aplicação no projeto

A Sicomin SR1500 (Figura 34) com endurecedor SD2503 (Figura 35) é uma resina de dois componentes especialmente desenvolvida para a indústria aeronáutica, construção de navios e indústria automóvel.

Para terminar o processo de cura, o são necessárias 24 horas a 40 °C, ou 18 horas a 60 °C. Considerando a disponibilidade do laboratório e da estufa, foi escolhido o período de 18 horas com uma temperatura de 60 °C.

Considerando a aplicabilidade na indústria automóvel, aliado à disponibilidade no laboratório, este conjunto de resina e endurecedor foi o selecionado para o revestimento dos provetes.



Figura 34 - Resina Sicomin
SR1500

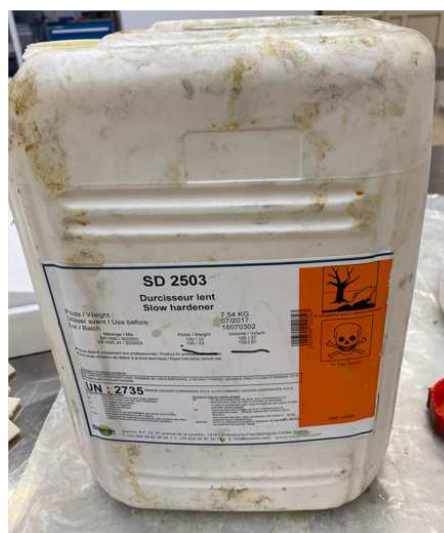


Figura 35 - Endurecedor SD 2503

3.4.Procedimentos

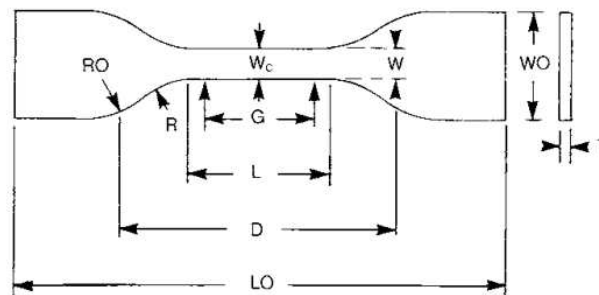
Descrevem-se nesta fase os procedimentos adotados durante os procedimentos experimentais envolvidos no projeto

3.4.1. Modelação e impressão dos provetes

Os provetes são o objeto principal da componente experimental do projeto, uma vez que todas as decisões tomadas e grande maioria do estudo elaborado foi no sentido de obter provetes com maior qualidade, assim como obter melhor revestimento para os corpos de prova, por forma a conseguir manter, ou até mesmo melhorar, as suas propriedades quando imersos em fluídos. Desta forma, após apresentado o material que compõe os provetes, segue-se a descrição dos procedimentos realizados para seu ensaio laboratorial.

Geometria dos provetes

No que diz respeito à geometria dos provetes a fabricar, existem geometrias mais adequadas, dependendo do tipo de ensaio que se realiza. Segundo a norma ASTM D638, a geometria “osso de cão” é mais adequada para estes testes, sendo que foram utilizados no âmbito do presente trabalho os provetes do tipo IV ilustrados na Figura 36.



Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.) ^A					Tolerances
	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{B,C}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^C
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^C
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^C
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

Figura 36 - Geometria e dimensões do provete, segundo o tipo IV da norma ASTM D638

O primeiro passo é a modelação *CAD* do provete de acordo com as dimensões definidas (Figura 38 e Figura 37). Posteriormente, para iniciar o processo de impressão, é necessário primeiramente importar o ficheiro *CAD*, em formato *STL*, para o *software* da impressora, onde serão definidos diversos parâmetros.

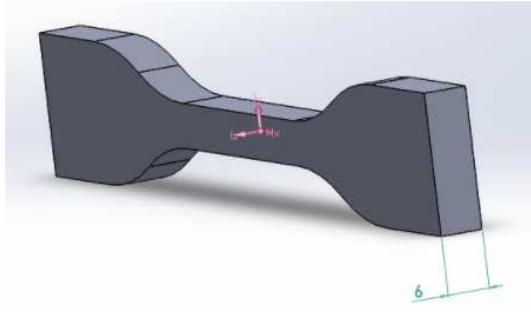


Figura 38 – Provete modelado

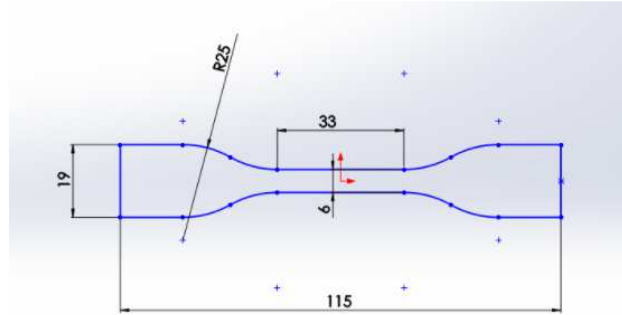


Figura 37 – Dimensões do provete

Orientação das camadas dos provetes

Quanto à orientação das camadas que constituem os provetes, seria benéfico optar por uma estrutura impressa na vertical (Figura 40), uma vez que, ao imprimir o provete camada sob camada, existem variações de temperatura menores, relativamente à impressão do provete na horizontal (Figura 39). Esta menor variação de temperatura surge como consequência de um menor tempo dispensado a criar cada camada, que origina menos empenos na peça final, permitindo produzir peças com elevada qualidade.

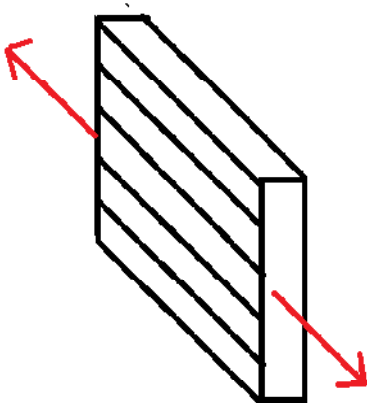


Figura 40 – orientação vertical das camadas

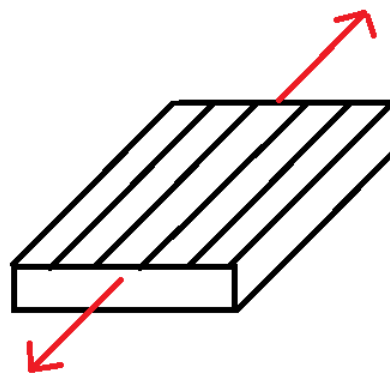


Figura 39 – orientação horizontal das camadas

A adoção da tipologia vertical detém ainda algumas vantagens adicionais:

- Diminuição da quantidade de material utilizado;
- Redução do tempo de fabricação em cerca de 30%;
- Melhoria do acabamento superficial e da geometria da peça.

Estes fatores levaram a que se começasse a impressão dos provetes na vertical, pensando-se que seria a disposição mais favorável (Figura 42).

No *software* da impressora, após a importação do modelo do *SolidWorks*, é necessário proceder a diversas alterações, expostas de seguida. Foram selecionados o material utilizado, a impressora, a velocidade de processamento e a qualidade da mesma, entre outros parâmetros (Anexo C – Parametrização da impressão. Neste *software* é possível também rodar livremente os provetes, de modo a obter a quantidade de provetes por impressão mais favorável.

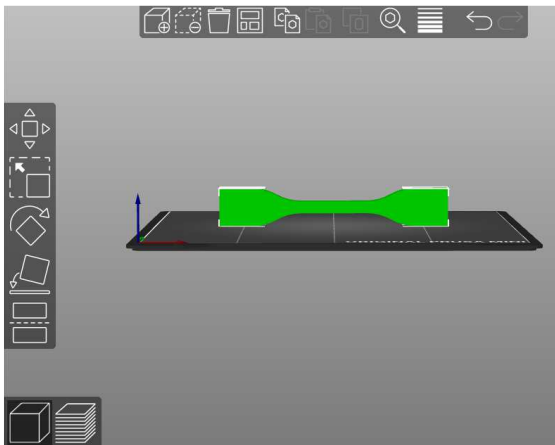


Figura 42 – Disposição do provete na vertical, no *software prusa*

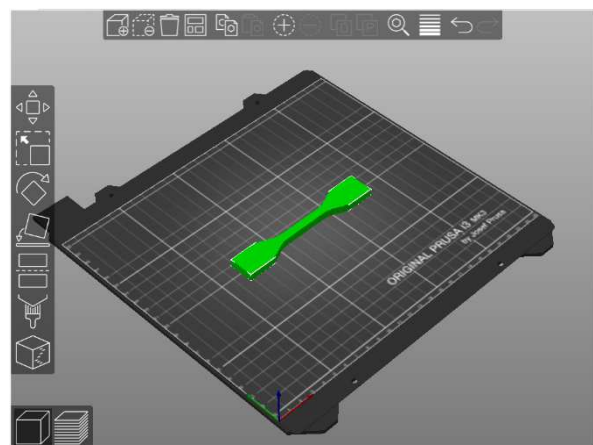


Figura 41 – Disposição do provete na horizontal, no *software prusa*

Foi alterada a disposição do provete para a posição horizontal (Figura 41) uma vez que, ao realizar alguns ensaios com o posicionamento vertical inicialmente definido, tornou-se perceptível que o aumento de material dispensado em cada provete tornaria esta posição pouco viável (Figura 43). A este fator junta-se ainda a necessidade de tirar os suportes manualmente, após a impressão, a cada provete, que anulava a poupança de 30% de tempo anunciada, além de prejudicar o acabamento final da peça nas zonas de remoção dos suportes. Mais se acrescenta que o posicionamento horizontal não trouxe aumentos significativos de empenos, como se esperaria (Figura 44).

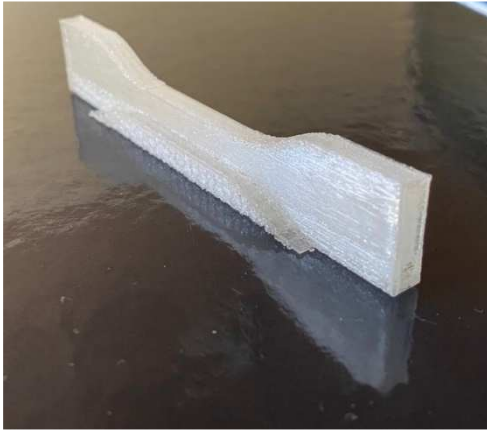


Figura 43 – Provete produzido na vertical,
com suportes



Figura 44 – Provete produzido na
horizontal, sem suportes

De forma a rentabilizar as impressões, foram impressos 4 provetes de cada vez, numa duração de 1h e 58m para cada conjunto (Figura 45).



Figura 45 – conjunto de 4 provetes de PC impressos

Definição da espessura de cada camada do provete

Nesta fase define-se a espessura de camada para cada provete. Foi definido inicialmente um valor de 0.3mm para cada camada, que se demonstrou bastante elevado. Os provetes impressos com 0.3mm por camada eram visivelmente menos opacos devido ao número reduzido de camadas que os constituíam, visível no provete à esquerda da Figura 46. Deste modo, definiu-se 0.15 mm para cada camada constituinte dos provetes (provetes à direita da Figura 46), assim como a qualidade pretendida para a impressão. Optou-se pelo tipo “*QUALITY*”, que proporciona a melhor relação entre qualidade da peça produzida e o tempo necessário para a impressão. Esta definição foi adotada para todos os materiais utilizados.



Figura 46 – Comparação do provete com camada de 0.3mm (à esquerda) e 0.15mm (à direita)

Foi necessário posteriormente definir o material utilizado na impressão. Cada opção de material apresentada no programa tem um conjunto de variáveis associadas. Foi selecionado o material com características genéricas para os três materiais em estudo.

No separador *print settings*, definem-se em primeiro lugar as características das camadas e do *brim*, sendo este a primeira camada impressa, com um perímetro superior ao do provete, que ajuda a garantir a adesão do provete à mesa da impressora, diminuindo empenos. Este *brim* ajuda também a remoção do provete da mesa após a impressão,

reduzindo as hipóteses de danificar o provete neste processo. Na Figura 47 mostra-se o *brim* já removido dos provetes, após serem impressos.



Figura 47 – *Brim* de um conjunto de 4 provetes de ABS

Foram selecionadas as características do *brim*. Este parâmetro define a largura da aba do provete, que corresponde também à metade da distância relativamente aos outros provetes. Este valor foi definido para 5mm.

Para a impressão dos provetes foi então definida uma espessura de 0.15mm para cada camada, e uma espessura da primeira camada de 0.2 mm, com o intuito de aumentar a adesão do provete à mesa, reduzindo empenos e provetes defeituosos.

É também definida a densidade de cada camada que forma o provete, assim como o padrão criado na impressão. Foi selecionada uma densidade de 1, com um padrão retilíneo, uma vez que não são pretendidos espaços ocios nas camadas.

Numa última fase são então definidas as temperaturas de impressão. Este é um dos parâmetros mais relevantes, uma vez que as definições de temperaturas não concordantes com o material utilizado podem levar, não apenas a provetes defeituosos, como também a danos na impressora.

A definição das temperaturas adequadas foi assim a etapa mais desafiante do processo de impressão, que obrigou a várias impressões de teste. As temperaturas finais definidas para os diversos materiais encontram-se nas Figura 48, Figura 49 e Figura 50. De forma a isolar o ambiente de impressão dos provetes, foi também colocada uma caixa de

acrílico em redor da impressora (Figura 103), para que as temperaturas de impressão fossem mais facilmente atingidas e mantidas. Os provetes impressos a temperaturas não adequadas



Figura 48 – Temperaturas de impressão para PC-ABS

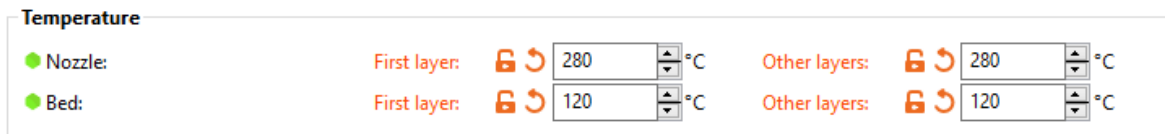


Figura 49 – Temperaturas de impressão para PC

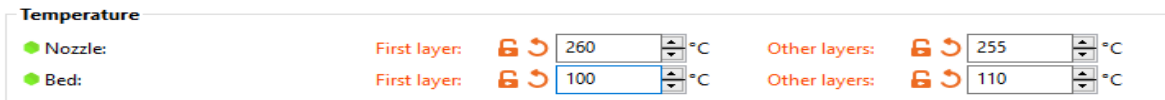


Figura 50 – Temperaturas de impressão para ABS

Entre a impressão de cada conjunto de provetes, foi necessário adotar alguns procedimentos. Tal passava por remover os provetes anteriores já impressos e fazer a limpeza do injetor, por forma a que o material depositado na mesa fosse sem interrupções. Foi também essencial assegurar o fornecimento de material, garantindo que o rolo não ficaria preso e que tinha material suficiente. O processo decorreu sem qualquer problema tanto para o ABS como para o PC-ABS. No entanto, para o PC, surgiram algumas dificuldades até serem encontrados os parâmetros certos e que fossem impressos provetes de acordo com o estabelecido. Foram impressos alguns provetes defeituosos (Figura 51), em impressões experimentais, até se encontrarem as temperaturas e formato mais eficientes.

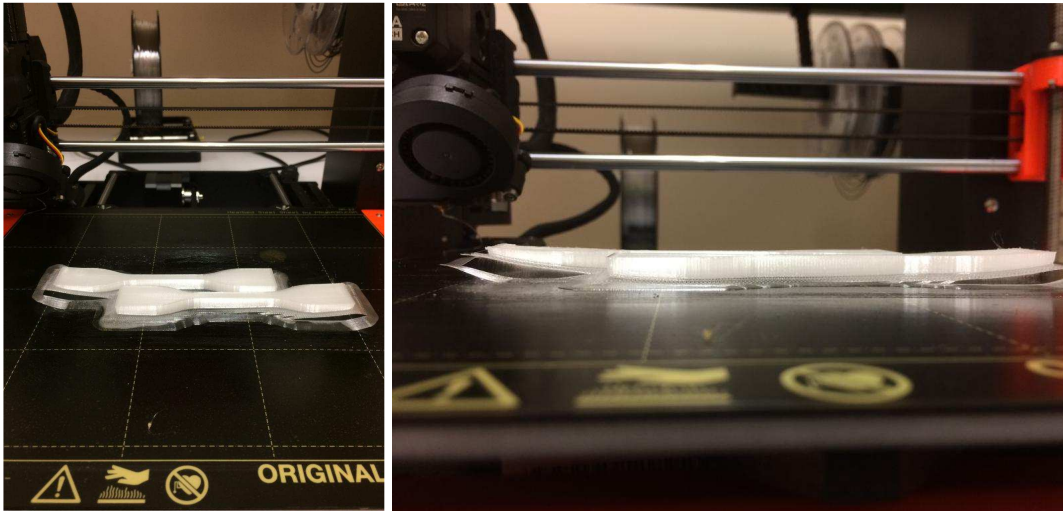


Figura 51 Provetes de PC impressos com peno devido a parâmetros não ideais

Inicialmente, os provetes de PC tinham muito pouca adesão à mesa na zona que será presa pelas amarras. Deste modo, foram criados pontos de fixação circulares, na tentativa de resolver este problema (Figura 52). No entanto, tendo em conta que estes provetes demorariam mais tempo a ser fabricados e utilizariam mais material, não foram utilizados. O problema foi solucionado pela adequação das temperaturas de impressão e da mesa.

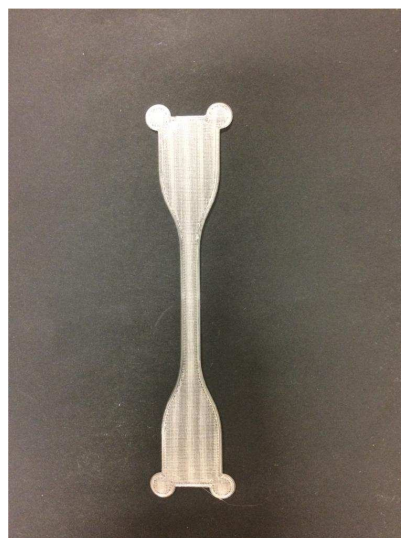


Figura 52– Provede de PC com zonas de fixação

À medida que o procedimento foi otimizado, os provetes inutilizáveis foram sendo cada vez menos, diminuindo o material desperdiçado e reduzindo o tempo total decorrido na impressão. Contudo, os provetes tiveram sempre de ser analisados individualmente, por forma a escolher os mais adequados. Analisando Figura 53, é visível que dos provetes expostos, o segundo e o terceiro são os mais adequados para utilizar nos ensaios posteriores. Estes tiveram maior adesão à mesa, pelo que a zona das amarras tem maior espessura. Esta escolha e comparação foi feita para todos os provetes.

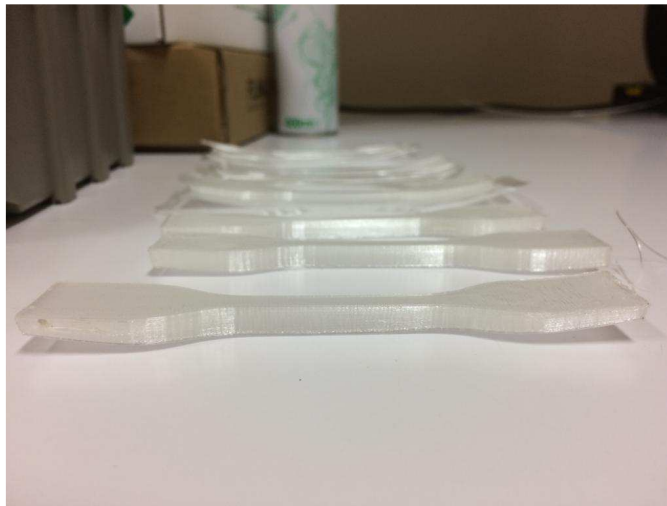


Figura 53 – Seleção de provetes de PC

3.4.2. Duração dos ensaios

Quanto à duração do mergulho dos provetes, optou-se por períodos de 7, 14, 21 e 28 dias. Para cada período de contacto com cada fluído, cada tipo de revestimento e para cada material, utilizaram-se 3 provetes, de modo a obter maior fiabilidade nos resultados obtidos.

De modo a concluir o número de provetes necessários para realizar todos os testes pretendidos, apresentam-se agora diagramas com todos os materiais utilizados, com os diversos revestimentos (Figura 54). São mostrados ainda os dois fluídos nos quais serão mergulhados os provetes, num conjunto de três períodos distintos.

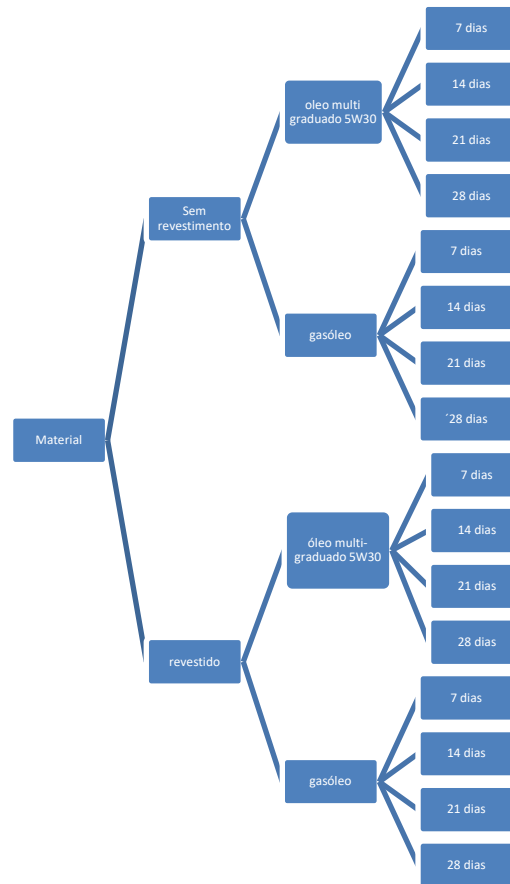


Figura 54 – Esquematização do número de provetes necessários e os períodos de mergulho

Deste modo, com 3 materiais distintos, com revestimento e sem revestimento, 2 tipos de fluídos diferentes e 4 períodos de impregnação divergentes, ainda com 3 amostras para cada um dos ensaios, obtém-se um total de 144 provetes necessários para realizar todos os testes.

3.4.3. Revestimento dos provetes

Terminado o processo de impressão dos provetes, procede-se ao revestimento dos mesmos, recorrendo à resina e endurecedor escolhidos. A primeira etapa foi, após registar a massa do recipiente azul vazio, adicionar uma quantidade de resina (Figura 55) considerada suficiente para revestir todos os provetes (Figura 56).

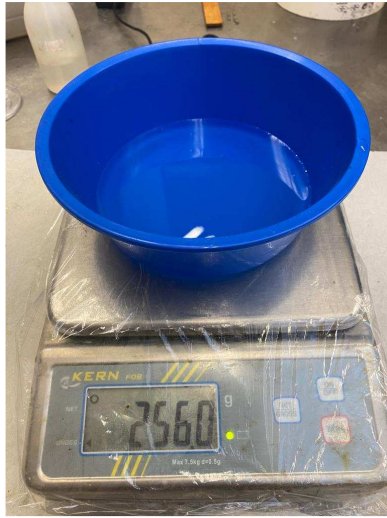


Figura 56 – Registo da massa de resina



Figura 55 – Recipiente de resina Sicomin SR1500

Com base nesta massa e na proporção anunciada, foi adicionada em seguida a quantidade de endurecedor (Tabela 4). Essa mesma massa foi adicionada ao recipiente com a resina (Figura 57).

Tabela 4 – Determinação da massa de endurecedor

<i>Quantidade de resina</i>	<i>Quantidade de endurecedor</i>
100	33
256	X

$$X = \frac{256 \times 33}{100} \quad (1)$$

$$X = 84.48 \text{ g} \quad (2)$$



Figura 57 – Adição da massa de endurecedor respeitando a relação indicada

Terminada a mistura da resina com o endurecedor, processa-se a imersão dos provetes, revestindo-os com a camada de resina e endurecedor. Esta imersão foi feita manualmente, mergulhando cada provete na solução, escorrendo-os e colocando-os num tabuleiro. Foram submersos 21 provetes de cada material, num total de 63 provetes. Em algumas zonas os provetes ficaram muito próximos, que originou algumas dificuldades na remoção do excesso de resina na fase posterior do processo.

Na Figura 58 mostram-se os provetes já dispostos no tabuleiro, dentro da estufa, após a imersão na solução de resina e endurecedor. Estes foram colocados na estufa por 18h a 60°C.



Figura 58 – Provetes na estufa HEK-GMBH MCP-Vacuum

3.4.4. Remoção do excesso da resina

Terminadas as 18 horas, os provetes são retirados da estufa, pelo que nesta fase é necessário retirar o excesso de resina dos mesmos. Este processo foi o mais demorado de todo o procedimento experimental, uma vez que se revelou difícil a remoção da resina em redor dos provetes. Foi utilizado equipamento de proteção individual durante todo o processo: bata, luvas e óculos de proteção (Figura 59).

No caso dos provetes de Policarbonato, o facto de ficarem demasiado juntos, levou à quebra de algumas unidades no momento da separação.



Figura 59 – Material utilizado e disposição do provete no processo de remoção do excesso de resina

Na Figura 60 é dado como exemplo o estado antes e após a remoção do excesso de resina, num provete de ABS. A resina foi removida por forma a manter as dimensões dos provetes incluídas nas tolerâncias da norma ASTM D638



Figura 60 – Provetes antes e após a remoção do excesso de resina

3.4.5. Imersão dos provetes em fluídos

Após remover o excesso de resina de todos os provetes, avançou-se para a etapa de mergulhar os provetes nos fluídos escolhidos.

Foram necessários 12 recipientes, dos quais 6 foram utilizados para colocar os provetes envolvidos em óleo, e os restantes 6 para colocar os provetes envolvidos em gasóleo (provetes revestidos e por revestir). Os recipientes para inserir o óleo são cerâmicos e de vidro, de forma que não exista contaminação do óleo. Já nos recipientes com gasóleo, não existiu essa necessidade, tendo em conta as características do fluído e as temperaturas a que foram sujeitos. Foram usados recipientes de plástico.

Quanto ao óleo multigraduado, este começa a atingir as suas características ótimas de lubrificação por volta de 60 °C. Um óleo a baixas temperaturas origina atrito excessivo entre os componentes móveis de um motor de combustão interna. Por outro lado, para temperaturas excessivamente altas, que rondem os 135 °C, o óleo perde as suas características de lubrificação. Para veículos de competição, onde o desempenho prevalece e não se prioriza a fiabilidade, aplicam-se temperaturas superiores, cerca 150 °C. Com isto, num motor convencional em funcionamento há algum tempo, atingem-se facilmente os 100-110 °C, sendo esta a temperatura normal de funcionamento num veículo que circule nas estradas (Davis, 2022). Esta temperatura de 110 °C foi assim a temperatura utilizada na estufa para mergulhar os provetes em óleo.

Considerando as temperaturas médias que se sentem em Portugal, e tendo em conta o óleo que se utiliza mais frequentemente nas oficinas (em prol do que é recomendado pelo fabricante), utilizou-se o óleo multigraduado 5W30 (Figura 61).



Figura 61 – Óleo multigraduado Total 5w30 utilizado no mergulho dos provetes

Já o gasóleo não sofre grandes variações de temperatura em todo o circuito de alimentação de combustível, pelo que a temperatura ambiente pode ser considerada para os ensaios laboratoriais.

Posto isto, foram colocados os recipientes com óleo na estufa, a 110 °C. Os pratos cerâmicos no topo serviram para garantir que os provetes não flutuavam e ficavam totalmente submersos em óleo (Figura 63).

Para o gasóleo, não foi necessário adotar nenhuma estratégia para que os provetes ficassem submersos, tendo em conta a geometria dos recipientes. Após verificar que estes não flutuavam, foram colocados dentro de outra estufa à temperatura ambiente (Figura 62).



Figura 63 – Provetes mergulhados em óleo.



Figura 62 – Provetes mergulhados em gasóleo.

3.4.6. Ensaio de tração

A dureza de um material é um dos principais fatores considerados no desenvolvimento de um novo material. Esta dureza pode ser medida tanto pela tensão necessária para provocar deformação no material plástico ou, por outro lado, pela tensão máxima que o material suporta. Desta forma, terminado o processo de mergulho dos provetes, procede-se aos ensaios de tração. Para tal, em períodos distintos, os provetes foram retirados dos recipientes, e ensaiados em seguida.

O ensaio de tração consiste na aplicação de um esforço a um provete para que este seja alongado até à sua rutura. As dimensões do provete são referidas na norma, para que os resultados obtidos sejam comparáveis. Os provetes são fixos ao equipamento pela zona das amarras. Deste ensaio são obtidos os valores da carga aplicada ao provete, bem como o seu alongamento. Para a realização deste ensaio foi seguida a norma ASTM D638.

Devido à sua simplicidade de execução e reprodutibilidade de resultados, o ensaio de tração é vastamente aplicado. Com este ensaio é possível calcular (Biopdi, 2022):

1. Resistência à tração;
2. Módulo de elasticidade;
3. Tensão de rutura.

De forma a quantificar a rigidez do material, analisa-se o valor do Módulo de Elasticidade, dado pela razão entre a tensão e a deformação relativa, dentro do limite elástico linear, em que a deformação é totalmente reversível e diretamente proporcional à tensão normal. A tensão pode ser obtida dividindo-se a força pela área da seção transversal do provete, e a deformação relativa, dividindo-se a deformação absoluta pelo comprimento útil do provete. Assim, tem-se (Ferreira, 2020):

$$E = \sigma \varepsilon = \frac{\Delta F/A_0}{\Delta L/L_0} \quad (3)$$

Onde:

- E: módulo e elasticidade do material constituinte do provete;
- σ : tensão normal;
- ε : deformação linear;
- ΔF : força aplicada longitudinalmente ao provete;
- A_0 : área da seção transversal mediana do provete;
- ΔL : variação do comprimento útil do provete;
- L_0 : comprimento útil do provete.

Quando o ensaio de tração se realiza, obtém-se diretamente do *software* a curva tensão-deformação e pode ser determinado o módulo de elasticidade. A Figura 64 mostra a evolução da tensão com a deformação para o ABS no estado final da sua produção e antes do revestimento e mergulho. Adiante, este tipo de provetes será denominado de provetes virgens.

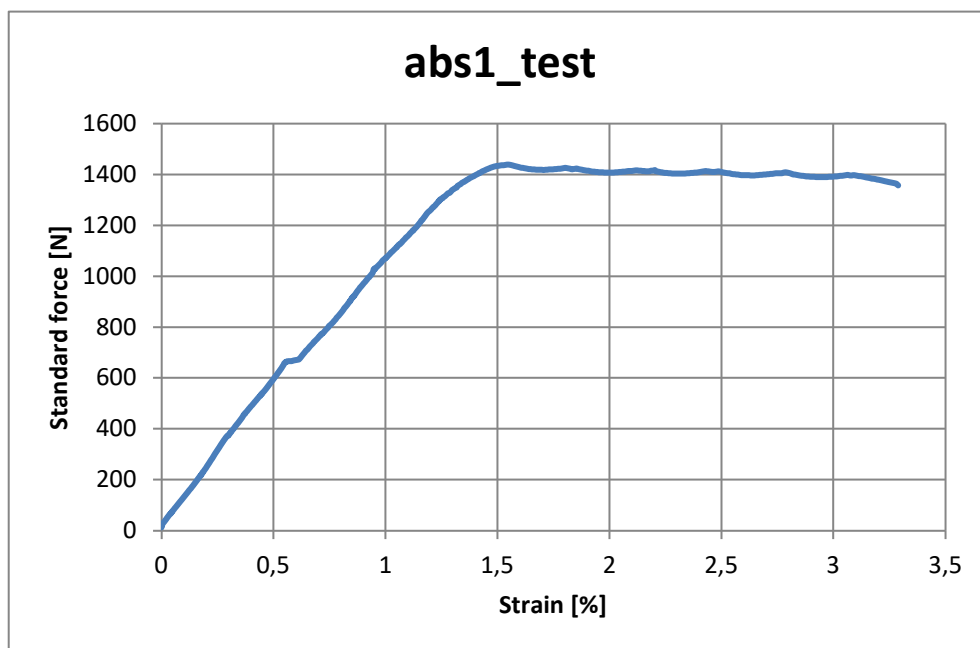


Figura 64 - Ensaio de tração para provete de ABS virgem

Os ensaios foram aplicados segundo a norma ASTM D638, com uma velocidade de 5mm/ min e uma distância entre a zona de fixação das amarras de 65mm. Os primeiros provetes a serem testados no equipamento Zwick 100 foram provetes de material virgem,

sem qualquer revestimento ou mergulho (Figura 65). Na Figura 66 mostram-se os provetes em PC e ABS em material virgem já ensaiados.

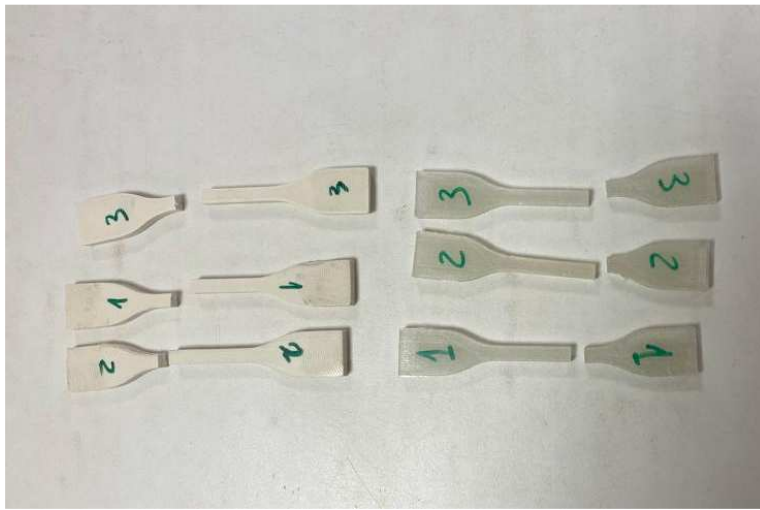


Figura 66 - Provetes em material virgem

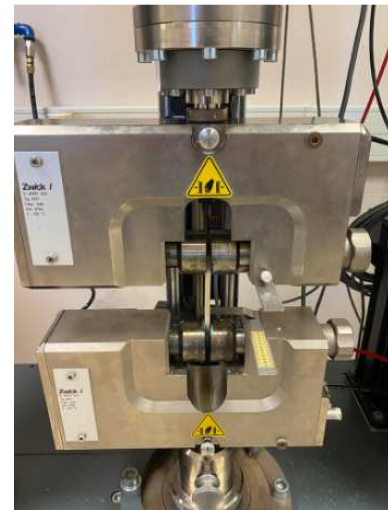


Figura 65 - Ensaio de provete
ABS

3.4.7. Registo da variação da massa dos provetes

Este ensaio consiste em registar a massa dos provetes antes e após serem mergulhados, usando para o efeito a balança AG204 presente no Laboratório de Materiais.

Numa Análise e discussão de resultados, são expostos os gráficos da evolução da variação da massa dos provetes.

4. Análise e discussão de resultados

Terminada a apresentação dos procedimentos experimentais adotados e equipamentos utilizados, procede-se nesta fase à exposição dos resultados obtidos e análise dos mesmos. Após a fase de imersão dos provetes a massa de cada um foi registada e logo de seguida foram submetidos ao ensaio de tração.

4.1. Ensaio de tração

À medida que os ensaios de tração foram realizados, foram registados, através do *software* do equipamento, os dados necessários para determinar os valores de deslocamento e resistência à tração. As curvas de tensão/deformação podem ser encontradas no Anexo D - Curvas Força-Deslocamento – Ensaio tração. Os gráficos expostos demonstram as diferenças observadas entre os provetes mergulhados em óleo e os provetes mergulhados em gasóleo.

Os dados apresentados para o deslocamento dos provetes (Δ) foram calculados tendo em conta a distância inicial das amarras do equipamento de ensaio. Esta distância está definida na norma ASTM D638 (65mm). Deste modo obteve-se,

$$\Delta = \varepsilon * 0.65 \quad (4)$$

Quanto aos valores da resistência à tração (σ), foram aplicados os cálculos com base na força máxima aplicada ao provete, no limite da zona elástica, e na área da secção transversal do próprio provete,

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} \quad (5)$$

Com:

Δ = deslocamento do provete [mm];

ε = deformação do provete (adimensional);

σ = tensão [MPa];

F_{max} = força [N];

A = área de secção do provete [mm²]

Provetes em ABS

Nas Figura 67 e Figura 68 encontram-se os resultados dos deslocamentos observados para os provetes em ABS, ao longo dos diversos períodos. O valor de deslocamento dos provetes em ABS virgem, isto é, de provetes que não foram revestidos nem mergulhados em nenhum fluido, é apresentado no período de mergulho “0 dias”, uma vez que não foi mergulhado em nenhum fluido. Assim, pode fazer-se uma comparação dos resultados.

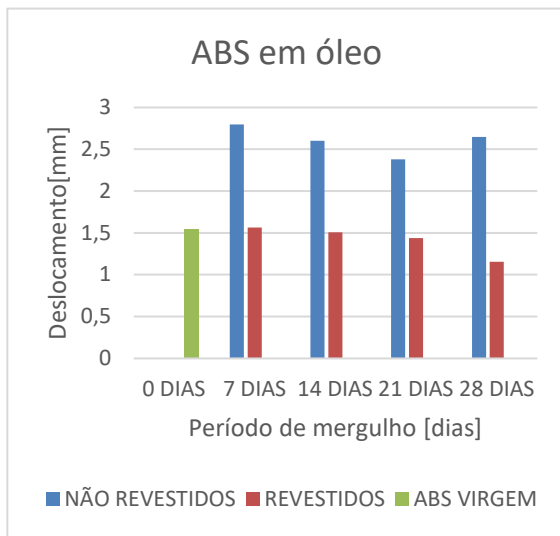


Figura 67 - Deslocamento dos provetes de ABS em óleo

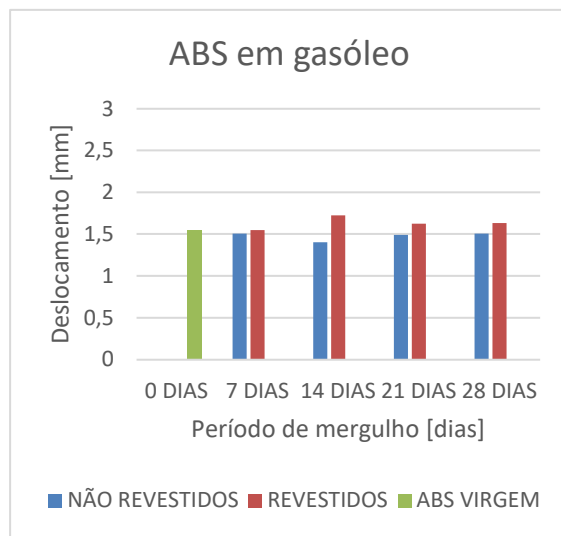


Figura 68 - Deslocamento dos provetes de ABS em gasóleo

Como se pode verificar na Figura 67, os provetes mergulhados em óleo não revestidos tiveram assim um deslocamento máximo de 2.795 ± 0.335 mm ao fim de 7 dias e 2.648 ± 1.266 mm ao fim do 28º dia. Já os provetes não revestidos mergulhados em gasóleo tiveram um deslocamento máximo de 1.507 ± 0.054 mm ao fim de 7 dias e os mesmos 1.507 ± 0.092 mm ao fim de 28 dias

Quanto aos provetes revestidos, para os que foram mergulhados em óleo observou-se um deslocamento máximo de $1.563 \text{ mm} \pm 0.215$ para 7 dias, e $1.155 \text{ mm} \pm 0.398$ para 28 dias. Já os provetes mergulhados em gasóleo revestidos tiveram um deslocamento máximo de $1.547 \text{ mm} \pm 0.729$ mm em 7 dias, e 1.632 ± 0.141 mm ao fim do 28º dia.

Nos provetes mergulhados em gasóleo (Figura 68), é visível um ligeiro aumento do deslocamento nos provetes revestidos e mergulhados, após os períodos de 14 a 28 dias, indicando assim um aumento da flexibilidade e ductilidade dos mesmos. Já nos provetes não revestidos, as variações foram menores, com muito pouca variação do deslocamento, em qualquer dos períodos, face ao deslocamento nos provetes não mergulhados.

Por outro lado, os provetes mergulhados em óleo e não revestidos sofreram uma variação de deslocamento bastante acentuada, em qualquer dos períodos de testagem. Esta variação indica um aumento de flexibilidade e ductilidade do material. Essa variação foi anulada pela aplicação do revestimento, ou seja, os provetes revestidos apresentaram uma variação mínima do deslocamento, salvo para o maior período de mergulho (28 dias).

Por último, é visível a grande diferença entre os deslocamentos observados entre os provetes não revestidos mergulhados em óleo e em gasóleo. Tal indica que as propriedades do óleo e as temperaturas mais elevadas tornam os provetes não revestidos mais dúcteis, e com maior capacidade de sem deformarem sem atingir a rotura.

Para os provetes em ABS foram também determinados os valores de resistência máxima à tração. Os gráficos elaborados seguem o mesmo princípio que os gráficos do deslocamento anteriormente expostos.

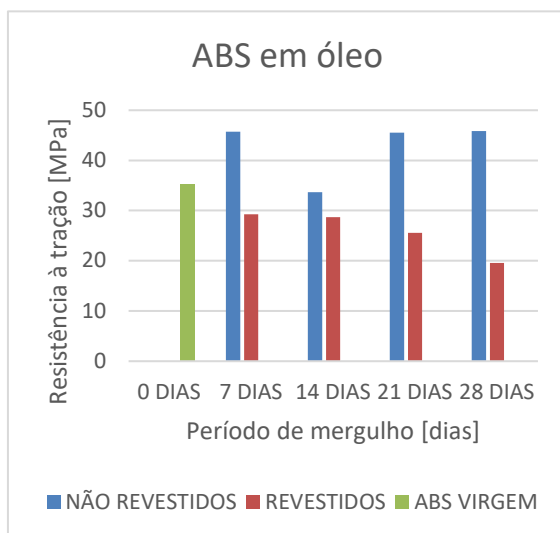


Figura 69 – Resistência à tração para ABS em óleo

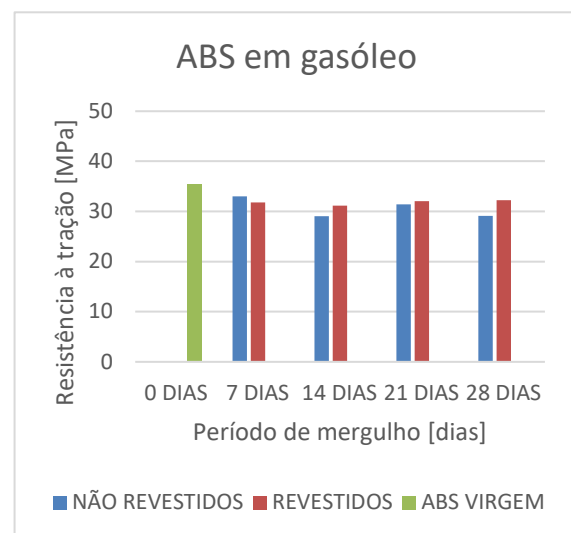


Figura 70 - Resistência à tração para ABS em gasóleo

Conforme realizado para os valores de deslocamento, também os dados da resistência à tração foram comparados. Os valores para os provetes revestidos e não revestidos mergulhados nos dois fluidos distintos foram comparados, fazendo-se referência também aos valores dos provetes em material virgem.

Como se pode verificar na Figura 70, para os provetes em ABS mergulhados em gasóleo registou-se um valor de resistência à tração máximo de 33.004 ± 1.463 MPa nos provetes não revestidos ao fim de 7 dias, e 29.117 ± 0.672 MPa ao fim de 28 dias. Quanto aos provetes revestidos, registaram-se 31.754 ± 0.477 MPa ao fim de 7 dias e 32.230 ± 2.802 MPa aos 28 dias.

Nos provetes em ABS mergulhados em óleo (Figura 69) registou-se um valor máximo de 29.235 ± 0.465 MPa nos provetes revestidos ao fim de 7 dias e 18.897 ± 12.511 MPa no 28º dia. Para os provetes não revestidos, os valores foram 45.702 ± 2.103 MPa ao 7º dia e 45.869 ± 0.197 MPa em 28 dias.

Nos provetes não revestidos mergulhados em óleo, os valores de resistência à tração aumentaram significativamente, para todos os períodos, facto não verificado nos provetes revestidos. Tal indica, como já foi possível concluir com os resultados obtidos para o deslocamento, que o mergulho em óleo multigraduado aumenta a ductilidade do material, alargando o seu regime elástico. Por outro lado, a aplicação do revestimento diminuiu a resistência à tração dos provetes, pelo que se pode concluir que a camada de resina torna os provetes mais frágeis.

Quanto aos provetes mergulhados em gasóleo, poucas diferenças se registaram, tanto para os provetes revestidos como não revestidos. As propriedades do gasóleo e a temperatura ambiente não alteraram significativamente a resistência à tração dos provetes em ABS.

Na Tabela 5 são mostrados todos os resultados obtidos para os provetes ABS testados. Nesta tabela constam valores a 0, marcados a amarelo, que representam os provetes que não foram testados, por se quebrarem na fase de revestimento. Nestes casos, a média dos valores é tida com base em 2 provetes.

Tabela 5 – Valores de deslocamento e resistência à tração para provetes ABS

DIAS	MEIO	AMOSTRA	DEFORMAÇÃO [mm]					RESISTÊNCIA À TRAÇÃO [MPa]				
			1	2	3	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	1	2	3	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
TESTE			1,56455	1,5509	1,5184	1,54462	0,019357442	38,0451	33,9191	33,8447	35,269	1,962792071
7	OLEO	ABS REV.	1,27075	1,63605	1,78165	1,56282	0,214906248	24,0696	29,6295	34,005	29,2347	4,065684282
		ABS N REV.	2,56035	2,5558	3,2682	2,79478	0,334761289	46,5078	42,8204	47,7806	45,703	2,10348213
	GASOLEO	ABS REV.	1,5457	1,54895	0	1,54733	0,729417207	31,2766	32,231	0	31,7538	0,477204729
		ABS N REV.	1,43715	1,5171	1,56715	1,50713	0,053538154	30,9413	33,8912	34,1795	33,004	1,463280918
14	OLEO	ABS REV.	1,81675	1,625	1,07185	1,50453	0,315809189	34,2041	36,2977	15,5166	28,6728	9,342060664
		ABS N REV.	2,07805	3,3813	2,3452	2,60152	0,56207284	36,0895	33,748	31,2075	33,6817	1,993628254
	GASOLEO	ABS REV.	1,58405	1,85965	0	1,72185	0,819448858	27,0726	35,2599	0	31,1662	4,093658056
		ABS N REV.	1,47095	1,3988	1,3364	1,40205	0,054977859	31,5713	28,331	27,2316	29,0446	1,84210941
21	OLEO	ABS REV.	1,5847	1,3377	1,39295	1,43845	0,105845603	26,8052	29,821	20,0109	25,5457	4,102785795
		ABS N REV.	1,836	2,541	2,766	2,381	0,396169156	45,3836	41,2503	50,0137	45,5492	3,579562269
	GASOLEO	ABS REV.	1,55285	1,69455	0	1,6237	0,767602452	30,7711	33,2853	0	32,0282	1,257135008
		ABS N REV.	1,442	1,556	1,476	1,49133	0,047786562	30,4438	32,6527	31,0361	31,3776	0,933530094
28	OLEO	ABS REV.	1,679	1,07	0,716	1,155	0,39771095	33,6513	19,9773	3,06311	18,8972	12,51089557
		ABS N REV.	2,387	2,909	0	2,648	1,266339168	46,0667	0	45,6731	45,8699	0,19682162
	GASOLEO	ABS REV.	1,829	1,556	1,511	1,632	0,140506228	31,1428	36,0738	29,4736	32,2301	2,802041903
		ABS N REV.	1,638	1,447	1,436	1,507	0,092739779	28,3515	29,0136	29,9872	29,1174	0,671759565

Provetes em PC-ABS

Terminada a apresentação dos resultados para os provetes em ABS, prossegue-se para os provetes em PC-ABS. Foram realizados os mesmos cálculos, a partir do conjunto de valores obtidos e constantes da Tabela 6.

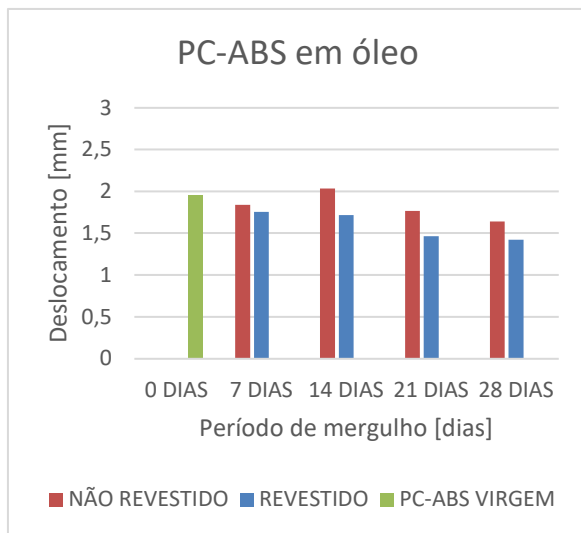


Figura 71 – Deslocamento em PC-ABS em óleo

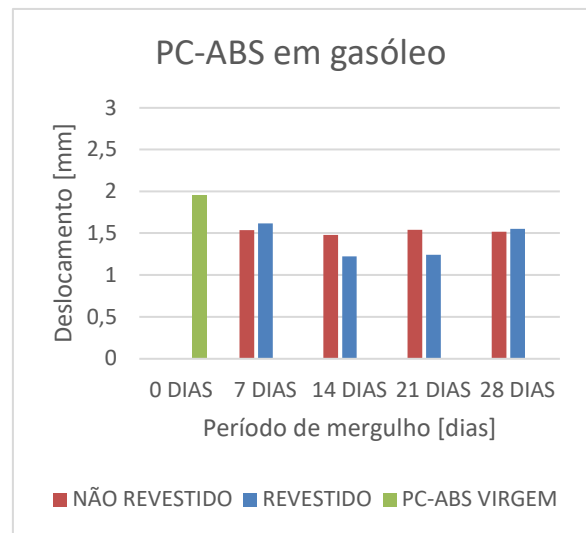


Figura 72 – Deslocamento para PC-ABS em gasóleo

De acordo com os gráficos da Figura 71, os provetes de PC-ABS revestidos e mergulhados em óleo apresentaram um deslocamento de 1.755 ± 0.109 mm em 7 dias e 1.419 ± 0.162 mm em 28 dias. Já os provetes não revestidos atingiram um deslocamento de 1.839 ± 0.148 mm ao 7º dia e 1.638 ± 0.150 mm no 28º dia. O valor de referência para os provetes em PC-ABS em material virgem encontrou-se nos 1.952 ± 0.036 mm.

Os provetes de PC-ABS revestidos mergulhados em gasóleo (Figura 72) sofreram um deslocamento de 1.618 ± 0.763 mm ao fim de 7 dias e 1.551 ± 0.281 mm no 28º dia. Os provetes não revestidos sofreram 1.536 ± 0.024 mm no 7º dia e 1.518 ± 0.06 mm ao fim do 28º dia. Estes valores são comparados aos mesmos 1.952 ± 0.036 mm observados para o PC-ABS virgem.

Contrariamente ao que se observou nos provetes em ABS, não se verificaram grandes alterações nos valores de deslocamento nos provetes de PC-ABS mergulhados em óleo. Ocorreu uma ligeira diminuição do deslocamento sofrido pelos provetes não revestidos, os quais reduziram a sua ductilidade quando em contacto com o óleo multigraduado a 110 °C. Os provetes revestidos apresentaram uma tendência gradual de redução de ductilidade ao longo dos períodos de mergulho face aos provetes em material virgem.

Nos provetes mergulhados em gasóleo, o deslocamento registado, tanto para provetes revestidos como não revestidos, é inferior ao deslocamento tido como referência, de provetes não mergulhados. Em qualquer dos períodos foram registados valores inferiores, que indicam que o gasóleo diminui a ductilidade dos provetes em PC-ABS. Esta diminuição é mais acentuada no caso dos provetes revestidos, com uma tendência de variação não linear ao longo dos vários períodos de mergulho.

Nas Figura 74 e Figura 73 são apresentados os valores de resistência máxima à tração determinados.

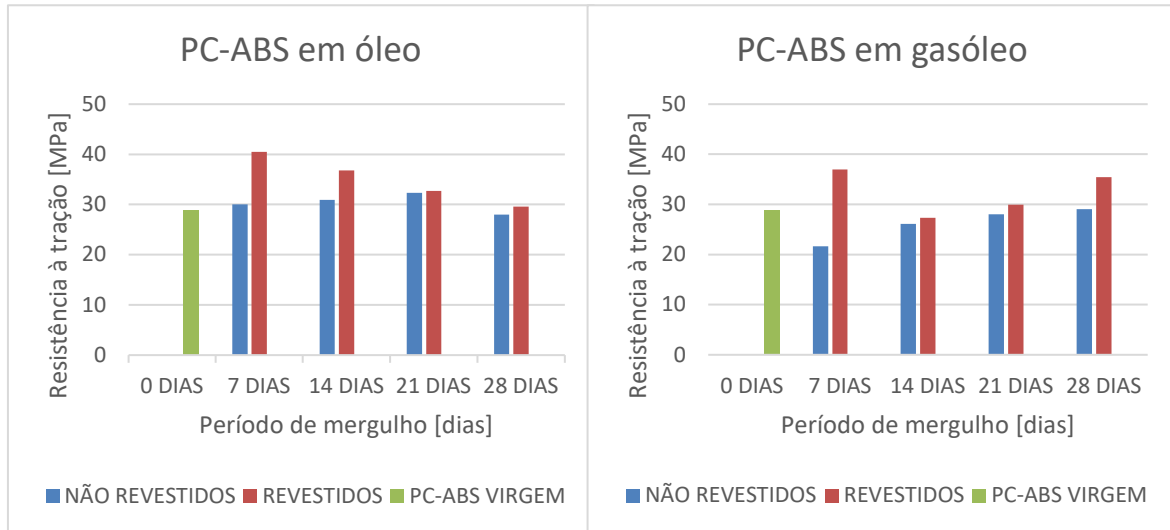


Figura 74 – Resistência à tração para PC-ABS em óleo

Figura 73 – Resistência à tração para PC-ABS em gasóleo

Ao fim do 7º dia de mergulho, os provetes em PC-ABS revestidos e mergulhados em óleo (Figura 74) atingiram uma resistência máxima à tração de 40.452 ± 6.90 MPa e 29.549 ± 4.029 MPa em 28 dias. Já os provetes não revestidos atingiram um valor máximo de 29.999 ± 5.269 MPa em 7 dias e 28.003 ± 3.363 MPa em 28 dias. A resistência à tração nos provetes de PC-ABS virgem foi de 28.711 ± 0.206 MPa.

Para os provetes em PC-ABS mergulhados em gasóleo revestidos (Figura 73), os valores de resistência máxima à tração fixaram-se nos 36.969 ± 17.431 MPa no 7º dia e 35.403 ± 7.871 MPa em 28 dias. Já nos provetes não revestidos, obtiveram-se 21.659 MPa ± 0.553 em 7 dias e 29.015 ± 1.532 MPa em 28 dias.

No caso dos provetes em PC-ABS mergulhados em óleo, contrariamente ao verificado nos provetes de ABS, observou-se um aumento considerável, principalmente ao fim de 7 dias de mergulho, da resistência à tração observada para os provetes revestidos. Tal indica que os provetes revestidos, apresentam uma maior resistência à tração e, portanto, uma melhoria da sua resistência mecânica. É de salientar que essa melhoria reduz

gradualmente ao longo dos períodos de mergulho. Por outro lado, os provetes não revestidos sofrem uma variação muito pouco significativa, indicando que o revestimento de resina provoca poucas alterações em termos de resistência à tração aos provetes de PC-ABS mergulhados em óleo.

Os provetes mergulhados em gasóleo não revestidos, apresentam ligeiras alterações à resistência à tração face aos provetes em material virgem, com uma variação um pouco mais acentuada ao fim dos primeiros 7 dias, com uma redução da resistência à tração, tendência que se inverte ao longo dos períodos de mergulho. Ao final do 28º dia, os valores estão em linha com os valores de referência.

Nos provetes revestidos as diferenças são mais significativas, com aumentos nos valores da resistência à tração mais expressivos. Estes aumentos apresentam uma tendência não linear, com maiores variações após 7 e 28 dias de mergulho, respetivamente.

Na Tabela 6 encontram-se expressos os todos os valores experimentais obtidos para os provetes de PC-ABS. Mais uma vez, os dados a amarelo representam os provetes que não foram testados.

Tabela 6 - Valores de deslocamento e resistência à tração para provetes PC-ABS.

DIAS	MEIO	AMOSTRA	DEFORMAÇÃO [mm]					RESISTÊNCIA À TRAÇÃO [MPa]				
			1	2	3	MÉDIA	DESVIO P	1	2	3	MÉDIA	DESVIO P
TESTE			1,934	1,919	2,002	1,95167	0,03611	28,6762	28,4785	28,9797	28,7115	0,20612
7	OLEO	PC-ABS REV.	1,6796	1,6757	1,9097	1,755	0,1094	48,4855	31,6341	41,237	40,4522	6,90191
		PC-ABS N REV.	2,0059	1,6471	1,86485	1,83928	0,14759	29,0868	31,8105	23,111	28,0028	3,63335
	GASOLEO	PC-ABS REV.	1,6211	1,61395	0	1,61753	0,76251	36,5532	37,3859	0	36,9695	17,4309
		PC-ABS N REV.	1,5041	1,56195	1,5418	1,53595	0,02398	30,2237	26,8542	29,9683	29,0154	1,53176
14	OLEO	PC-ABS REV.	1,92335	1,90515	1,3221	1,71687	0,27924	42,7656	38,9625	28,582	36,77	5,99435
		PC-ABS N REV.	1,93505	2,03905	2,12225	2,03212	0,07658	48,3769	35,3754	33,2966	39,0163	6,67313
	GASOLEO	PC-ABS REV.	1,33445	1,1128	0	1,22363	0,58388	29,7545	24,9081	0	27,3313	13,0351
		PC-ABS N REV.	1,49955	1,4846	1,4547	1,47962	0,01865	27,2869	25,5877	31,1147	27,9964	2,3115
21	OLEO	PC-ABS REV.	1,45145	1,6588	1,2792	1,46315	0,15519	31,3491	41,2452	25,5886	32,7276	6,46569
		PC-ABS N REV.	1,777	1,761	1,762	1,76667	0,00732	34,2966	32,4117	25,9771	30,8951	3,5617
	GASOLEO	PC-ABS REV.	1,27725	1,20835	0	1,2428	0,58654	32,0169	27,8453	0	29,9311	14,2121
		PC-ABS N REV.	1,551	1,517	1,548	1,53867	0,01537	26,1006	26,9	25,2972	26,0993	0,65435
28	OLEO	PC-ABS REV.	1,218	1,425	1,616	1,41967	0,16253	25,5123	28,0832	35,0507	29,5487	4,02954
		PC-ABS N REV.	1,449	1,649	1,817	1,63833	0,15042	28,858	24,1914	36,9461	29,9985	5,26916
	GASOLEO	PC-ABS REV.	1,43	1,939	1,284	1,551	0,28076	29,1851	46,5075	30,515	35,4025	7,87114
		PC-ABS N REV.	1,536	1,435	1,582	1,51767	0,0614	21,718	22,3065	20,9554	21,6599	0,55312

Provetes em PC

Dos provetes mergulhados, os que demonstraram maior degradação pelo contacto com o óleo multigraduado foram os de PC, sendo que os provetes mergulhados, quer revestidos e não revestidos, não puderam ser testados. Os provetes não revestidos fragmentaram ainda dentro do recipiente com óleo, durante os primeiros sete dias de mergulho (Figura 75). Os provetes revestidos quebraram assim que foram comprimidos na zona das amarras (Figura 76) aquando da realização dos ensaios de tração. Deste modo, para os ensaios de tração como em provetes de PC, apenas são expostos os resultados para os provetes mergulhados em gasóleo. Mais se acrescenta que, devido aos provetes que se danificaram durante a remoção do excesso de resina, só foram obtidos provetes suficientes para 3 períodos de mergulho (7, 14 e 21 dias). Tal pode dever-se ao aperto dos provetes nos mordentes do torno e à limagem que, por se tratar de um material mais frágil, tenha provocado microfissuras nos provetes de PC.



Figura 76 – Provetes em PC revestido mergulhados em óleo



Figura 75 - Provetes em PC não revestido mergulhados em óleo

Posto isto, apresentam-se os valores de deslocamento para os provetes mergulhados em gasóleo, revestidos e não revestidos, nos diversos períodos. De forma a facilitar a leitura da evolução do comportamento dos provetes, o valor do deslocamento dos provetes em material virgem, não revestidos e não mergulhados em nenhum fluído, é exposto na primeira barra de cada gráfico (a verde) –Figura 77 e Figura 78.

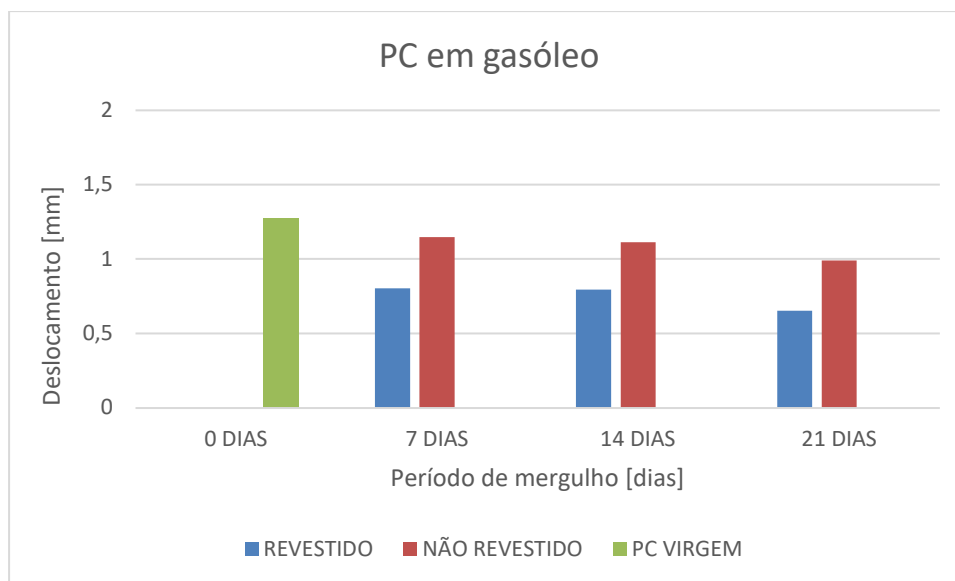


Figura 77 – Deslocamento para PC em gasóleo

Os provetes em PC revestidos, mergulhados em gasóleo (Figura 77), sofreram um deslocamento de $0.802 \pm 0.392\text{mm}$ em 7 dias e $0.653 \pm 0.309\text{mm}$ em 21 dias. Para os provetes não revestidos registaram-se $1.148 \pm 0.046\text{mm}$ em 7 dias e $0.99 \pm 0.096\text{mm}$ ao fim de 28 dias. Estes valores foram comparados aos $1.274 \pm 0.014\text{mm}$ registados nos provetes em PC virgem.

De acordo com a Figura 77, o deslocamento global dos provetes mergulhados (com e sem revestimento) diminui quando comparados com o deslocamento observado nos provetes em material virgem. Tal indica uma perda de ductilidade nos provetes que foram mergulhados em gasóleo, sejam estes revestidos ou não revestidos. É de destacar que esta diminuição do deslocamento é mais acentuada nos provetes revestidos, que indica que a camada de resina que cobre os provetes torna-os mais frágeis.

Analisados os valores do deslocamento para os provetes de PC, apresentam-se os resultados para a resistência máxima à tração.

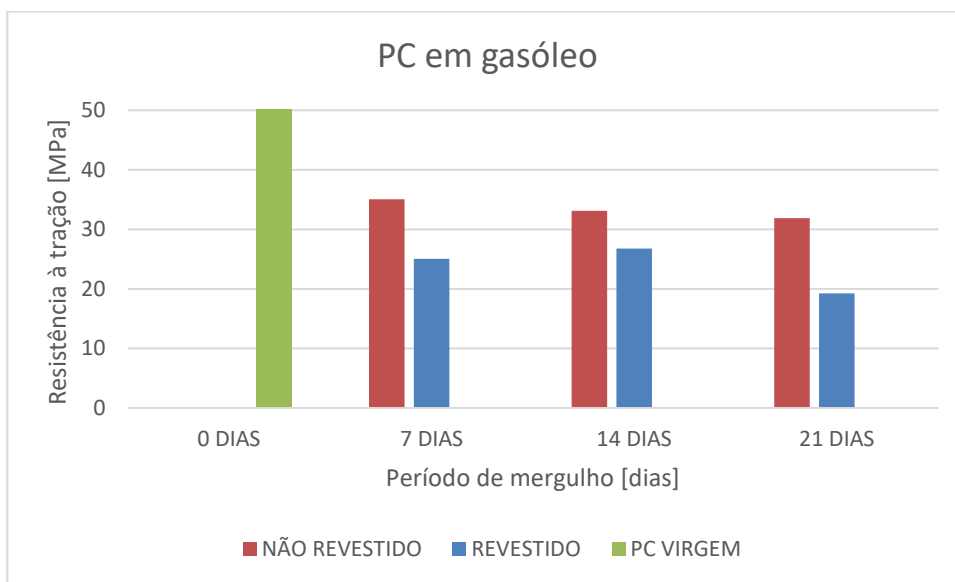


Figura 78 – Resistência à tração para PC em gasóleo

Os valores de resistência máxima à tração para os provetes em PC revestidos foram de 25.049 ± 12.039 MPa ao fim de 7 dias e 19.265 ± 9.106 MPa ao 28º dia. Os provetes não revestidos apresentaram valores de 36.934 ± 2.679 MPa ao final de 7 dias e 31.813 ± 2.145 MPa em 28 dias. O valor para os provetes em PC virgem foi de 49.229 ± 0.701 MPa.

Estes valores da Figura 78 indicam uma diminuição de resistência mecânica, tanto nos provetes revestidos como não revestidos após o mergulho em gasóleo. Esta diminuição é, contudo, mais acentuada nos provetes revestidos. Conclui-se que o gasóleo impõe uma degradação os provetes de PC, tornando-os mais frágeis, sendo que o revestimento com resina acentua este efeito. Na Tabela 7 expõem-se todos os valores obtidos para os provetes de PC. Com valor 0 e em fundo amarelo estão assinalados os provetes que por se terem quebrado não foram testados. As linhas a vermelho representam os provetes imersos em óleo, que se degradaram ao ponto de não poderem ser testados.

Tabela 7 – Valores de deslocamento e resistência à tração nos provetes de PC

DIAS	MEIO	AMOSTRA	DEFORMAÇÃO [mm]				RESISTÊNCIA À TRAÇÃO [Mpa]					
			1	2	3	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	1	2	3	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
		TESTE	1,25385	1,28635	1,28245	1,27422	0,014489153	51,1161	50,1708	49,4014	50,2294	0,701270686
7	OLEO	PC REV.										
		PC N REV.										
	GASOLEO	PC REV.	0,92885	0,67535	0	0,8021	0,392020719	22,1775	27,9213	0	25,0494	12,03895938
		PC N REV.	1,1635	1,1947	1,08485	1,14768	0,046219627	37,2334	36,6345	31,2744	36,9339	2,679119707
14	OLEO	PC REV.										
		PC N REV.										
	GASOLEO	PC REV.	0,75855	0,8294	0	0,79398	0,37539937	26,3745	27,1267	0	26,7506	12,61408657
		PC N REV.	1,0713	1,1508	1,10305	1,11173	0,037128107	31,1163	35,0381	33,215	33,0772	1,602443801

4.2. Variação de massa

Terminada a apresentação dos resultados dos ensaios de tração para os diversos tipos de provetes, são apresentados os valores da variação de massa registados para os provetes, nos diversos períodos de mergulho. Estes dados ajudaram a completar as conclusões obtidas, por forma a perceber se a aplicação do revestimento melhora a impermeabilização dos componentes produzidos por fabricação aditiva a fluídos como o óleo e o gasóleo.

Para tal foram registadas as massas dos provetes antes de serem mergulhados nos respetivos fluídos, e posteriormente, logo depois de serem retirados dos recipientes e secos, nos períodos estipulados.

Variação de massa nos provetes de ABS

Nas Figura 80 e Figura 79 mostra-se a variação de massa para os provetes de ABS imersos em gasóleo e óleo, respetivamente.

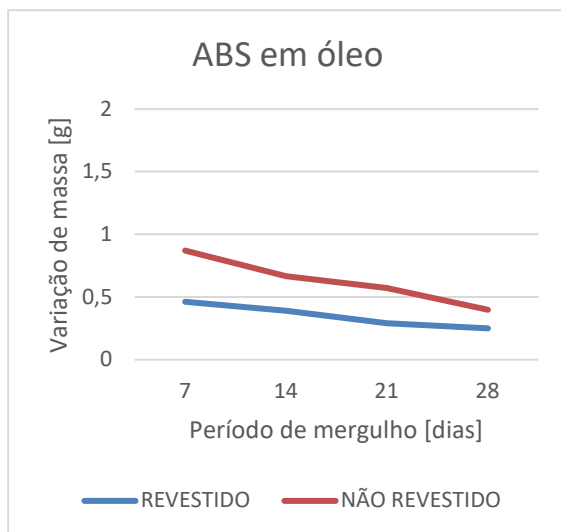


Figura 80 – Variação de massa em provetes de ABS mergulhados em óleo

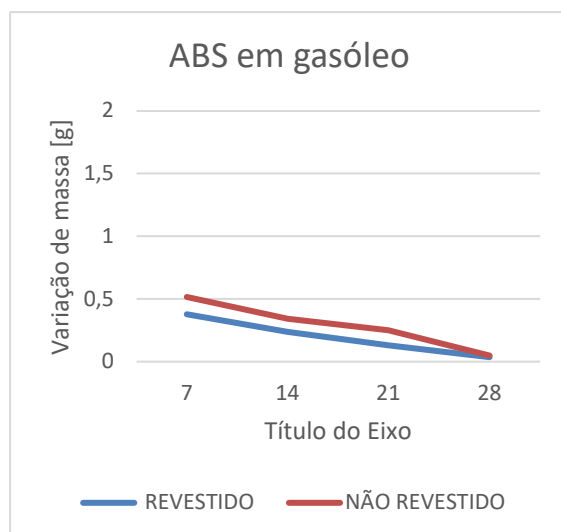


Figura 79 - Variação de massa em provetes de ABS mergulhados em gasóleo

Pela análise da Figura 80, os provetes de ABS mergulhados em óleo revestidos sofreram uma variação de massa de 0.462g ao fim de 7 dias e 0.251g ao fim de 28 dias. Já os provetes não revestidos sofreram uma variação de 0.872g ao fim de 7 dias e 0.399g ao fim dos 28 dias.

Pela análise da Figura 79, os provetes de ABS mergulhados em gasóleo revestidos tiveram uma variação de massa de 0.378g em 7 dias e 0.035g em 28 dias. Para os provetes não revestidos, a variação registada foi de 0.516g para 7 dias e 0.050g ao fim do 28º dia.

A tendência ao longo dos 28 dias de mergulho manteve-se tanto para os provetes mergulhados em óleo como gasóleo. A grande variação de massa ocorre nos primeiros 7 dias, sendo que posteriormente a absorção de fluido vai diminuindo gradualmente, sendo praticamente inexistente ao fim de 28 dias. Esta variação foi mais significativa nos provetes não revestidos, tanto para os provetes mergulhados em óleo como em gasóleo.

Observa-se também que os provetes de ABS mergulhados em óleo sofreram uma variação de massa consideravelmente superior aos provetes mergulhados em gasóleo.

De forma a compreender os resultados dispares nas variações de massa, apresentam-se imagens dos provetes revestidos (uma vez que as alterações visuais foram mais acentuadas) após os primeiros 7 dias de mergulho (Figura 81), e após os 28 dias (Figura 82). Ao fim dos primeiros 7 dias é visível alguma degradação da camada de resina, acompanhada de alguma diferença na pigmentação da mesma. Contudo, ao 28º dia, os provetes apresentam já uma deformação considerável, com a camada de resina bastante mais degradada. Esta deformação gradual ao longo dos diversos períodos deve-se à flexibilidade do material.



Figura 81 – provete de ABS revestidos, mergulhados em óleo, ao 7º dia



Figura 82 – provetes de ABS revestidos, mergulhados em óleo ao fim do 28º dia

Variação de massa nos provetes de PC

Dos provetes em PC, apenas foram testados os que foram mergulhados em gasóleo. Os provetes mergulhados em óleo não puderam ser testados, como já mencionado anteriormente.

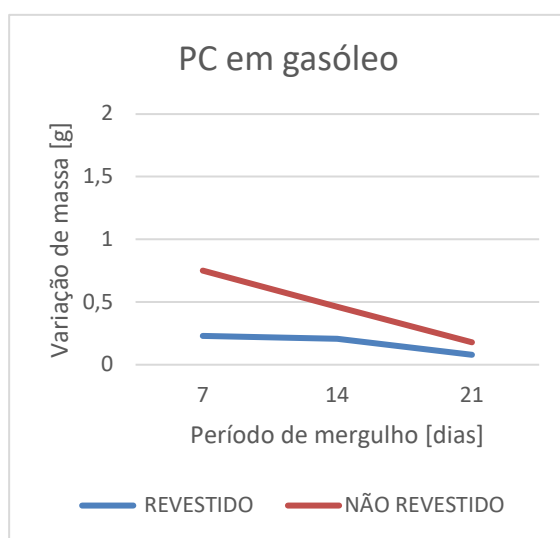


Figura 83 – Variação de massa para provetes de PC em gasóleo

Analisando a Figura 83, para os provetes de PC revestidos mergulhados em gasóleo observou-se uma variação de 0.229g ao fim de 7 dias e 0.079g ao fim dos 21 dias.

Os provetes não revestidos sofreram uma variação de 0.750g em 7 dias e 0.179g em 21 dias.

Como verificado nos outros materiais, os provetes em PC não revestidos absorveram bastante mais fluído, degradando mais, o que se traduziu numa mais acentuada perda de massa, comparativamente aos provetes revestidos. Nos provetes revestidos, a variação nos 7 e 14 dias foi superior à que se verificou até ao 21º dia. A pouca variação indica uma camada de revestimento uniforme, que permitiu um isolamento mais eficaz do provete.



Figura 84 – Provete PC revestido
mergulhado em gasóleo

Os provetes mergulhados em gasóleo apresentam poucas diferenças no seu aspeto após o mergulho (Figura 64).

Variação de massa nos provetes de PC-ABS

Por último apresentam-se os valores de variação de massa para os provetes de PC-ABS (Figura 85, Figura 86).

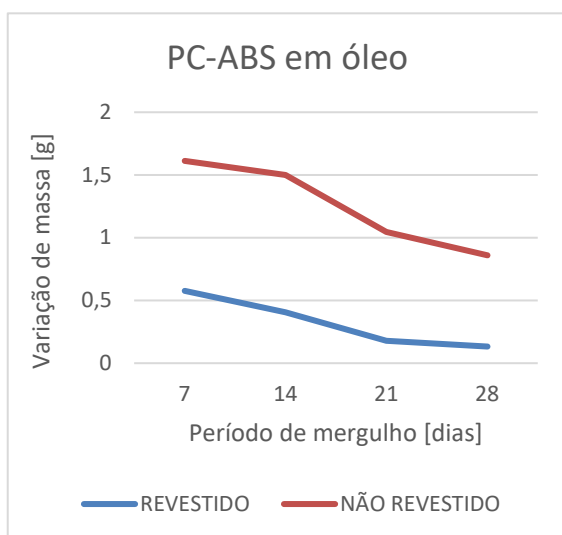


Figura 85 - Variação de massa em provetes PC-ABS mergulhados em óleo

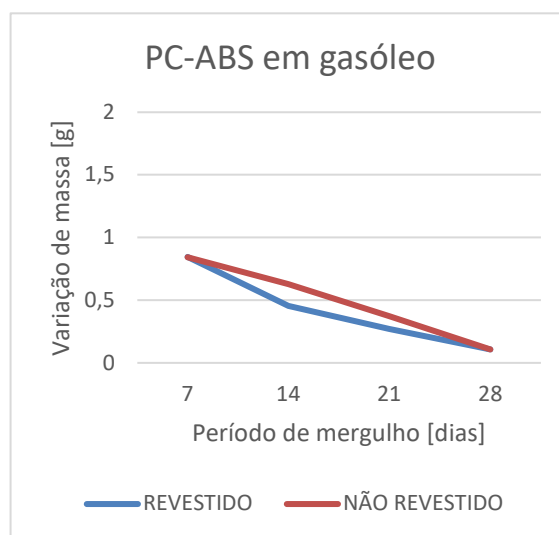


Figura 86 – Variação de massa em provetes PC-ABS mergulhados em gasóleo

Através da Figura 85, conclui-se que os provetes mergulhados em óleo revestidos sofreram uma variação de 0.463g ao fim de 7 dias e 0.251g em 28 dias. Já nos provetes não revestidos observou-se uma variação de 0.872g em 7 dias e 0.399g ao final do 28º dia

Pela Figura 86, nota-se que nos provetes mergulhados em gasóleo revestidos, verificou-se 0.378g em 7 dias e 0.035g ao fim de 28 dias. Já os provetes não revestidos sofreram uma variação de 0.516g em 7 dias e 0.050g no 28º dia.

Os provetes de PC-ABS não revestidos e mergulhados em óleo sofreram a variação de massa mais significativa entre todos os provetes. Esta variação pode ser indicativa de uma camada de resina pouco eficiente, com alguma degradação da mesma durante o período de mergulho. Nos provetes mergulhados em gasóleo existiu também uma variação mais acentuadas nos primeiros 7 dias. Contudo, a variação para os provetes revestidos e não revestidos é idêntica.

Tal como nos provetes de ABS, os provetes de PC-ABS que apresentam maiores diferenças visuais são os revestidos mergulhados em óleo. Ao contrário do que se verificou no ABS, os provetes não deformaram ao fim dos 28 dias (Figura 88). No entanto a cor da resina mudou significativamente quando comparada com a cor ao fim dos 7 dias (Figura 87). Apesar da camada parecer uniforme pode não ter espessura suficiente para oferecer um bom isolamento, provocando variações de massa.



Figura 87 - provetes de PC-ABS revestidos mergulhados em óleo ao fim de 7 dias



Figura 88 - provetes de PC-ABS revestidos mergulhados em óleo ao fim de 28 dias

4. Conclusão e Trabalhos Futuros

Os processos de fabrico aditivo estão atualmente bastante desenvolvidos, oferecendo um vasto conjunto de processos, com aplicações distintas. As diversas vantagens destes processos captaram a atenção de múltiplas indústrias, aumentando a oferta de produtos e equipamentos, possibilitando, por um lado, a redução do preço e, por outro, aumentar os materiais disponíveis no mercado.

O objetivo deste projeto foi perceber a variação da permeabilidade em componentes fabricados por um dos processos de fabrico aditivo mais comuns atualmente, o FDM, quando em contacto com fluidos presentes num automóvel com motor de combustão interna, pela aplicação de um revestimento de resina epoxídica. Para tal, foram impressos diversos provetes, de acordo com a norma ASTM D638, sendo posteriormente revestidos com a resina epoxídica e mergulhados nos fluídos selecionados, óleo multigraduado e gasóleo, por períodos distintos. Após o período de mergulho terminar, os provetes foram testados mediante ensaios de tração uniaxial, e a sua variação de massa foi também registada.

Pela análise efetuada, concluiu-se que o PC não é adequado para estar em contacto com óleo multigraduado às temperaturas normais de funcionamento (110°C). A sua baixa ductilidade e, por outro lado, a sua grande fragilidade, levaram a que os provetes não revestidos fragmentassem ainda dentro dos recipientes onde foram mergulhados nos fluídos, e os provetes revestidos quebrassem assim que foram fixados pelas amarras no equipamento de ensaio de tração. Já os provetes de PC-ABS apresentaram resultados melhores que os do PC, contudo as suas variações de massa foram muito significativas, o que traduzem a sua degradação acentuada aquando do contacto com os fluídos em análise, e os valores de deslocamento e resistência máxima à tração mostraram ainda alguma fragilidade do material, mesmo quando revestido pela resina. Desta forma, dos materiais abordados, o ABS é o que mais se adequa à utilização no contacto com óleo multigraduado onde de verifiquem temperaturas elevadas (normais para o funcionamento de um motor de combustão interna). A imersão em óleo de componentes fabricados em ABS tende a melhorar a sua ductilidade. De salientar ainda que não foram registadas melhorias significativas ou benefícios na utilização do revestimento utilizando resinas epoxídicas

Futuramente, com intuito de dar seguimento a este trabalho, sugere-se a utilização de outras técnicas para uniformizar a espessura da camada de resina que reveste os provetes, bem como outros tipos de revestimento. No início do projeto, ponderou-se a utilização de PLA como material para os provetes. Contudo, a indisponibilidade no mercado levou a que se optasse pelo PC-ABS. Talvez o PLA, pelas suas características, permitisse obter resultados mais positivos para algumas das condições dos ensaios, pelo que se sugere a sua futura análise.

5. Bibliografia

(s.d.).

A. Ahmadi Nadooshan, S. D. (2007). Application of RP Technology with Polycarbonate Material for Wind Tunnel Model Fabrication .

Alessandra Regina Pepe Ambrozin, S. E. (2015). Metallic corrosion related to mineral fuels and biofuels utilization.

Ali Bagheri, J. J. (Abril de 2019). Photopolymerization in 3D Printing.

Alves, M. (2020). *Circula Seguro*. Obtido de <https://www.circulaseguro.pt/sabia-que-existem-diferentes-tipos-de-oleo-do-motor/>

Autonews. (agosto de 2020). Obtido de <https://www.autonews.pt/auto-news/60523-ferrari-sp48-unica-um-novo-edicao-unica-de-maranello/>

Ben Benwood, F. S. (setembro de 2022). *SLS 3D PRINTING - How to make functional parts*.

Biopdi. (2022). *Ensaio de Tração, Resistência à tração, Teste de tração*. Obtido de Ensaio de tração: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>

Chohan, J. S. (2020). Pre and post processing techniques to.

Davis, M. (2022). *MotorTrend*. Obtido de <https://www.motortrend.com/car-reviews/>

Engineers, I. o. (2012). Special materials used in FDM rapid prototyping technology application.

Ferreira, S. G. (2020). *Estudo da Degradação de Peças Produzidas por FDM*. IPLeiria.

filament2print. (2015). Obtido de <https://filament2print.com/pt/>

Forbes. (2020). *The Best 3-D Printers of 2020*. Obtido de <https://www.forbes.com/sites/anthonykarcz/2020/01/08/the-best-3-d-printers-of-2020/>

Giantomaso, I. (2018). *LSEV: carro é feito com impressora 3D e deve chegar ao mercado em 2019*. Obtido de <https://www.techtudo.com.br/noticias/2018/03/lsev-carro-e-feito-com-impressora-3d-e-deve-chegar-ao-mercado-em-2019.ghtml>

Herderick, E. D. (2015). Progress in Additive Manufacturing.

Kwang-Ho Jo, Y.-S. J.-H. (2016). A Study of Post-Processing Methods for Improving the Tightness of a Part Fabricated by Fused Deposition Modeling.

- Legrand, D. G., & Bendler, J. T. (2010). *Handbook of Polycarbonate Science and Technology*.
- magazine, f. (dezembro de 2020). *Em 2019 a Europa preferiu mais carros a gasolina. Portugal seguiu a tendência*. Obtido de <https://fleetmagazine.pt/2020/02/06/gasolina-foi-a-motorizacao-favorita-na-europa-durante-2019-e-hibridos-ganharam-terreno/>
- Matmatch. (2020). *Filaments for Fused Deposition Modeling (FDM)*. Obtido de <https://matmatch.com/learn/material/filaments-for-fused-deposition-modeling-fdm>
- Miriam R. Simon Cater, B. M. (2014). Permeability and Porosity Reduction of Fused Deposition Modeling Parts via Internal. pp. p5.6; p12-20.
- oleo de motor: como escolher o oleo certo*. (12 de 2020). Obtido de https://www.auto-doc.pt/info/oleo-de-motor-coisas-que-pode-aprender-com-o-rotulo?gadw=1&gclid=EAIaIQobChMIpZ7RkLLf7QIVo-tCh2YowHsEAAYAiAAEgJKjFD_BwE
- omnexus. (2020). *3D Printing / Additive Manufacturing Using Polymers - Complete Guide*. Obtido de omnexus - the material selection platform: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/3d-printing-and-additive-manufacturing-polymers-and-processes>
- Paoli, M.-A. D. (2008). Degradação e Estabilização de Polímeros. pp. p.32-36.
- polimeros, m. (2020). *Home-Mais polimeros* - . Obtido de mais polimeros: <https://maispolimeros.com>
- recuperação de carros antigos*. (2020). Obtido de 3D FILA: <https://3dfila.com.br/recuperacao-de-carros-antigos-impressao-3d-e-a-solucao/>
- Schoffer, F. (setembro de 2022). *FDM 3D PRINTING - How to prototype*.
- sculpteo. (2018). the state of 3D printing. *The State of 3D printing 2018 Edition*, pp. p6-p10.
- SLA 3 PRINTING* . (2020).
- tecnometal. (2016). tecnometal inovação nas emoresas de metalúrgica e metalocerâmica. *tecnometal entrevista Manuel Grilo, Diretor do CENFIM*.
- Tomé, J. D. (2021). *Razão Automóvel*. Obtido de <https://www.razaoautomovel.com/etiqueta/porsche-959>
- unlimited, 3. p. (2022). *FDM FUSED DEPOSITION MODELING*.
- Xometry, T. (2022). *PC-ABS: Polycarbonate Material Properties*. Obtido de Xometry: <https://www.xometry.com/resources/materials/pc-abs/>

Zeqing Jin, Z. Z. (fevereiro de 2020). Automated Real-Time Detection and Prediction of Interlayer Imperfections in Additive Manufacturing Processes Using Artificial Intelligence.

Anexo A – Registo das massas de fluido

1. Provetes revestidos – mergulhados em óleo

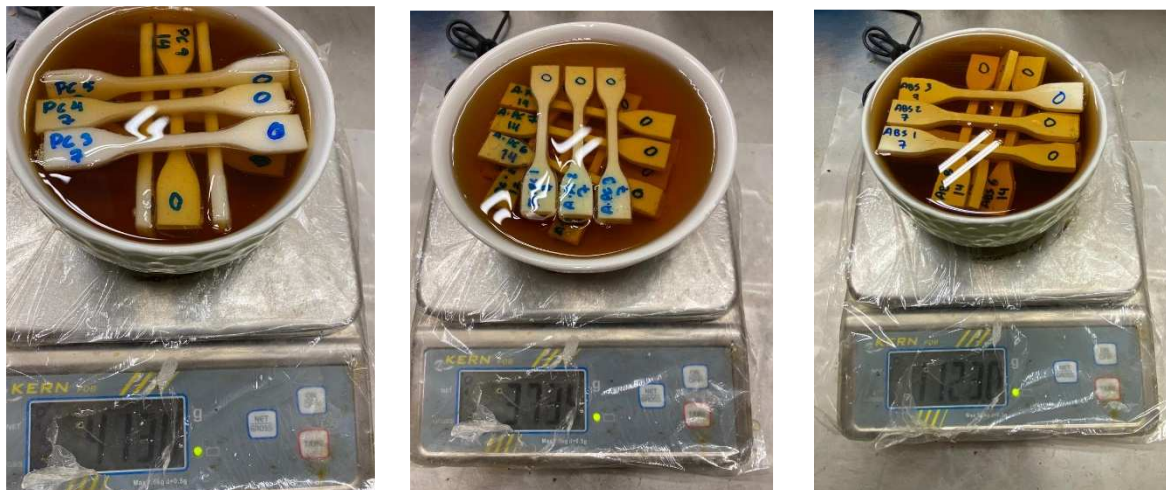


Figura 89 – Registo da massa de óleo em provetes dos vários materiais

2. Provetes não revestidos – mergulhados em óleo



Figura 90 - Registo da massa de óleo em provetes dos vários materiais

3. Provetes revestidos – mergulhados em gasóleo



Figura 91 - Registo da massa de gasóleo em provetes dos vários materiais

4. Provetes não revestidos – mergulhados em gasóleo



Figura 92 - Registo da massa de óleo em provetes dos vários materiais

Anexo B - Ensaio de tração

Os ensaios de tração são realizados num provete com o formato apresentado na figura Figura 93. A forma em osso do provete tem duas zonas mais largas, destinadas à fixação do mesmo no equipamento, assim como uma zona mais estreita, denominada *gage section*, zona essa onde provete irá ceder.

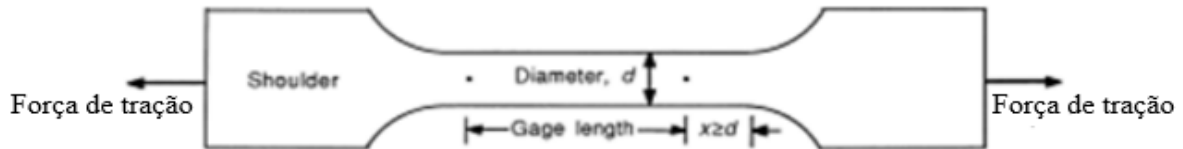


Figura 93 – Geometria do provete usado em ensaios de tração

A força de tração é medida sob a forma de uma função do aumento do comprimento da zona mais estreita do provete, pelo que uma relação entre a força aplicada e o aumento do comprimento é obtida. Esta relação é convertida para uma relação tensão-deformação, exposta sob a forma gráfica.

A tensão nominal é definida por:

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (6)$$

Onde F representa a força de tração aplicada, e A_0 a área inicial da secção da *gage section*.

A deformação nominal, e , é definida por:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (7)$$

onde L_0 representa o comprimento inicial da *gage section*, e ΔL representa a variação desse mesmo comprimento.

De modo a obter resultados fiáveis, é aconselhada uma alteração dos dados obtidos, por forma a obter valores de tensão e deslocamento verdadeiros.

A tensão real é definida por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

Onde A representa a área da secção instantânea da *gage section* enquanto a força F é aplicada.

Quando o comprimento do provete começa a variar, a deformação real é expressa por:

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} \quad (8)$$

Desde que a deformação da *gage section* seja uniforme, a tensão e deslocamento reais podem ser calculados considerando $LA=L_0A_0$:

$$\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} \quad (9)$$

Deste modo, a fórmula da tensão (σ) pode ser reescrita na forma:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} \quad (10)$$

Substituindo ainda F/A_0 e A_0/A obtém-se

$$\sigma = S(1 + e) \quad (11)$$

Com a substituição de $L/L_0 = (1 + e)$ na expressão da deformação real, obtém-se

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (12)$$

Com deformações pequenas, as diferenças entre a tensão nominal e a tensão real são também bastante reduzidas. Nesta situação, é indiferente se o módulo de *Young* utilizado é definido em função da tensão nominal ou real. Da curva de tensão-deformação podem ser obtidos diversos parâmetros mecânicos.

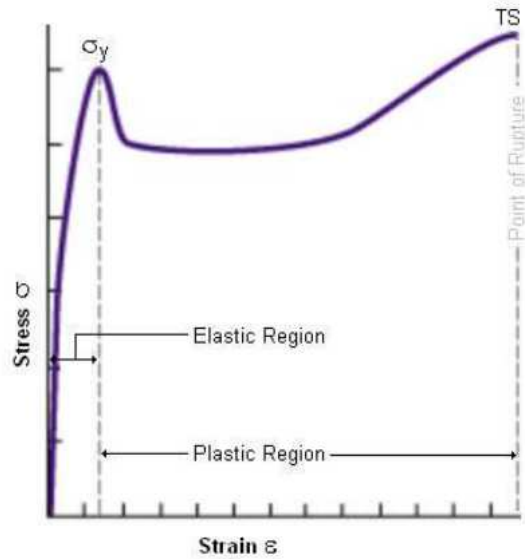


Figura 94 – Gráfico da curva tensão - deformação

Definição de conceitos

Módulo de Young (E): para a grande maioria dos materiais plásticos, a relação tensão-deformação para os valores iniciais é linear. O declive desta reta traduz-se no módulo de Young, ou módulo de elasticidade.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (13)$$

Tensão máxima (σ_y): valor que corresponde ao máximo da função, que ocorre no momento anterior ao fim da zona elástica. Este valor corresponde ao valor da tensão máxima.

Tensão de cedência: valor de tensão correspondente ao ponto em que ocorre fratura

Porcentagem de alongamento:

$$\% El = \left[\frac{(L_f - L_0)}{L_0} \right] \cdot 100 \quad (14)$$

Onde L_0 corresponde ao comprimento inicial da *gage section* e L corresponde ao comprimento dessa mesma zona no ponto de rutura da peça.

Considerando diversos aspetos que influenciam a forma da curva tensão-deformação, é necessário assegurar alguns parâmetros, tais como temperatura ambiente estável, velocidade do teste constante e a utilização de amostras com deformação homogénea. Tendo ainda em conta que as deformações elásticas são bastante reduzidas, uma medição razoável e precisa do módulo de *Young* num ensaio de tração requer a utilização de um extensómetro muito sensível.

Anexo C – Parametrização da impressão

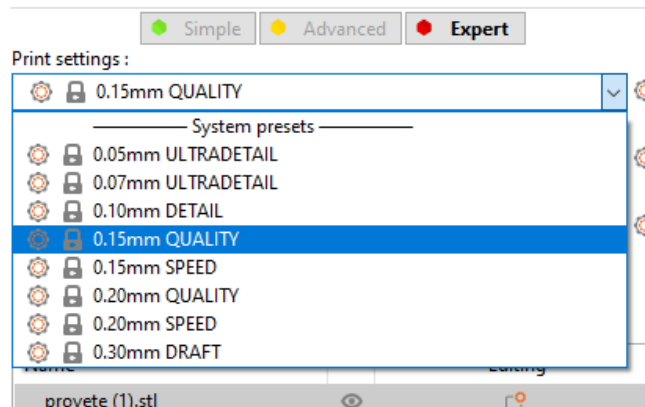


Figura 95 – Seleção da altura de cada camada

2 – Definição do material

De acordo com as características dos materiais utilizados, foi selecionado o material genérico para todos os provetes.

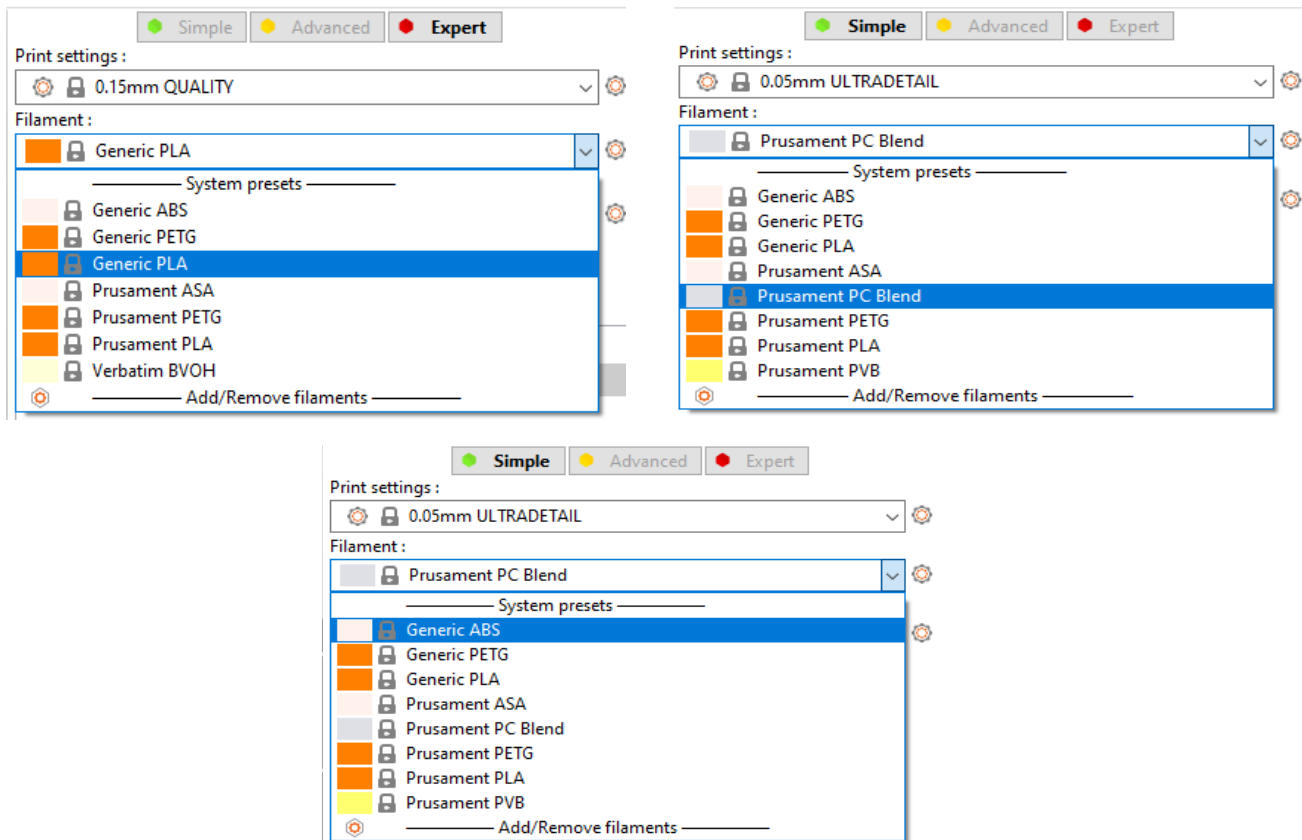


Figura 96 – Seleção de cada material

4 – Seleção da impressora

Define-se neste momento a impressora a ser utilizada. Caso não fosse selecionada a impressora correta, ocorreriam inconformidades na leitura do ficheiro

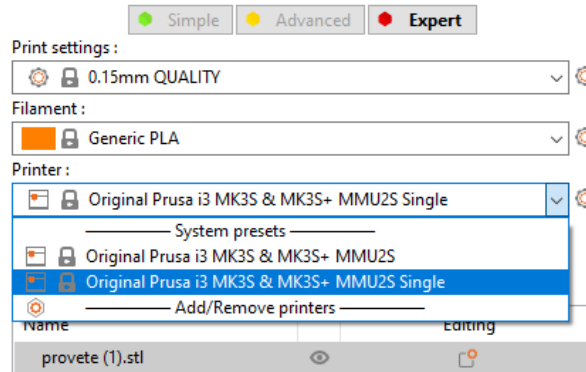


Figura 97 – Seleção da impressora Prusa MK3S+

5 – Colocação de suportes

Devido à colocação do provete na horizontal, não são necessários suportes. É feita essa seleção no *software*.

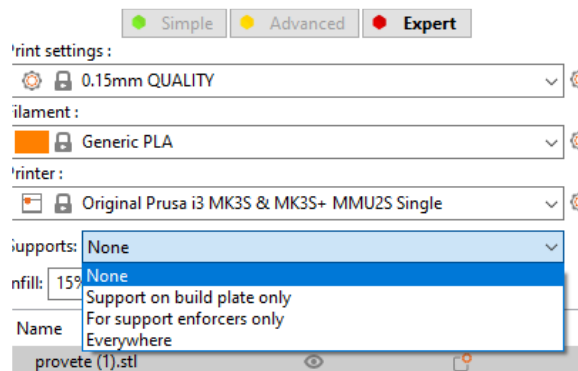


Figura 98 – seleção de impressão sem suportes

No separador *print settings*, foi definida a espessura de cada camada. A primeira camada deve ter uma espessura diferente, de forma a melhorar a adesão do material à mesa.

Para a impressão dos provetes foi então definida uma espessura de 0.15mm para cada camada, e uma espessura da primeira camada de 0.2 mm.

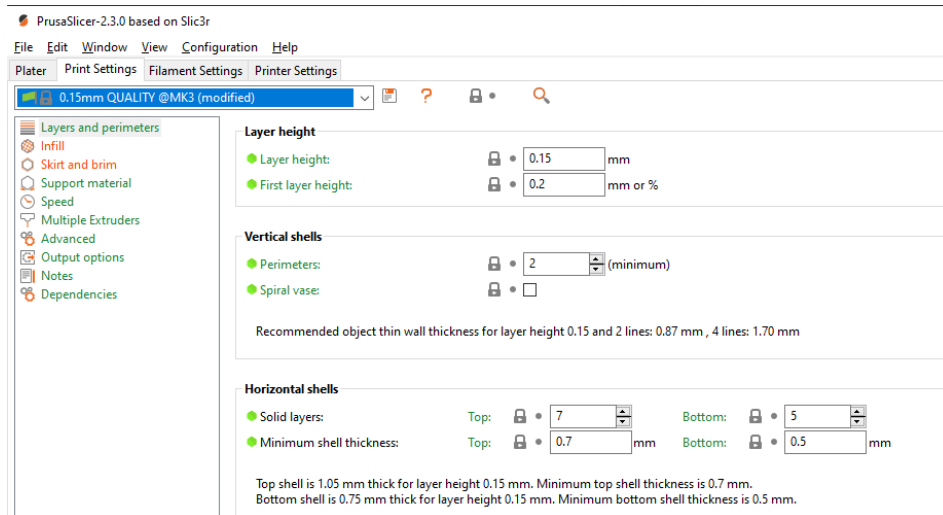


Figura 99 – Parâmetros para a primeira camada impressa

É também definida a densidade de cada camada que forma o provete, assim como o padrão criado na impressão. Foi selecionada uma densidade de 1, com um padrão retilíneo, uma vez que não são pretendidos espaços ociosos nas camadas.

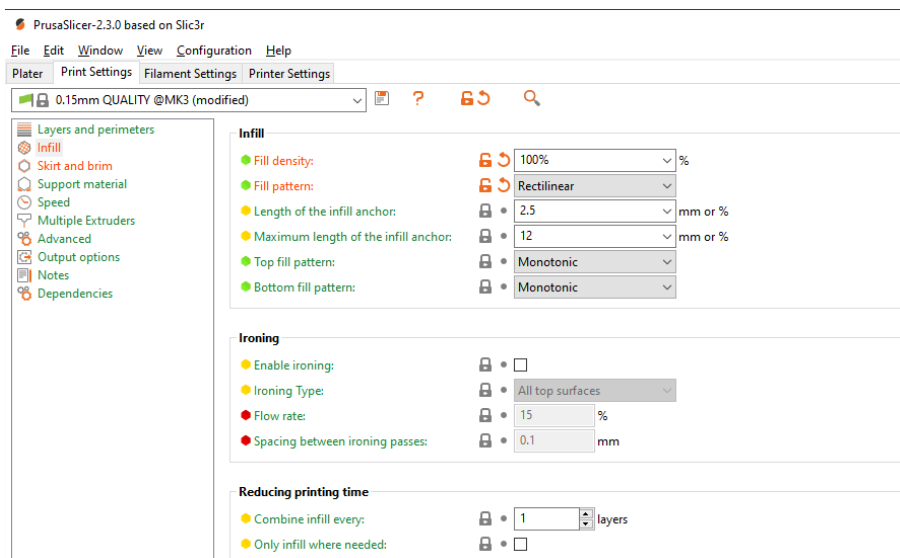


Figura 100 – Densidade de cada camada

Nesta fase são então selecionadas as características do *brim* (primeira camada impressa com um perímetro superior ao do provete, que ajuda a garantir a adesão do provete à mesa da impressora). Este *brim* ajuda também a remoção do provete da mesa após a impressão, reduzindo as hipóteses de danificar o provete neste processo.

Este parâmetro define a largura da aba do provete, que corresponde também à distância relativamente aos outros provetes. Este valor foi definido para 5mm.

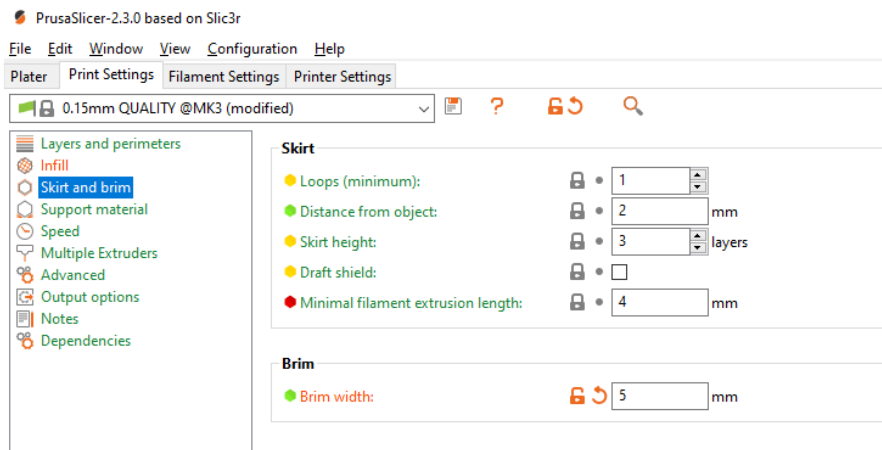


Figura 101 – Definição das dimensões do *brim*

Terminada a definição dos parâmetros no *software*, é colocado o cartão SD na impressora. Nesta fase deu-se início à impressão, que inclui as etapas:

1. Pré-aquecimento da mesa e da extremidade do injetor (255 e 100 °C, respetivamente);
2. Carregamento do filamento do rolo até à impressora;
3. Carregamento do filamento até ao injetor;
4. Início da impressão pela seleção do ficheiro pretendido.

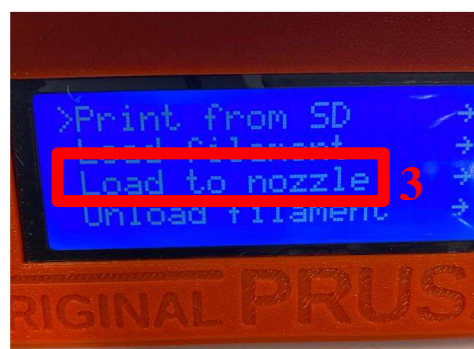




Figura 102 – Procedimentos de impressão na *PRUSA MK3S+*

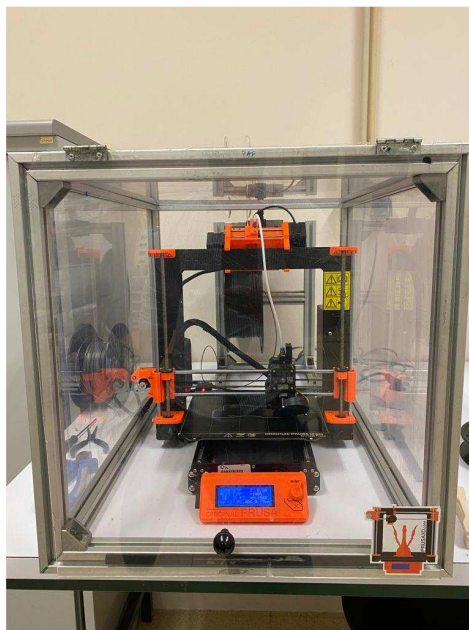


Figura 103 – Impressora em funcionamento

Anexo D - Curvas Força-Deslocamento – Ensaio tração

Provetes ABS_TESTE

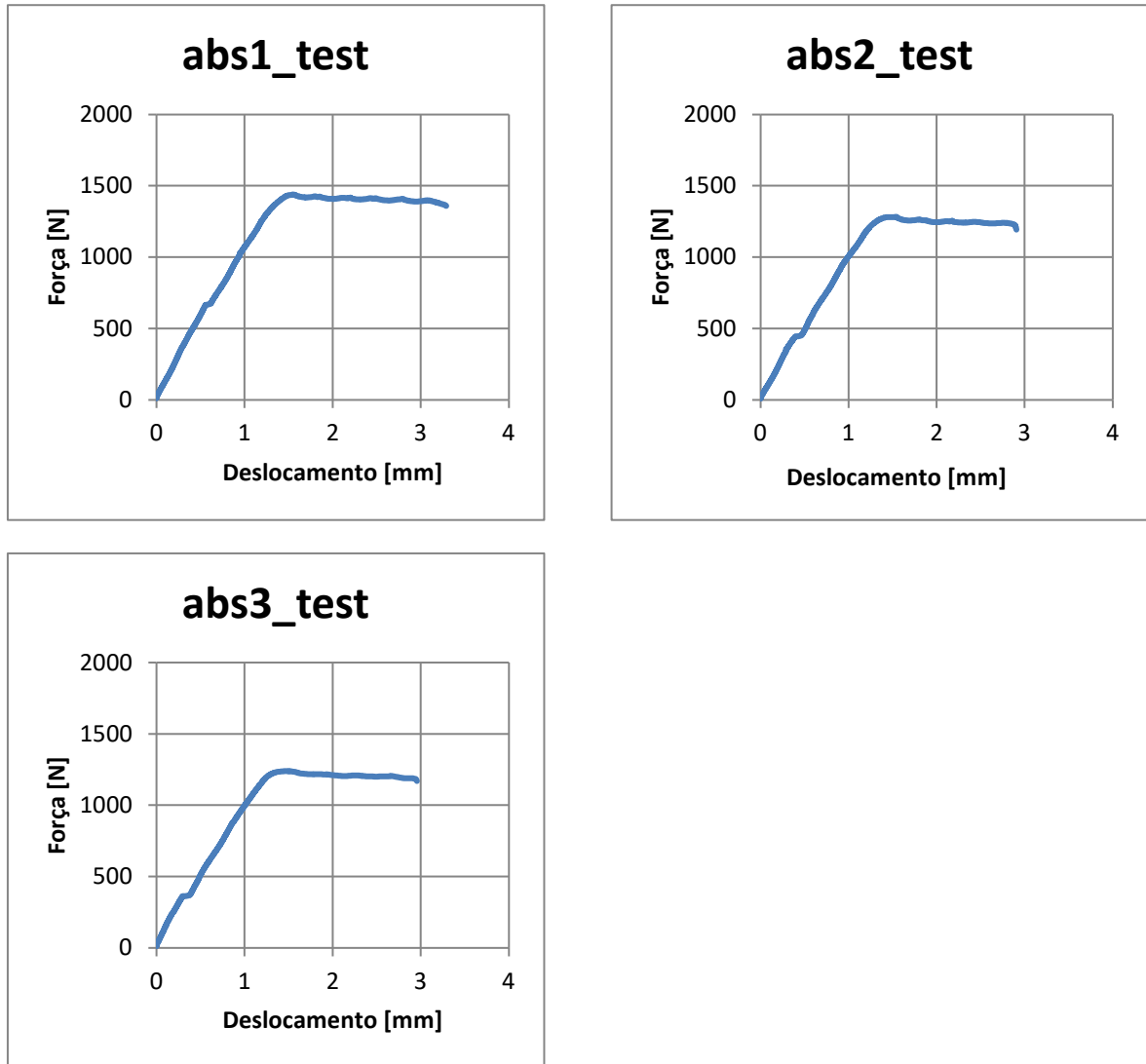


Figura 104 – Gráficos força – deslocamento para provetes em ABS virgem

Provetes ABS 7 dias não revestido mergulhado em óleo

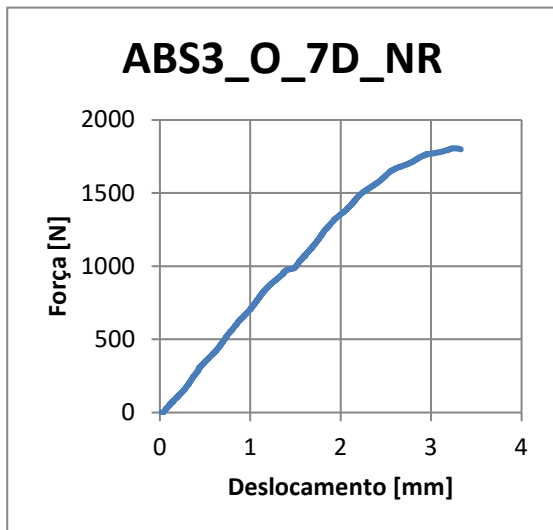
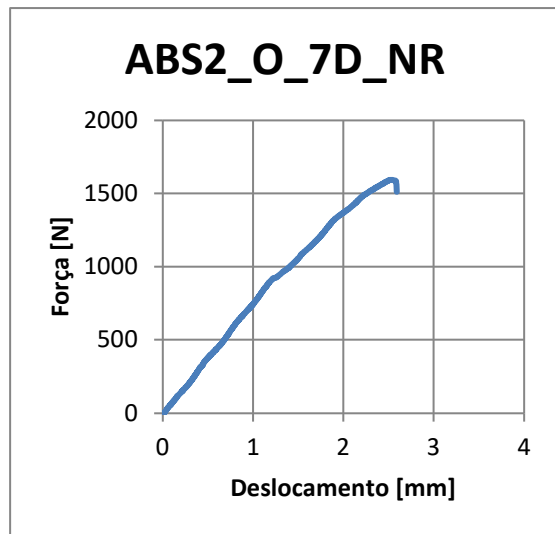
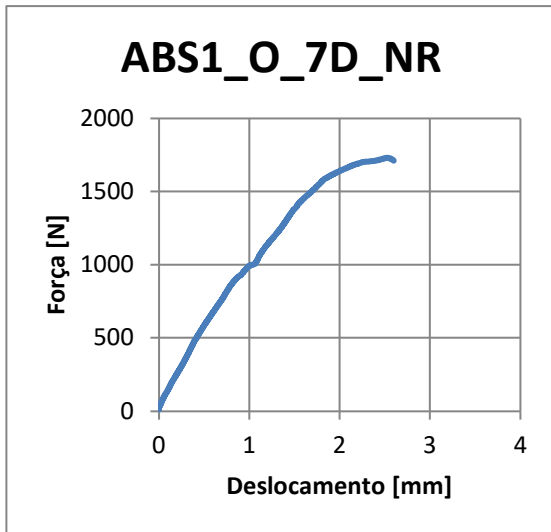
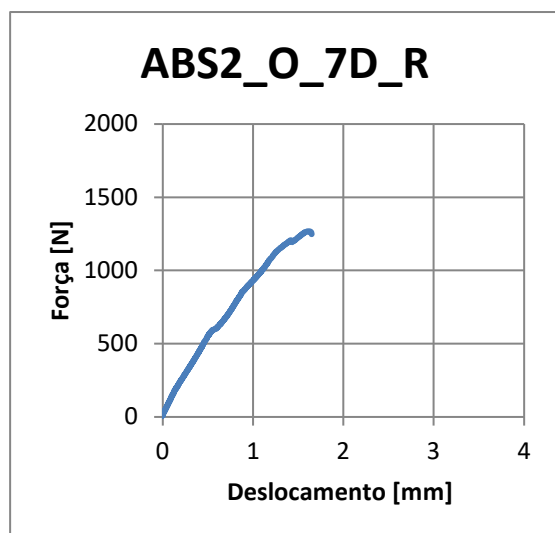
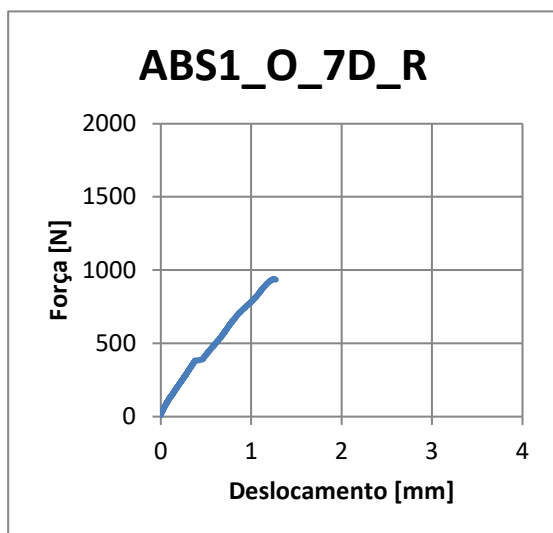


Figura 105 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 7 dias em óleo

Provetes ABS 7 dias revestido mergulhado em óleo



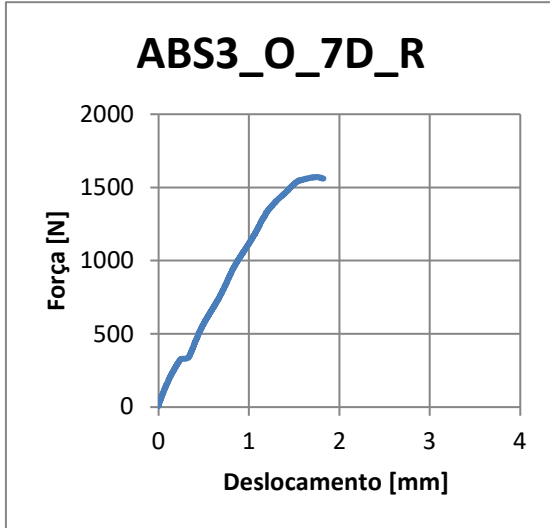
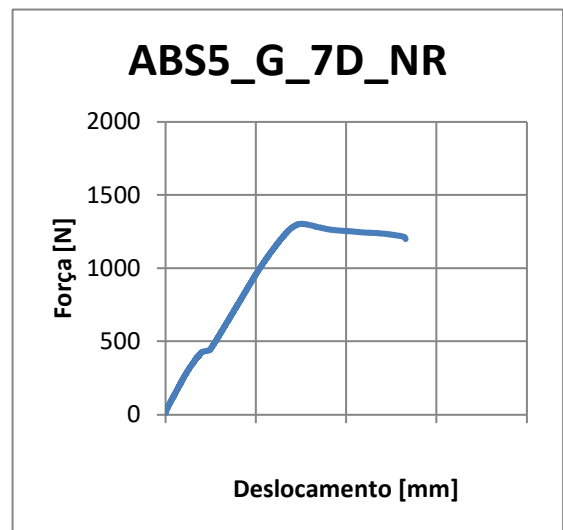
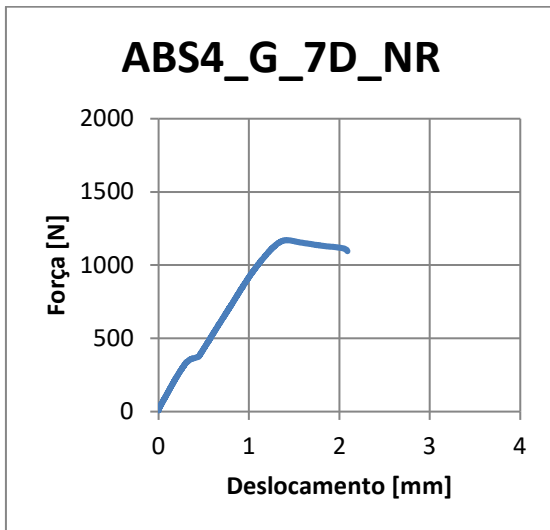


Figura 106 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 7 dias em óleo

ABS 7 dias não revestido mergulhado em gasóleo



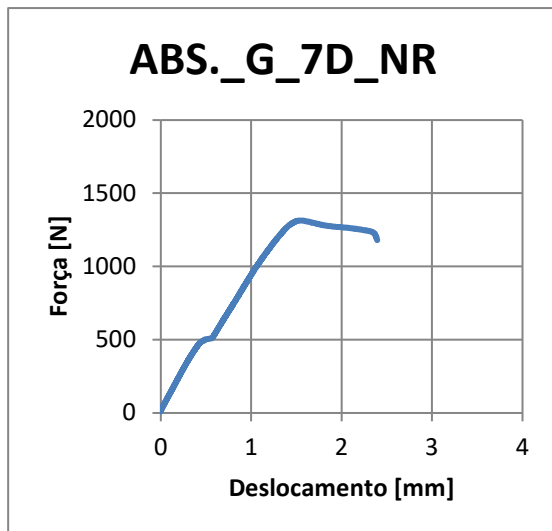


Figura 107 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 7 dias em gasóleo

Provetes ABS revestido 7 dias mergulhado em gasóleo

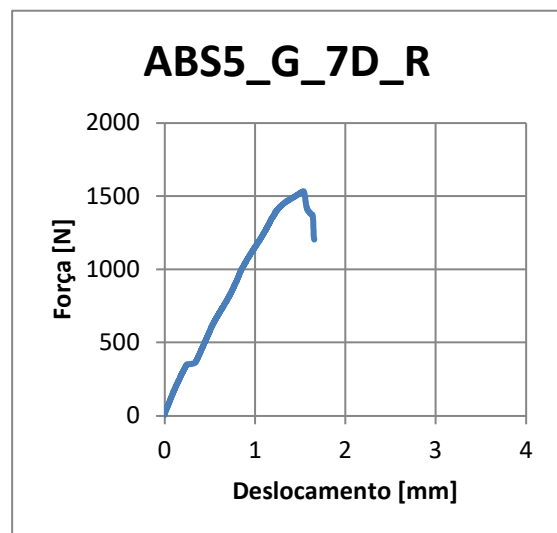
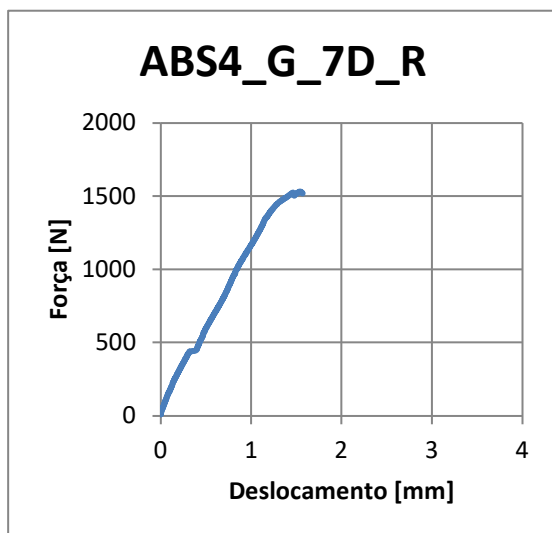
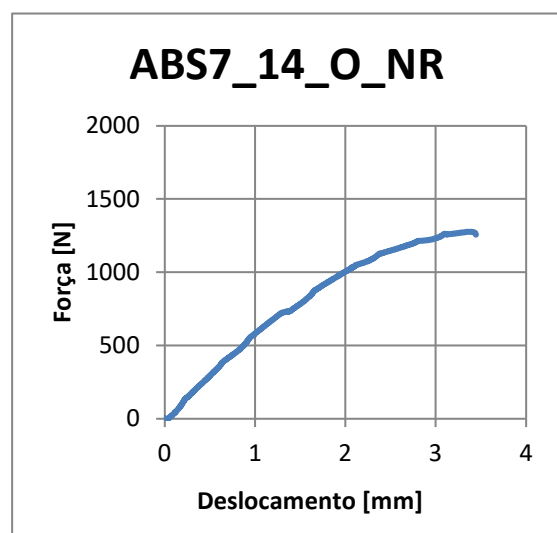
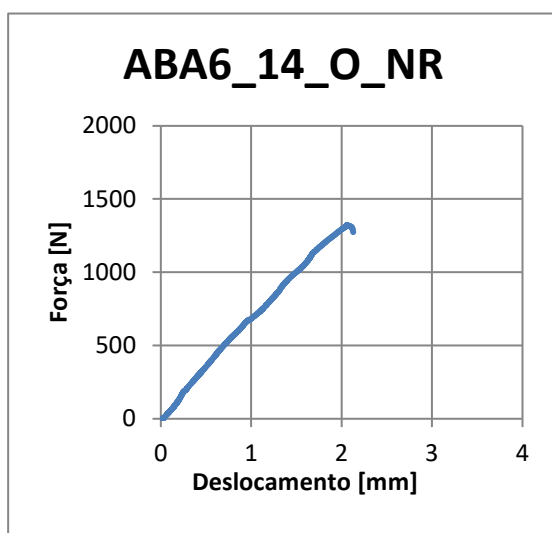


Figura 108 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 7 dias em gasóleo

Provetes ABS 14 dias não revestido mergulhado em óleo



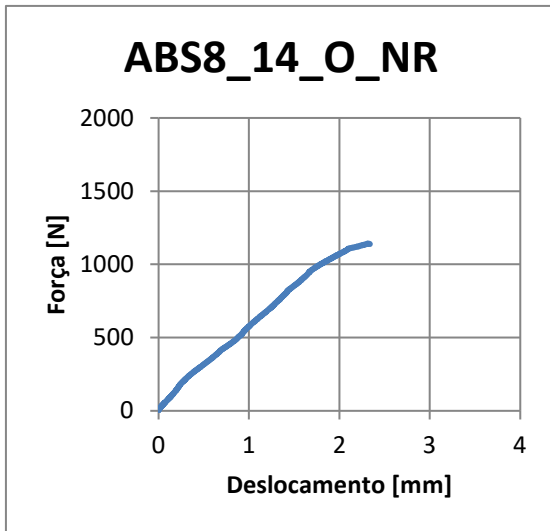


Figura 109 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 14 dias em óleo

Provetes ABS 14 dias revestido mergulhado em óleo

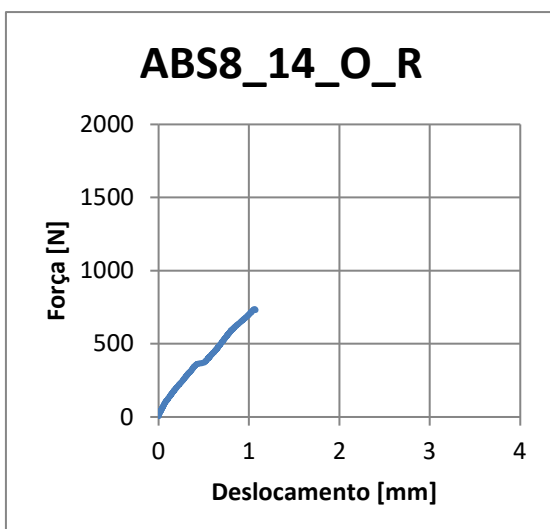
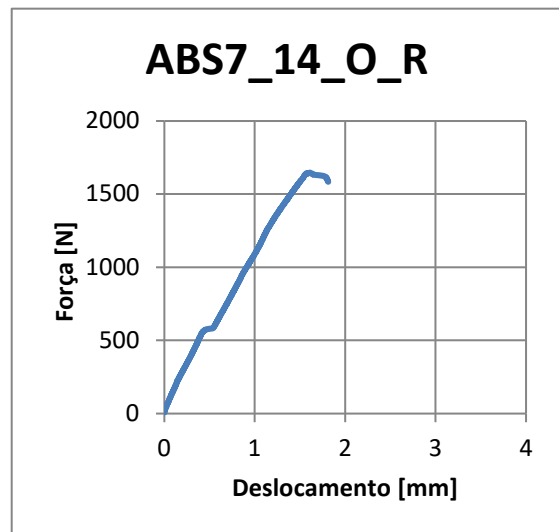
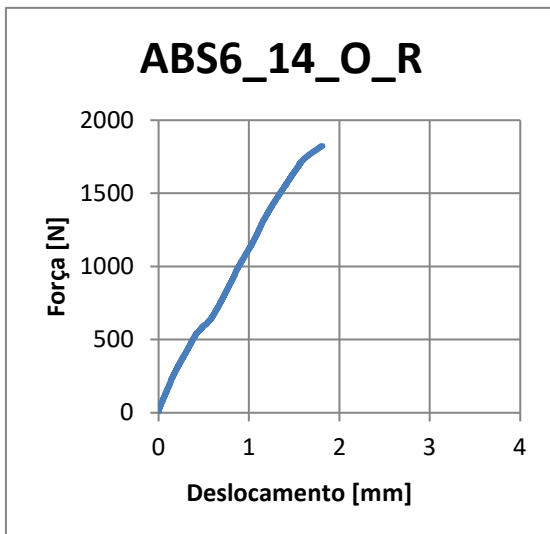


Figura 110 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 14 dias em óleo

Provetes ABS 14 dias não revestido mergulhado em gasóleo

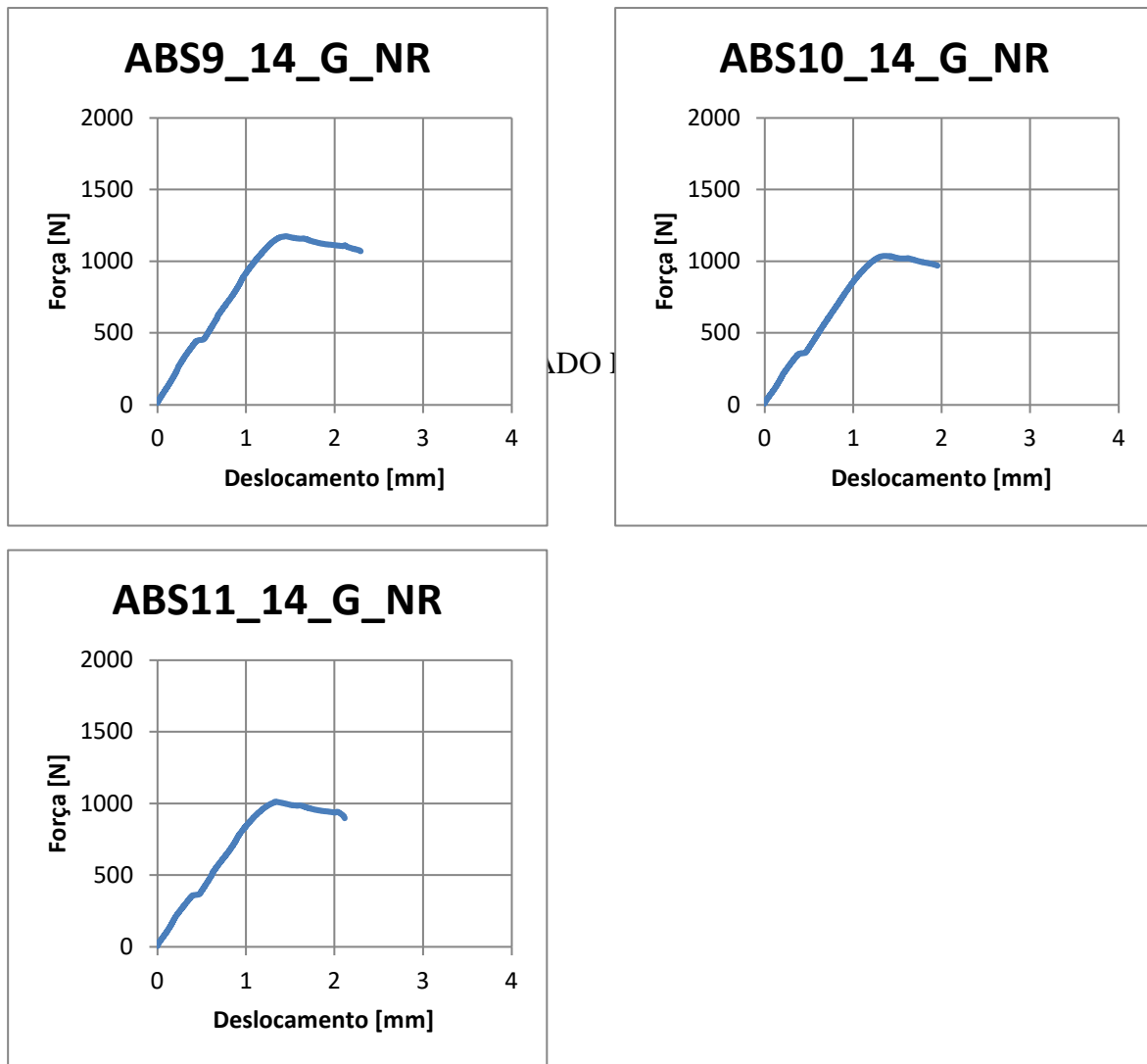


Figura 111 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 14 dias em gasóleo

Provetes ABS 14 dias revestido mergulhado em gasóleo

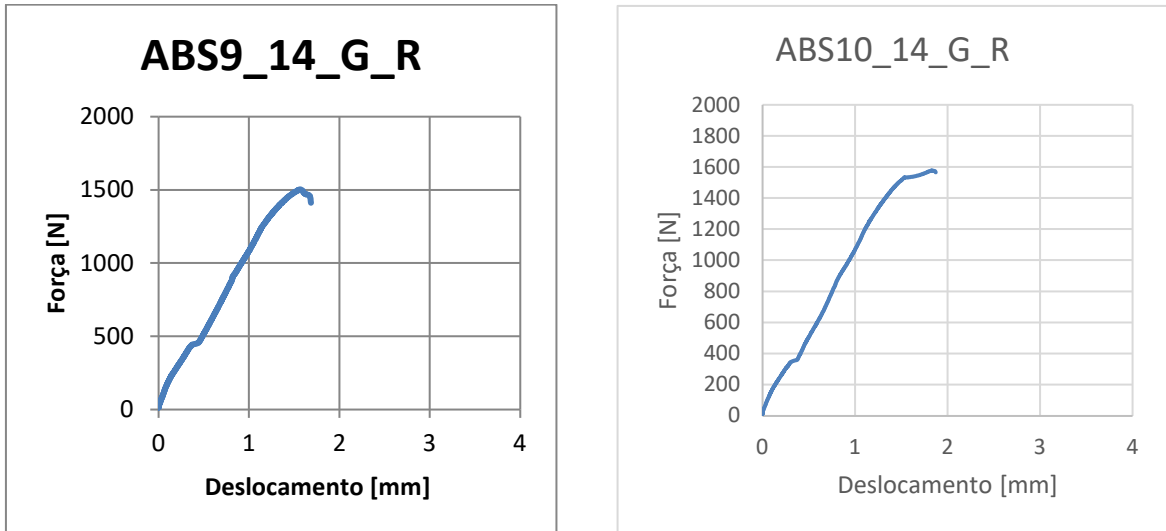
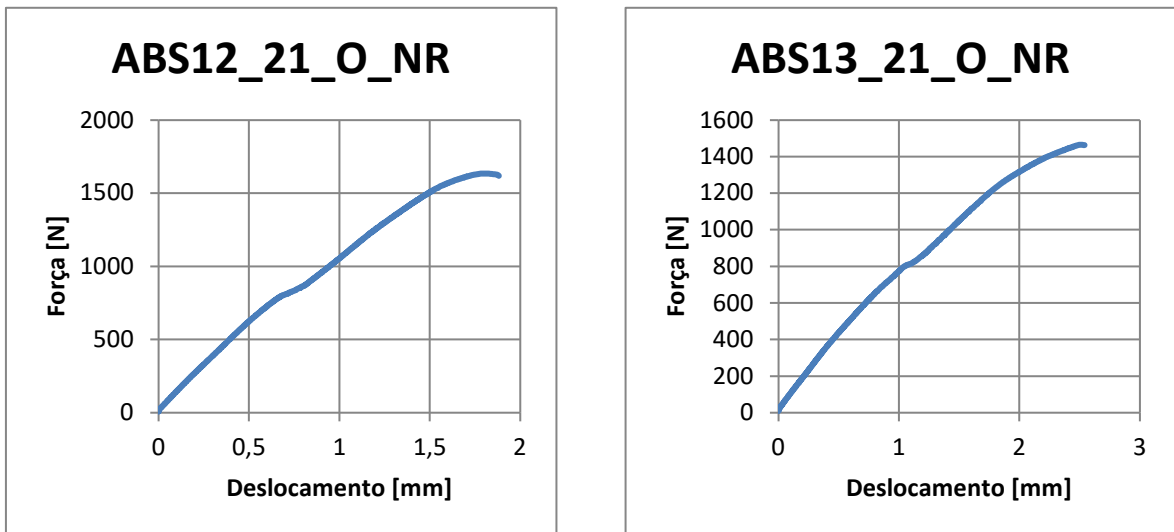


Figura 112 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 14 dias em gasóleo

Provetes ABS 21 dias não revestido mergulhado em óleo



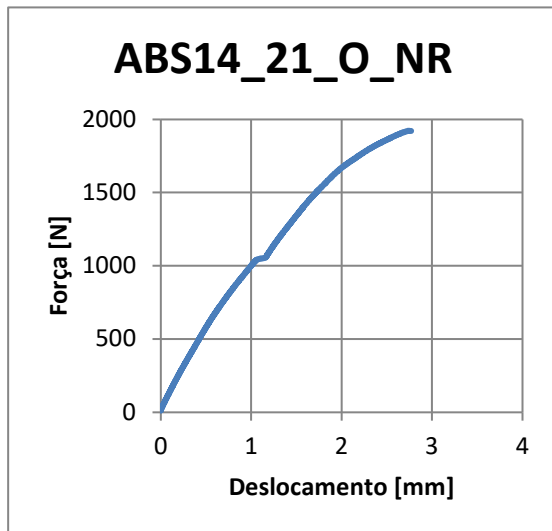


Figura 113 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 21 dias em óleo

Provete ABS 21 dias revestido mergulhado em óleo

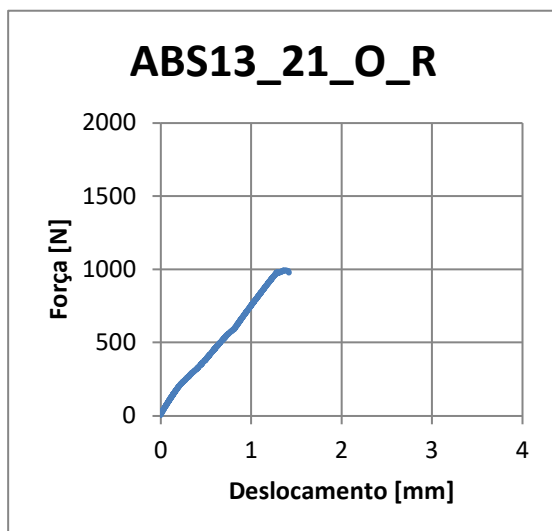
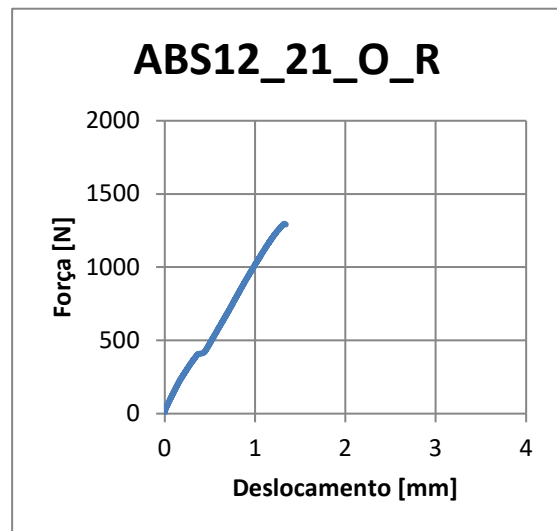
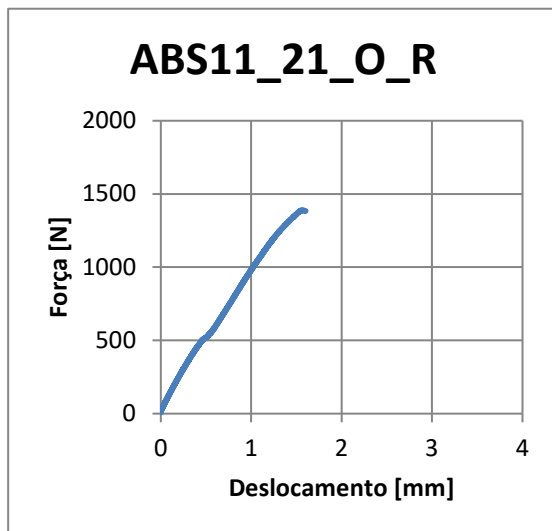


Figura 114 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 21 dias em óleo

Provetes ABS 21 dias não revestido mergulhado em gasóleo

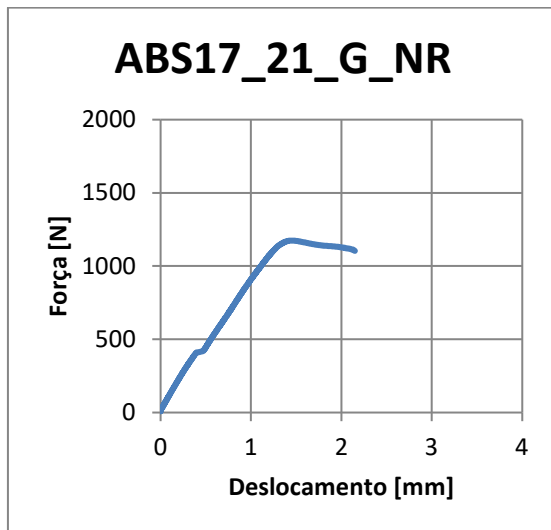
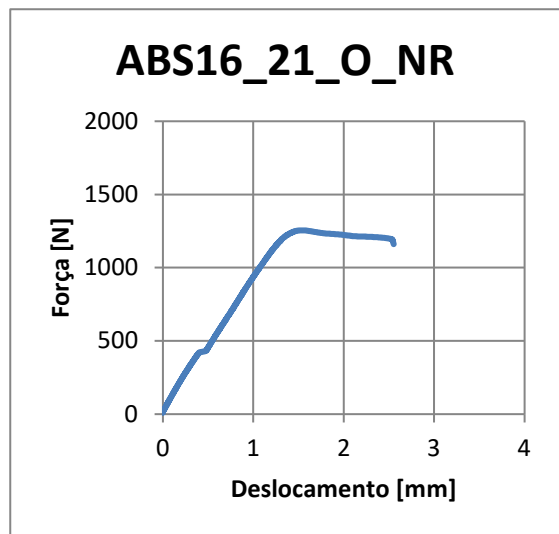
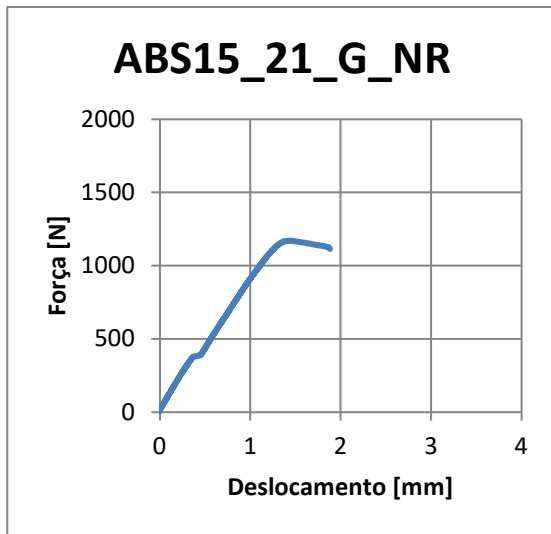


Figura 115 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 21 dias em gasóleo

Provetes ABS 21 dias revestido mergulhado em gasóleo

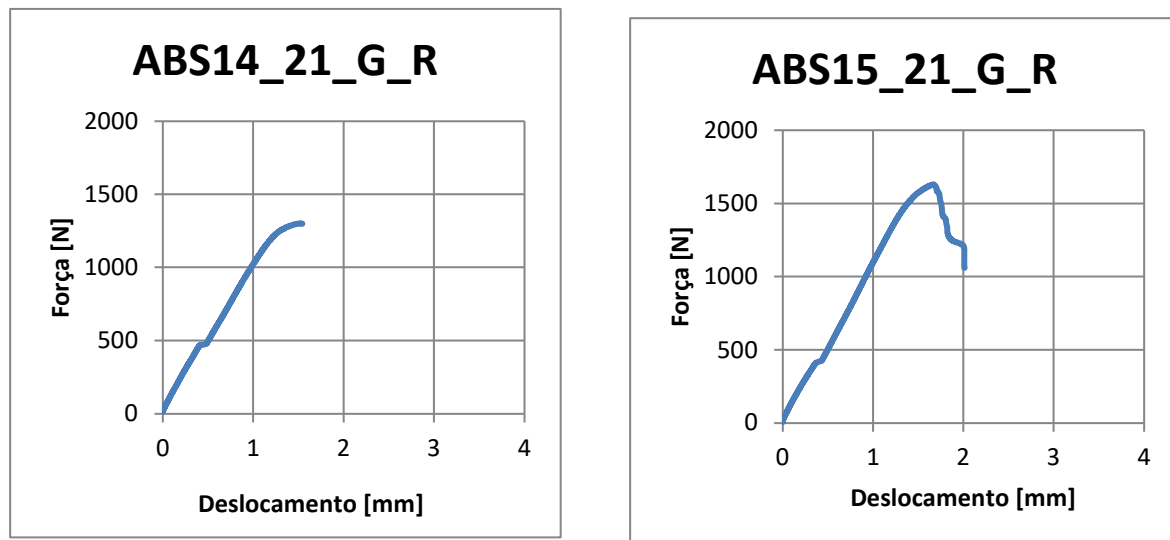


Figura 116 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 21 dias em gasóleo

Provetes ABS 28 dias não revestido mergulhado em óleo

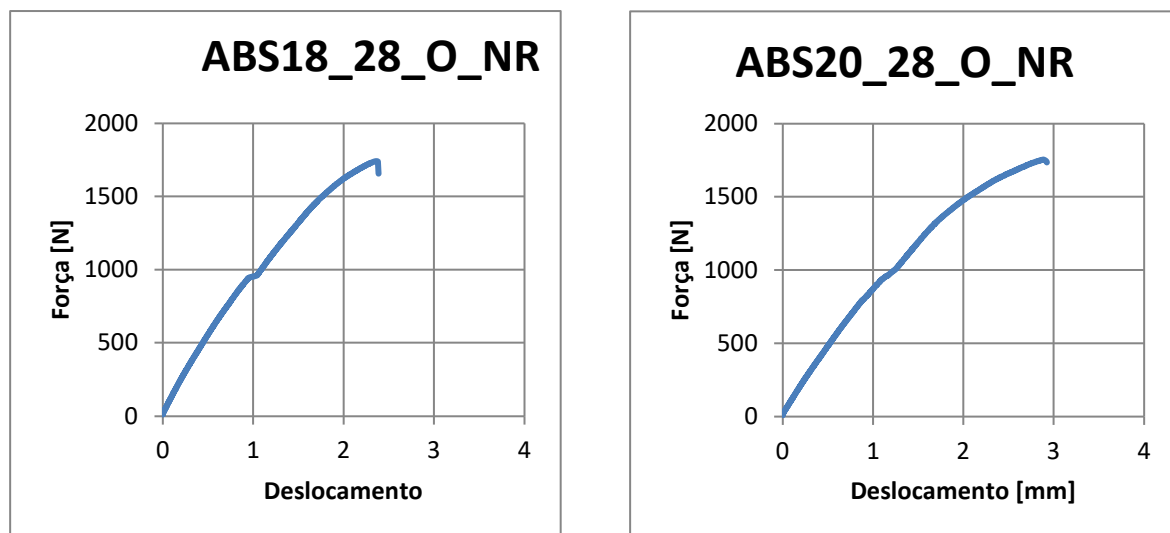


Figura 117 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 28 dias em óleo

Provetes ABS 28 dias revestido mergulhado em óleo

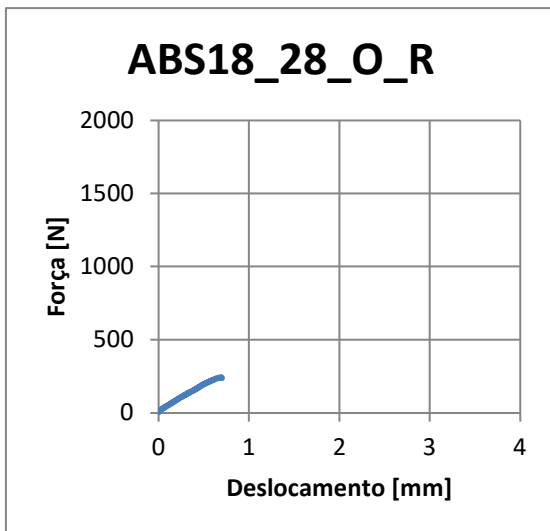
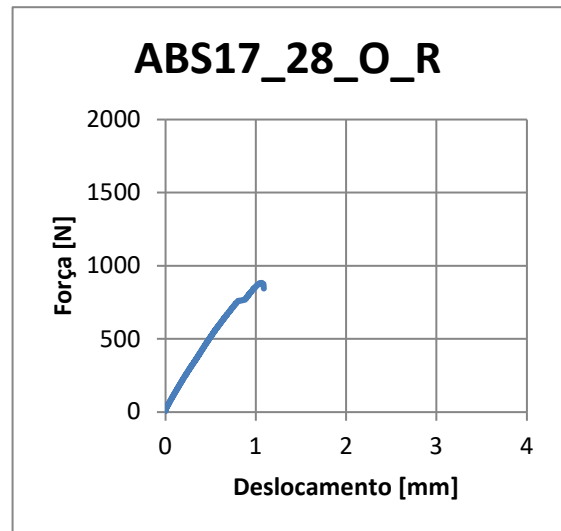
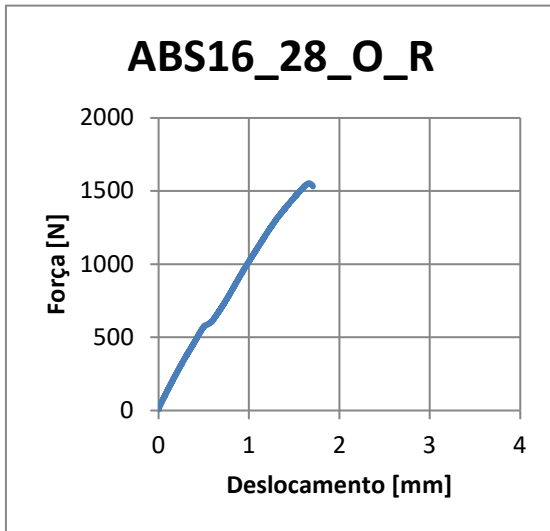
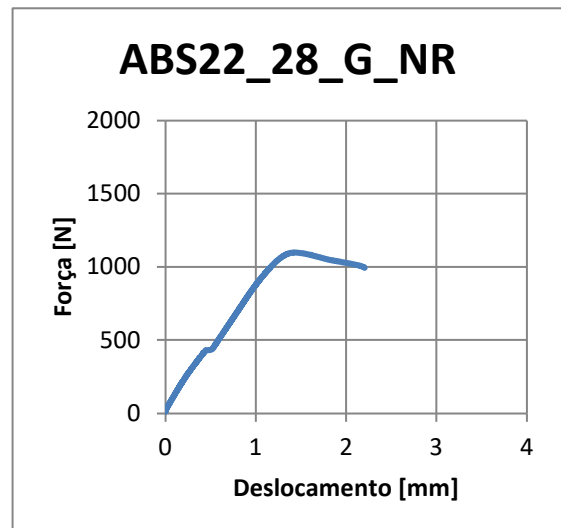
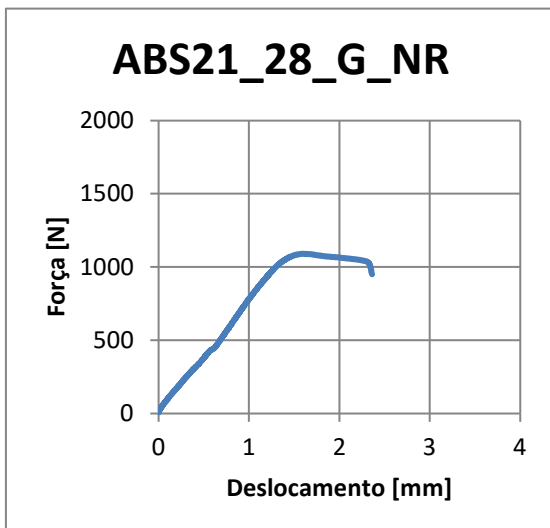


Figura 118 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 28 dias em óleo

Proвете ABS 28 dias não revestido mergulhado em gasóleo



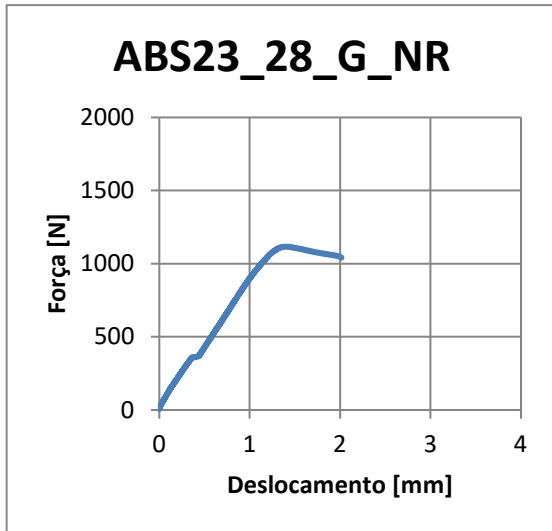


Figura 119 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em ABS 28 dias em gasóleo

Provetes ABS 28 dias revestidos mergulhado em gasóleo

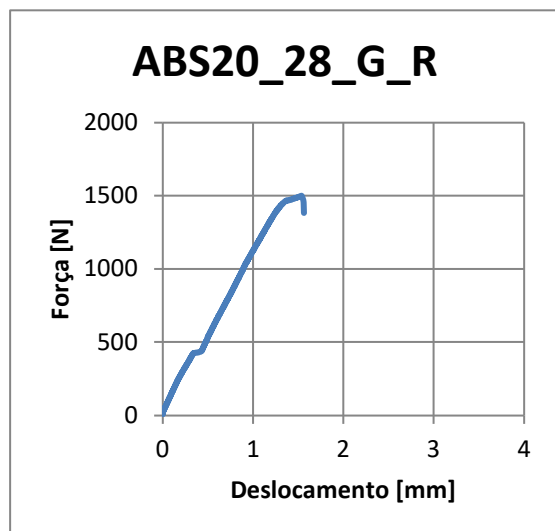
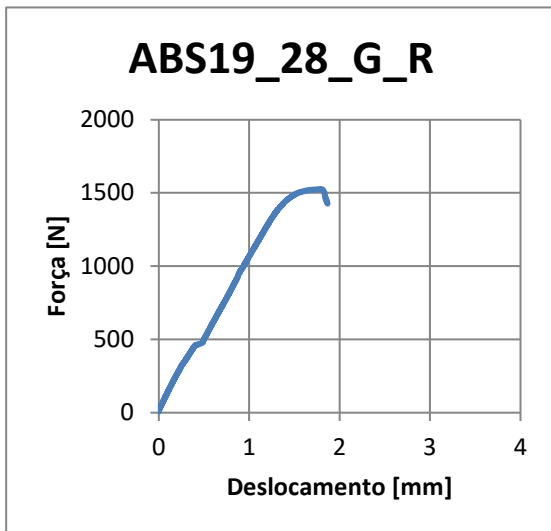


Figura 120 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em ABS 28 dias em gasóleo

Provetes PC TESTE

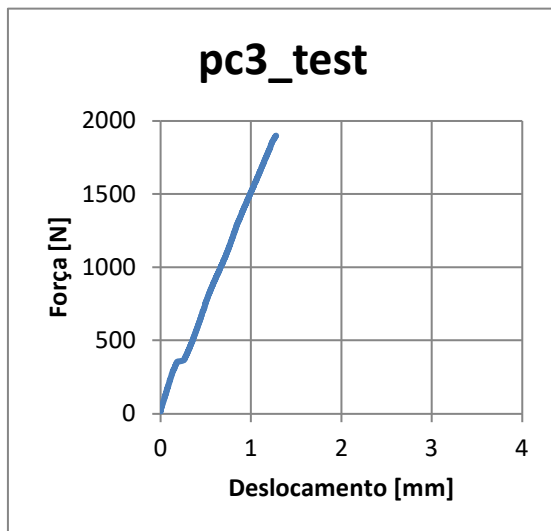
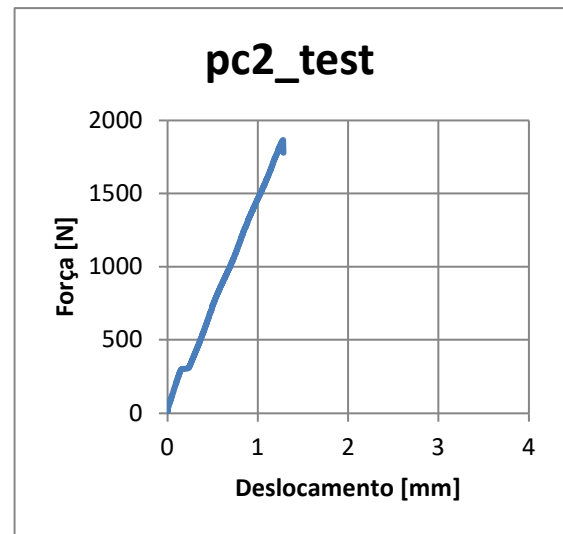
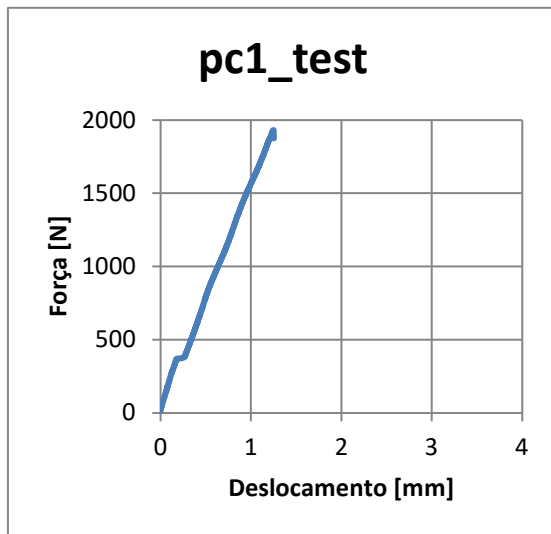


Figura 121 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes em PC virgem

Provetes PC 7 dias não revestido mergulhado em gasóleo

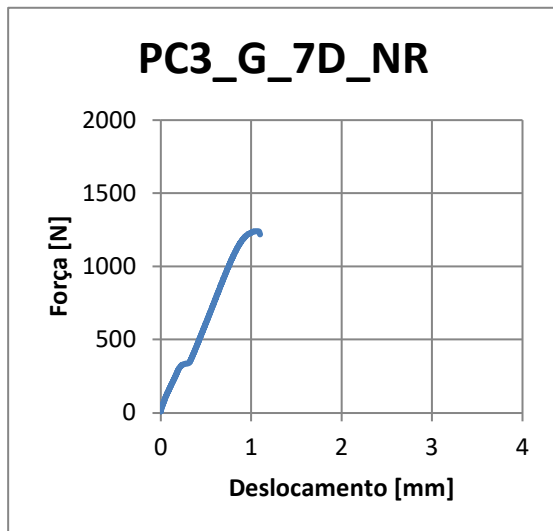
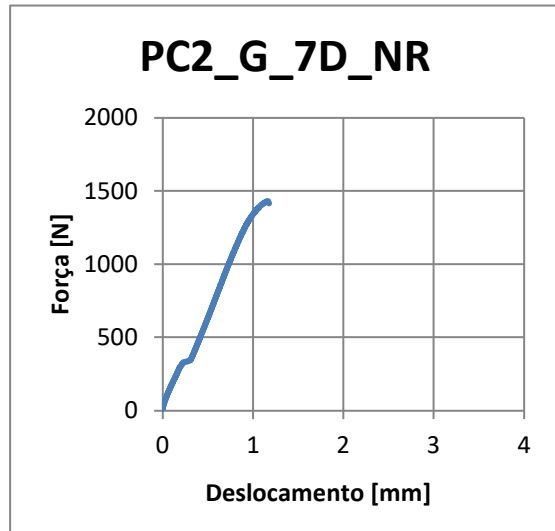
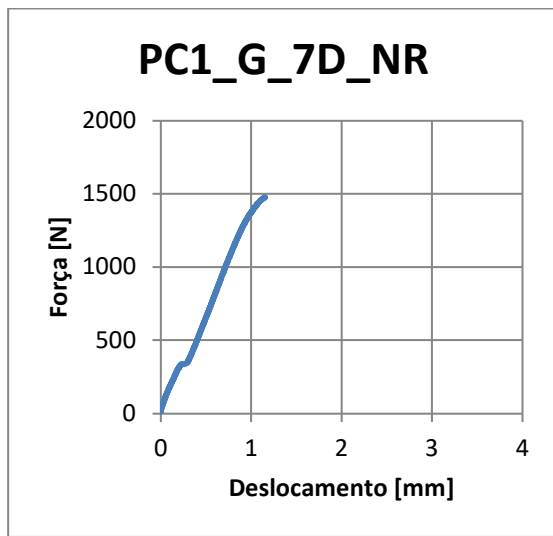


Figura 122 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC 7 dias mergulhados em gasóleo

Provetes PC 7 dias revestido mergulhado em gasóleo

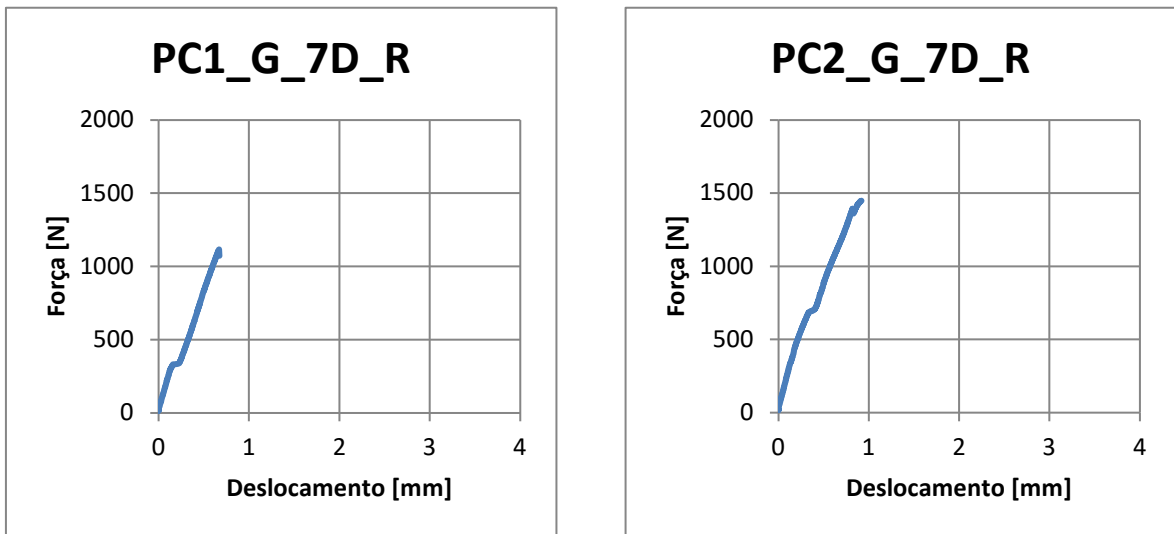
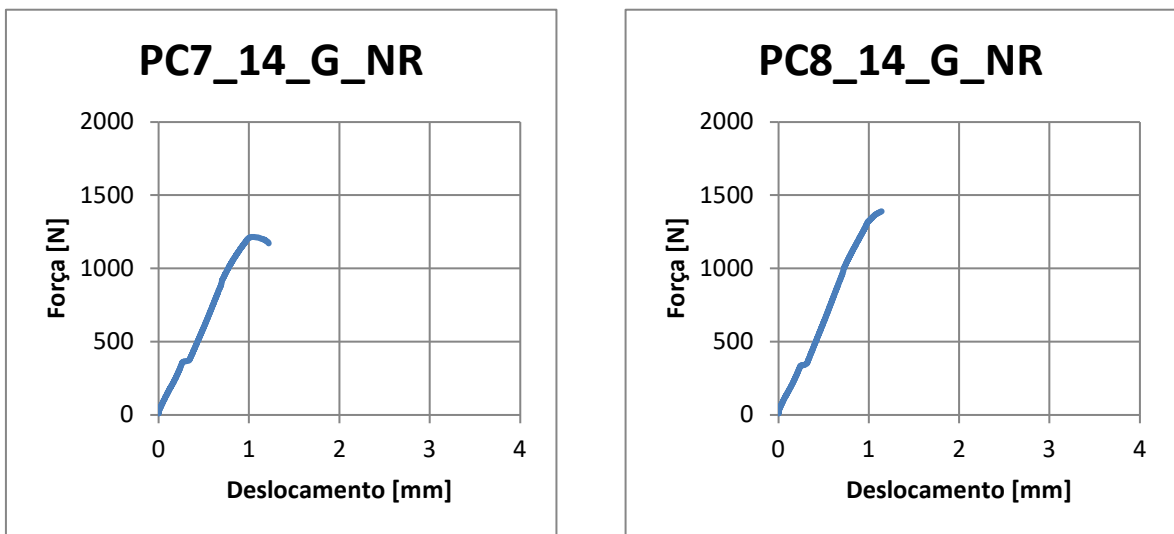


Figura 123 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC 7 dias mergulhados em gasóleo

Provete PC 14 dias não revestido mergulhado em gasóleo



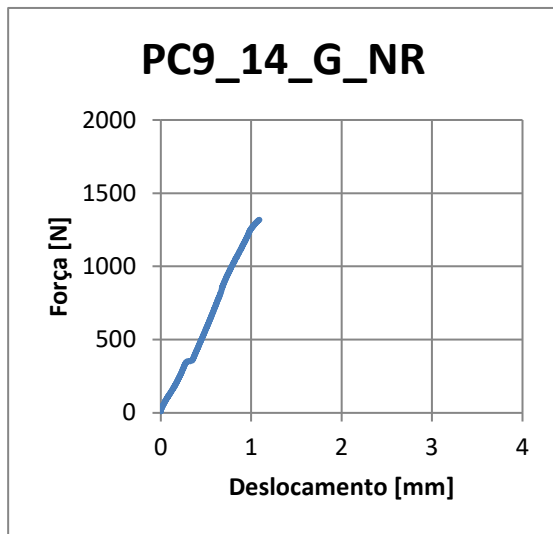


Figura 124 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC 14 dias mergulhados em gasóleo

Provete PC 14 dias revestidos mergulhados em gasóleo

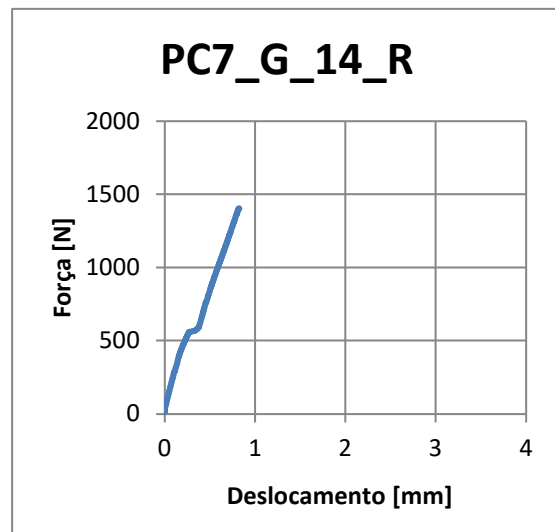
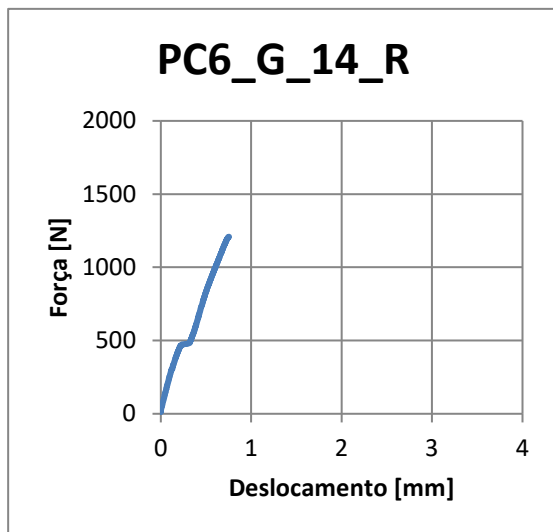


Figura 125 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC 14 dias mergulhados em gasóleo

Provetes PC 21 dias não revestidos mergulhado em gasóleo

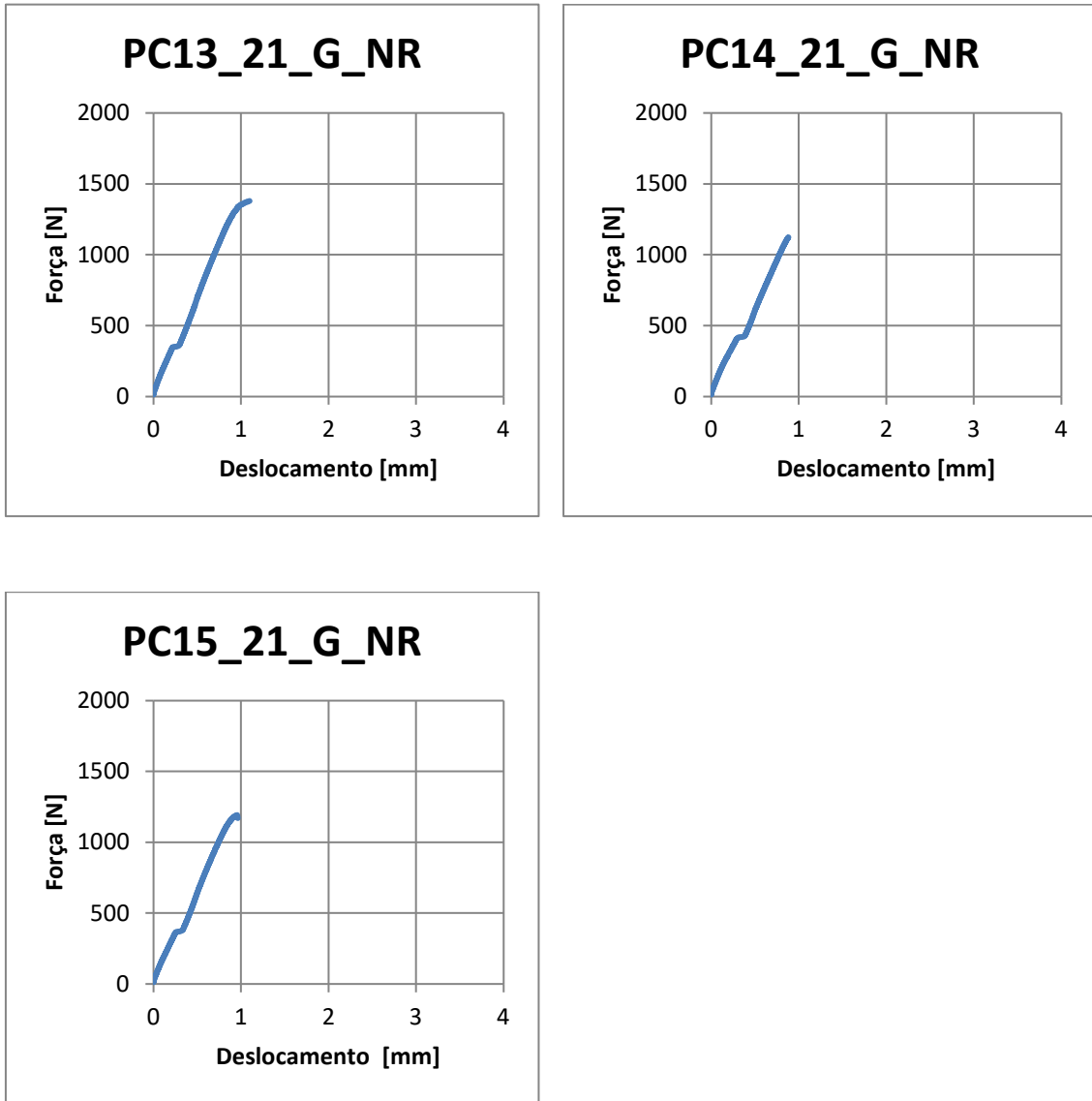


Figura 126 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC 21 dias mergulhados em gasóleo

Provetes PC 21 dias revestidos mergulhado em gasóleo

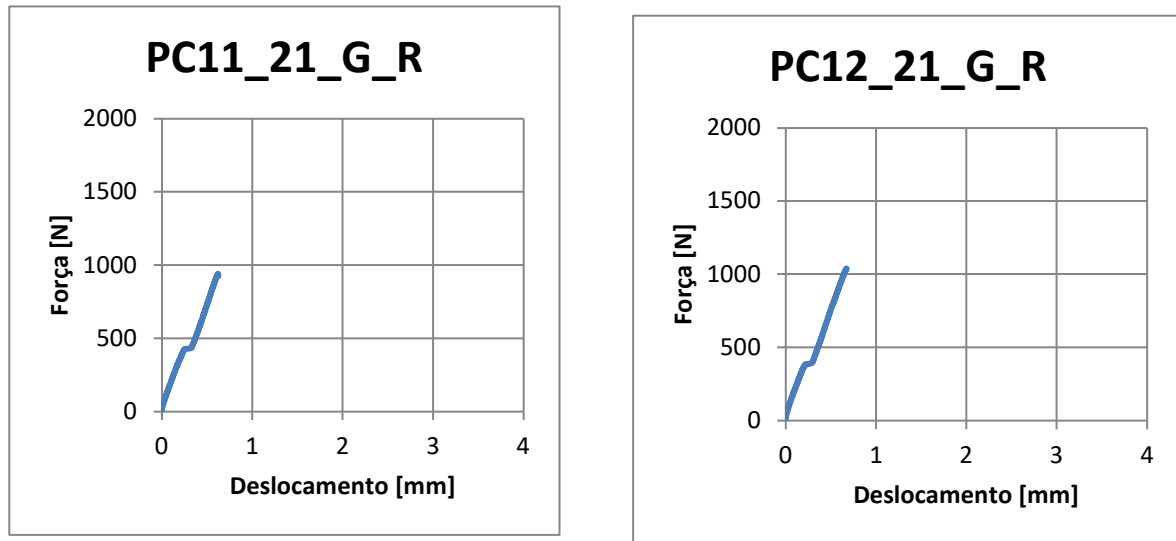


Figura 127 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC 21 dias mergulhados em gasóleo

Provetes PC-ABS TESTE

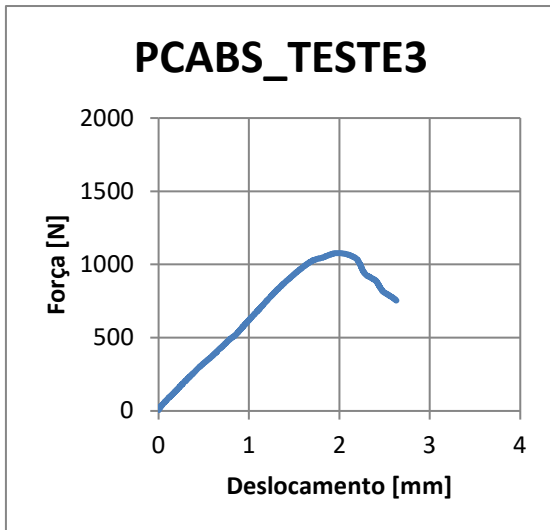
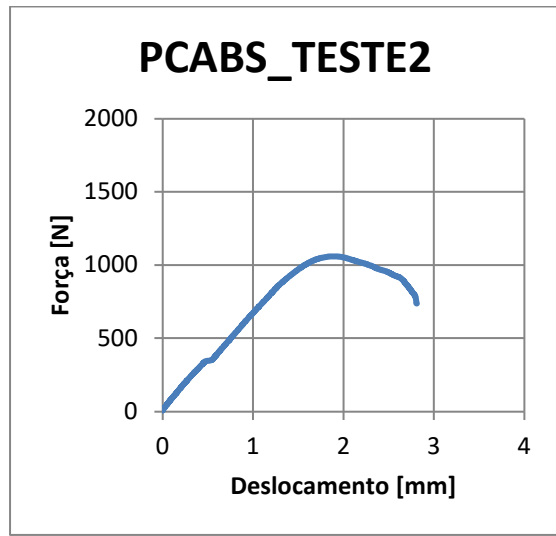
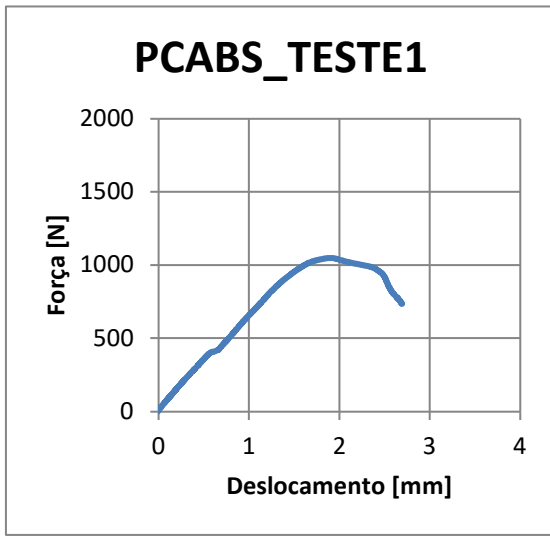
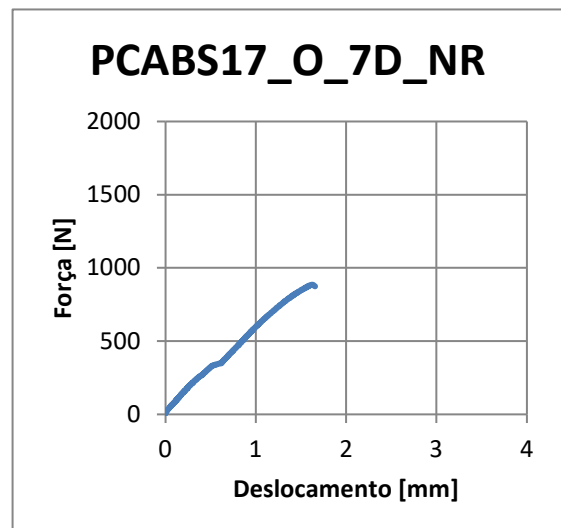
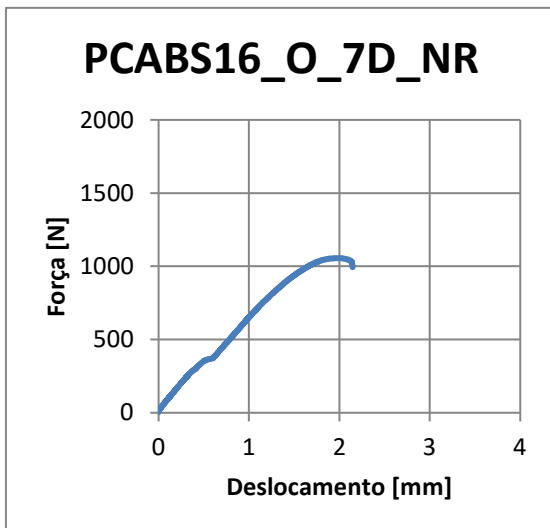


Figura 128 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS virgem



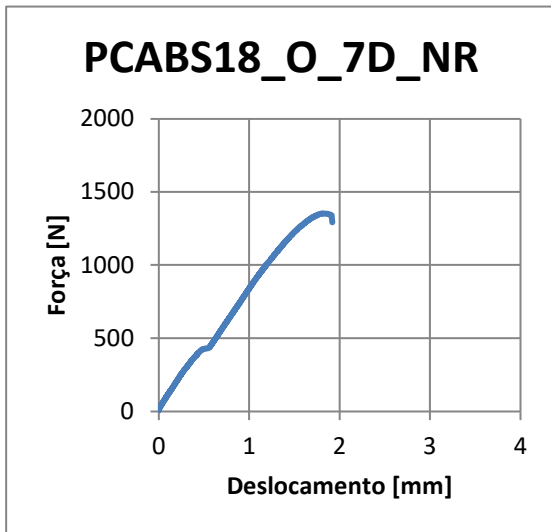
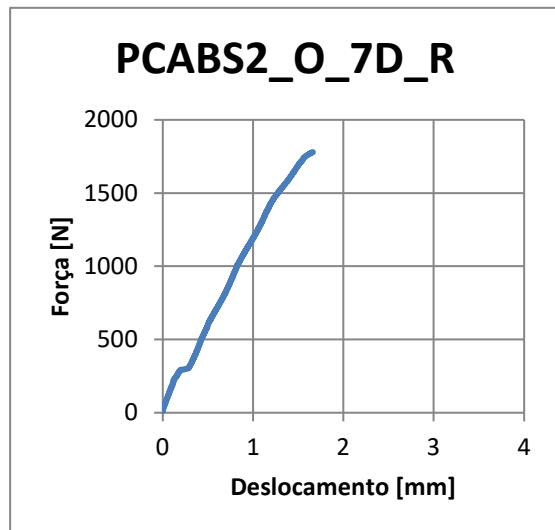
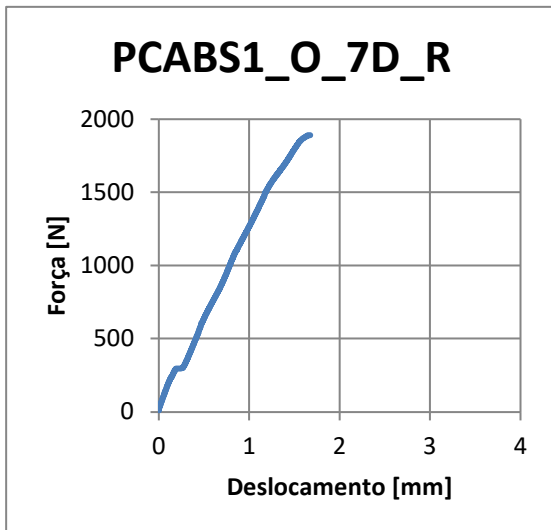


Figura 129 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 7 dias mergulhados em gasóleo

Provetes PC-ABS 7 dias revestidos mergulhados em óleo



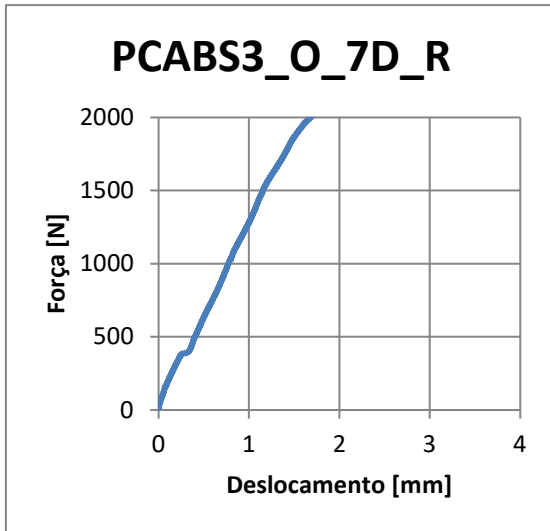


Figura 130 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC 7 dias mergulhados em óleo

Provetes PC-ABS 7 dias não revestidos mergulhados em gasóleo

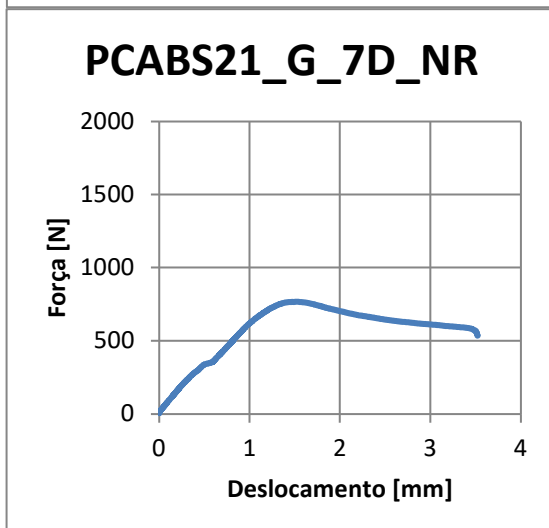
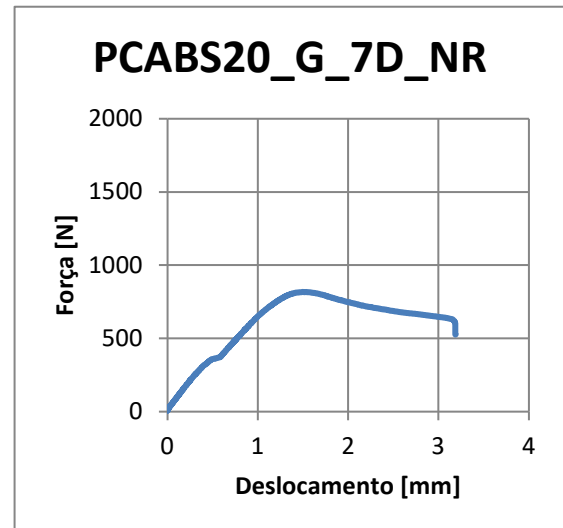
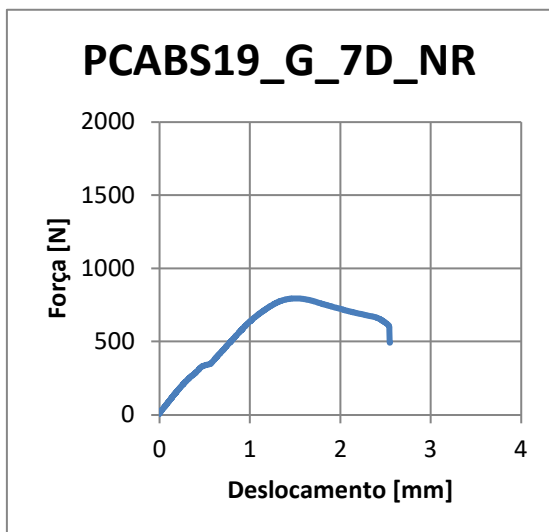


Figura 131 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 7 dias mergulhados em gasóleo

Provetes em PC-ABS 7 dias revestidos mergulhados em gasóleo

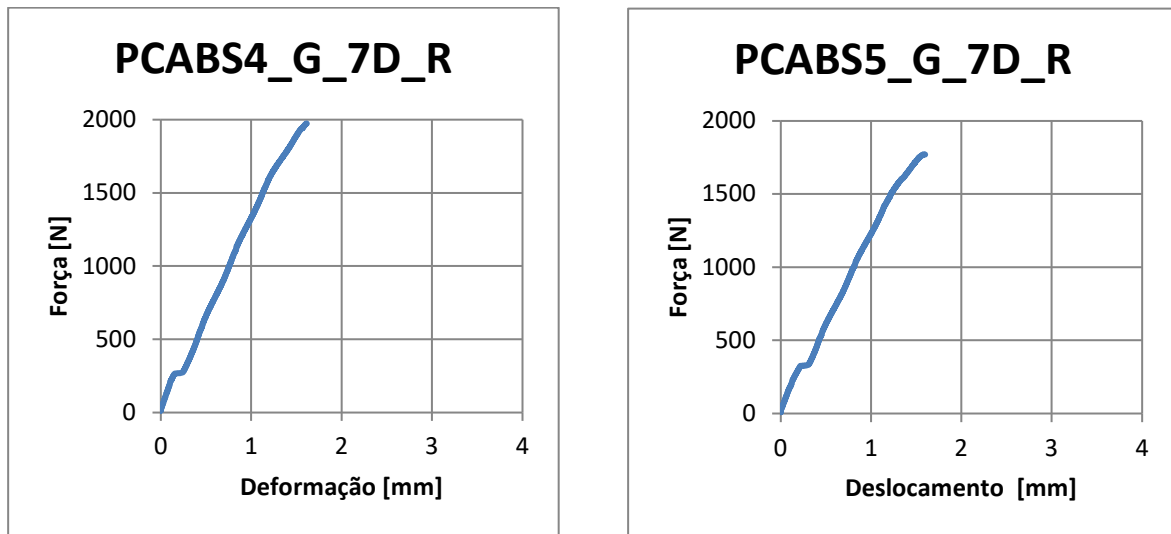
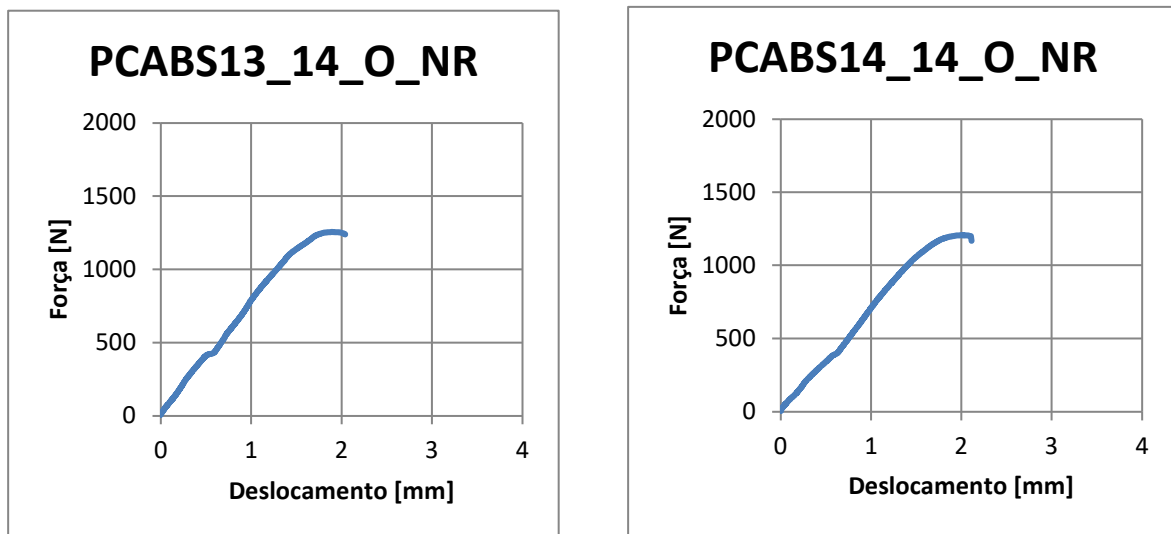


Figura 132 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 7 dias mergulhados em gasóleo

Provetes PC-ABS 14 dias não revestidos mergulhados em óleo



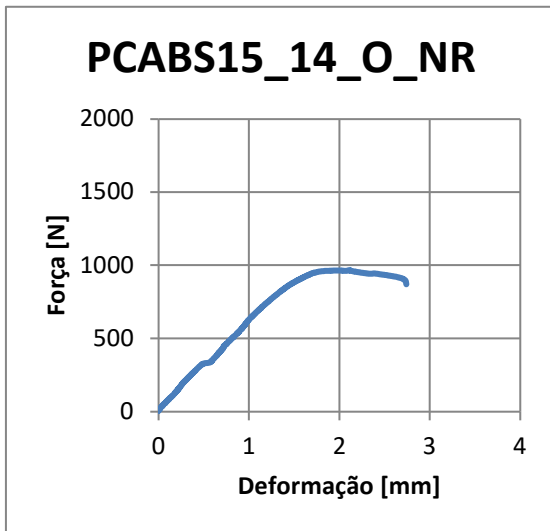


Figura 133 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 14 dias mergulhados em óleo

Provetes em PC-ABS 14 dias revestidos mergulhado em óleo

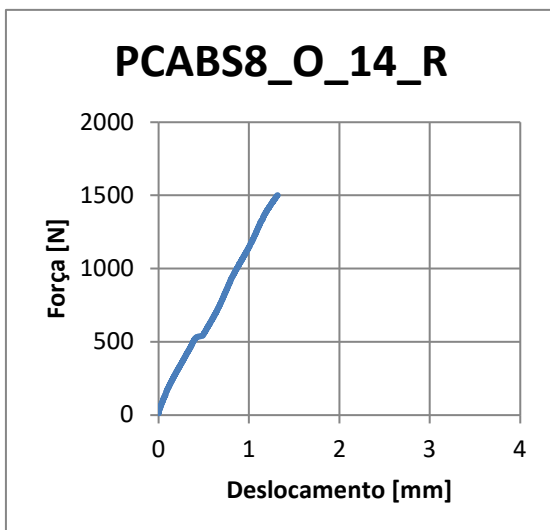
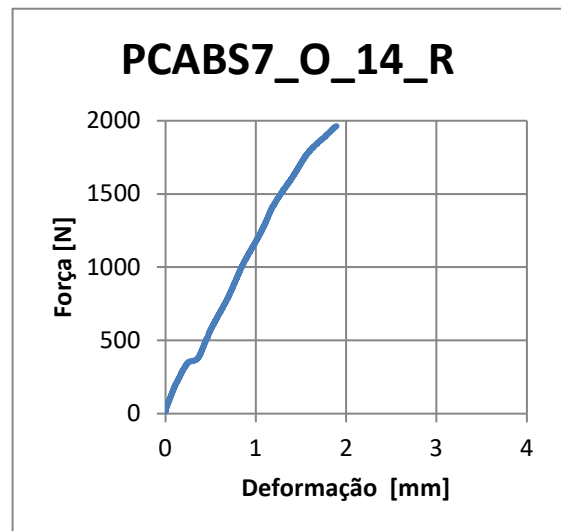
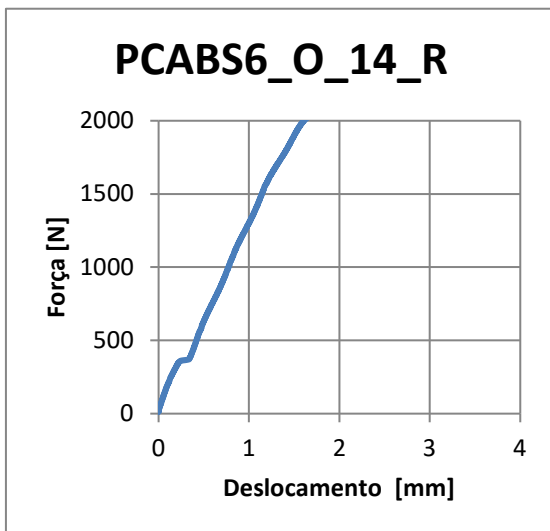


Figura 134 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC 14 dias mergulhados em óleo

Provetes em PC-ABS 14 dias não revestidos mergulhado em gasóleo

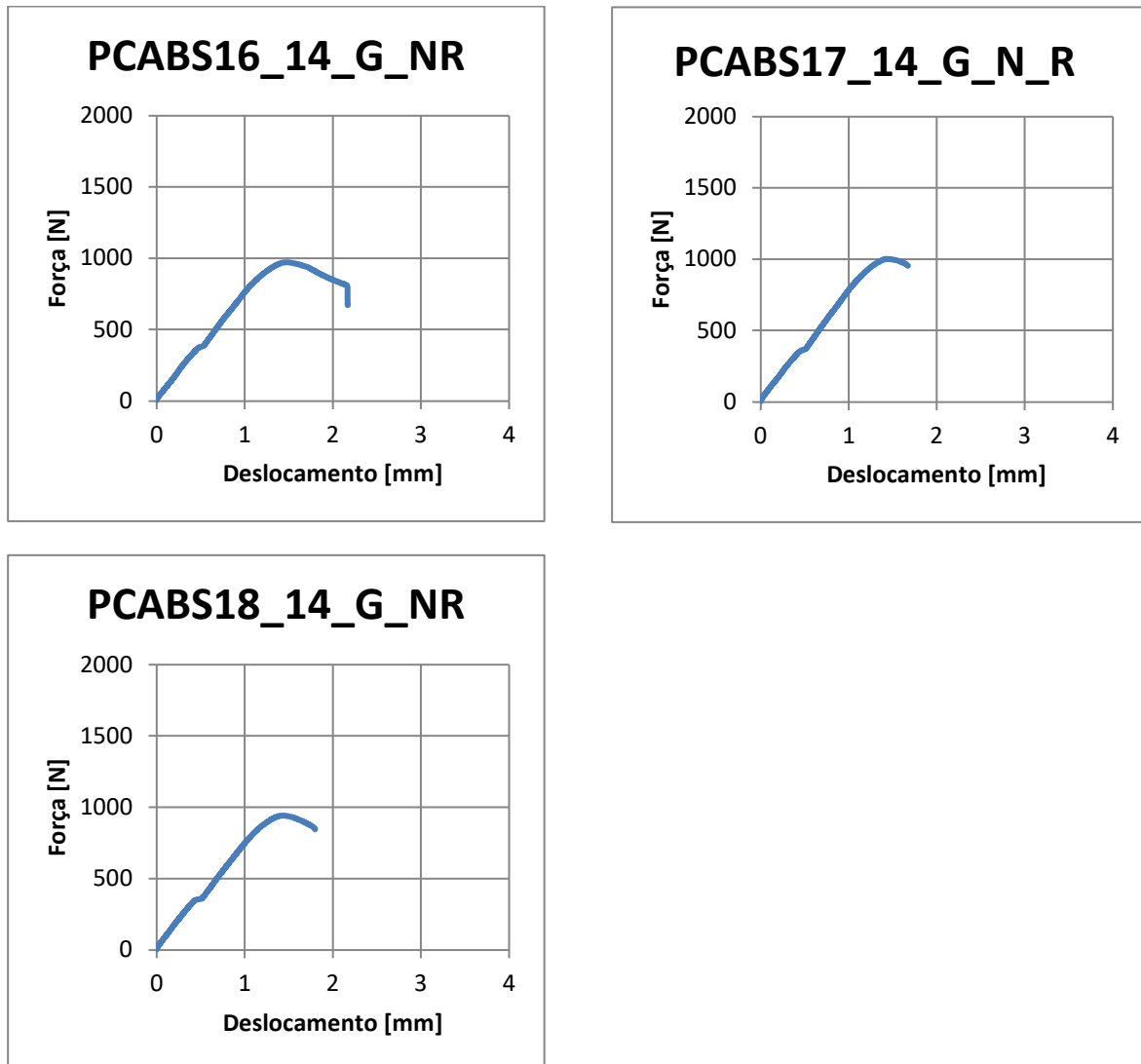


Figura 135 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 14 dias mergulhados em gasóleo

Provetes PC-ABS 14 dias não revestido mergulhado em gasóleo

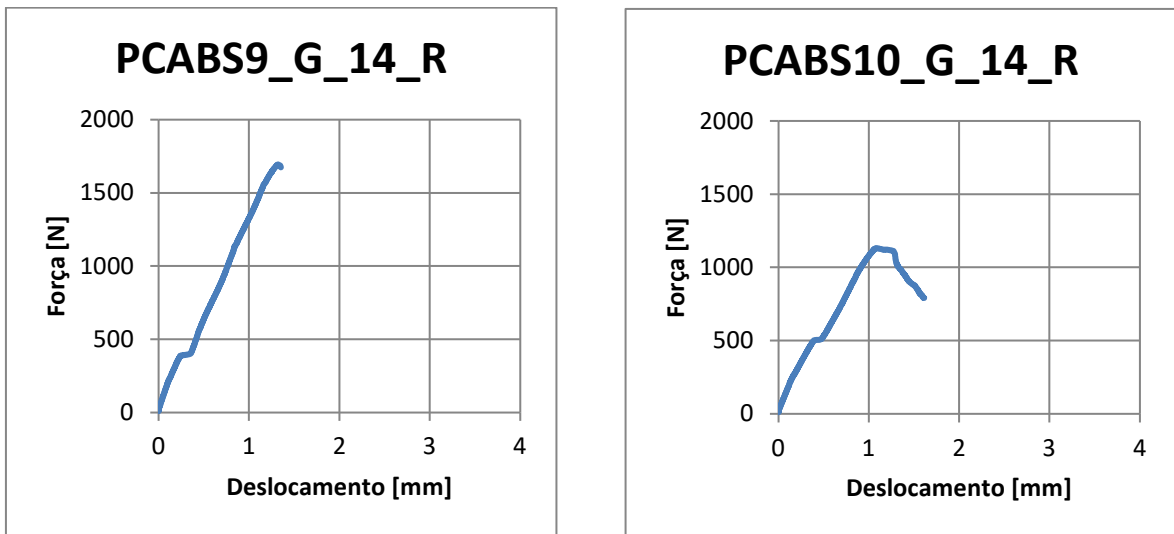


Figura 136 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 14 dias mergulhados em gasóleo

Provetes em PC-ABS 21 dias não revestido mergulhado em óleo

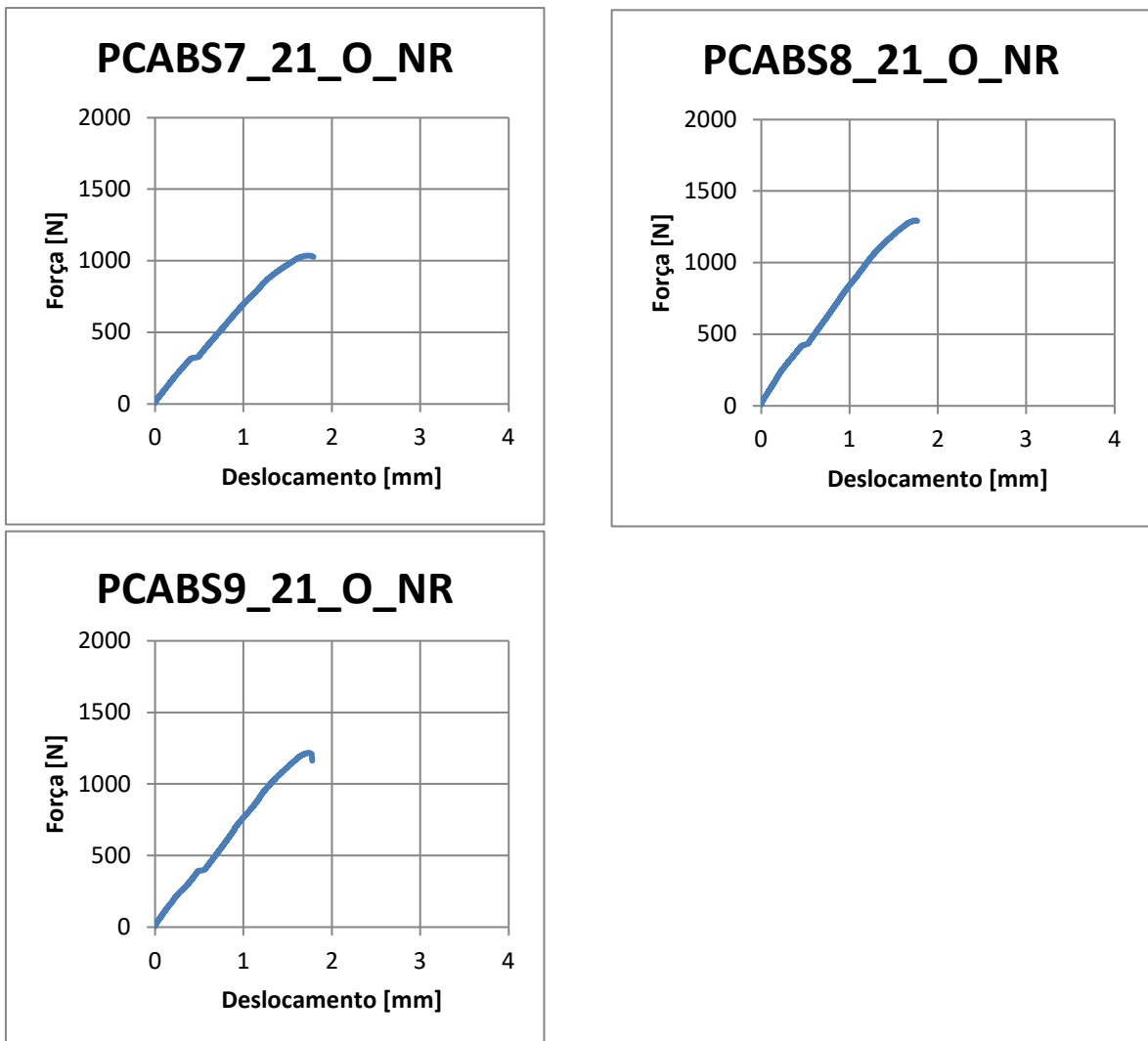


Figura 137 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 21 dias mergulhados em óleo

Provetes em PC-ABS 21 dias revestido mergulhado em óleo

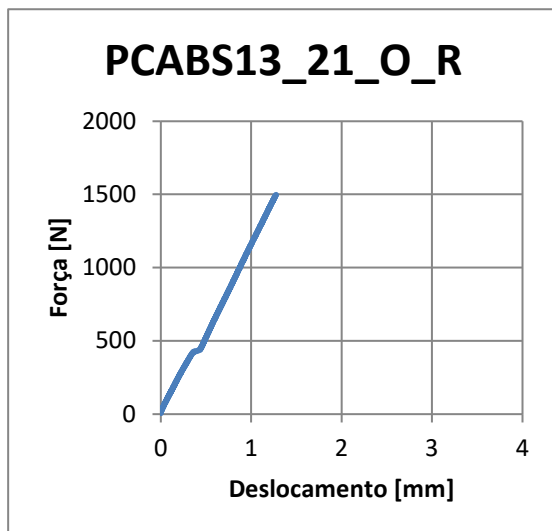
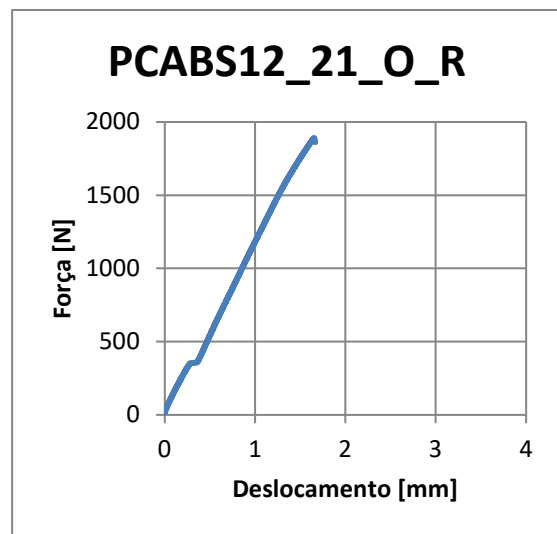
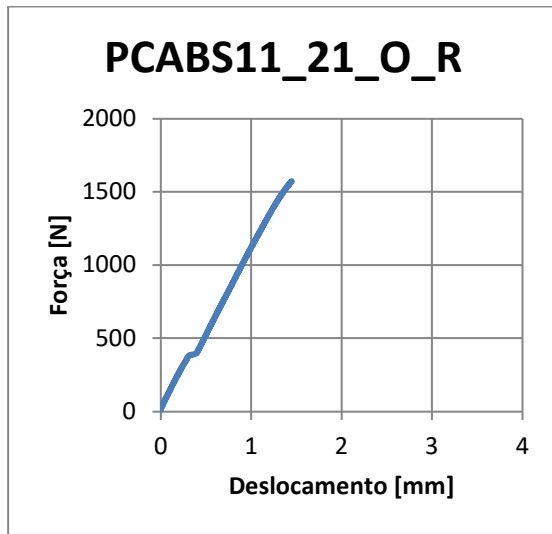


Figura 138 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 21 dias mergulhados em óleo

Provetes em PC-ABS 21 dias não revestido mergulhado em gasóleo

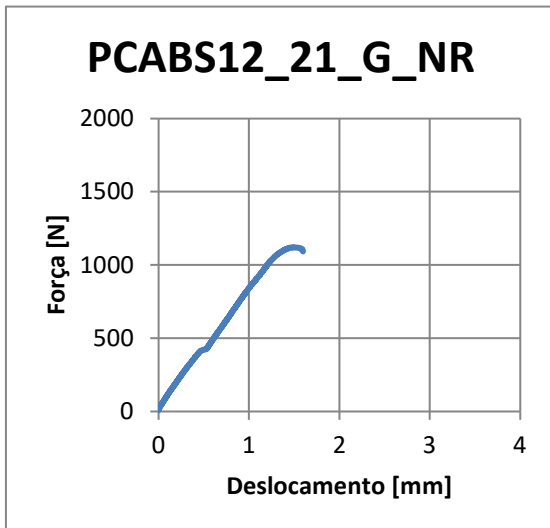
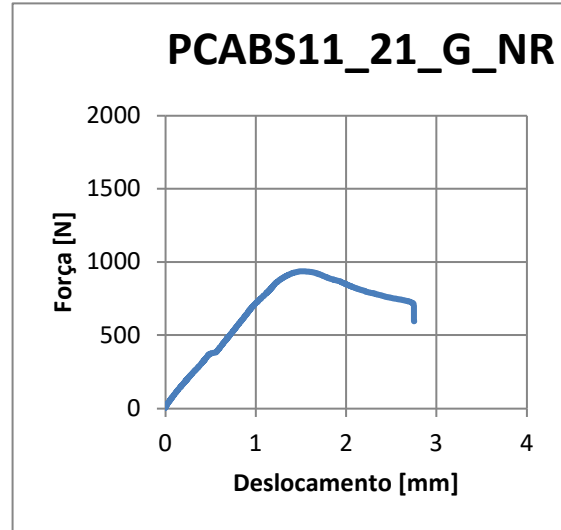
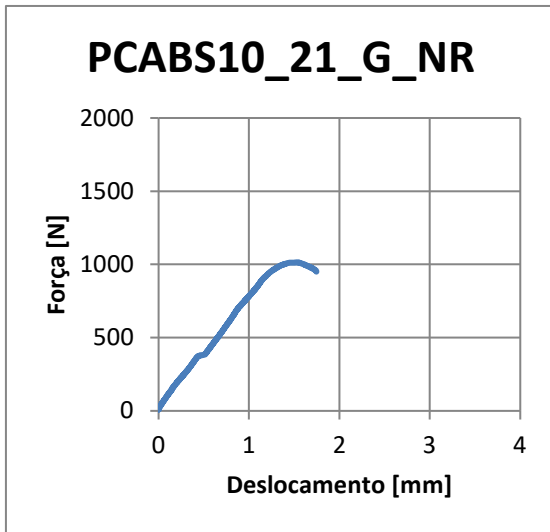


Figura 139 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 21 dias mergulhados em gasóleo

Provetes PC-ABS 21 dias revestido mergulhado em gasóleo

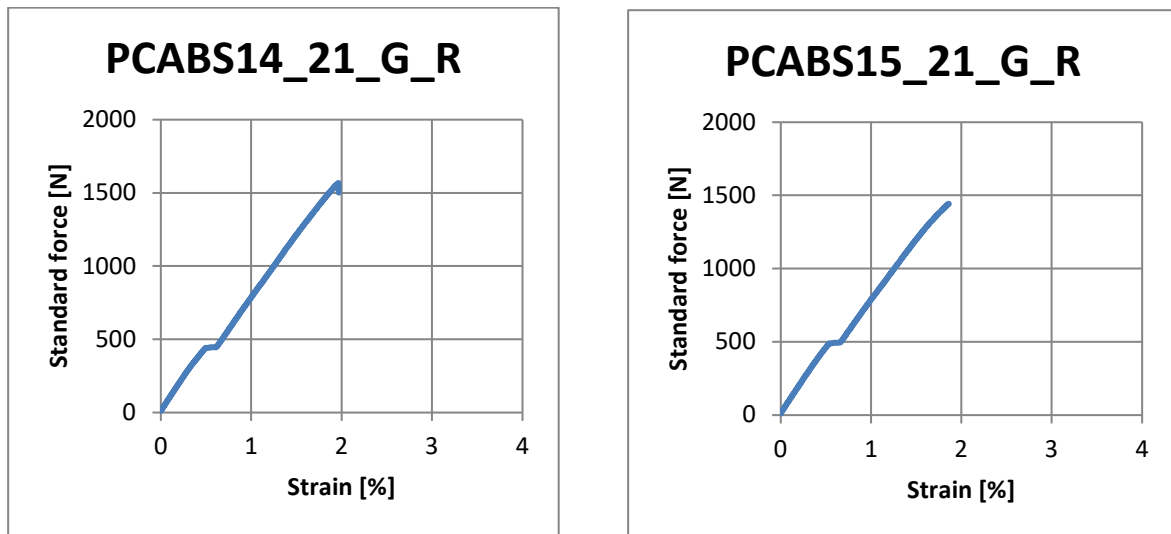
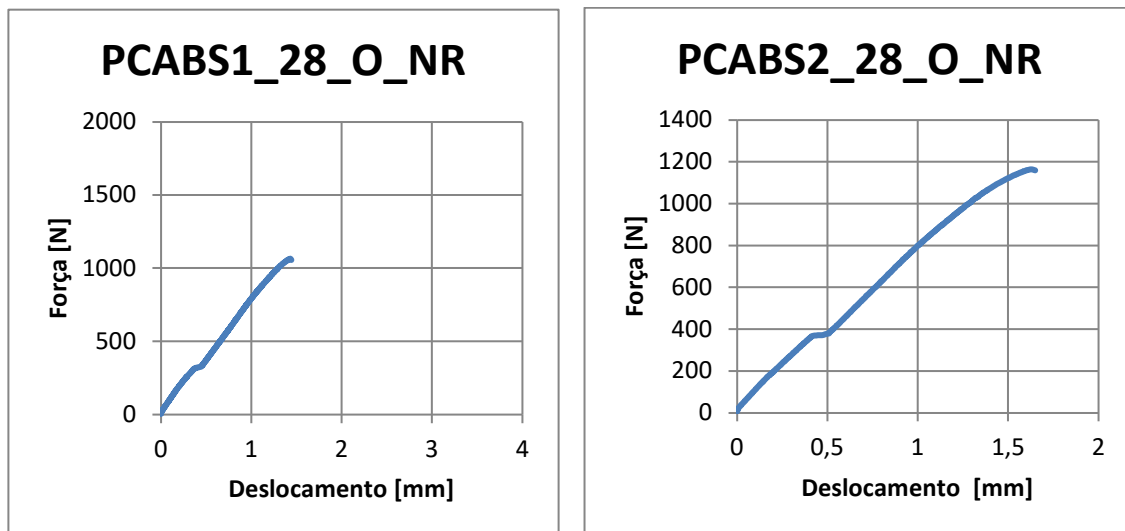


Figura 140 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 21 dias mergulhados em gasóleo

Provetes em PC-ABS não revestido mergulhado em óleo



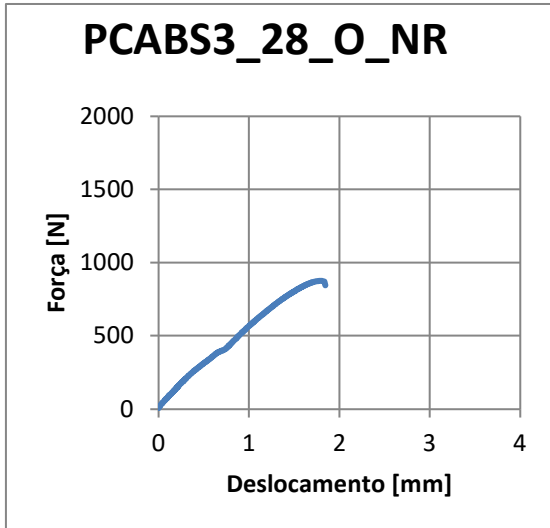
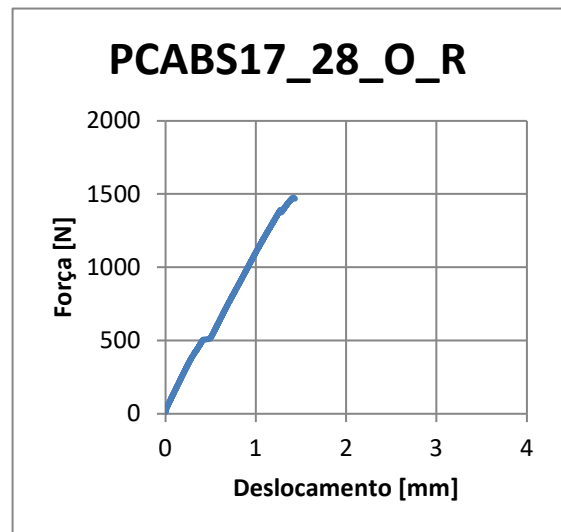
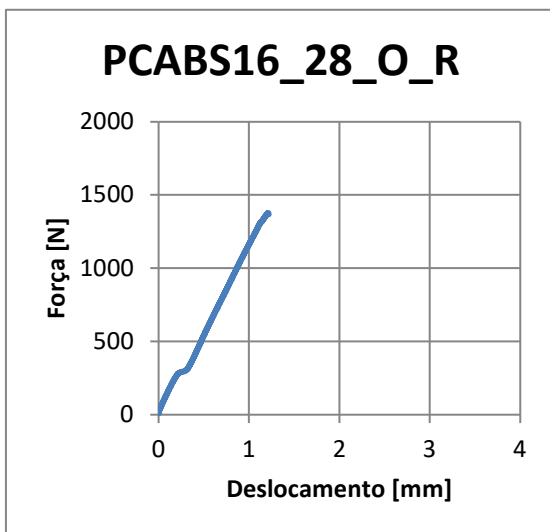


Figura 141 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 28 dias mergulhados em óleo

Provetes PC-ABS 28 dias revestido mergulhado em óleo



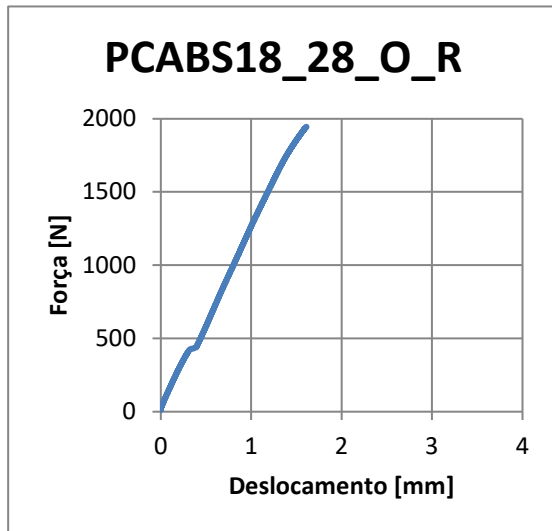


Figura 142 - - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 28 dias mergulhados em óleo

Provetes PC-ABS 28 dias não revestido mergulhado em gasóleo

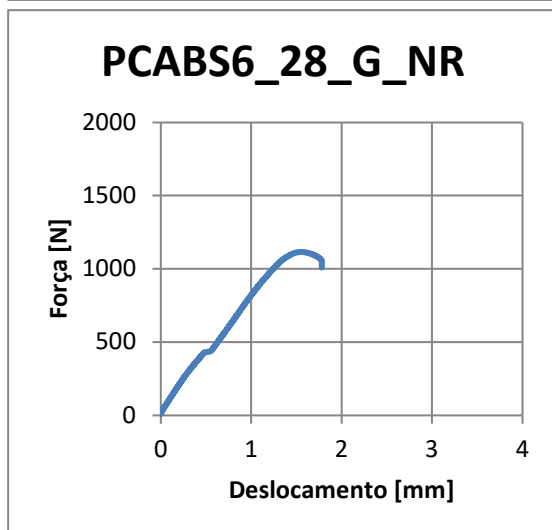
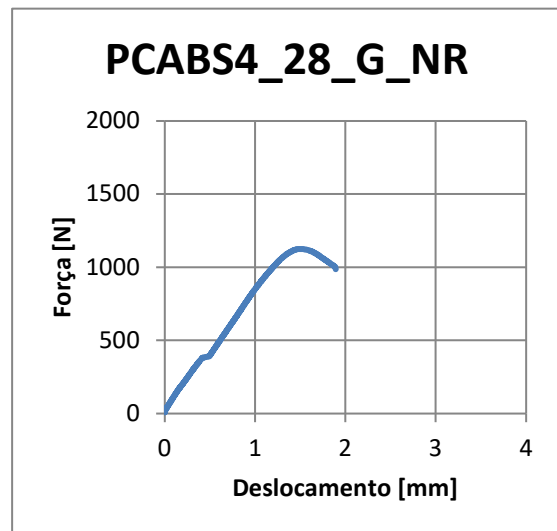
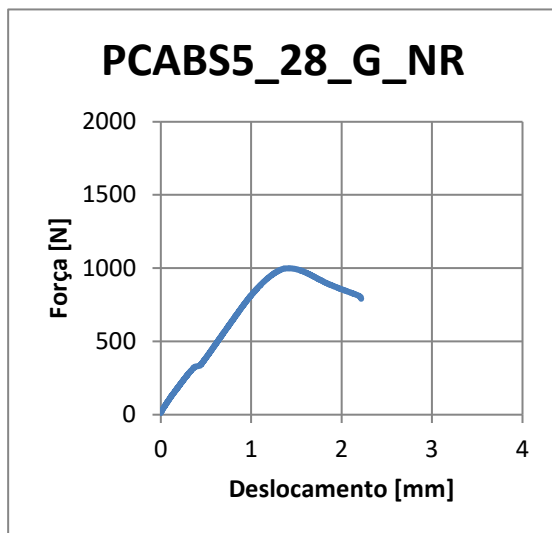


Figura 143 - - Gráficos Força – Deslocamento para provetes não revestidos em PC-ABS 28 dias mergulhados em gasóleo

Provetes PC-ABS 28 dias revestido mergulhado em gasóleo

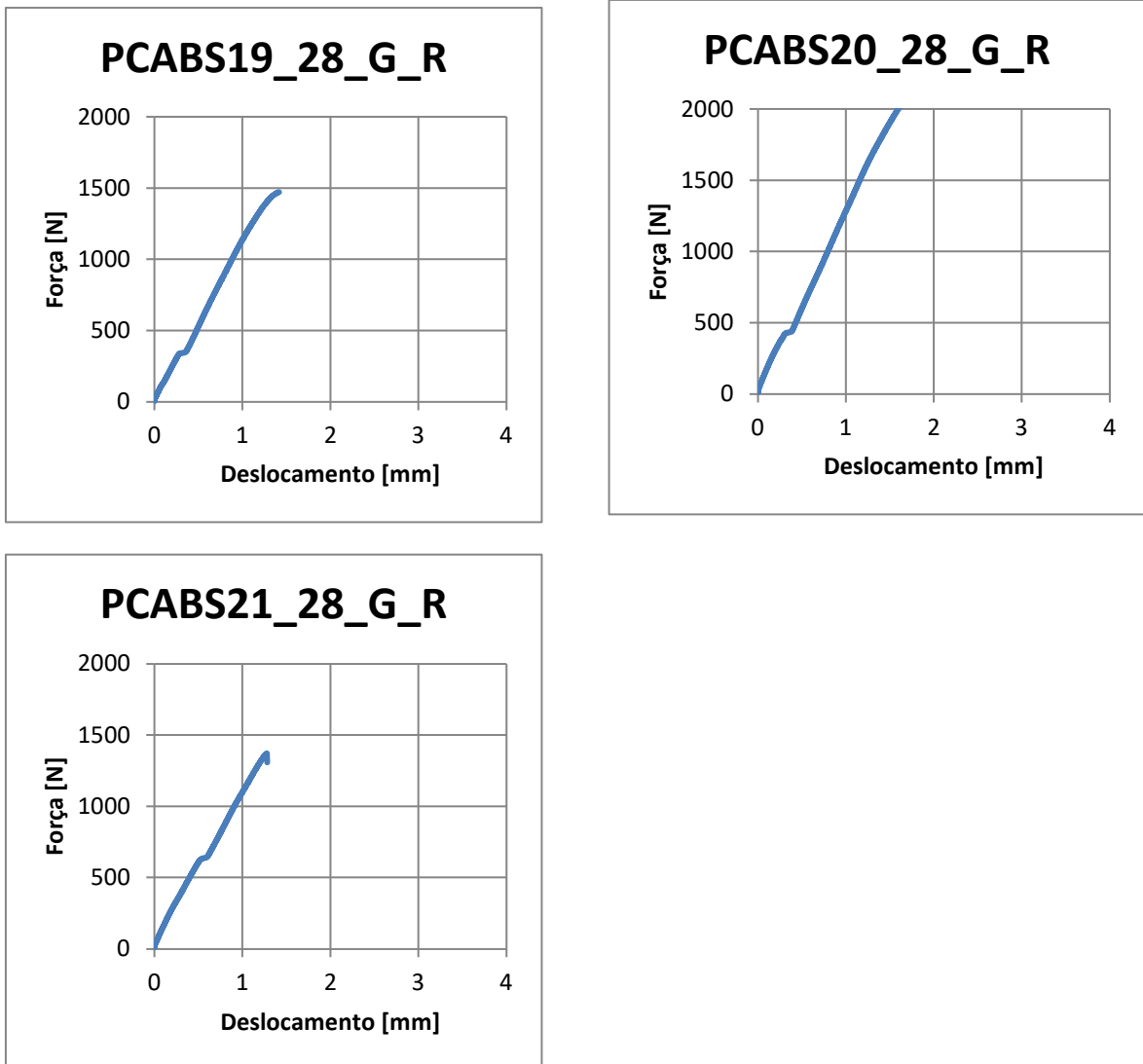


Figura 144 - Gráficos Força – Deslocamento para provetes revestidos em PC-ABS 28 dias mergulhados em gasóleo