



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Natália Amorim Acioli Moura

**Durabilidade de compósitos produzidos por
pultrusão**

Dezembro de 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Natália Amorim Acioli Moura

Durabilidade de compósitos produzidos por pultrusão

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor José Manuel de Sena Cruz
Doutor Luís Luciano Gouveia Correia

Dezembro de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contatar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição
CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Agradecimentos

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil – Perfil de Estruturas e Geotecnia, na Universidade do Minho. Gostaria de expressar os meus profundos agradecimentos e reconhecimento a todas as pessoas que contribuíram para a sua elaboração, e em particular às que refiro em seguida.

Em primeiro lugar, ao Professor Doutor José Sena Cruz gostava de dirigir o meu agradecimento por toda a disponibilidade, pelos ensinamentos transmitidos e pelo apoio motivacional demonstrado ao longo da execução da dissertação e pela dedicação para me ajudar na organização da dissertação

Ao Doutor Luís Correia, coorientador da dissertação, agradeço pela paciência, pela forma cuidadosa e atenciosa que sempre demonstrou durante a dissertação, por todo o auxílio, disponibilidade e colaboração.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, LEST, do Departamento de Engenharia Civil, em particular ao Engenheiro Marco Jorge e ao técnico Sr. António Matos, agradeço-lhes toda a disponibilidade, apoio, ensinamentos e incentivo.

No âmbito do projeto DURABLE-FRP (PTDC/ECI-EGC/4609/2020), agradeço ao financiamento por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e cofinanciamento pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização (POCI) e o Programa Operacional Regional de Lisboa e, parcialmente financiado pelo projeto POCI-01-0145-FEDER-007633 e pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob referência UIDB/04029/2020.

Por fim, agradeço especialmente a minha família, aos meus queridos pais (Renata e Rilton) por todo o apoio, paciência e sempre estarem torcendo por mim, à minha avó Irley e ao meu avô Ril, sem vocês, nada disso seria possível.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

Os polímeros reforçados com fibra (do inglês *fibre reinforced polymer* – FRP) são cada vez mais utilizados na indústria da construção no contexto de estruturas novas e no reforço de estruturas existentes. Estes materiais compósitos são utilizados devido à sua leveza, à facilidade de instalação, ao seu elevado desempenho estrutural (resistência e rigidez) e elevada durabilidade. Contudo, existe ainda falta de conhecimento suficientemente consolidado em relação a diferentes aspetos, nomeadamente a sua durabilidade sob condições específicas ambientais e de carregamento.

Na presente dissertação apresenta-se um estudo experimental do comportamento de painéis FRP produzidos por pultrusão, constituídos por fibra de vidro (GFRP) e matriz de poliéster insaturado e vinil éster, submetidos a envelhecimento laboratorial acelerado. A campanha experimental de envelhecimento acelerado incluiu os seguintes ambientes: (i) temperatura constante de -15 °C, 20 °C, 40 °C e 60 °C e (ii) imersão em água desmineralizada a 60 °C. Após o envelhecimento acelerado com uma duração de 6 meses, a durabilidade do GFRP foi avaliada através da sua resposta mecânica, em termos de comportamento à tração uniaxial (a 0° e a 90°), compressão, flexão, corte no plano e corte interlaminar. Os resultados obtidos mostraram uma maior degradação ao ambiente de imersão em água, com reduções nas diversas propriedades avaliadas que, alguns casos, ultrapassaram os 50%. Não obstante, os resultados também comprovam que parte dos efeitos do ambiente de imersão em água são reversíveis, desde que submetidos a um período de secagem, e que o tipo de resina tem grande influência na sua durabilidade.

Palavras-Chave: Polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP); Placas pultrudidas de GFRP; Resinas de poliéster insaturado e de vinil éster; Envelhecimento acelerado; Durabilidade de compósitos; Ensaios mecânicos

Abstract

Fibre reinforced polymers (FRP) are increasingly used in the construction industry for new structures and to reinforce existing structures. These composite materials are used because of their light weight, easy installation, high structural performance (strength and stiffness) and high durability. However, there is still a lack of sufficiently consolidated knowledge regarding different aspects, namely their durability under specific environmental and loading conditions.

This dissertation presents an experimental study of the behaviour of FRP panels produced by pultrusion, consisting of glass fibre FRP (GFRP) and unsaturated polyester and vinyl ester matrix, subjected to accelerated laboratory ageing. The experimental campaign of accelerated ageing included the following environments: (i) constant temperature of -15 °C, 20 °C, 40 °C and 60 °C and (ii) immersion in demineralised water at 60 °C. After accelerated ageing lasting 6 months, the durability of GFRP was evaluated through its mechanical response, in terms of uniaxial tensile behaviour (at 0° and 90°), compression, bending, in-plane shear and inter laminar shear.

The results obtained showed a higher degradation to water immersion environment, with reductions in the various properties evaluated that, in some cases, exceeded 50%. Nevertheless, the results also prove that part of the effects of the water immersion environment are reversible, provided that they are submitted to a drying period, and that the type of resin has a great influence on its durability.

Keywords: Glass-Fiber Reinforced Polymers (GFRP); Accelerated aging; Pultruded GFRP profiles; Durability of composites; Vinylester resins and unsaturated polyester; Mechanical testing

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xvii
1. INTRODUÇÃO	20
1.1. Enquadramento temático.....	20
1.2. Objetivos e metodologia	21
1.3. Estrutura da dissertação	21
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	23
2.1. Introdução	23
2.2. Durabilidade de compósitos	24
2.2.1. Efeito da temperatura	25
2.2.2. Efeito da humidade.....	25
2.2.3. Efeito de agentes químicos.....	27
2.2.4. Efeito da radiação UV.....	28
2.3. Considerações finais	28
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	30
3.1. Projeto DURABLE-FRP.....	30
3.2. Materiais	31
3.3. Programa experimental.....	33
3.3.1. Ensaio de caracterização física	33
3.3.1. Ensaio de caracterização mecânica	35
4. RESULTADOS E ANÁLISE.....	47
4.1. Propriedades Físicas.....	47
4.2. Propriedades mecânicas.....	49
4.2.1. Tração uniaxial - 0°	49

4.2.2. Tração uniaxial - 90°	56
4.2.3. Compressão uniaxial - 0°	62
4.2.4. Flexão.....	70
4.2.5. Corte no Plano.....	76
4.2.6. Corte interlaminar.....	82
5. CONCLUSÕES.....	90
5.1. Conclusões gerais.....	90
5.2. Trabalhos futuros.....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
ANEXO I – Caracterização física.....	96
ANEXO II – Caracterização mecânica.....	97
ANEXO III – Ensaio de envelhecimento	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Fases constituintes dos polímeros reforçados com fibras (FRP) (Correia, 2000)	23
Figura 2 - Localização das estações experimentais do projeto DURABLE-FRP	31
Figura 3 - Layout adotado para a extração das amostras necessárias à caracterização mecânica das placas em estudo (cotas em milímetros)	32
Figura 4 - Recipiente de barro com provete de UP no ensaio de calcinação	34
Figura 5 - Provete UP utilizado no ensaio de calcinação.....	34
Figura 6 - Amostras nos recipientes antes da calcinação	34
Figura 7 - Amostras nos recipientes depois da calcinação.....	34
Figura 8 - Amostra de resina de UP.....	35
Figura 9 - Amostra de resina de VE	35
Figura 10 - Geometria do provete utilizado nos ensaios de tração uniaxial ('EN ISO 527-4', 1997)	36
Figura 11 - Linhas de referência no provete nos ensaios de tração	36
Figura 12 - Marcação para as leituras com recurso a vídeo extensómetro nos ensaios de tração.....	36
Figura 13 - Ensaio de tração uniaxial.....	37
Figura 14 - Geometria do provete utilizado nos ensaios de compressão ('EN ISO 14126', 1999)	38
Figura 15 - Marcação dos pontos do ensaio de compressão na zona central para medição das extensões	39
Figura 16 - Extensões consideradas pelo vídeo extensómetro no ensaio de compressão	39
Figura 17 – Máquina MTS para a realização do ensaio de compressão (apenas para a determinação do módulo de elasticidade).....	40
Figura 18 – Máquina universal para a realização do ensaio de compressão à rotura.....	40
Figura 19 - Configuração do ensaio de flexão ('EN ISO 14125', 1998).....	41
Figura 20 - Marcação em provetes de matriz de VE para os ensaios de flexão.....	41
Figura 21 – Marcação em provetes de matriz de UP para os ensaios de flexão.....	41
Figura 22 – Equipamento de ensaio MTS Exceed E45.104.....	42
Figura 23 – Ensaio de flexão.....	42
Figura 24 - Geometria do provete utilizado nos ensaios de corte no plano ('ASTM D5379', 2005).....	43
Figura 25 – Configuração de ensaio de corte no plano ('ASTM D5379', 2005)	43
Figura 26 - Marcação dos pontos para a medição das extensões no ensaio de corte no plano.....	44

Figura 27 – Medição das extensões com recurso a vídeo extensómetro no ensaio de corte no plano	44
Figura 28 - Ensaio do corte no plano.....	44
Figura 29 – Configuração do ensaio de corte interlaminar ('EN ISO 14130', 1997, p. 14130).....	45
Figura 30 - Marcação dos provetes para os ensaios de corte interlaminar	46
Figura 31 - Ensaio de corte interlaminar.....	46
Figura 32 - Camadas de fibras de vidro que compõem o compósito com resina UP	49
Figura 33 - Camadas de fibras de vidro que compõem o compósito com resina VE.....	49
Figura 34 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial a 0° aos provetes de GFRP com resina UP	51
Figura 35 Possíveis modos de rotura nos ensaios de tração ('ASTM D3039/D3039M', 2002).....	52
Figura 36 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial a 0° aos provetes de GFRP com resina VE	53
Figura 37 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 0° aos provetes de referência de GFRP com resina VE e UP	55
Figura 38 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 0° aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP	55
Figura 39 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 0° aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP	55
Figura 40 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 0° aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP	56
Figura 41 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial a 90° aos provetes de GFRP com resina UP	58
Figura 42 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial a 90° aos provetes de GFRP com resina VE	60
Figura 43 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 90° aos provetes de referência de GFRP com resina VE e UP	61
Figura 44 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 90° aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP	61
Figura 45 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 90° aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP	61

Figura 46 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 90° aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP	62
Figura 47 - Tensão <i>versus</i> deslocamento (curva média por serie) de ensaios de compressão aos provetes de GFRP com resina UP	64
Figura 48 - Provetes UP para ensaio de compressão inválidos	65
Figura 49 – Possíveis modos de rotura nos ensaios de compressão	66
Figura 50 - Tensão <i>versus</i> deslocamento (curva média por serie) de ensaios de compressão aos provetes de GFRP com resina VE	67
Figura 51 - Tensão <i>versus</i> deslocamento (curva média por serie) de ensaios de compressão aos provetes de referência de GFRP com resina VE e UP	68
Figura 52 - Tensão <i>versus</i> deslocamento (curva média por serie) de ensaios de compressão aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP	68
Figura 53 - Tensão <i>versus</i> deslocamento (curva média por serie) de ensaios de compressão aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP	69
Figura 54 - Tensão <i>versus</i> deslocamento (curva média por serie) de ensaios de compressão aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP	69
Figura 55 - Tensão versus deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de flexão aos provetes de GFRP com resina UP	71
Figura 56 - Modo de rotura ensaio de flexão [32]	72
Figura 57 - Tensão versus deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de flexão aos provetes de GFRP com resina VE	74
Figura 58 - Tensão <i>versus</i> deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de flexão aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP.....	75
Figura 59 - Tensão <i>versus</i> deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de flexão aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP	75
Figura 60 - Tensão <i>versus</i> deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de flexão aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP	75
Figura 61 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de GFRP com resina UP	78
Figura 62 - Possíveis modos de rotura nos ensaios de corte no plano ('ASTM D5379', 2005)	78
Figura 63 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de GFRP com resina VE	80

Figura 64 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de referência de GFRP com resina VE e UP	81
Figura 65 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP	81
Figura 66 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP	81
Figura 67 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP	82
Figura 68 - Tensão <i>versus</i> deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de GFRP com resina UP	84
Figura 69 - Possíveis modos de rotura nos ensaios nos ensaios de corte interlaminar ('EN ISO 14130', 1997).....	85
Figura 70 - Tensão <i>versus</i> deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de GFRP com resina VE.....	86
Figura 71 - Tensão <i>versus</i> deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de referência de GFRP com resina VE e UP.....	87
Figura 72 - Tensão <i>versus</i> deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP	88
Figura 73 - Tensão <i>versus</i> deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP.....	88
Figura 74 - Tensão <i>versus</i> deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP.....	88
Figura 75 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de flexão	98
Figura 76 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de flexão UP	99
Figura 77 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de flexão VE.....	99
Figura 78 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de corte interlaminar	100
Figura 79 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de corte interlaminar UP	101
Figura 80 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de corte interlaminar VE.....	101
Figura 81 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de tração 0°	102
Figura 82 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de tração 0° UP.....	103
Figura 83 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de tração 0° VE	103
Figura 84 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de tração 90°	104

Figura 85 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de tração 90° UP	105
Figura 86 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de tração 90° VE	105
Figura 87 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de corte no plano	106
Figura 88 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de corte no plano UP	107
Figura 89 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de corte no plano VE.....	107
Figura 90 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de compressão.....	108
Figura 91 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de compressão VE	109
Figura 92 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de compressão UP.....	109
Figura 93 – Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão W60 S	111
Figura 94 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão W60 S UP	112
Figura 95 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão W60 S VE.....	112
Figura 96 - Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão W60 D	113
Figura 97 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão W60D UP	114
Figura 98 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão W60D VE	114
Figura 99 - Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão T-15.....	115
Figura 100 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T-15 UP	116
Figura 101 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de T-15 VE.....	116
Figura 102 – Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão T20	117
Figura 103 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T20 UP	118
Figura 104 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T20 VE.....	118
Figura 105 - Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão T40	119
Figura 106 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T40 UP	120
Figura 107 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T40 VE.....	120
Figura 108 – Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão T60	121
Figura 109 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T60 UP	122
Figura 110 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T60 VE.....	122
Figura 111 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 S	123
Figura 112 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 S UP	124
Figura 113 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 S VE.....	124
Figura 114 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 D.....	125
Figura 115 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 D UP.....	126
Figura 116 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 D VE	126

Figura 117 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T-15	127
Figura 118 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T-15 UP	128
Figura 119 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T-15 VE.....	128
Figura 120 – Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T20	129
Figura 121 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T20 UP	130
Figura 122 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T20 UP	130
Figura 123 – Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T40	131
Figura 124 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T40 VE.....	132
Figura 125 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T40 UP	132
Figura 126 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T60	133
Figura 127 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T60 UP	134
Figura 128 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T60 VE.....	134
Figura 129 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 S	135
Figura 130 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 S UP	136
Figura 131 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 S VE.....	136
Figura 132 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 D	137
Figura 133 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 D UP	138
Figura 134 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 D VE	138
Figura 135 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° T-15.....	139
Figura 136 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T-15 UP	140
Figura 137 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T-15 VE.....	140
Figura 138 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° T20	141
Figura 139 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T20 UP	142
Figura 140 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T20 VE.....	142
Figura 141 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° T40	143
Figura 142 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T40 UP	144
Figura 143 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T40 VE.....	144
Figura 144 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° T60	145
Figura 145 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T60 UP	146
Figura 146 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T60 VE.....	146
Figura 147 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° W60 S	147
Figura 148 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° W60 S UP	148

Figura 149 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° W60 S VE.....	148
Figura 150 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° W60D	149
Figura 151 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° W60 D UP.....	150
Figura 152 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° W60 D VE	150
Figura 153 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° T-15.....	151
Figura 154 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T-15 UP	152
Figura 155 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T-15 VE.....	152
Figura 156 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° T20	153
Figura 157 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T20 UP	154
Figura 158 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T20 VE.....	154
Figura 159 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° T40	155
Figura 160 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T40 UP	156
Figura 161 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T40 VE.....	156
Figura 162 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° T60	157
Figura 163 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T60 UP	158
Figura 164 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T60 VE.....	158
Figura 165 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano W60 S	159
Figura 166 – Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano W60 S	160
Figura 167 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano W60 D.....	161
Figura 168 – Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano W60 D.....	162
Figura 169 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano T-15	163
Figura 170 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano T-15.....	164
Figura 171 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano T20	165
Figura 172 – Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano T20	166
Figura 173 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano T40	167
Figura 174 – Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano T40	168
Figura 175 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano T60	169
Figura 176 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano T60.....	170
Figura 177 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão W60S.....	171
Figura 178 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão W60 S UP	172
Figura 179 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão W60 S VE.....	172
Figura 180 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão W60D	173

Figura 181 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão W60 D UP	174
Figura 182 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão W60 D VE.....	174
Figura 183 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão T-15.....	175
Figura 184 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T-15 UP.....	176
Figura 185 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T-15 VE	176
Figura 186 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão T20.....	177
Figura 187 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T20 UP	178
Figura 188 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T20 VE.....	178
Figura 189 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão T40.....	179
Figura 190 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T40 UP	180
Figura 191 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T40 VE.....	180
Figura 192 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão T60.....	181
Figura 193 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T60 UP	182
Figura 194 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T60 VE.....	182

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de degradação (Sena-Cruz, 2021)	24
Tabela 2 - Mecanismos de degradação induzido pela humidade (Svetlik, 2008)	26
Tabela 3 - Geometria dos provetes	32
Tabela 4 - Informações da norma para o ensaio de tração.....	35
Tabela 5 - Informações da norma para o ensaio de compressão.....	38
Tabela 6 – Principais características do ensaio de flexão	40
Tabela 7 - Informações da norma para o ensaio de corte no plano	42
Tabela 8 - Características principais do ensaio de corte interlaminar.....	45
Tabela 9 - Nomenclatura utilizada nos ensaios de calcinação	47
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de calcinação nos provetes com matriz de UP e VE	47
Tabela 11 - Percentagem de fibras nos provetes com matriz de UP e VE	48
Tabela 12 - Resultados nos ensaios de tração uniaxial 0° dos provetes com resina UP	50
Tabela 13 - Resultados nos ensaios de tração uniaxial 0° dos provetes com resina VE	52
Tabela 14 - Resultados nos ensaios de tração uniaxial 90° dos provetes com resina UP.....	57
Tabela 15 - Resultados nos ensaios de tração uniaxial 90° dos provetes com resina VE	59
Tabela 16 - Resultados nos ensaios de compressão uniaxial 0° dos provetes com resina UP	63
Tabela 17 - Resultados nos ensaios de compressão uniaxial 0° dos provetes com resina VE	66
Tabela 18 - Resultados nos ensaios de flexão dos provetes com resina UP	70
Tabela 19 - Resultados nos ensaios de flexão dos provetes com resina VE.....	73
Tabela 20 - Resultados nos ensaios de corte no plano dos provetes com resina UP	77
Tabela 21 - Resultados nos ensaios de corte no plano dos provetes com resina VE.....	79
Tabela 22 - Resultados nos ensaios de corte interlaminar dos provetes com resina UP	83
Tabela 23 - Resultados nos ensaios de corte interlaminar dos provetes com resina VE.....	85
Tabela 24 - Dimensão dos provetes para o ensaio de calcinação	96
Tabela 25 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio de flexão.....	97
Tabela 26 - Resultados dos ensaios de flexão de referência	98
Tabela 27 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio de corte interlaminar	99
Tabela 28 - Resultados dos ensaios de corte interlaminar de referência	100
Tabela 29 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio tração 0°	101
Tabela 30 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio tração 0°	103
Tabela 31 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio tração 0°	105

Tabela 32 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio compressão.....	107
Tabela 33 - Dimensões dos provetes W60 S para o ensaio de flexão.....	110
Tabela 34 - Resultado dos ensaios de flexão W60 S	111
Tabela 35 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio de flexão	112
Tabela 36 - Resultado dos ensaios de flexão W60 D	113
Tabela 37 - Dimensões dos provetes T-15 para o ensaio de flexão.....	114
Tabela 38 - Resultado dos ensaios de flexão T-15.....	115
Tabela 39 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio de flexão.....	116
Tabela 40 - Resultado dos ensaios de flexão T20	117
Tabela 41 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio de flexão.....	118
Tabela 42 - Resultado dos ensaios de flexão T40	119
Tabela 43 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio de flexão.....	120
Tabela 44 - Resultado dos ensaios de flexão T60	121
Tabela 45 - Dimensões dos provetes W60 S para o ensaio de corte interlaminar	122
Tabela 46 - Resultado dos ensaios de corte interlaminar W60 S	123
Tabela 47 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio de corte interlaminar	124
Tabela 48 - Resultado dos ensaios de corte interlaminar W60 D	125
Tabela 49 - Dimensões dos provetes T-15 para o ensaio de corte interlaminar.....	126
Tabela 50 - Resultado dos ensaios de corte interlaminar T-15	127
Tabela 51 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio de corte interlaminar	128
Tabela 52 - Resultado dos ensaios de corte interlaminar T20	129
Tabela 53 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio de corte interlaminar	130
Tabela 54 - Resultado dos ensaios de corte interlaminar T40	131
Tabela 55 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio de corte interlaminar	132
Tabela 56 - Resultado do ensaio de corte interlaminar T60.....	133
Tabela 57 - Dimensões dos provetes a W60 S para o ensaio tração 0°	134
Tabela 58 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio tração 0°	136
Tabela 59 - Dimensões dos provetes T-15 de referência para o ensaio tração 0°	138
Tabela 60 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio tração 0°	140
Tabela 61 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio tração 0°	142
Tabela 62 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio tração 0°	144
Tabela 63 - Dimensões dos provetes W60 S para o ensaio tração 90°	146

Tabela 64 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio tração 90°	148
Tabela 65 - Dimensões dos provetes T-15 para o ensaio tração 90°	150
Tabela 66 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio tração 90°	152
Tabela 67 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio tração 90°	154
Tabela 68 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio tração 90°	156
Tabela 69 - Dimensões dos provetes W60 S para o ensaio corte no plano	158
Tabela 70 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio corte no plano	160
Tabela 71 - Dimensões dos provetes T-15 para o ensaio corte no plano	162
Tabela 72 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio corte no plano	164
Tabela 73 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio corte no plano	166
Tabela 74 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio corte no plano	168
Tabela 75 - Dimensões dos provetes W60 S para o ensaio de compressão	170
Tabela 76 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio de compressão	172
Tabela 77 - Dimensões dos provetes T-15 para o ensaio de compressão	174
Tabela 78 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio de compressão	176
Tabela 79 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio compressão.....	178
Tabela 80 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio de compressão	180

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento temático

Cada vez mais os materiais compósitos FRP, do inglês *Fiber Reinforced Polymer* (também conhecidos como polímeros reforçados com fibras), são utilizados em indústrias, incluindo na construção civil, nomeadamente para novas construções e para a reabilitação de estruturas existentes. Contudo, a ideia de reforçar materiais já existia na história antiga. P.e., em 4000 a.C., no Egito, fibras naturais eram usadas como o papiro para fazer velas, cordas e barcos. Um outro exemplo é o uso de palha para reforçar tijolos, prática com mais de 2000 anos que é ainda hoje é utilizada (Ventura, 2009).

No contexto atual, consideram-se compósitos FRP, os materiais constituídos por fibras discretas embebidas numa matriz polimérica. Os FRP começaram a ser utilizados na década de 40 na indústria naval e aeroespacial e só mais tarde, nas décadas de 1970 e 1980, é que começaram a ser aplicados no setor da construção. Seu interesse começou a aumentar devido à elevada demanda de reparação e reforço de estruturas, à necessidade da redução de custos e à necessidade de modernizar as construções (Bakis *et al.*, 2002; Ventura, 2009). Os polímeros reforçados com fibra são uma alternativa viável aos materiais ditos de tradicionais (e.g. betão, aço), devido ao seu alto desempenho mecânico, leveza, maior durabilidade e possibilidade de apresentar muito bom comportamento em diversas condições ambientais (Bakis *et al.*, 2002). Os polímeros à base de fibras de vidro (GFRP), quando comparado aos polímeros com fibras de carbono (CFRP), têm menor resistência à tração e módulo de elasticidade, possuem inferior resistência à abrasão e são mais suscetíveis à rotura por fluência, além de possuírem baixa resistência à fadiga, humidade e agentes alcalinos (Sena-Cruz, 2021). Apesar dessas características, os compósitos GFRP têm como principal vantagem o seu baixo custo por comparação com p.e. os compósitos CFRP, razão pela qual são muito usados em novas estruturas, e.g. pontes, painéis sanduíche, estruturas porticadas, entre outras (Pereira, 2009).

Define-se como durabilidade de um material a capacidade de resistir a fissuração, degradação química, oxidação, delaminação, desgaste e/ou danos causados por ações num determinado período sob condições específicas de carga e ambientais. A qualificação da durabilidade obtém-se pelo princípio de tolerância a danos, ou seja, a capacidade de um material ou estrutura resistir a ações e continuar a funcionar com um determinado desempenho por um certo tempo (Civil Engineering Research Foundation, 2001). Apesar dos compósitos terem vindo a ser bastante utilizados nos setores aeroespacial, automóvel ou marítimo, existem diferenças significativas em relação às ações ambientais, ao tipo de carregamento e aos tipos de materiais e processamento destes quando usados na indústria

da construção, razão pela qual estudos de durabilidade destas indústrias não podem ser usados na indústria da construção. Por outro lado, os estudos existentes sobre durabilidade no setor da construção são escassos e as informações disponíveis por vezes são contraditórias e/ou confusas devido às diferenças nos métodos/procedimentos adotados e devido à vasta variabilidade de materiais disponíveis (tanto ao nível do tipo de fibra/matriz como modo de fabrico) (Civil Engineering Research Foundation, 2001).

1.2. Objetivos e metodologia

A presente dissertação de mestrado foi desenvolvida no contexto do projeto DURABLE-FRP e tem como principal objetivo contribuir para o estudo da durabilidade de compósitos de fibra de vidro (GFRP), produzidos por pultrusão, com matriz de poliéster insaturado e de vinil éster, utilizados em estruturas de Engenharia Civil, tanto em construções novas e como na reabilitação de estruturas existentes.

Para que o objetivo mencionado fosse alcançado, realizou-se uma pesquisa bibliográfica relativa às principais características do material FRP, com foque especial na sua durabilidade. Posteriormente, realizaram-se ensaios laboratoriais para a (i) caracterização física e mecânica inicial dos compósitos usados, e para a (ii) caracterização física e mecânica dos compósitos sob efeito de envelhecimento acelerado durante um período de 6 meses. Os ensaios mecânicos nos compósitos GFRP incluíram ensaios de tração a 0° e a 90°, de compressão, de flexão, de corte interlaminar e, de corte no plano, tanto em provetes de referência como em provetes envelhecidos. Com base nos resultados experimentais obtidos, procedeu-se à sua análise.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos essenciais. O Capítulo 1 apresenta um enquadramento temático da dissertação, os seus objetivos e metodologia adotada para a sua execução e estrutura deste documento.

O Capítulo 2 apresenta o estado do conhecimento, em que foi realizada pesquisa bibliográfica sobre polímeros reforçados com fibras (FRP) e sobre a durabilidade destes compósitos sob o efeito da temperatura, humidade, agentes químicos e raios ultravioleta (UV).

O Capítulo 3 explica, de forma mais detalhada, o projeto DURABLE-FRP no qual a presente dissertação se insere, descreve os materiais utilizados, e o programa experimental que inclui ensaios de envelhecimento, bem como, a caracterização física e mecânica.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e as respectivas análises de todo o programa experimental, nomeadamente às propriedades físicas e às propriedades mecânicas obtidas ao longo do projeto.

Por último, no Capítulo 5 resumem-se as conclusões principais obtidas no âmbito do trabalho desenvolvido na presente dissertação.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Introdução

Os compósitos FRP são constituídos por três fases essenciais: (i) fibras de reforço, (ii) matriz polimérica e, (iii) interfase fibra-matriz, como se ilustra na Figura 1

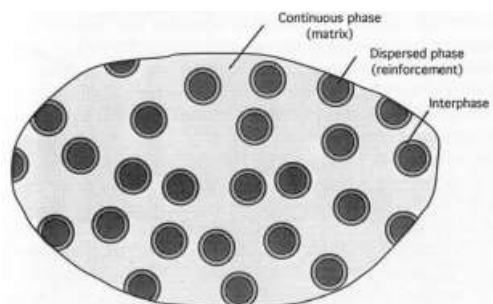


Figura 1 – Fases constituintes dos polímeros reforçados com fibras (FRP) (Correia, 2000)

As fibras, mesmo frágeis, são responsáveis pela rigidez e resistência do compósito. Estas, no caso da indústria da construção, são habitualmente de carbono, vidro, aramida e basalto. A matriz polimérica, por sua vez, apresenta baixa resistência e é responsável pela transferência e distribuição das tensões entre fibras e tem a função de proteger as fibras de danos ambientais e mecânicos. Com o objetivo de proteger as fibras contra a degradação, normalmente é feito um tratamento químico superficial nestas, que também aumenta a ligação fibra-matriz, e.g. (Gudonis *et al.*, 2014; Sena-Cruz, 2021).

As fibras de vidro possuem elevada resistência à tração e compressão, baixo custo relativo às outras fibras, alta resistência química e ao fogo, bem como boas propriedades de isolamento acústico, térmico e elétrico, pelo que são frequentemente utilizadas na indústria da construção (Pereira, 2009).

Os compósitos podem ser fabricados por vários métodos, nomeadamente por pultrusão, infusão a vácuo ou *wet-layup*. Nesta dissertação os FRPs estudados foram produzidos por pultrusão. A pultrusão é definido como um processo contínuo em que as fibras, embebidas na matriz polimérica, são esticadas e passadas por uma fieira aquecida, para então processar a cura e a forma do compósito. Este método é o mais utilizado na execução dos sistemas de FRP pré-fabricados (Sena-Cruz, 2021).

Os polímeros reforçados com fibras podem ser usados como varões em betão armado, em construções novas, sendo que estas soluções aumentam a vida útil da estrutura devido à sua maior durabilidade, nomeadamente pela elevada resistência à corrosão (Ceroni *et al.*, 2006; Zhao and Zhang, 2007). Outra forma de aplicação dos compósitos corresponde à reabilitação/reforço de estruturas, frequentemente através da (i) técnica EBR (do inglês *externally bonded reinforcement*), em que estes materiais são aplicados sobre a superfície do elemento a reforçar, através de adesivos construtivos (p.e. epóxi), e

através da (ii) técnica NSM (do inglês *near surface mounted*), em que estes materiais são introduzidos na camada de recobrimento do betão (Bstien, Rudolf Ganz and Taerwe, 2019; Sena-Cruz, 2021).

Embora os materiais FRP apresentem muitas vantagens quando comparados com materiais convencionais (aço e betão), a sua durabilidade ainda é um tópico a ser investigado pela comunidade científica. Na próxima secção os aspetos principais da durabilidade de compósitos FRP, nomeadamente o efeito da temperatura, da humidade, de agentes químicos e da radiação ultravioleta.

2.2. Durabilidade de compósitos

A durabilidade destes materiais compósitos é de extrema importância para a segurança da estrutura. Em termos genéricos, a durabilidade de um material ou estrutura é definida pela sua resistência a oxidação, degradação química, fissuração, delaminação, desgaste e/ou efeito de danos causados por objetos estranhos durante um determinado tempo, sob condições ambientais específicas e sob condições de carga (Civil Engineering Research Foundation, 2001; Luigi Ascione, Jean-François Caron, João Ramôa Correia, Wouter De Corte, Patrice Godonou, Jean Knippers, Eric Moussiaux, Toby Mottram, Matthias Oppe, Nuno Silvestre, Peter Thorning, Liesbeth Trom, 2016; Sena-Cruz, 2021).

Neste contexto, alterações na performance do material (mecânica ou física) são causadas por fatores de degradação ambiental e fatores de degradação mecânicos. Estes podem ser classificados da seguinte forma (Tabela 1).

Tabela 1 - Fatores de degradação (Sena-Cruz, 2021)

Fator de degradação ambiental	Fator de degradação mecânico
Temperatura	Ações estáticas (fluência e relaxação)
Humidade	Ações dinâmicas (impacto, fadiga e vibração)
Exposição UV	
Agentes químicos	

Os fatores de degradação temperatura e humidade serão estudados nesta dissertação. De seguida, apresenta-se algumas considerações relativas os efeitos de degradação ambiental.

2.2.1. Efeito da temperatura

Os compósitos de FRP são afetados por temperaturas elevadas, por temperatura muito baixas (abaixo de zero) e pelas variações térmicas (ciclos térmicos) ao longo do tempo. Os efeitos térmicos em materiais compósitos, nomeadamente quando a temperatura se aproxima ou excede da temperatura de transição vítrea (T_g), levam à diminuição significativa da rigidez e a sua resistência mecânica. A T_g corresponde ao valor de temperatura para o qual o material deixa de se comportar como sólido e seu comportamento se assemelha ao de um líquido de ultraelevada viscosidade (mole, semelhante à borracha). Não obstante, de uma forma geral, a exposição a ciclos térmicos de baixa amplitude térmica, não provoca degradação significativa na rigidez ou na resistência do compósito (Civil Engineering Research Foundation, 2001).

Quando os compósitos são expostos em ambientes com temperaturas abaixo de zero, pode ocorrer o endurecimento da matriz e conseqüentemente microfissuras, o que facilita a entrada de agentes de degradação, como a humidade, que induz fenómenos como o *swelling* ou a *plasticization* (detalhados na próxima secção). O congelamento-descongelamento na presença de sais também pode acelerar a degradação devido à formação e expansão dos cristais de sal dentro do compósito. Tipicamente, as fibras de vidro e de aramida são as mais afetadas pelos efeitos da temperatura de serviço, entre 20 e 60 °C, resultando na redução do seu módulo de elasticidade (Green *et al.*, 2006; Budhe *et al.*, 2017).

Em relação à influência de ciclos térmicos na interfase matriz/fibra, deve ser referido que o coeficiente de expansão térmica (CTE) das fibras é, geralmente, menor que o da matriz polimérica. Esta diferença de CTEs gera tensões internas, especialmente perante ciclos de congelamento e descongelamento, o que resulta na fragilização da matriz, podendo acontecer microfissuração, desenvolvimento de tensões residuais e degradação da ligação fibra-matriz. Assim, temperaturas baixas também provocam a fragilização da matriz e redução da eficácia da transferência de tensão entre matriz e fibra. No caso de temperaturas elevadas, estas ocasionam em gradientes térmicos que, juntamente com o aumento significativo da viscoelasticidade, podem resultar na degradação da interfase da matriz/fibra (Civil Engineering Research Foundation, 2001; Heshmati, Haghani and Al-Emrani, 2015; Sena-Cruz, 2021).

2.2.2. Efeito da humidade

Os compósitos FRP são muito utilizados na indústria naval por apresentar uma longa vida útil em contacto com a humidade e soluções aquosas. No entanto, quando os compósitos são expostos diretamente à humidade, podem apresentar degradação ao nível da sua matriz polimérica, das fibras de reforço e da interfase matriz/fibra. A exposição dos compósitos à humidade inclui contacto direto com chuva, humidade e imersões em soluções aquosas, como em inundações ou em áreas portuárias, que em época de chuva ficam submetidos a transbordamento, por exemplo (Hunston *et al.*, 2001; Luigi Ascione,

Jean-François Caron, João Ramôa Correia, Wouter De Corte, Patrice Godonou, Jean Knippers, Eric Moussiaux, Toby Mottram, Matthias Oppe, Nuno Silvestre, Peter Thorning, Liesbeth Trom, 2016; Sena-Cruz, 2021).

De uma forma geral, o principal efeito da humidade é refletido na matriz do polímero através de fenómenos como a hidrólise, a *plasticization* e outros mecanismos que causam mudanças reversíveis e/ou irreversíveis no compósito (ver Tabela 2). A humidade pode provocar a deterioração da ligação entre a fibra e a matriz, que por sua vez pode levar à perda de eficiência da transferência de carga entre estas e consequente redução das propriedades mecânicas do compósito (resistência e rigidez). No caso das fibras de vidro, a humidade, pode provocar a extração dos seus iões, o que resulta na perda da resistência e na formação de microfissuras no compósito (Hunston *et al.*, 2001; Karbhari *et al.*, 2003).

Tabela 2 - Mecanismos de degradação induzido pela humidade (Svetlik, 2008)

Classificação	Mecanismo de degradação	Fibra	Matriz	Interfase	Reversibilidade
Físico	<i>Plasticization</i>		X	X	Reversível*
	<i>Swelling</i>		X		Reversível*
	Relaxamento		X		Irreversível
Químico	Lixiviação	X	X	X	Irreversível
	Hidrólise:				
	- Cisão de cadeia		X		Irreversível*
	- Pico	X			Irreversível*
	- Descolamento			X	Irreversível*

Nota: (*) Às vezes relatado como reversível e irreversível.

Na degradação física, a *plasticization* corresponde à incorporação de moléculas de baixo peso molecular, como a água, na rede polimérica da matriz, que atua como diluente ou plastificante. Este mecanismo físico leva à diminuição da rigidez e resistência, aumento da elasticidade e diminuição da temperatura de transição vítrea (Weitsman, 2012).

O *swelling* é a mudança do volume devido à humidade e é independente da expansão térmica. A água, quando absorvida por um polímero, tem suas partículas de água ocupando os vazios do material, causando este efeito. Quando é atingido um alto nível de *swelling*, as tensões internas podem instigar microfissuras da matriz e degradação da interfase fibra-matriz, aumentando a entrada de humidade e o

agravamento da sua degradação (Myung Cheon Lee and Peppas, 1993; Weitsman and Guo, 2002, Berens and Hopfenberg, 1978).

Em relação à degradação química, reporta-se o fenómeno de lixiviação, especialmente em temperaturas elevadas, em que a água atua como fluido percolante e promove a extração de resíduos de baixo peso molecular, resultando na aparente perda de peso do polímero (Lee, Rockett and Hoffman, 1992).

A hidrólise acontece pela clivagem da ligação molecular hidrolítica causada pela exposição à humidade, que resulta fragmentos solúveis em água. Este efeito gera danos irreversíveis na matriz polimérica e, conseqüentemente, no material compósito (Pickett and Coyle, 2013).

De forma resumida, a probabilidade de degradação do compósito será cada vez maior quanto mais humidade for absorvida e, conseqüentemente, menos reversível serão as mudanças. Além disso, é mostrado em vários estudos que o meio de imersão afeta o nível de saturação, ou seja, os níveis de saturação são mais altos quando submetidos a água destilada, depois em água doce e por último água salgada (Sena-Cruz, 2021).

Em relação aos efeitos da humidade na matriz polimérica, as resinas de viniléster absorvem menos humidade do que as resinas de poliéster quando imersas em água e conseqüentemente apresentam melhor durabilidade neste ambiente (Liao, Schultheisz and Hunston, 1999; Cabral-Fonseca *et al.*, 2012). Na fase inicial, a absorção de água nos polímeros provoca envelhecimento físico, em especial a *plasticization*, enquanto em longos períodos com exposição à água sofre degradação química por hidrólise (Ghorbel and Valentin, 1993).

No que diz respeito a fibra de vidro, a humidade promove a alteração na sua estrutura molecular, com a extração de iões. Estes iões combinam-se com as moléculas de água, resultando em falhas que diminuem significativamente a sua resistência (Schutte, 1994).

Além disso a humidade afeta quimicamente a ligação entre a fibra e a matriz, diminuindo a sua força. O aumento de volume da matriz, denominado de *swelling*, também resulta em efeitos negativos na interfase e reduz tensões. Além disso a absorção de humidade causa a rotura da ligação entre as fibras e a matriz (Sena-Cruz, 2021).

2.2.3. Efeito de agentes químicos

Os produtos químicos nomeadamente soluções ácidas e alcalinas, combustíveis e lubrificantes podem levar à degradação dos compósitos FRP. Na Engenharia Civil é a degradação devido a soluções de meio alcalino, meio característico pelo alto nível de pH são as consideradas mais críticas (Benmokrane *et al.*, 2001).

Conforme já referido, a matriz tem a função de proteger a fibra de danos ambientais, nomeadamente ataque da solução alcalina e/ou ácidas (Benmokrane *et al.*, 2001). A resina poliéster é uma das mais usadas pelo seu baixo custo e por ter uma boa resistência a ambientes ácidos, porém não é recomendada para ambientes muito alcalinos. Os epóxis têm uma melhor resistência em soluções aquosas, em solventes orgânicos e em ambientes alcalinos. Em conjunto, a resina de vinilester é a melhor opção para ambientes alcalinos por ter maior resistência neste meio, além de ter boa resistência a solução aquosa e a solventes orgânicos (Murphy, 1994; Benmokrane *et al.*, 2001).

As fibras de vidro precisam ser quimicamente melhoradas, porque em ambientes alcalinos são altamente degradadas. Neste contexto existem vários tipos de fibras de vidro, nomeadas a fibra de vidro C (resistência química), a fibra de vidro AR (resistência alcalina) e a fibra de vidro E-CR (usado em ambiente ácidos) ('EN ISO 2078', 1993).

2.2.4. Efeito da radiação UV

A radiação UV afeta em especial a matriz polimérica do compósito, na camada superficial do FRP. Quando esta radiação é absorvida pelo FRP, originam mudanças químicas que induzem alterações nas propriedades físicas, mecânicas e visuais do compósito. As superfícies afetadas pela radiação promovem falhas que auxiliam a entrada da humidade, de efeitos térmicos e outros agentes ambientais, contribuindo para a degradação das propriedades mecânicas dos polímeros. É possível verificar os primeiros sinais de degradação por radiação UV quando o compósito perde a intensidade do brilho, há escamações e amarelamento da superfície (Kaczmarek, 1996; Chin, Martin and Nguyen, 2001).

2.3. Considerações finais

Apesar do conjunto de estudos existentes sobre a durabilidade compósitos FRP, verificam-se lacunas no conhecimento existente, principalmente no que diz respeito ao desempenho deste tipo de materiais sob envelhecimento natural, quando usados compósitos FRP de espessura elevada (típicos na Construção Civil) ou processos de fabrico como é o caso da infusão a vácuo. Outra questão importante que tem de ser abordada a relação entre os efeitos do envelhecimento em condições laboratoriais (envelhecimento acelerado) e condições exteriores (envelhecimento natural). Neste contexto, têm sido desenvolvidos estudos para a correlação entre os efeitos de envelhecimento acelerado e envelhecimento natural (e.g. (Fernandes *et al.*, 2018; Cruz *et al.*, 2021)).

Presentemente, o projeto de investigação DURABLE-FRP (PTDC/ECI-EGC/4609/2020) desenvolvido em parceria entre a Universidade do Minho, o Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, visa também contribuir para o aumento do conhecimento da

durabilidade de compósitos FRP, com especial foque na durabilidade e correlação entre envelhecimento acelerado e envelhecimento natural. A presente dissertação de mestrado encontra-se inserida neste projeto.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Projeto DURABLE-FRP

O programa experimental da presente dissertação de mestrado foi realizado no âmbito do projeto de investigação “DURABLE-FRP: Durabilidade de Compósitos FRP para Estruturas de Engenharia Civil” financiado pela fundação para a ciência e tecnologia (FCT). Este projeto conta com a participação da Universidade do Minho, Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O seu objetivo principal é estudar a durabilidade de compósitos GFRP – perfis e painéis sandwich - aplicados em estruturas de Engenharia Civil para construção nova e reabilitação. O projeto possui um programa experimental extenso, sob condições de envelhecimento acelerado (em laboratório) e envelhecimento natural, que irá proporcionar informações fundamentais para preencher lacunas da literatura, definir modelos de degradação para várias condições ambientais e produzir recomendações de projeto.

No que respeita ao envelhecimento natural, diferentes estações foram estabelecidas em diferentes locais em Portugal, esperado que se atinjam condições específicas de envelhecimento, nomeadamente: (i) níveis mais elevados de carbonatação do betão devido aos níveis de concentração de CO₂, sendo que a estação experimental (lugar onde as amostras de GFRP serão expostas ao ambiente específico) está situada perto do Aeroporto Internacional de Lisboa e de uma auto-estrada crítica - @LNEC (ver Figura 2); (ii) ciclos de congelação-descongelação, uma vez que uma estação experimental está situada Serra da Estrela- @EDP (ver Figura 2); (iii) temperaturas de serviço elevadas e baixa humidade relativa, na estação experimental situada em Elvas - @S&P (ver Figura 2); e (iv) elevada concentração de cloretos e maior humidade relativa, na estação experimental de Viana do Castelo, pela proximidade ao oceano atlântico - @ADPL (ver Figura 2).

No que respeita ao envelhecimento acelerado em laboratório, o projeto contempla envelhecimento sob efeito de (i) temperatura constante de -15 °C, 20 °C, 40 °C e 60°C e (ii) imersão em água desmineralizada a 20 °C, 40 °C e 60°C. Após o envelhecimento acelerado com duração de 6 meses, 12 meses, 2, 5, 10 e 20 anos, a durabilidade do GFRP é avaliada através da sua resposta mecânica, em termos de comportamento à tração uniaxial (a 0° e a 90°), compressão, flexão, corte no plano e corte interlaminar.

A presente dissertação foca-se apenas no estudo do envelhecimento laboratorial, em que se pretende investigar a influencia da humidade e da temperatura na durabilidade dos painéis, que de seguida se detalha.



Figura 2 - Localização das estações experimentais do projeto DURABLE-FRP

3.2. Materiais

Os perfis de GFRP estudados no contexto da presente dissertação foram fornecidos pela empresa *Exel Composites* e foram produzidas por pultrusão. No total foram estudados dois tipos de soluções, perfis de GFRP compostos por fibras de vidro e matriz em vinilester e perfis de GFRP compostos por fibras de vidro e matriz em poliéster insaturado.

Os perfis produzidos por pultrusão tem 900 mm de comprimento, 250 mm de largura e 8 mm de espessura. A caracterização mecânica destes perfis envolveu ensaios (i) de tração a 0° e 90°, (ii) de compressão, (iii) de flexão, (iv) de corte em plano, e, (vi) de corte interlaminar. Foram ainda realizados (vii) ensaios de DMA. Os ensaios foram realizados de acordo com normas cujo detalhe se apresenta nas próximas secções. Na Figura 3 ilustra-se o *layout* adotado para a extração dos provetes (normalizados) necessários às caracterizações supracitadas. A geometria dos provetes apresenta-se na Tabela 3. A extração dos provetes realizou-se com recurso a jato de água.

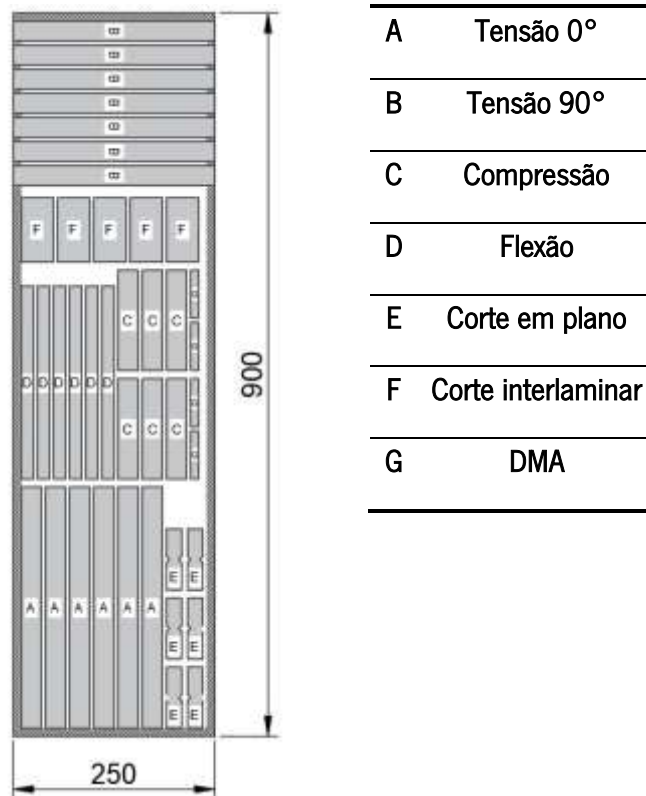


Figura 3 - Layout adotado para a extração das amostras necessárias à caracterização mecânica das placas em estudo (cotas em milímetros)

Tabela 3 - Geometria dos provetes

Tipo de ensaio	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Tração 0°	8	25	300
Tração 90°	8	25	250
Compressão	8	25	125
Flexão	8	15	240
Corte no plano	8	20	76
Corte Interlaminar	8	40	80
DMA	8	10	60

3.3. Programa experimental

O programa experimental envolveu (i) dois tipos de materiais distintos, i.e. compósitos, GFRP produzidos com matriz poliéster insaturado e matriz viniléster, (ii) provetes não envelhecidos e, (iii) provetes sob o efeito de envelhecimento acelerado durante 6 meses. No total, foram considerados cinco ambientes de envelhecimento acelerado, a saber: (i) provetes submetidos a uma temperatura de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T-15); (ii) provetes submetidos a uma temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T20), considerados de referência; (iii) provetes submetidos a uma temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T40); (iv) provetes submetidos a uma temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T60); e, (v) os provetes imersos em água destilada a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura (W60). Neste último ambiente, uma parte dos provetes foram ensaiados saturados (W60 S) e a outra parte, depois de retirados do ambiente de envelhecimento (W60), os provetes foram mantidos num ambiente de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ / 55% de humidade relativa até terem atingido massa contante (W60 D).

Tal como referido anteriormente, a caracterização mecânica envolveu 6 tipos de ensaios distintos (ver secção anterior): (i, ii) tração a 0° e 90° , (iii) compressão, (iv) flexão, (v) corte no plano, e (vi) de corte interlaminar. De referir que, os ensaios DMA não foram incluídos no contexto do presente trabalho devido a problemas técnicos no equipamento. Realizaram-se ainda ensaios de calcinação tanto aos provetes de referência, como aos provetes sujeitos ao envelhecimento laboratorial.

No que se segue, detalham-se os protocolos de ensaio adotados.

3.3.1. Ensaio de caracterização física

Com o objetivo de estimar a quantidade de fibras que constituem as placas de viniléster (VE) e poliéster insaturado (UP), foram realizados ensaios de calcinação. Este tipo de ensaio é realizado para eliminar a totalidade da matriz nas amostras de modo a ficarem apenas fibras de vidro. Para tal propósito, foram utilizados recipientes (copos) de barro, que resistem a elevadas temperaturas sem comprometer as amostras (ver Figura 4). O ensaio foi feito a oito amostras com dimensões de $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ (ver Figura 5), quatro de UP e quatro de VE.

Primeiro, foram inseridos os recipientes com os provetes numa estufa com a temperatura a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 22 horas, conforme se ilustra na Figura 6. Após esse período, foram medidas as suas dimensões (comprimento, largura e espessura) e, depois, foi determinada a massa com recurso a balança de elevada precisão: os recipientes, as amostras, e os recipientes com as amostras.



Figura 4 - Recipiente de barro com provete de UP no ensaio de calcinação



Figura 5 - Provete UP utilizado no ensaio de calcinação

Seguiu-se o ensaio de calcinação, em que as oito amostras foram submetidas a temperatura elevada (600 °C) durante oito horas (ver Figura 7). Depois, após um período de arrefecimento de 2 dias, os provetes foram pesados, com e sem os recipientes e ficaram como mostram as Figura 8 e Figura 9.

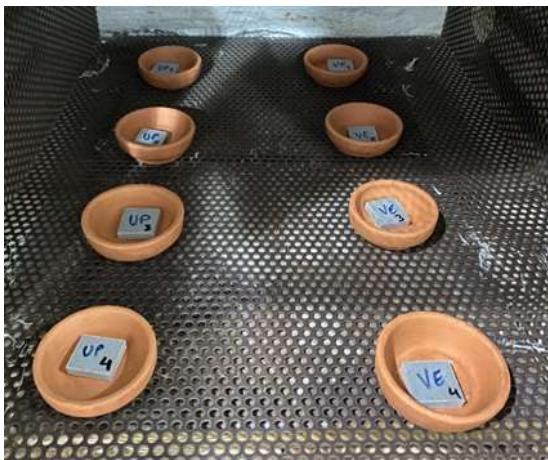


Figura 6 - Amostras nos recipientes antes da calcinação



Figura 7 - Amostras nos recipientes depois da calcinação



Figura 8 - Amostra de resina de UP



Figura 9 - Amostra de resina de VE

3.3.1. Ensaios de caracterização mecânica

3.3.1.1. Ensaio de tração a 0° e a 90°

Os ensaios de tração realizaram-se em conformidade com a norma ISO 527. A caracterização inicial envolveu dois tipos de ensaios, tração com fibras a 0° e a 90°. Foi utilizado o provete tipo “A” para o ensaio da tensão a 0° e o provete tipo “B” para o ensaio a tensão a 90° (ver Figura 3) cujas dimensões foram definidas pelas normas ISO 527-1, *Plastics - Determination of tensile properties. - Part 1: General principles* e ISO 527-4, *Plastics - Determination of tensile properties. - Part 4: Test conditions for isotropic fibre-reinforced plastic composites* ('EN ISO 527-4', 1997). Segundo estas, deve realizar-se um ensaio de tração em controlo da deformação à velocidade de 2 mm/min. Tendo em conta a espessura da amostra (8 mm), o tipo de espécie (classificado como tipo 2) e o tipo de material (classificado como *glass-fibre systems*), adotou-se a recomendação da norma em utilizar uma distância entre pinças igual a 150 mm e um comprimento para quantificar as extensões com recurso a vídeo extensómetro igual a 50 mm. Na Tabela 4 apresentam-se as características principais do ensaio de tração e na Figura 10 é apresentada a geometria do provete.

Tabela 4 - Informações da norma para o ensaio de tração

Tipo de teste	glass-fibre systems
Frequência de aquisição	5 Hz
Velocidade do teste	2 mm/min
Tipo de espécie	Tipo 2
Distancia entre pinças (L)	150 mm
Comprimento do medidor (L_0)	50 mm

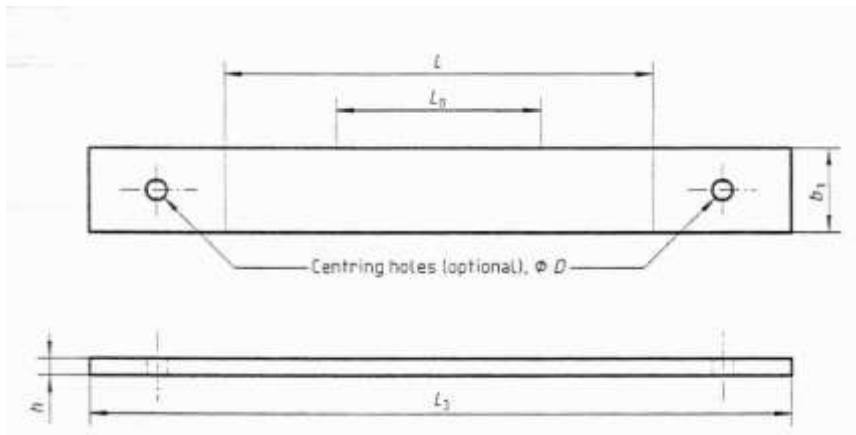


Figura 10 - Geometria do provete utilizado nos ensaios de tração uniaxial ('EN ISO 527-4', 1997)

Antes da execução dos ensaios foi também desenvolvido um protocolo de ensaio com o conjunto de tarefas a efetuar. Assim, os 6 provetes com resina UP e 6 provetes com resina de VE foram devidamente identificados com recurso a uma nomenclatura adequada. Depois foi necessário lixar superficialmente a região central do provete para que a luz do equipamento de vídeo-extensometria não fosse refletida e, conseqüentemente comprometesse a leitura das extensões. Com os provetes lixados, marcaram-se três linhas de referência para medir a deformação do provete (ver Figura 11 e Figura 12). Por fim, foi medida a largura e a espessura nas duas extremidades e no centro do provete, e depois este foi pesado. Este processo foi repetido para todos os provetes

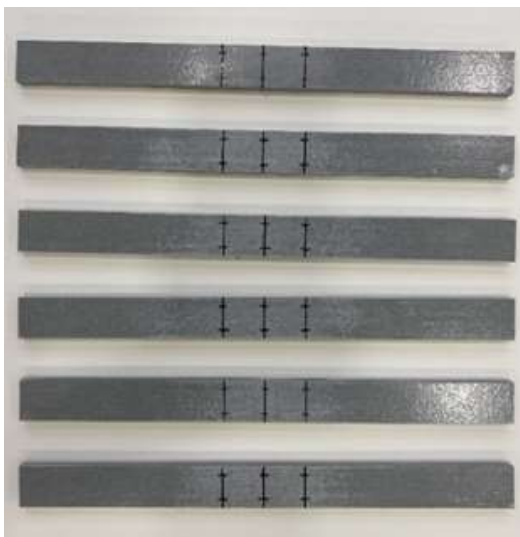


Figura 11 - Linhas de referência no provete nos ensaios de tração

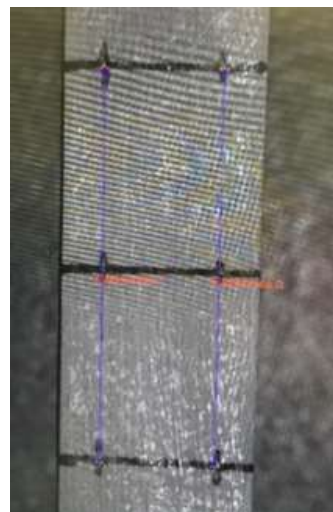


Figura 12 - Marcação para as leituras com recurso a vídeo extensómetro nos ensaios de tração

O ensaio também foi realizado na máquina de testes universal, MTS Exceed E45.104. Na Figura 13 é apresentada a foto do ensaio de tração. A instrumentação do ensaio contou com o sensor de deslocamento, célula de carga interna e o vídeo extensómetro da máquina.



Figura 13 - Ensaio de tração uniaxial

3.3.1.2. Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão realizaram-se de acordo com a ISO 14126:1999, tendo sido adotado o provete tipo “C” (ver Figura 3) (‘EN ISO 14126’, 1999). Segundo esta norma, deve-se realizar um ensaio de compressão em controlo da deformação, à velocidade de $1 \text{ mm/min} \pm 0.5 \text{ mm/min}$. Tendo em conta a espessura da amostra (8 mm), o tipo de material (classificado como glass-fibre systems), tipo de teste (classificado como tipo “B2”) e o método de ensaio (classificado com método 2), adota-se a recomendação da norma de utilizar uma distância entre pinças igual a 25 mm. Na Tabela 5 apresentam-se as características principais do ensaio de compressão, e na Figura 14 é apresentada a geometria do provete.

Tabela 5 - Informações da norma para o ensaio de compressão

Material	Glass-fibre systems
Tipo de teste	Tipo B2
Frequência de aquisição	5 Hz
Velocidade do teste	1 mm/min \pm 0.5 mm/min
Método de teste	Método 2
Distancia entre pinças	25 mm

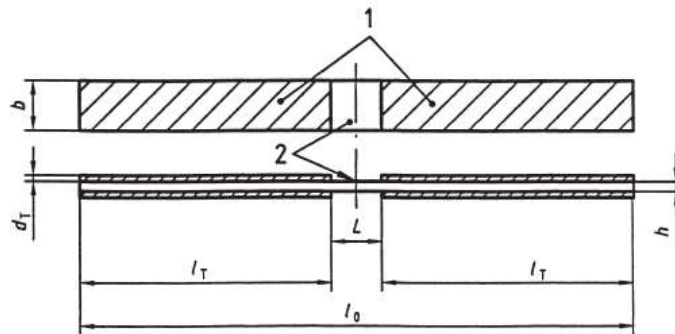


Figura 14 - Geometria do provete utilizado nos ensaios de compressão ('EN ISO 14126', 1999)

Antes do início do ensaio também se procedeu ao desenvolvimento de um protocolo com o conjunto de tarefas a efetuar. Assim, após identificação própria de cada provete, marcou-se quatro pontos para que o vídeo-extensómetro pudesse medir a deformação do provete na região central (ver Figura 15 e Figura 16). Os pontos têm uma distância entre eles de 2 mm ao longo do comprimento e de 1,5 mm ao longo da largura. Por fim, foi medida a largura e a espessura nas duas extremidades e no centro do provete e depois este foi pesado. Este processo foi repetido para todos os provetes.



Figura 15 - Marcação dos pontos do ensaio de compressão na zona central para medição das extensões

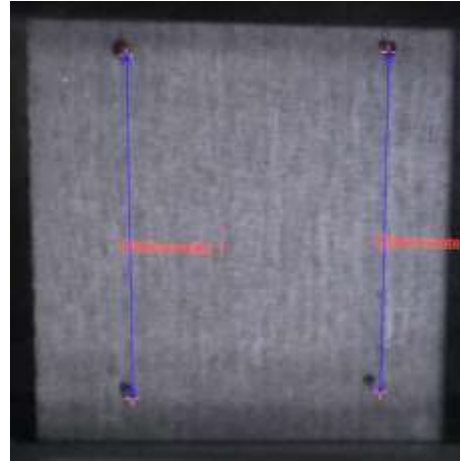


Figura 16 - Extensões consideradas pelo vídeo extensómetro no ensaio de compressão

O ensaio também foi realizado na máquina de testes universal, MTS Exceed E45.104, porém por ter uma capacidade de carga de 100 kN, foi necessário a utilização de uma outra máquina de ensaios universal com maior capacidade (300 kN) para levar os provetes à rotura. Na Figura 17 e Figura 18 são apresentadas duas fotos dos ensaios de compressão. A instrumentação do ensaio contou com o vídeo extensómetro da máquina para o registo das extensões para o nível de carga inicial, o sensor de deslocamento e célula de carga interna das duas máquinas.



Figura 17 – Máquina MTS para a realização do ensaio de compressão (apenas para a determinação do módulo de elasticidade)

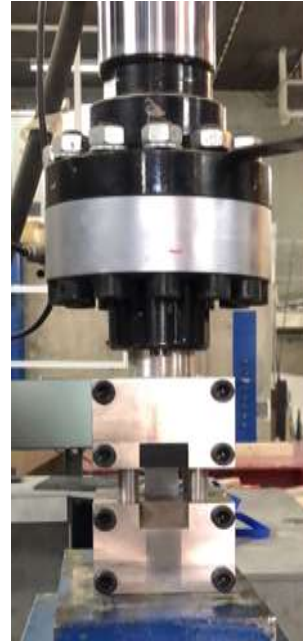


Figura 18 – Máquina universal para a realização do ensaio de compressão à rotura

3.3.1.3. Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão foram realizados em conformidade de com a norma ISO 14125:1998, provete tipo “D” (ver Figura 3) (‘EN ISO 14125’, 1998). Segundo esta norma, deve realizar-se um ensaio de flexão com três pontos, em controlo de deslocamento, à velocidade de 5 mm/min. Tendo em conta a espessura da amostra (8 mm) e o tipo de material (classificado como de classe 3), adotou-se a recomendação da norma em se utilizar um comprimento de vão livre igual a 160 mm. Na Tabela 6 apresentam-se as principais características do ensaio de flexão e na Figura 19 é apresentada a configuração de ensaio. Note-se que os apoios, cilíndricos, também têm as dimensões recomendadas pela norma, isto é, um raio igual a 5 mm.

Tabela 6 – Principais características do ensaio de flexão

Material	Classe 3 (glass-fibre systems)
Tipo de teste	Teste de flexão com 3 pontos
Frequência de aquisição	5 Hz
Velocidade do teste	5 mm/min
Dimensão R1 e R2	5 mm
Comprimento do vão livre	160 mm

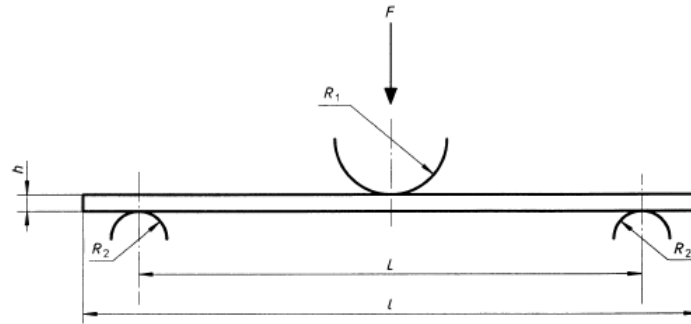


Figura 19 - Configuração do ensaio de flexão ('EN ISO 14125', 1998)

Para realização destes ensaios desenvolveu-se um protocolo de ensaio com o conjunto de tarefas a efetuar, de forma a minimizar potenciais os erros. Assim, antes do início do teste, os 6 provetes com resina de UP e 6 provetes com resina de VE foram identificados segundo uma etiqueta própria (ver Figura 20 e Figura 21). Depois marcaram-se três linhas de referência para indicar a localização dos suportes e do meio vão. Por fim, foi medida a largura e a espessura nas três secções marcadas do provete (linhas de referência) e depois os provetes foram pesados. Este processo foi repetido para todos os provetes.

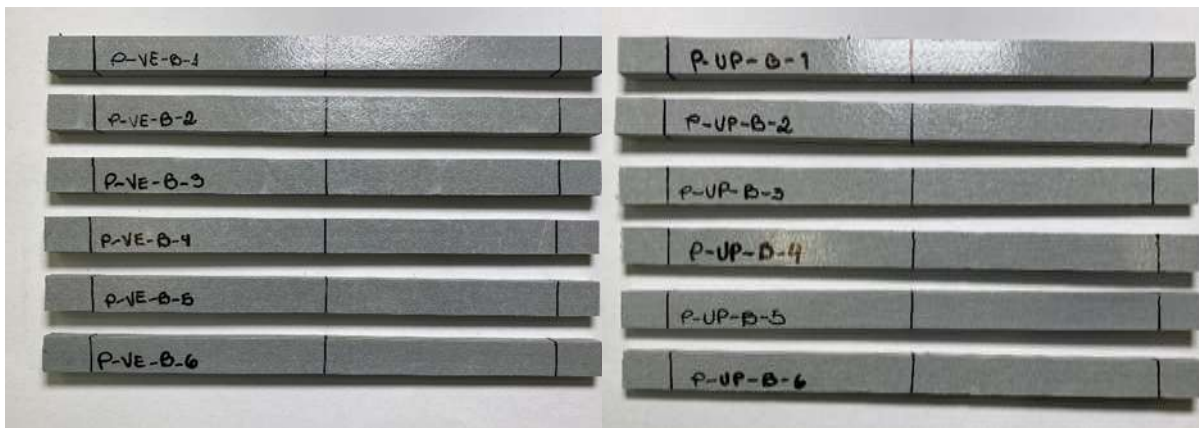


Figura 20 - Marcação em provetes de matriz de VE para os ensaios de flexão

Figura 21 - Marcação em provetes de matriz de UP para os ensaios de flexão

O ensaio foi realizado na máquina de universal de ensaios, MTS Exceed E45.104, com capacidade de carga máxima de 100 kN. Na Figura 22 é apresentada uma foto do equipamento de ensaio, enquanto na Figura 23 é apresentada uma foto do ensaio de flexão. A instrumentação do ensaio contou apenas com o sensor de deslocamento e célula de carga internos da máquina.



Figura 22 – Equipamento de ensaio MTS Exceed E45.104



Figura 23 – Ensaio de flexão

3.3.1.4. Ensaio de corte no plano

Os ensaios de corte no plano realizaram-se em conformidade com a ASTM D5379. Neste ensaio utilizou-se o provete tipo “E” (ver Figura 3) (‘ASTM D5379’, 2005). Segundo esta norma, deve realizar-se um ensaio de flexão com controlo da deformação, à velocidade de 2 mm/min. Tendo em conta a espessura da amostra (8 mm), o tipo de material (classificado como *glass-fiber systems*), adota-se a recomendação da norma de utilizar uma largura no centro com 12 mm. Na Tabela 7 apresentam-se as características principais do ensaio do corte no plano e nas Figura 24 e Figura 25 apresentam, respetivamente, a geometria do provete adotada e a configuração de ensaio.

Tabela 7 - Informações da norma para o ensaio de corte no plano

Material	Glass-fibre systems
Frequência de aquisição	5 Hz
Velocidade do teste	2 mm/min
d_2	4 mm
Largura no centro (w)	12 mm

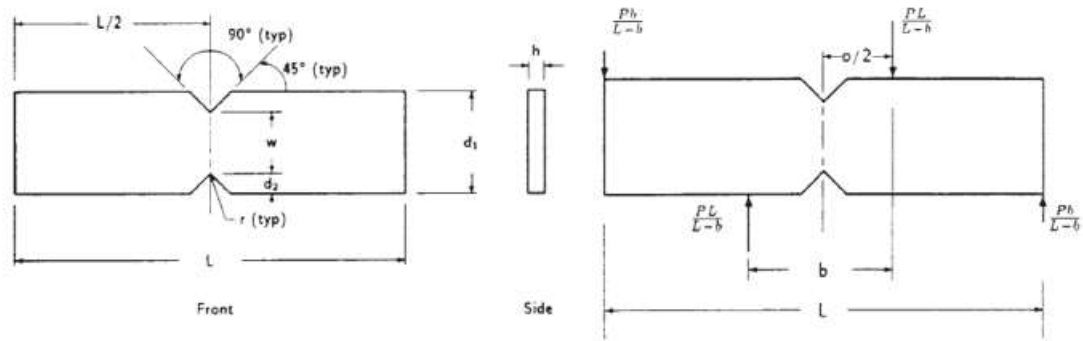


Figura 24 - Geometria do provete utilizado nos ensaios de corte no plano ('ASTM D5379', 2005)

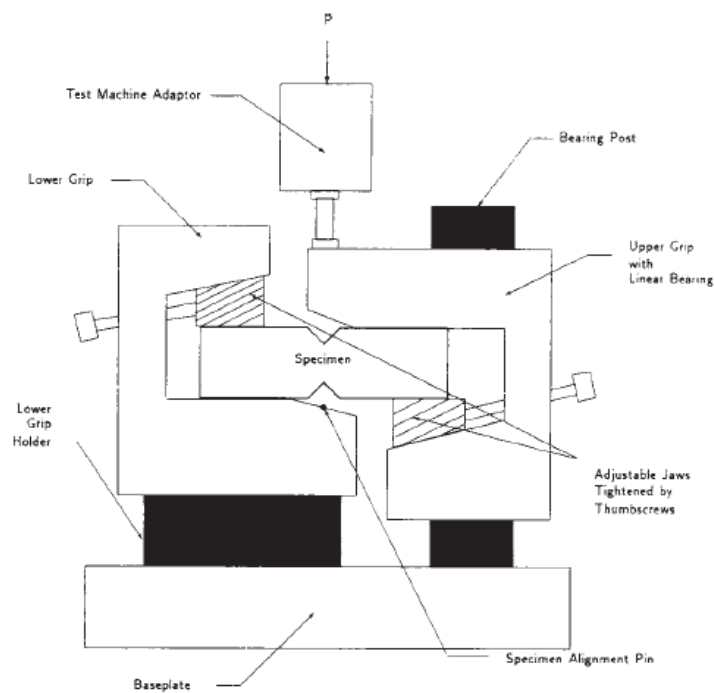


Figura 25 – Configuração de ensaio de corte no plano ('ASTM D5379', 2005)

Antes do início dos ensaios de corte no plano também se desenvolveu um protocolo de ensaio. Assim, foi necessário lixar o provete na região onde as leituras por vídeo extensômetro se iriam processar. Com os provetes lixados, marca-se quatro pontos para o extensômetro medir a deformação do provete na região de interesse (ver Figura 26 e Figura 27). Os pontos têm uma distância de 6 mm entre eles. Por fim, foi medida a largura e a espessura nas extremidades e no meio do provete e depois este foi pesado. Este processo foi repetido para todos os provetes

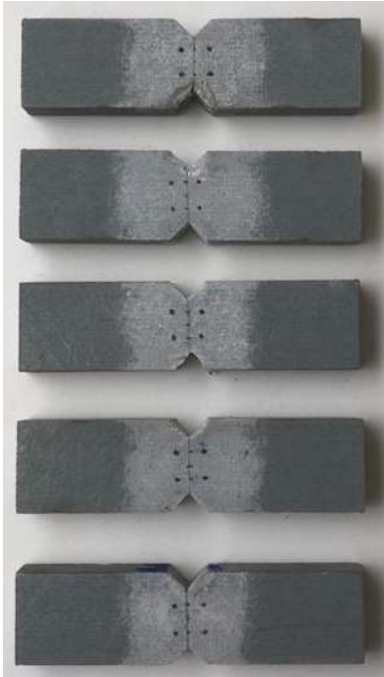


Figura 26 - Marcação dos pontos para a medição das extensões no ensaio de corte no plano

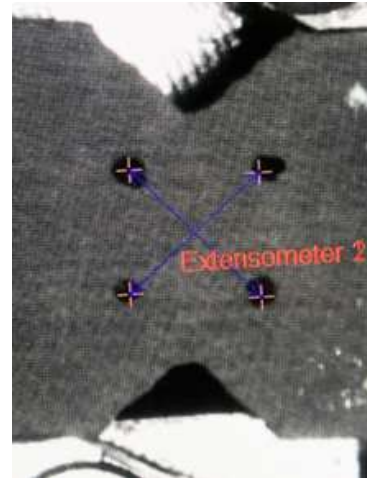


Figura 27 – Medição das extensões com recurso a vídeo extensómetro no ensaio de corte no plano

O ensaio também foi realizado na máquina de testes universal, MTS Exceed E45.104. Na Figura 28 representa o ensaio do corte no plano. A instrumentação do ensaio contou com o sensor de deslocamento, célula de carga interna e o vídeo extensómetro.



Figura 28 - Ensaio do corte no plano

3.3.1.5. Ensaio de corte interlaminar

O ensaio de corte interlaminar foi realizado de acordo com a norma ISO 14130:1997 ('EN ISO 14130', 1997). Neste ensaio, usou-se o provete tipo F tendo-se adotado um comprimento de vão livre igual a 40 mm (ver Figura 3). Na Tabela 8 apresentam-se as características principais do ensaio do corte interlaminar, enquanto que na Figura 29 (suportes), como se indica na Figura 29 e Tabela 8.

Tabela 8 - Características principais do ensaio de corte interlaminar

Material	Glass-fiber systems
Frequência de aquisição	5 Hz
Velocidade do teste	1 mm/min \pm 0.2 mm/min
Dimensão R1	5 mm
Dimensão R2	2 mm
Comprimento do vão livre	40 mm

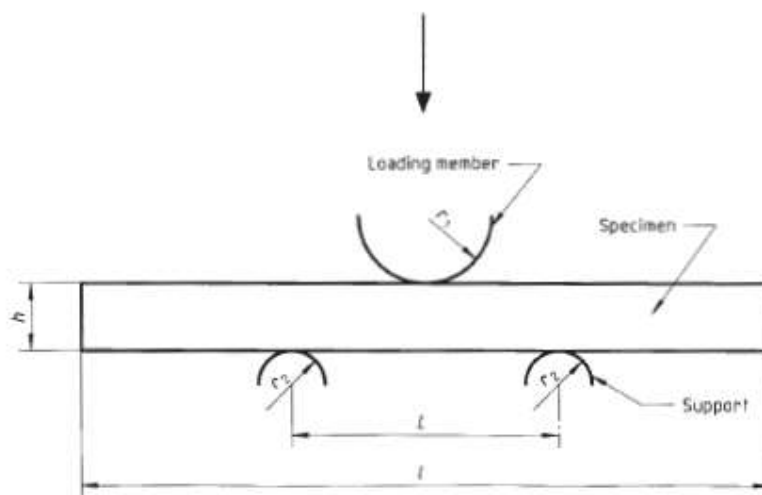


Figura 29 – Configuração do ensaio de corte interlaminar ('EN ISO 14130', 1997, p. 14130)

Para este ensaio também foi desenvolvido um protocolo com o conjunto de tarefas a efetuar de modo a minimizar os erros durante a execução dos mesmos. Assim, antes do início do ensaio, os 5 provetes com resina de UP e 5 provetes com resina de VE foram identificados (ver Figura 30). Depois marcou-se três linhas de referência, para indicar a localização dos suportes e do meio vão. Por fim, foi medida a largura e a espessura nas três secções marcadas do provete (linhas de referência) e depois foi pesado. Este processo é repetido para todos os provetes.

O ensaio também foi realizado na máquina de testes universal, MTS Exceed E45.104. Na Figura 31 é apresentada uma foto do ensaio do corte interlaminar. A instrumentação do ensaio contou apenas com o sensor de deslocamento e célula de carga interna da máquina.

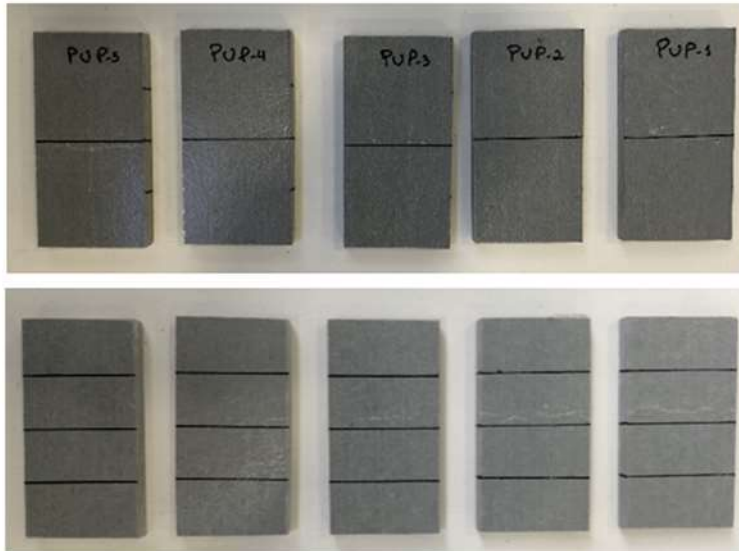


Figura 30 - Marcação dos provetes para os ensaios de corte interlaminar



Figura 31 - Ensaio de corte interlaminar

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. Propriedades Físicas

Tal como referido anteriormente, com o objetivo de se estimar a percentagem de fibra de vidro nas placas de compósitos com matriz de poliéster insaturado (UP) e viniléster (VE), utilizou-se a norma ISO 1172:1996 ('EN ISO 1172', 1996). Os principais resultados obtidos encontram-se nas Tabela 10 e Tabela 11. Antes dos ensaios de calcinação foi determinada a massa os recipientes (copos) sem os provetes (M_1), a massa dos provetes (M_2), e a massa dos recipientes com os provetes (M_3) e após os ensaios de calcinação, determinou-se a massa dos recipientes com os provetes (M_4) e os recipientes (M_5) (ver Tabela 9). No Anexo I incluem-se detalhes adicionais, como sejam as dimensões de cada provete ensaiado.

Tabela 9 - Nomenclatura utilizada nos ensaios de calcinação

	M_1 : Massa dos recipientes sem provete
Antes dos ensaios de calcinação	M_2 : Massa dos provetes
	M_3 : Massa dos recipientes com provetes
Depois dos ensaios de calcinação	M_4 : Massa dos recipientes com provetes
	M_5 : Massa dos recipientes

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de calcinação nos provetes com matriz de UP e VE

Resina	Provete	M_1 [g]	M_2 [g]	M_3 [g]	M_4 [g]	M_5 [g]
UP	P-UP-1	77,19	11,83	89,00	84,24	76,97
	P-UP-2	90,03	11,32	101,33	96,13	89,79
	P-UP-3	94,86	14,09	108,93	103,40	94,69
	P-UP-4	76,25	11,77	88,00	83,27	76,14
VE	P-VE-1	81,66	12,59	94,23	89,91	81,44
	P-VE-2	80,41	12,86	93,25	87,99	80,18
	P-VE-3	89,27	12,41	101,67	97,09	89,10
	P-VE-4	91,22	14,20	105,39	100,33	91,07

Com base nos resultados obtidos, foi utilizada a seguinte fórmula ('EN ISO 1172', 1996) para calcular a percentagem de fibra de vidro (M_{glass}) existente em cada provete:

$$M_{glass} = \frac{M_4 - M_1}{M_3 - M_1} \cdot 100$$

Tabela 11 - Percentagem de fibras nos provetes com matriz de UP e VE

Resina	Espécies ID	M_{glass} [%]
UP	P-UP-1	59,70%
	P-UP-2	53,98%
	P-UP-3	60,70%
	P-UP-4	59,74%
	Média	58,53%
	Coefficiente de variação	3,9%
VE	P-VE-1	65,63%
	P-VE-2	59,03%
	P-VE-3	63,06%
	P-VE-4	64,29%
	Média	63,01%
	Coefficiente de variação	3,2%

Assim, pode concluir-se que os compósitos estudados apresentam cerca de 60% de teor em fibra de vidro (em massa), particularizando, 59% e 63% no caso dos compósitos com resina de poliéster insaturado e com resina de viniléster, respetivamente.

Adicionalmente, a partir destes ensaios foi também observada a arquitetura de fibras, que neste caso é composta por sete camadas: (i) quatro camadas com as fibras de vidro distribuídas aleatoriamente (*chopped strand mat*) e três camadas com fibras na direção da pultrusão (*roving*), como se ilustra na Figura 32 e na Figura 33.



Figura 32 - Camadas de fibras de vidro que compõem o compósito com resina UP



Figura 33 - Camadas de fibras de vidro que compõem o compósito com resina VE

4.2. Propriedades mecânicas

4.2.1. Tração uniaxial - 0°

Os resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial a 0°, nomeadamente o módulo de elasticidade (**E**), tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$), extensão para a força máxima ($\epsilon_{fm\acute{a}x}$), e os modos de rotura, são apresentados nas Tabela 12 e Tabela 13 para provetes com resina poliéster insaturado (UP) e provetes com resina viniléster (VE), respetivamente. A Figura 34 e Figura 36 apresentam as curvas médias da relação entre a tensão e a extensão por serie dos ensaios para provetes com resina UP e provetes com resina VE, respetivamente. Nos ANEXOS II e III é disponibilizada informação mais detalhada dos ensaios de tração, que inclui as fotos dos modos de rotura dos provetes.

Tabela 12 - Resultados nos ensaios de tração uniaxial 0° dos provetes com resina UP

Série	E [GPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_{f m\acute{a}x}$ [%]	Modos de Rotura ⁽¹⁾
Referência	29,34 (6,4%)	422,97 (1,0%)	1,50 (8,6%)	XGM (5)
W60 S	29,95 (8,8%)	210,04 (5,8%)	0,72 (5,3%)	XGM (3); DGM (3)
W60 D	32,87 (4,2%)	266,92 (6,4%)	0,91 (9,7%)	XGM (5)
T-15	25,35 (17,2%)	378,48 (1,5%)	1,43 (4,6%)	XGM (5)
T20	35,20 (2,6%)	389,88 (4,0%)	1,34 (3,9%)	XGM (5)
T40	35,41 (6,5%)	398,72 (2,4%)	1,38 (3,4%)	XGM (5)
T60	28,05 (9,0%)	392,47 (1,5%)	1,48 (3,3%)	XGM (5)

Nota: Os valores em percentagem apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação; ⁽¹⁾ Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado

Tendo por base os valores acima referidos é possível comparar os ambientes envelhecidos com o ambiente de referência e observa-se que todos tiveram uma diminuição da tensão máxima. O ambiente que levou à maior redução de resistência foi o de imersão em água destilada (W60 S), com uma redução de 50.34% do valor de referência e o ambiente com menor variação foi o T40 com uma redução de 5.73% do valor de referência. Portanto, depois da referência, o ambiente com 40°C é o que possui maior resistência com uma média de 398.88 MPa, em seguida o ambiente com 60°C com 392.47 MPa, depois o ambiente com 20°C com 389.88 MPa, posteriormente estão os ambientes com -15°C, W60 D e W60 S com 378.48 MPa, 266.92 MPa e 210.04 MPa, respetivamente.

Verifica-se uma maior degradação nas séries W60 S e W60 D, enquanto os restantes não obtiveram uma perda significativa na resistência (ver Figura 34). Verifica-se também um aumento na rigidez nas séries

T20 e T40 e uma diminuição nos ambientes T-15 e T60, contudo, devido ao facto de se tratar de uma pequena variação, poderá ser negligenciado.

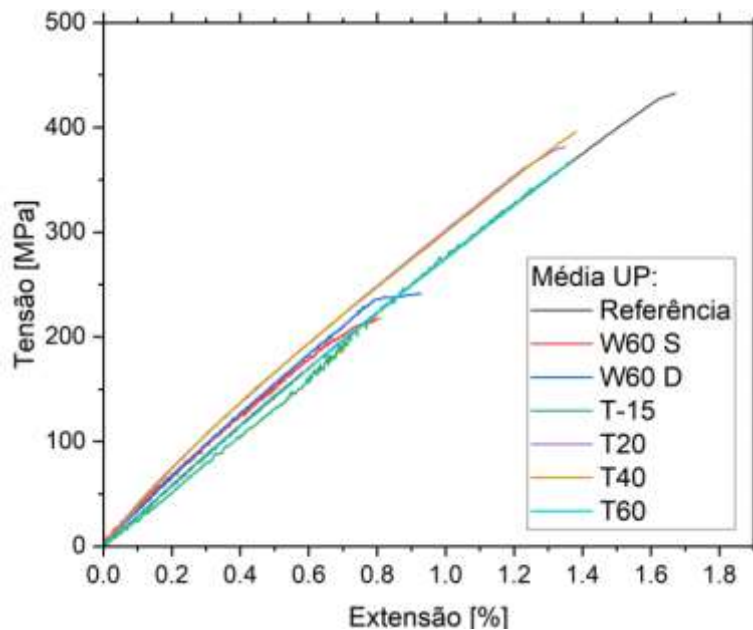


Figura 34 - Tensão versus extensão (curva média por série) de ensaios de tração uniaxial a 0° aos provetes de GFRP com resina UP

Como a norma utilizada para realizar os testes da presente dissertação, ISO 527, não caracteriza as diferentes formas de rotura dos provetes, usou-se a norma ASTM D3039/D3039M ('ASTM D3039/D3039M', 2002) para avaliá-los devido à similaridade dos parâmetros. Assim, a Figura 35 mostra estes possíveis tipos e rotura. Para este ensaio, a maioria dos provetes obteve a rotura XGM que, de acordo com a norma ASTM D3039/D3039M, significa rotura explosiva localizada no meio do provete, porém ocorreu no ambiente W60 S 3 modos de rotura DGM, que correspondem à rotura na lateral do

rovete. Novamente, verifica-se uma alteração do modo de rotura na série exposta ao ambiente hidrotérmico W60 S, que comprova a maior fragilidade destes compósitos ao ambiente em causa.

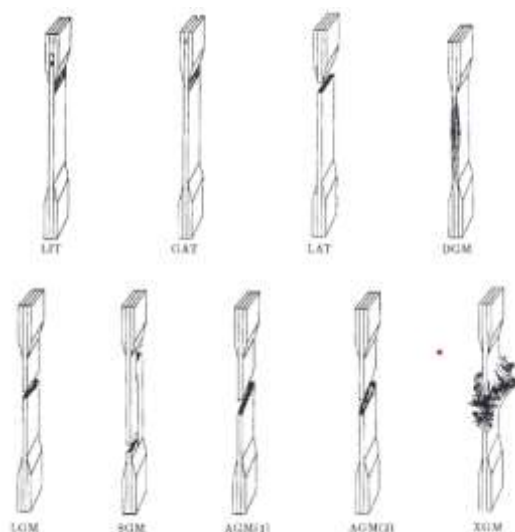


Figura 35 Possíveis modos de rotura nos ensaios de tração ('ASTM D3039/D3039M', 2002)

Tabela 13 - Resultados nos ensaios de tração uniaxial 0° dos provetes com resina VE

Série	E [GPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_{fm\acute{a}x}$ [%]	Modos de Rotura ⁽¹⁾
Referência	33,65 (3,1%)	456,41 (1,7%)	1,45 (0,6%)	XGM (6)
W60 S	36,35 (5,8%)	311,49 (13,3%)	0,94 (15,0%)	XGM (6)
W60 D	37,39 (4,9%)	340,94 (4,4%)	1,04 (9,7%)	XGM (4); DGM (4)
T-15	32,32 (10,5%)	403,25 (3,4%)	1,33 (4,2%)	XGM (6)
T20	38,20 (2,5%)	410,33 (2,9%)	1,26 (2,7%)	XGM (6)
T40	40,49 (3,4%)	410,67 (4,5%)	1,20 (2,8%)	XGM (6)
T60	33,32 (3,4%)	408,40 (4,2%)	1,33 (4,7%)	XGM (6)

Nota: Os valores em percentagem apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação; ⁽¹⁾ Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado

Tendo por base os valores acima referidos é possível comparar os ambientes envelhecidos com o ambiente de referência e observa-se que todos tiveram uma diminuição da tensão máxima. O ambiente que mais teve esse decréscimo foi o W60 S, com uma redução de 31.75% do valor de referência e o ambiente com menor variação foi o T40 com uma redução de 10.02% do valor de referência. Portanto, depois da referência, o ambiente com 40°C é o que possui maior resistência com uma média de 410.67 MPa, em seguida o ambiente com 20°C com 410.33 MPa, depois o ambiente com 60°C com 408.4 MPa, posteriormente estão os ambientes com -15°C, W60 D e W60 S com 403.25 MPa, 340.94 MPa e 311.49 MPa, respetivamente.

De uma forma geral observa-se as mesmas variações que nos provetes com resina UP, isto é, degradação significativa nas séries W60 S e W60 D, e variações mínimas nas restantes séries (ver Figura 36).

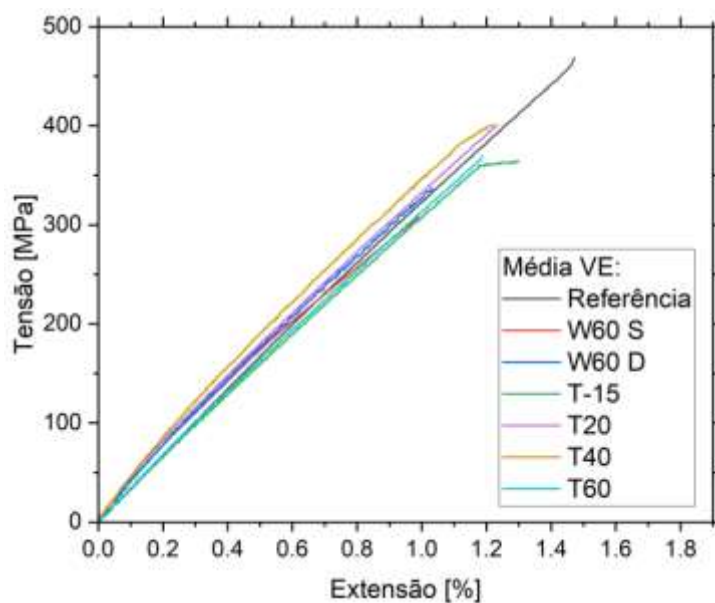


Figura 36 - Tensão versus extensão (curva média por série) de ensaios de tração uniaxial a 0° aos provetes de GFRP com resina VE

Da mesma forma usa-se a norma ASTM D3039/D3039M para avaliar os modos de rotura e verifica-se que a maioria dos provetes apresenta a rotura XGM, explosiva localizada no meio do provete. No entanto, no ambiente W60D os modos de rotura foram 4 XGM e 2 DGM, que também comprova uma maior fragilidade destes compósitos (VE) ao ambiente em causa.

São apresentadas em seguida várias figuras com a tensão de tração *versus* extensão a meio vão (curva média por série) para os diferentes ambientes, com o objetivo de facilitar a comparação entre os compósitos com matriz em poliéster insaturado (UP) e viniléster (VE). Assim, a Figura 37, Figura 38,

Figura 39 e Figura 40 apresentam a comparação para as séries de referência, W60 S e W60 D, T15 e T20, e T40 e T60, respectivamente.

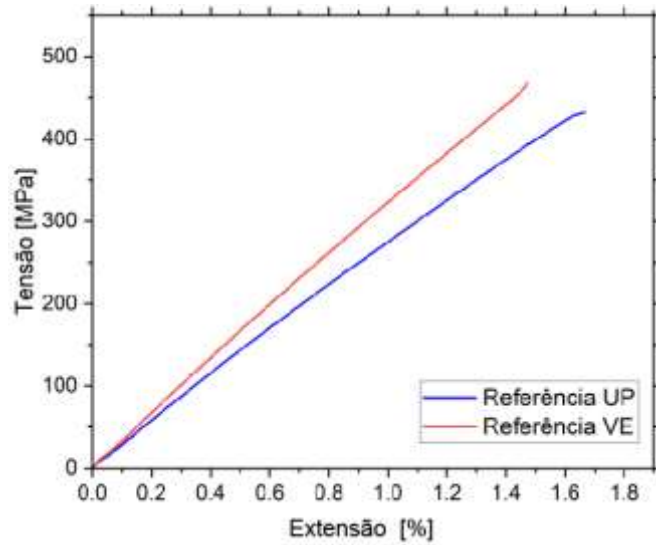


Figura 37 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 0° aos provetes de referência de GFRP com resina VE e UP

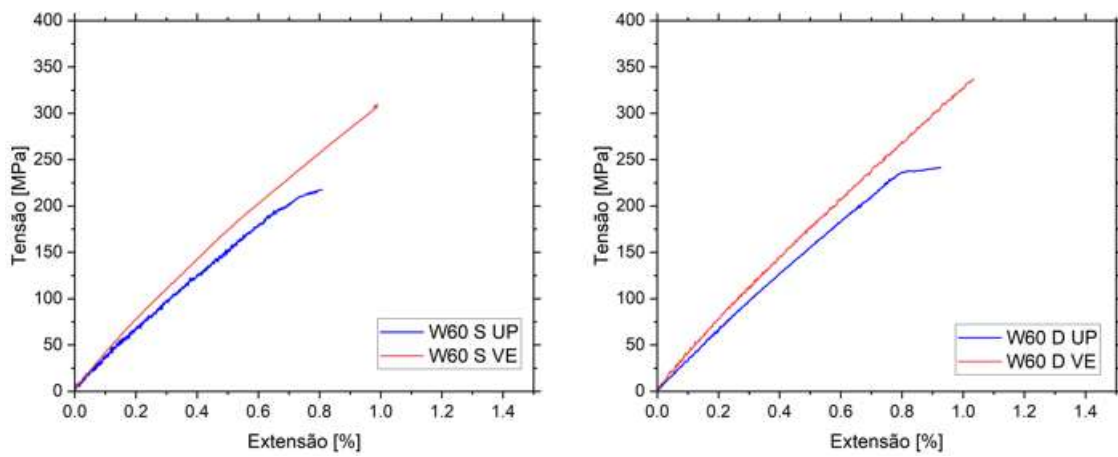


Figura 38 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 0° aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP

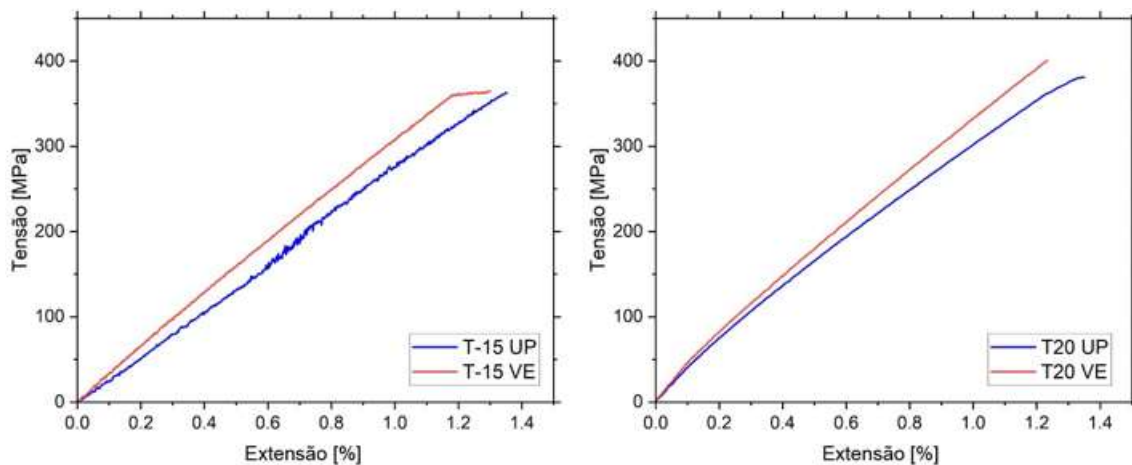


Figura 39 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 0° aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP

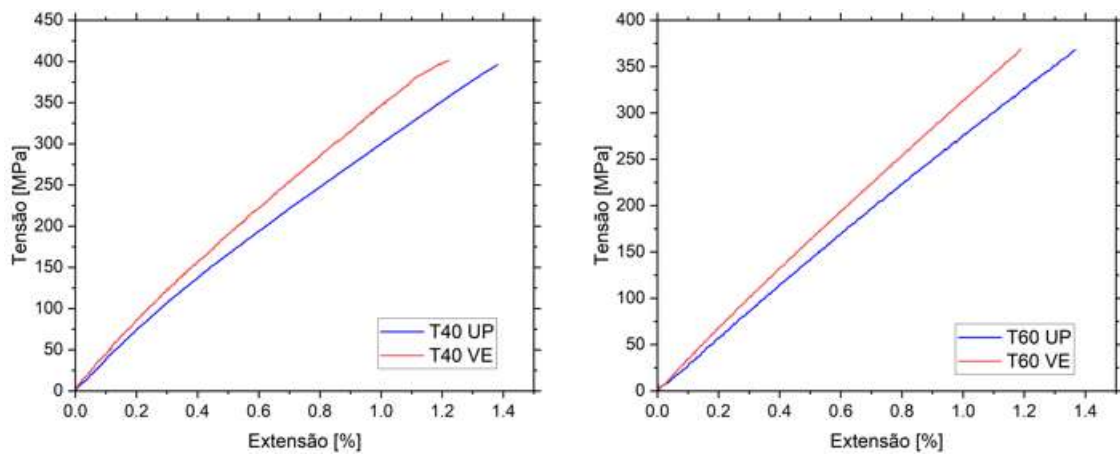


Figura 40 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 0° aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP

A partir dos gráficos apresentados acima (ver Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Figura 40), nota-se que a resina viniléster mantém maior resistência e rigidez do que a resina poliéster insaturado. Assim, tal como referido anteriormente nos ensaios de flexão e corte interlaminar, o compósito com resina VE apresenta superior comportamento mecânico. Tal como referido anteriormente, será também de referir que os provetes com resina VE apresentam maior teor em fibras, que também contribui para um melhor comportamento destes, por comparação com os provetes com resina UP.

4.2.2. Tração uniaxial - 90°

Os resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial a 90°, nomeadamente os modos de rotura, o módulo de elasticidade (E), tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$), e deformação para a força máxima ($\epsilon_{fm\acute{a}x}$) são apresentados nas Tabela 14 e Tabela 15 para provetes com resina poliéster insaturado (UP) e provetes com resina viniléster (VE), respetivamente. A Figura 41 e Figura 42 apresentam a relação entre a tensão e a deformação vertical médio por serie de ensaios para provetes com resina UP e provetes com resina VE, respetivamente. Nos ANEXOS I e II é disponibilizada informação mais detalhada dos ensaios de flexão, que inclui as fotos dos modos de rotura dos provetes.

Tabela 14 - Resultados nos ensaios de tração uniaxial 90° dos provetes com resina UP

Série	E [GPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_{fm\acute{a}x}$ [%]	Modos de Rotura ⁽¹⁾
Referência	5,95 (7,6%)	54,80 (4,4%)	1,45 (12,2%)	LAT (1); LGM (2); AGM (3)
W60 S	5,58 (3,3%)	37,27 (3,7%)	0,91 (6,1%)	LGM (4); AGM (1)
W60 D	5,88 (1,8%)	38,66 (3,1%)	0,99 (6,4%)	LAT (3); LGM (2)
T-15	5,34 (5,2%)	53,03 (3,7%)	1,53 (2,7%)	LGM (4); AGM (1)
T20	6,59 (3,2%)	56,60 (7,9%)	1,43 (4,3%)	LAT (4); LGM (1)
T40	5,89 (6,5%)	56,16 (3,7%)	1,44 (4,3%)	LGM (5)
T60	6,22 (5,9%)	53,92 (1,5%)	1,33 (6,0%)	1 LAT (1); LGM (3); AGM (1)

Nota: Os valores em porcentagem apresentados dentro de parenteses representam o respectivo coeficiente de variação ⁽¹⁾. Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado

Ao comparar os ambientes envelhecidos com o ambiente de referência, nota-se que os ambientes a 20°C e 40°C tiveram um aumento na tensão máxima (3% e 2% respectivamente) e os ambientes W60 S, W60 D, T-15 e T60 tiveram uma diminuição da tensão máxima. Este aumento das propriedades mecânicas pode resultar do fenômeno de pós-cura da matriz, que ocorre quando o material exposto a temperaturas moderadamente elevadas durante sua vida útil. Os ambientes W60 S, W60 D, T-15 e T60 tiveram uma redução de 32%, 29%, 3% e 1% respectivamente.

Os ambientes W60S e W60D, assim como nos outros ensaios, também apresentam uma diminuição significativa no valor da resistência (ver Figura 41). Em relação à rigidez, os valores obtidos do modo de elasticidade são muito próximos ao valor da referência e os ambientes T60 e T20 tiveram um pequeno aumento na rigidez.

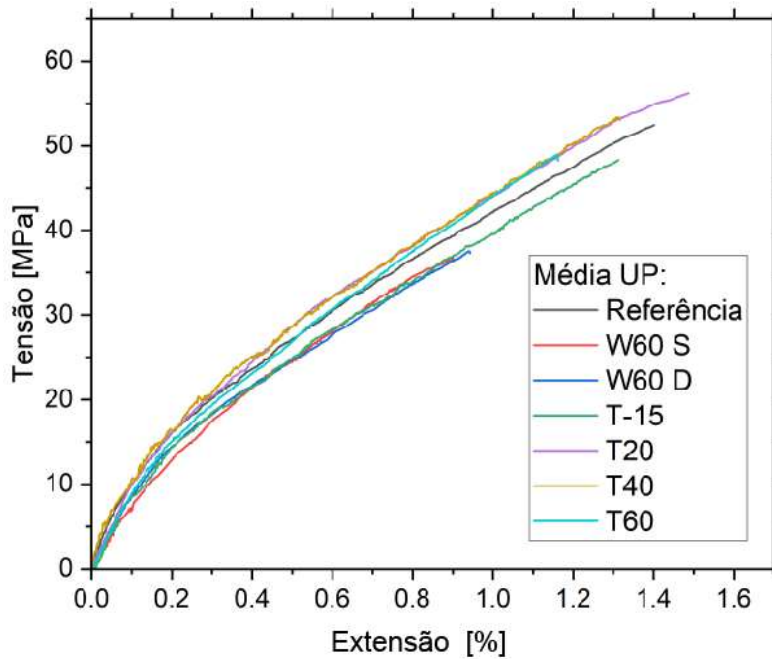


Figura 41 - Tensão versus extensão (curva média por série) de ensaios de tração uniaxial a 90° aos provetes de GFRP com resina UP

Da mesma forma usa-se a norma ASTM D3039/D3039M devido à similaridade dos parâmetros da norma ISO 527 para avaliar os modos de rotura. Neste ensaio, os provetes tiveram três tipos de fratura: i) rotura angular no meio do provete (AGM), ii) rotura lateral no meio do provete (LGM) e iii) rotura lateral no topo do provete (LAT). Todos os modos de rotura são aceitáveis segundo a norma ASTM D3039/D3039M. Contrariamente a todos os ensaios apresentado anteriormente, no ensaio de tração a 90°, todas as séries apresentaram idênticos modos de rotura (o modo de rotura dominante foi o LGM).

Tabela 15 - Resultados nos ensaios de tração uniaxial 90° dos provetes com resina VE

Série	E [GPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_{fm\acute{a}x}$ [%]	Modos de Rotura ⁽¹⁾
Referência	10,18 (2,4%)	62,76 (4,4%)	1,19 (6,3%)	LGM (4); AGM (2)
W60 S	9,56 (8,8%)	44,69 (2,9%)	0,90 (9,6%)	LGM (3); AGM (2)
W60 D	9,46 (2,2%)	46,04 (3,2%)	0,88 (2,0%)	LAT (2); LGM (2); AGM (1)
T-15	9,18 (6,2%)	58,41 (2,1%)	1,22 (4,8%)	LAT (1); LGM (4)
T20	10,64 (2,4%)	62,13 (5,2%)	1,15 (6,7%)	LAT (1); LGM (4)
T40	10,64 (4,9%)	57,67 (5,6%)	1,10 (11,8%)	LAT (2); LGM (3)
T60	9,70 (5,3%)	54,85 (1,9%)	1,15 (4,4%)	LGM (5)

Nota: Os valores em percentagem apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação ⁽¹⁾ Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado

Tendo por base os valores acima referidos é possível comparar os ambientes envelhecidos com o ambiente de referência e observa-se que todos tiveram uma diminuição da tensão máxima. Novamente, foi a série W60 S que apresentou maior degradação, com uma redução de 29% do valor de referência. O ambiente com menor variação foi o T20 com uma redução de 1% do valor de referência. Portanto, depois da referência, o ambiente com 20 °C é o que possui maior resistência com uma média de 62.13 MPa, em seguida o ambiente com -15 °C com 58.41 MPa, depois o ambiente com 40 °C com 57.67 MPa, posteriormente estão os ambientes a 60 °C, W60 D e W60 S com 54.85 MPa, 46.04 MPa e 44.69 MPa, respetivamente.

Os ambientes W60 S e W60 D, assim como a resina poliéster insaturado, também uma diminuição significativa no valor da resistência (ver Figura 42). Além disso, tiveram uma pequena diminuição nos seus módulos de elasticidade, o que pode indicar uma degradação física de plasticização e química por lixiviação.

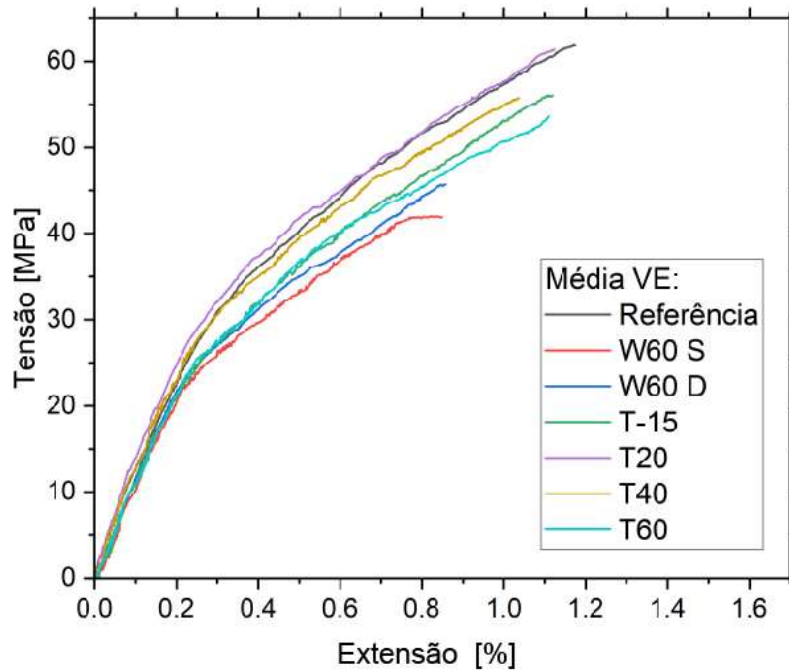


Figura 42 - Tensão versus extensão (curva média por série) de ensaios de tração uniaxial a 90° aos provetes de GFRP com resina VE

Os provetes também obtiveram três tipos de rotura: i) rotura angular no meio do provete (AGM), ii) rotura lateral no meio do provete (LGM) e iii) rotura lateral no topo do provete (LAT). O modo de rotura dominante foi o LGM, e verifica-se, tal como no caso dos compósitos com resina UP, que todas as séries apresentaram mais do que um tipo de modo de rotura.

São apresentadas em seguida várias figuras com a tensão de tração *versus* extensão a meio vão (curva média por série) para os diferentes ambientes, com o objetivo de facilitar a comparação entre os compósitos com matriz em poliéster insaturado (UP) e viniléster (VE). Assim, a Figura 43, Figura 44, Figura 45 e Figura 46 apresentam a comparação para as séries de referência, W60 S e W60 D, T15 e T20, e T40 e T60, respetivamente.

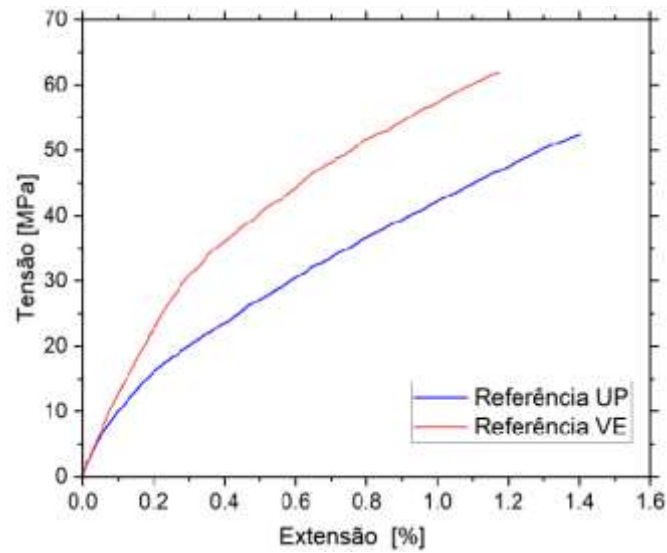


Figura 43 - Tensão versus extensão (curva média por série) de ensaios de tração uniaxial 90° aos provetes de referência de GFRP com resina VE e UP

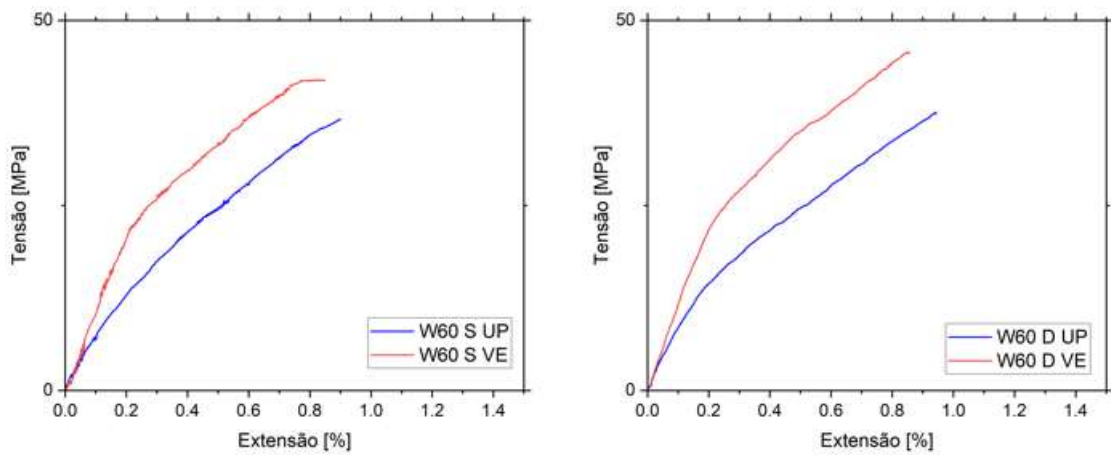


Figura 44 - Tensão versus extensão (curva média por série) de ensaios de tração uniaxial 90° aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP

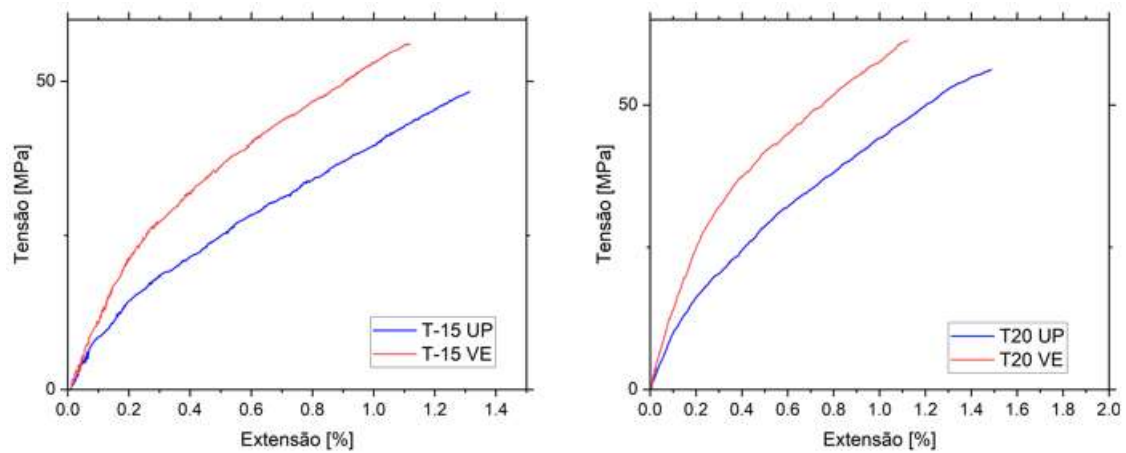


Figura 45 - Tensão versus extensão (curva média por série) de ensaios de tração uniaxial 90° aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP

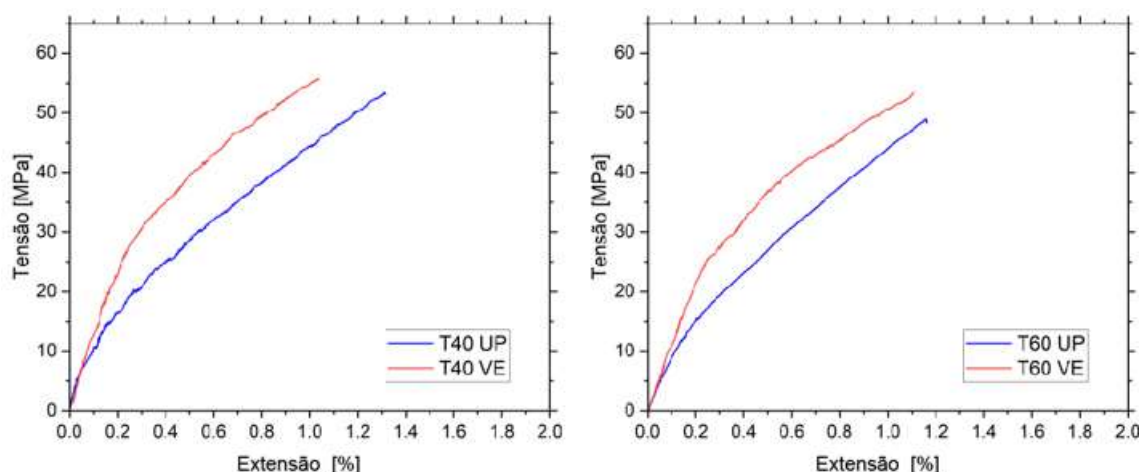


Figura 46 - Tensão versus extensão (curva média por serie) de ensaios de tração uniaxial 90° aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP

A partir dos gráficos apresentados acima (ver Figura 43, Figura 44, Figura 45, Figura 46), nota-se que a resina viniléster tem resistência mais significativa do que a resina poliéster insaturado e mais rigidez. Além disso, a resina viniléster, em ambientes saturados, absorve menos humidade do que a resina poliéster insaturado e conseqüentemente obtém uma melhor durabilidade em água.

4.2.3. Compressão uniaxial - 0°

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial a 0°, nomeadamente os modos de rotura e a tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) são apresentados nas Tabela 16 e Tabela 17 para provetes com resina poliéster insaturado (UP) e provetes com resina viniléster (VE), respetivamente. A Figura 47 e Figura 50 apresentam a relação entre a tensão e a deformação vertical médio por serie de ensaios para provetes com resina UP e provetes com resina VE, respetivamente. Nos ANEXOS II e III é disponibilizada informação mais detalhada dos ensaios de flexão, que inclui as fotos dos modos de rotura dos provetes.

Deve-se referir que devido a problemas técnicos (e.g. avarias na máquina de ensaios, ajustes no sistema de ensaio) não foi possível apresentar o módulo de elasticidade dos compósitos à compressão.

Tabela 16 - Resultados nos ensaios de compressão uniaxial 0° dos provetes com resina UP

Série	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	Modos de Rotura ⁽¹⁾
Referência	521,52 (8,2%)	Rotura complexa (7)
W60 S	254,76 (9,3%)	Rotura complexa (7)
W60 D	408,42 (3,8%)	Rotura complexa (7)
T-15	528,33 (11,6%)	Rotura complexa (7)
T20	547,51 (10,4%)	Rotura complexa (6); com rotura inválida (1)
T40	616,92 (3,5%)	Rotura complexa (7)
T60	599,36 (4,0%)	Rotura complexa (7)

Nota: Os valores em percentagem apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação; ⁽¹⁾ Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado

Tendo por base os valores acima referidos é possível comparar a resistência dos ambientes envelhecidos com o ambiente de referência e observa-se um aumento significativo da tensão nos ambientes T40 e T60, que podem resultar do fenómeno de pós-cura. Comparativamente à referência, a série T40 apresentou 18% de aumento (resistência 616.92 MPa), a T60 15% (599.36 MPa), a T20 5% (547.51 MPa) e a T-15 1% (528.33 MPa).

A série W60 S perdeu mais da metade da resistência durante os 6 meses de exposição, com uma redução de 51% do valor de referência obtendo-se 254.76 MPa. Em seguida verifica-se que uma redução de 21% na série W60 D (408.42 MPa), o que indica que elevado efeito da humidade na resistência à compressão do compósito. Estes resultados também indicam a grande influência do protocolo de ensaio,

nomeadamente na avaliação das propriedades mecânicas em estado saturado e não saturado (ver Figura 47).

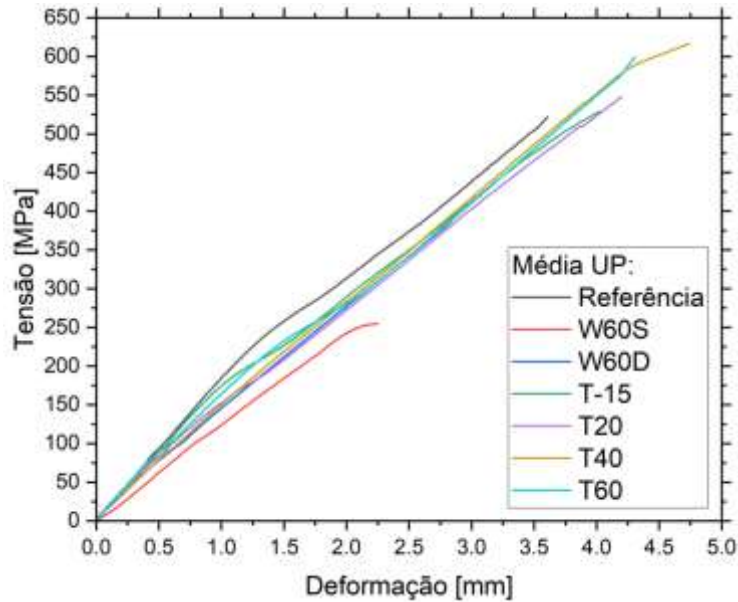


Figura 47 - Tensão *versus* deslocamento (curva média por série) de ensaios de compressão aos provetes de GFRP com resina UP

Deve ser referido que as placas expostas ao ambiente com $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, assim que cortadas, apresentaram em alguns provetes inválidos (ver Figura 48). É possível que as tensões térmicas (congelamento e descongelamento) devido ao coeficiente de expansão térmico (CTE) das fibras de vidro ser menor que o CTE da matriz, tenha resultado na fragilização do compósito e, conseqüentemente, causando

destacamento na fibra-matriz (perda de coesão, também conhecida como delaminação - ver secção 2.2.1 em efeitos da temperatura). Estes provetes não foram ensaiados.



Figura 48 - Provetes UP para ensaio de compressão inválidos

Segundo a norma EN ISO 14126:1999 ('EN ISO 14126', 1999), existem cinco modos de rotura aceitáveis para os ensaios de compressão: (i) corte num plano; (ii) rotura complexa; (iii) corte com espessura contínua; (iv) divergir/dispersar; (v) delaminação; (ver Figura 49). Neste ensaio, o modo de rotura dominante foi a rotura complexa.

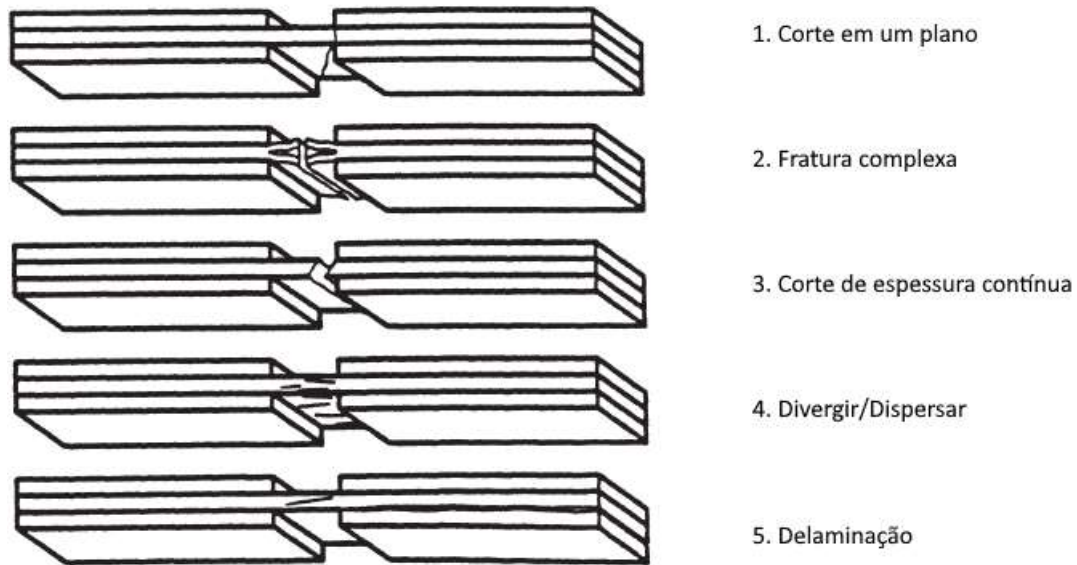


Figura 49 – Possíveis modos de rotura nos ensaios de compressão

Tabela 17 - Resultados nos ensaios de compressão uniaxial 0° dos provetes com resina VE

Série	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	Modos de Rotura ⁽¹⁾
Referência	505,16 (9,6%)	Rotura complexa (7)
W60 S	390,77 (4,4%)	Rotura complexa (7)
W60 D	535,85 (8,8%)	Rotura complexa (7)
T-15	598,40 (9,8%)	Rotura complexa (7)
T20	618,45 (9,4%)	Rotura complexa (5); Rotura inválida (2)
T40	661,87 (3,5%)	Rotura complexa (5); Rotura inválida (2)
T60	635,89 (1,9%)	Rotura complexa (5); Rotura inválida (2)

Nota: Os valores em percentagem apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação; ⁽¹⁾ Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado

Nos ensaios à compressão em compósitos com resina VE, a série W60 S teve uma redução de 23% do valor de referência obtendo 390.77 MPa. Já nas restantes séries, seguindo a ordem do maior para o

menor aumento, a T40 com 27% de aumento e resistência 661.87 MPa, a T60 com 22% e 635.89 MPa, a T20 com 19% e 618.45 MPa, a T-15 com 15% e 598.4 MPa e a W60 D com 3% e 535.85 MPa.

Assim como em todos os ensaios anteriores, o ambiente W60 S apresenta perda significativa da resistência, muito possivelmente pelas razões atrás mencionadas. Todos os restantes ambientes apresentam valores médios de resistência à compressão superiores à referência. Pode-se observar que, destas séries a W60 D é a que apresenta menor variação, até negligenciável por se tratar de um aumento percentual menor à ao coeficiente de variação da própria série (ver Figura 50). É novamente possível concluir que não só a humidade é altamente crítica para a resistência mecânica destes compósitos, como que estes efeitos negativos (degradação) podem ser reversíveis.

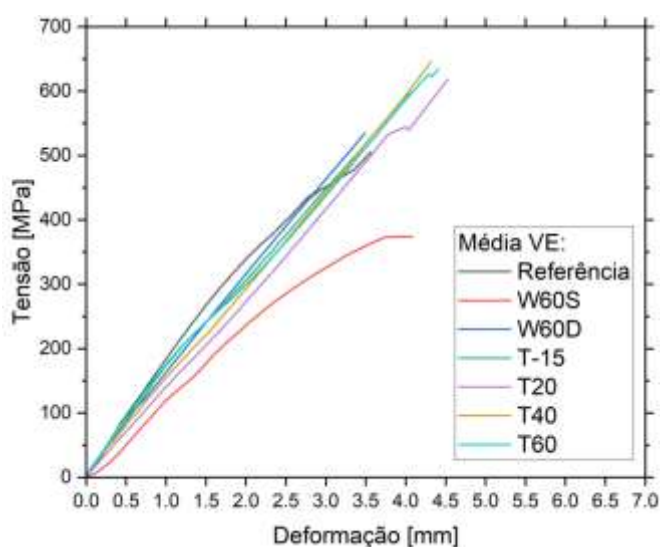


Figura 50 - Tensão *versus* deslocamento (curva média por série) de ensaios de compressão aos provetes de GFRP com resina VE

O ensaio também faz uso da norma EN ISO 14126:1999 para caracterizar o modo de rotura dos provetes e, segundo esta, a maioria sofreu uma fratura complexa.

São apresentadas em seguida várias figuras com a tensão de compressão *versus* deslocamento (curva média por série) para os diferentes ambientes, com o objetivo de facilitar a comparação entre os compósitos com matriz em poliéster insaturado (UP) e viniléster (VE). Assim, a Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54 apresentam a comparação para as séries de referência, W60 S e W60 D, T15 e T20, e T40 e T60, respetivamente.

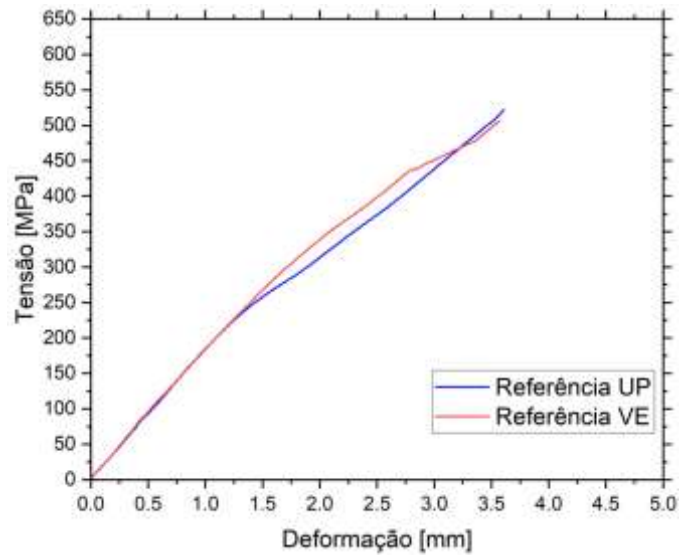


Figura 51 - Tensão *versus* deslocamento (curva média por serie) de ensaios de compressão aos provetes de referência de GFRP com resina VE e UP

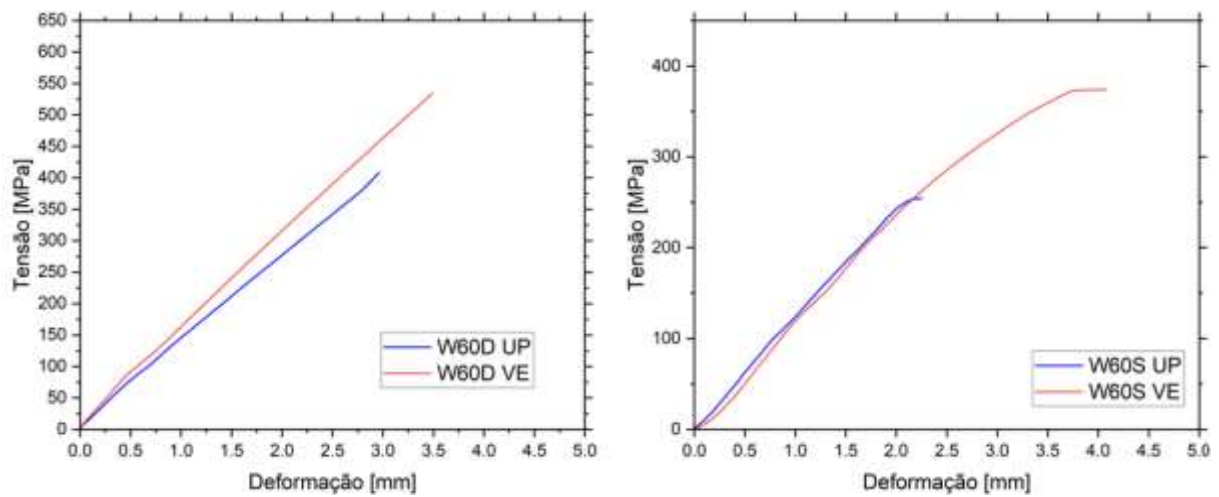


Figura 52 - Tensão *versus* deslocamento (curva média por serie) de ensaios de compressão aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP

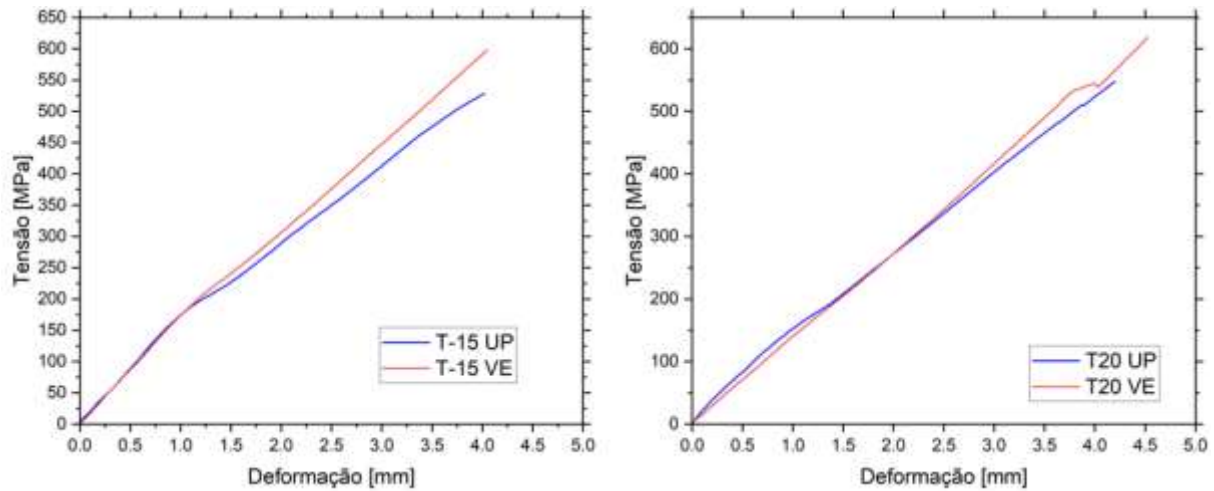


Figura 53 - Tensão *versus* deslocamento (curva média por serie) de ensaios de compressão aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP

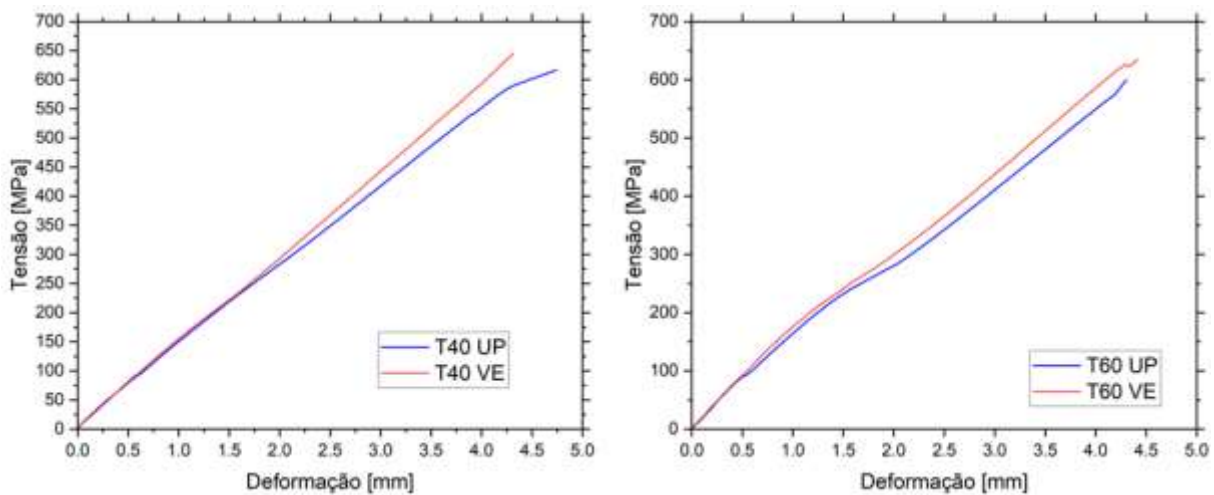


Figura 54 - Tensão *versus* deslocamento (curva média por serie) de ensaios de compressão aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP

Verifica-se um comportamento muito semelhante entre ambos os tipos de compósitos (UP e VE), com uma rigidez e tensão de compressão máxima muito semelhantes. É novamente verificado um comportamento significativamente melhor com a resina VE em ambiente saturado (W60 D e W60 S), pelas razões atrás referidas.

4.2.4. Flexão

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão, nomeadamente os modos de rotura, a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$), tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$), e deslocamento vertical a meio vão para a força máxima ($\delta_{m\acute{a}x}$) são apresentados nas Tabela 18 e Tabela 19 para provetes com resina UP e provetes com resina VE, respetivamente. A Figura 55 e a Figura 57 apresentam a relação entre a tensão e o deslocamento vertical médio por serie de ensaios para provetes com resinas UP e VE, respetivamente. Nos ANEXOS II e III é fornecida informação mais detalhada relativa aos ensaios de flexão, que inclui as fotografias dos modos de rotura dos provetes.

Tabela 18 - Resultados nos ensaios de flexão dos provetes com resina UP

Série	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	Modos de Rotura ⁽²⁾
W60 S ⁽¹⁾	1,13	9,05	283,4	Rotura por corte interlaminar (5); Rotura por tração das fibras (1)
W60 D	1,31 (10,6%)	9,11 (7,2%)	326,8 (10,6%)	Rotura por tração das fibras (6)
T-15	2,0 (5,2%)	13,9 (3,4%)	501,19 (5,0%)	Rotura por tração das fibras (6)
T20/Referência	1,93 (3,7%)	12,73 (3,1%)	481,21 (3,7%)	Rotura por tração das fibras (6)
T40	1,95 (4,1%)	13,64 (4,4%)	488,67 (4,0%)	Rotura por tração das fibras (6)
T60	1,98 (3,4%)	14,02 (3,9%)	494,67 (3,0%)	Rotura por tração das fibras (6)

Notas: Os valores em percentagem apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação; ⁽¹⁾ Este ambiente apresenta apenas um resultado com modo de rotura aceitável; ⁽²⁾ Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado

Tendo por base os valores acima referidos é possível observar uma maior dispersão de resultados (elevado coeficiente de variação) nos ambientes que foram envelhecidos com imersão em água desmineralizada a 60 °C (W60 S e W60 D), incluindo a alteração do modo de rotura.

Os ambientes W60 S e W60 D tiveram uma redução de 41% e 32% respetivamente e os T-15, T40 e T60 tiveram um aumento de 4%, 2% e 3% respetivamente. Portanto, os ambientes com -15°C é o que possui maior resistência com uma média de 501.19 MPa, em seguida o ambiente com 60°C com 494.67 MPa,

depois o ambiente com 40°C com 488.67 MPa, posteriormente estão os ambientes T20/Referência, W60 D e W60 S com 481.21 MPa, 326.8 MPa e 283.4 MPa, respetivamente.

A redução significativa da resistência nos provetes saturados com água desmineralizada (W60S e W60D) pode estar associada a fenómenos de plasticização. A diferença entre estes dois ambientes é aumento da sua degradação em proporção com a quantidade de humidade retida durante o período em contato com água: os provetes da série W60S ficam sempre submersos em água desmineralizada até ao momento do ensaio enquanto os provetes da série W60D retirados do tanque onde se encontravam imersos, instalados numa câmara climática a 20 °C / 55% de humidade relativa e foram ensaiados quando foi atingida massa constante nestes. Note-se que, tal como foi referido na secção 2.2.2, parte dos efeitos da humidade são reversíveis após sua remoção de meio saturado, pelo que a diferença de comportamento de ambas as séries poderão indiciar essa situação. Assim, os resultados da série W60 S (testada saturada) indicam a redução total (reversível + irreversível) provocada pelo ambiente neste período de ensaio, enquanto a série W60 D apresenta uma relativa recuperação das propriedades mecânicas. Na Figura 55, é possível observar esta maior degradação nas séries W60 S e W60 D. Em relação aos ambientes que não são afetados pela humidade, suas diferenças de temperatura não prejudicam de forma significativa a resposta mecânica destes, obtendo-se valores muito próximos.

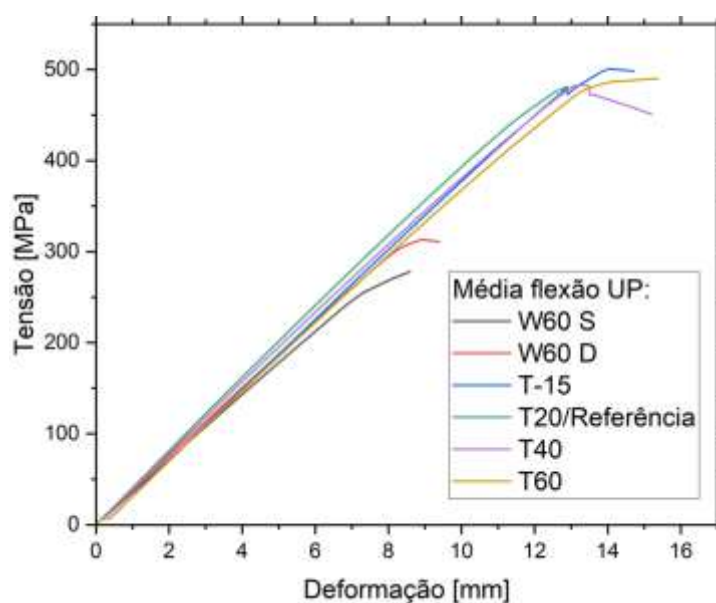


Figura 55 - Tensão versus deslocamento a meio vão (curva média por série) de ensaios de flexão aos provetes de GFRP com resina UP

Segundo a norma EN ISO 14125:1998 ('EN ISO 14125', 1998), existem seis modos de rotura possíveis em ensaios de flexão com três pontos de carga: (i) rotura por tração das fibras junto à face inferior; (ii) rotura por tração na camada mais externa; (iii) rotura por compressão; (iv) rotura por tração (incluindo

corte interlaminar); (v) rotura por compressão (incluindo corte interlaminar); e (vi) rotura por corte interlaminar (ver Figura 56). De acordo com a norma, os modos de rotura aceitáveis são apenas os modos de rotura por tração e compressão (i, ii e iii), sendo que as roturas que possuem corte interlaminar não são aceitáveis (iv, v e vi). Na campanha de ensaios realizada, a maioria dos provetes apresentou rotura por tração das fibras junto à face inferior. Contudo, no ambiente W60 S, cinco provetes romperam por corte interlaminar e um com rotura por tração nas fibras tracionadas. Esta mudança no modo de rotura é mais um indicador do efeito da humidade no compósito que fragiliza a ligação inter-camadas e/ou intra-camadas.

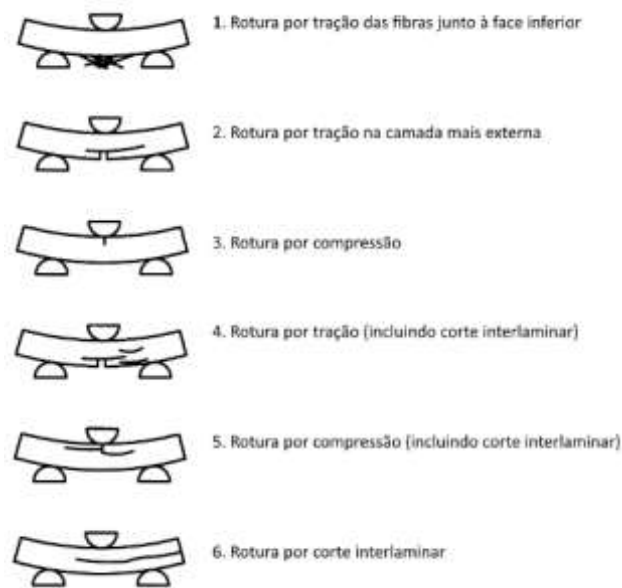


Figura 56 - Modo de rotura ensaio de flexão [32]

O provete de maior rigidez foi o T20/Referência e depois, de forma decrescente, T40, T-15, T60, W60 D e o W60 S com menor rigidez. Finalmente, pode-se referir que a diferença entre a série T20/Referência e as séries T-15, T40 e T60 (diferentes temperaturas) é mínima. Tal observação deve ser avaliada com base no tempo de exposição, que é relativamente curto (seis meses) e, conseqüentemente, insuficiente para produzir alterações significativas na resistência à flexão.

Tabela 19 - Resultados nos ensaios de flexão dos provetes com resina VE

Série	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	Modos de Rotura ⁽¹⁾
W60 S	1,56 (3,3%)	11,23 (5,3%)	390,46 (3,3%)	Rotura por tração das fibras (6)
W60 D	1,65 (3,6%)	10,68 (5,5%)	413,19 (3,6%)	Rotura por tração das fibras (6)
T-15	2,11 (4,0%)	13,50 (4,7%)	526,59 (4,1%)	Rotura por tração das fibras (6)
T20/Referência	2,02 (2,6%)	11,95 (3,4%)	504,11 (2,6%)	Rotura por tração das fibras (6)
T40	2,08 (5,5%)	12,75 (6,5%)	519,91 (5,6%)	Rotura por tração das fibras (6)
T60	2,02 (3,5%)	13,35 (4,9%)	505,02 (3,6%)	Rotura por tração das fibras (6)

Notas: Os valores em percentagem apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação; ⁽¹⁾ Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado

Tendo por base os valores acima referidos, do GFRP com matriz em viniléster, é possível observar uma maior dispersão de resultados nos ambientes que envelheceram em -15 °C (T-15) e a 40 °C (T40). Os ambientes W60 S e W60 D tiveram uma redução de 22% e 18% respetivamente e os T-15, T40 e T60 tiveram um aumento de 4%, 3% e 0,18% respetivamente. Portanto, os ambientes com -15°C é o que possui maior resistência com uma média de 526.59 MPa, em seguida o ambiente com 40°C com 519.91 MPa, depois o ambiente com 60°C com 505.02 MPa, posteriormente estão os ambientes T20/Referência, W60 D e W60 S com 504.11 MPa, 413.19 MPa e 390.46 MPa, respetivamente.

Neste caso, os provetes em água a 60°C também apresentam significativa enquanto os restantes ambientes apresentam variações menores no comportamento à flexão (ver Figura 57)

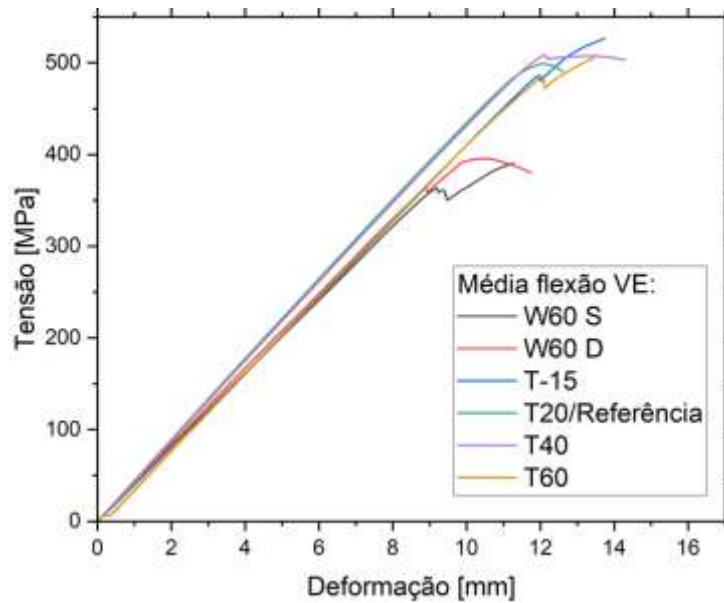


Figura 57 - Tensão versus deslocamento a meio vão (curva média por série) de ensaios de flexão aos provetes de GFRP com resina VE

O provete de maior rigidez foi o T40 e depois, de forma decrescente, T-15, W60 D, T60 e o W60 S com menor rigidez.

Por fim, verifica-se que o modo de rotura de todos os provetes envelhecidos foi por fratura por tração na fibra, igual aos provetes de referência. Assim, para o período de tempo, verifica-se que nenhum ambiente levou à alteração do modo de rotura.

São apresentadas em seguida várias figuras com a tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por série) para os diferentes ambientes, com o objetivo de facilitar a comparação entre os compósitos com matriz em poliéster insaturado (UP) e viniléster (VE). Assim, Figura 58, Figura 59 e Figura 60 apresentam a comparação para as séries de W60 S e W60 D, T15 e T20/Referência, e T40 e T60, respetivamente.

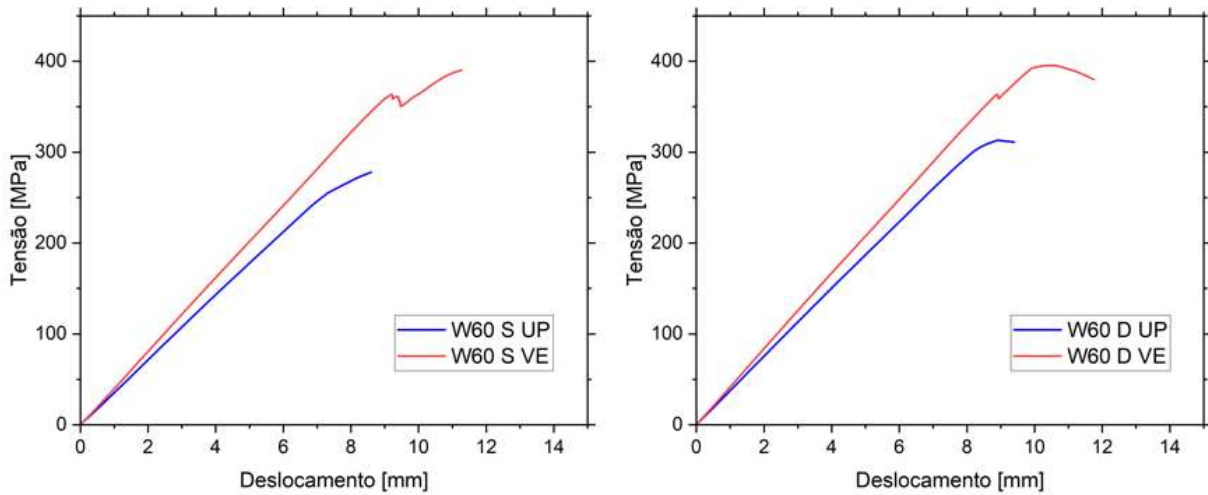


Figura 58 - Tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de flexão aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP

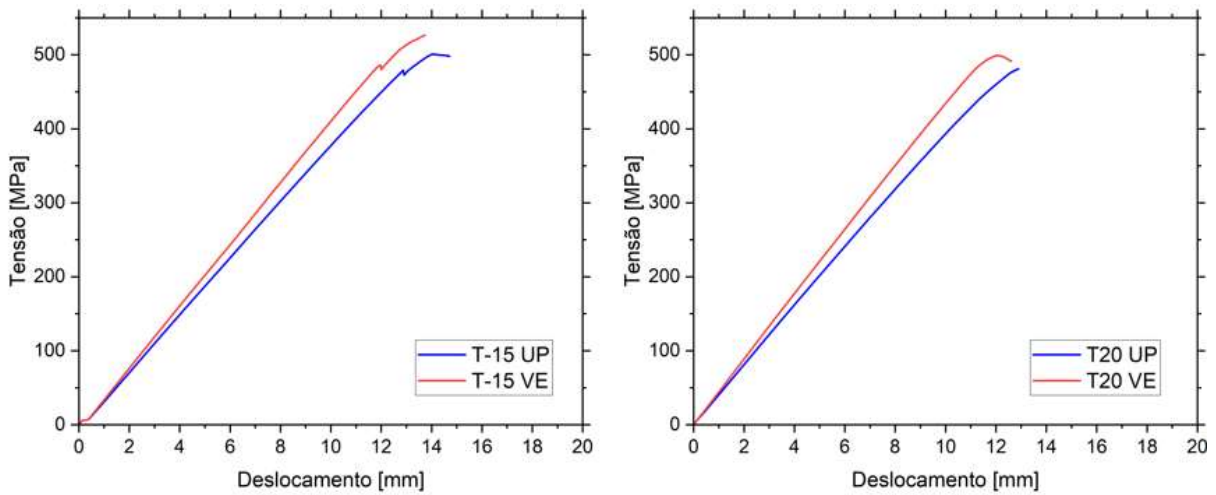


Figura 59 - Tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de flexão aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP

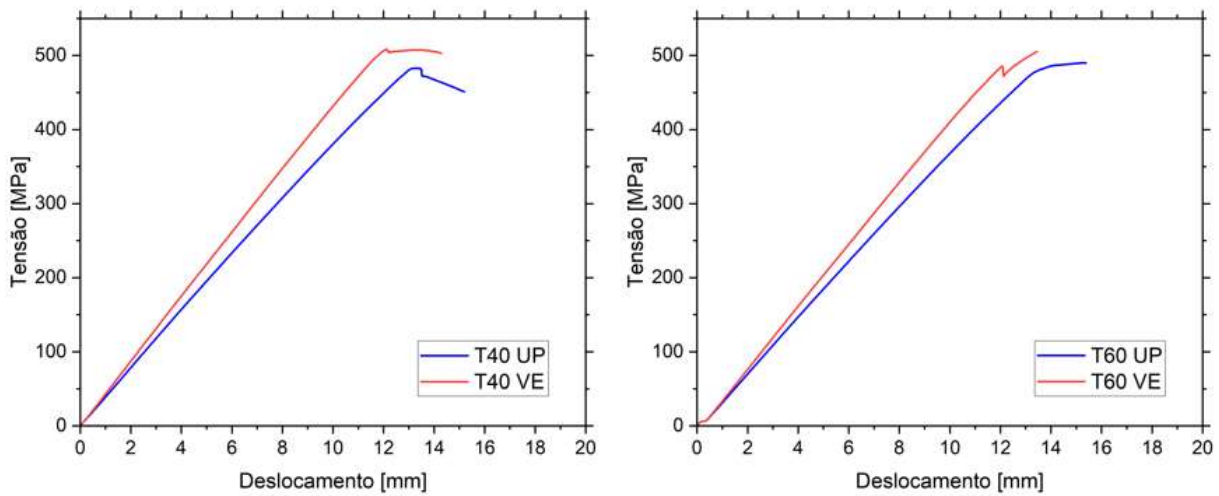


Figura 60 - Tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de flexão aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP

A partir dos gráficos apresentados acima, nota-se que a resina viniléster tem mais rigidez e maior resistência do que a resina de poliéster insaturado. Esta diferença de comportamento é ainda maior nos ambientes com elevada humidade (W60 S e W60 D). A resina viniléster absorve menos água do que a resina poliéster insaturado e por esta razão, quando imerso em água, tem melhor durabilidade.

Por fim, deve ser referido que a série W60 S apresentou um modo de rotura diferente (fratura por corte interlaminar) nos provetes com resina UP, que comprova a maior fragilidade esta matriz aos efeitos da humidade.

4.2.5. Corte no Plano

Os resultados obtidos nos ensaios de corte no plano, nomeadamente os modos de rotura, o módulo de elasticidade (G), tensão máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$), e deformação para a força máxima ($\gamma_{f_{m\acute{a}x}}$) são apresentados nas Tabela 20 e Tabela 21 para provetes com resina poliéster insaturado (UP) e provetes com resina viniléster (VE), respetivamente. A Figura 61 e Figura 63 apresentam a relação entre a tensão e a deformação vertical médio por serie de ensaios para provetes com resina UP e provetes com resina VE, respetivamente. Nos ANEXOS II e III é disponibilizada informação mais detalhada dos ensaios de flexão, que inclui as fotos dos modos de rotura dos provetes.

Tabela 20 - Resultados nos ensaios de corte no plano dos provetes com resina UP

Série	G [GPa]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\gamma_{f_{m\acute{a}x}}$ [%]	Modos de Rotura ⁽¹⁾
Referência	3,33 (9,6%)	72,55 (5,5%)	2,71 (15,7%)	Rotura tipo 2 (3); Rotura tipo 1 (2)
W60 S	1,34 (21,7%)	32,52 (2,1%)	1,95 (7,6%)	Rotura tipo 2 (5)
W60 D	2,51 (12,6%)	53,95 (2,3%)	3,0 (16,7%)	Rotura tipo 2 (5)
T-15	5,13 (20,3%)	82,23 (2,0%)	2,89 (26,7%)	Rotura tipo 2 (5)
T20	3,94 (12,8%)	81,67 (3,0%)	4,34 (5,4%)	Rotura tipo 2 (3); Rotura tipo 4 (2)
T40	3,21 (35,6%)	80,54 (3,2%)	4,27 (4,9%)	Rotura tipo 1 (4); Rotura tipo 2 (2)
T60	3,73 (6,1%)	73,31 (2,6%)	3,52 (10,0%)	Rotura tipo 1 (4); Rotura tipo 2 (2)

Nota: Os valores em percentagem apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação; ⁽¹⁾

Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado.

A partir dos resultados obtidos acima, é possível comparar os ambientes envelhecidos com o ambiente de referência e nota-se que os ambientes a -15 °C, 20 °C, 40 °C e 60 °C tiveram um aumento na tensão máxima em relação a referência. Os ambientes W60 S e W60 D tiveram uma redução de 55,18% e 25% respetivamente e os T-15, T20, T40 e T60 tiveram um aumento de 13%, 12%, 11% e 1% respetivamente. Portanto, os ambientes com -15 °C é o que possui maior resistência com uma média de 82,23 MPa, em seguida o ambiente a 20 °C com 81,67 MPa, T40 com 80,54 MPa e T60 com 73,31

MPa e posteriormente estão os ambientes de referência, W60 D e W60 S com 72.55 MPa, 53.95 MPa, 32.52 MPa, respetivamente (ver Figura 61).

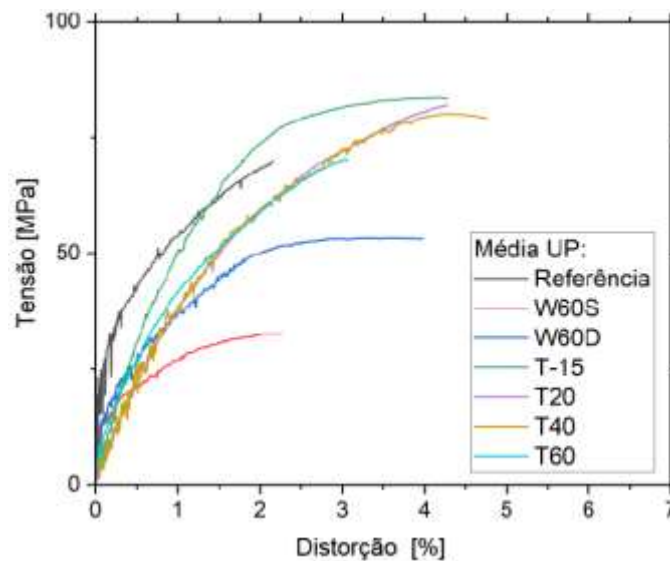


Figura 61 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de GFRP com resina UP

Segundo a norma ASTM D5379:2005 ('ASTM D5379', 2005), existem sete modos de rotura, mas apenas os quatro primeiros modos são aceitáveis (ver Figura 62). O modo de rotura da maioria dos provetes foi por fratura número 2.

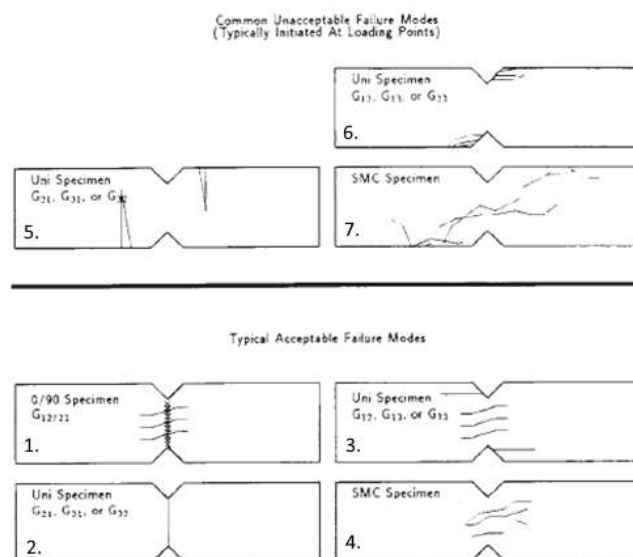


Figura 62 - Possíveis modos de rotura nos ensaios de corte no plano ('ASTM D5379', 2005)

Tabela 21 - Resultados nos ensaios de corte no plano dos provetes com resina VE

Série	G [GPa]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\gamma_{fm\acute{a}x}$ [%]	Modos de Rotura
Referência	3,88 (17,8%)	84,62 (3,9%)	4,11 (21,4%)	Rotura tipo 2 (4); Rotura tipo 1 (1)
W60 S	3,01 (19,4%)	66,75 (1,3%)	3,26 (15,7%)	Rotura tipo 2 (5)
W60 D	2,75 (15,1%)	70,25 (2,9%)	3,24 (9,0%)	Rotura tipo 2 (5)
T-15	3,51 (15,2%)	87,98 (2,0%)	4,41 (9,4%)	Rotura tipo 2 (5)
T20	3,96 (8,7%)	81,74 (3,5%)	3,60 (14,0%)	Rotura tipo 2 (5)
T40	4,21 (22,0%)	87,92 (3,6%)	4,05 (12,2%)	Rotura tipo 2 (5)
T60	3,62 (11,3%)	90,45 (1,9%)	4,31 (7,1%)	Rotura tipo 2 (5)

Nota: Os valores em percentagem apresentados dentro de parênteses representam o respetivo coeficiente de variação;

^(a) Os valores entre parênteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado.

A partir dos resultados obtidos acima, é possível comparar os ambientes envelhecidos com o ambiente de referência e nota-se que os ambientes a -15 °C, 40 °C e 60 °C tiveram um aumento na tensão máxima em relação a referência. Os ambientes W60 S, W60 D e T20 tiveram uma redução de 21%, 17% e 3% respetivamente e os T-15, T40 e T60 tiveram um aumento de 4%, 3.9% e 7% respetivamente. Portanto, os ambientes com 60 °C é o que possui maior resistência com uma média de 90.45 MPa, em seguida o ambiente a -15 °C com 87.98 MPa, T40 com 87.92 e posteriormente estão os ambientes de

referência, T20, W60 D e W60 S com 84.62 MPa, 81.74 MPa, 70.25 MPa, 66.75 MPa, respectivamente (ver Figura 63).

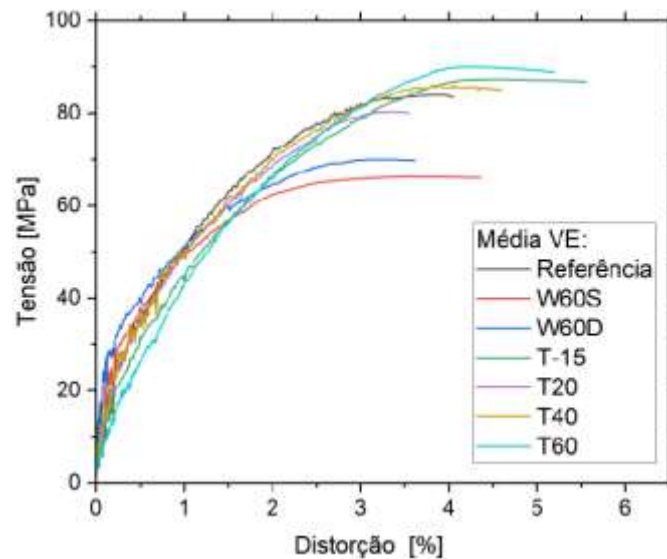


Figura 63 - Tensão versus distorção (curva média por série) de ensaios de corte no plano aos provetes de GFRP com resina VE

Assim como a resina poliéster insaturado, é usado a norma ASTM D5379 para caracterizar os modos de rotura e a maioria teve rotura número 2.

São apresentadas em seguida várias figuras com a tensão de corte *versus* distorção a meio vão (curva média por série) para os diferentes ambientes, com o objetivo de facilitar a comparação entre os compósitos com matriz em poliéster insaturado (UP) e viniléster (VE). Assim, a Figura 64, Figura 65, Figura 66 e Figura 67 apresentam a comparação para as séries de referência, W60 S e W60 D, T15 e T20, e T40 e T60, respectivamente.

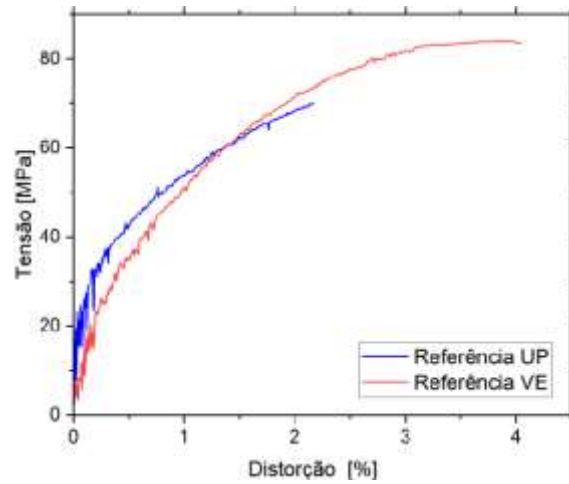


Figura 64 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de referência de GFRP com resina VE e UP

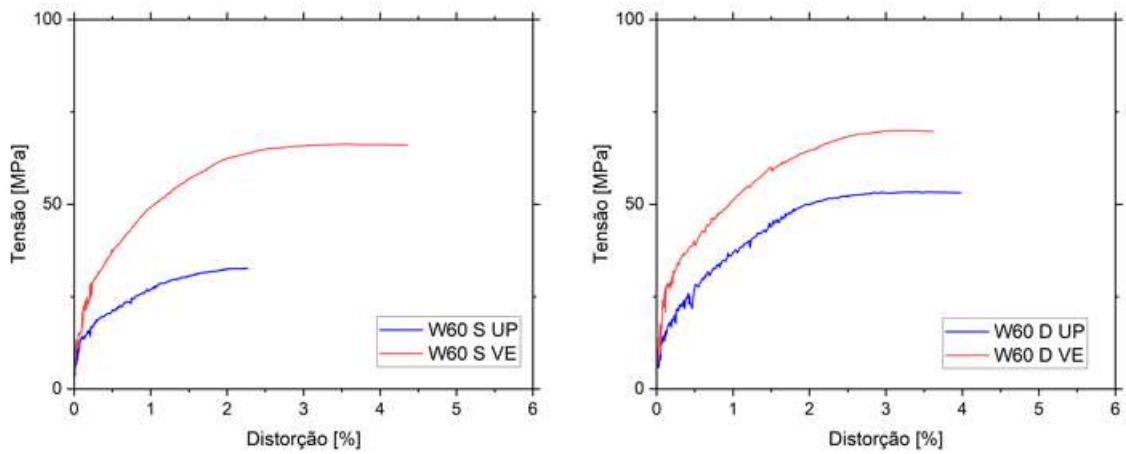


Figura 65 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP

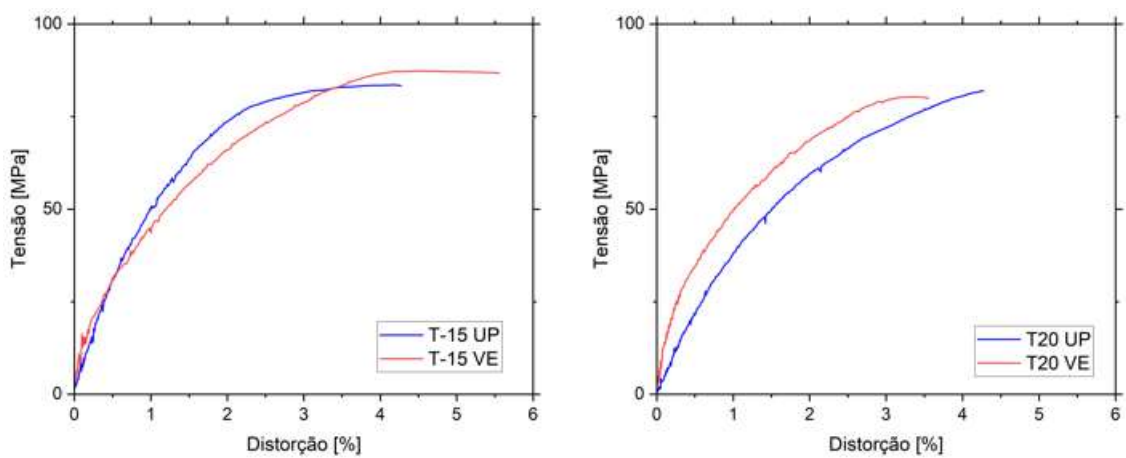


Figura 66 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP

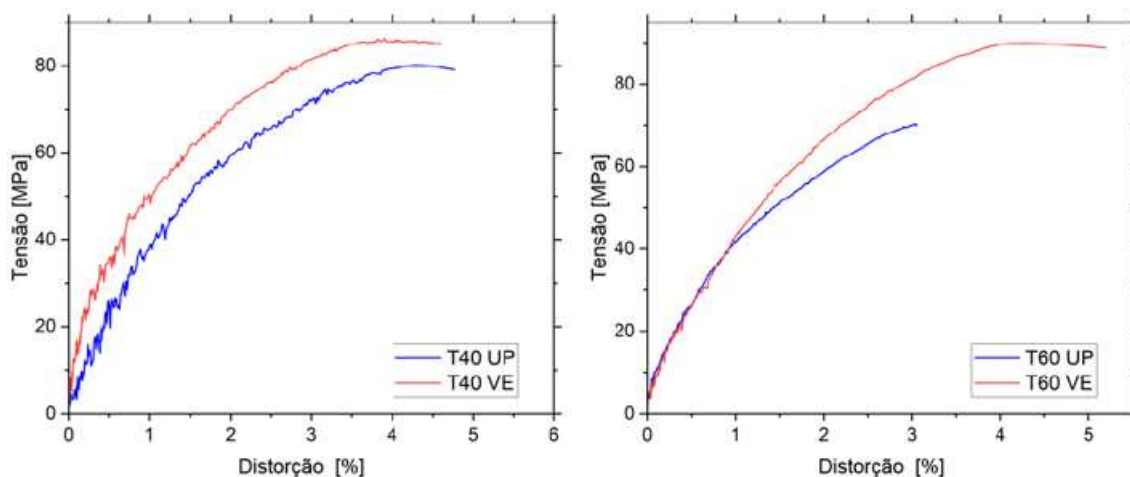


Figura 67 - Tensão versus distorção (curva média por serie) de ensaios de corte no plano aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP

A partir dos gráficos apresentados acima (ver Figura 64, Figura 65, Figura 66, Figura 67), observa-se um comportamento homólogo entre compósitos com matrizes distintas. Note-se que nos ensaios atrás analisados (flexão, corte interlaminar, e tração uniaxial segundo ambas as direções) os compósitos com resina VE apresentavam sempre melhor comportamento que os compósitos com resina UP. No presente caso, verifica-se de uma forma geral, melhor comportamento no GFRP com resina viniléster, contudo no ambiente de referência ou a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, é a resina UP que apresenta maior rigidez inicial. Deve ser referido, contudo, que nas séries W60 D e W60 S, pelo facto da resina viniléster absorver menos humidade, os compósitos com resina poliéster insaturado apresentam significativa redução na sua performance relativa ao corte no plano.

4.2.6. Corte interlaminar

Os resultados obtidos nos ensaios de corte interlaminar, nomeadamente a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$), tensão máxima de corte ($\tau_{m\acute{a}x}$), deslocamento vertical a meio vão para a força máxima ($\delta_{m\acute{a}x}$) e modos de rotura, são apresentados nas Tabela 22 e Tabela 23 para provetes com resina poliéster insaturado e provetes com resina viniléster, respetivamente. A Figura 68 e a Figura 70 apresentam a relação entre a tensão e o deslocamento vertical médio por serie de ensaios para provetes com resina UP e provetes com resina VE, respetivamente. Nos ANEXOS II e III é disponibilizada informação mais detalhada dos ensaios de flexão, que inclui as fotos dos modos de rotura dos provetes.

Tabela 22 - Resultados nos ensaios de corte interlaminar dos provetes com resina UP

Série	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]	Modos de Rotura ⁽¹⁾
Referência	9,35 (3,3%)	1,46 (25,3%)	21,9 (3,3%)	Corte múltiplo (2); Corte simples (3)
W60 S	5,57 (2,8%)	1,53 (4,4%)	13,05 (2,8%)	Rotura por corte plástica (5)
W60 D	7,90 (1,6%)	1,77 (5,0%)	18,51 (1,6%)	Corte múltiplo (1); Rotura por corte plástica (5)
T-15	9,72 (2,1%)	1,11 (4,2%)	22,78 (2,1%)	Corte múltiplo (5); Rotura por corte plástica (1)
T20	9,53 (3,5%)	1,16 (11,6%)	22,35 (3,6%)	Corte múltiplo (2); Corte simples (3)
T40	9,43 (2,0%)	1,13 (15,3%)	22,11 (2,0%)	Corte múltiplo (3); Corte simples (2)
T60	9,13 (7,3%)	1,33 (17,0%)	21,47 (69%)	Corte múltiplo (5); Rotura por corte plástica (1)

Notas: Os valores em percentagem apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação; ⁽¹⁾ Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado. De acordo com a norma EN ISO 14130, nos modos de rotura não aceitáveis, a tensão apresentada não deve ser interpretada como tensão máxima de corte interlaminar.

Tendo como base os valores acima referidos houve uma maior dispersão de resultados nos deslocamentos máximos ($\delta_{m\acute{a}x}$). Ao comparar os ambientes envelhecidos com o ambiente de referência, nota-se que os ambientes a -15, 20 e 40°C tiveram um aumento na tensão máxima de corte e os ambientes W60 S, W60 D e T60 tiveram uma diminuição da tensão máxima de corte. Os ambientes W60 S, W60 D e T60 tiveram uma redução de 40.41%, 15.48% e 1.96% respetivamente e os T-15, T20 e T40 tiveram um aumento de 4.02%, 2.05% e 0.96% respetivamente. Portanto, os ambientes com -15°C é o que possui maior resistência com uma média de 22.78 MPa, em seguida o ambiente com 20°C com 22.35MPa, depois o ambiente com 40°C com 22.11MPa, posteriormente estão os ambientes de referência, W60 D e W60 S com 21.9 MPa, 51MPa e 13.05MPa, respetivamente.

Os ambientes com temperatura a -15, 20 e 40°C possuem maior resistência média do que o ambiente de referência. Embora o aumento das propriedades de polímeros seja expectável devido a fenômenos de pós-cura, nos ambientes que o material é exposto a temperaturas próximas do seu T_g (e.g. série T40), numa análise cuidada verifica-se que o aumento é pequeno. De facto, esta pequena variação, também

é observada nos ambientes T-15 e T20, onde o fenômeno de pós cura não deverá ocorrer, não deve ser admitida como relevante.

Não obstante, os ambientes W60S e W60D sofreram degradação devido à exposição hidrotérmica, obtendo uma diminuição significativa no valor da resistência. Note-se que a degradação física denominada por plasticização leva à diminuição na rigidez e da resistência, e, com o amolecimento da matriz, ao aumento do deslocamento vertical a meio vão para a força máxima. Na Figura 68, é possível observar esta maior degradação nas séries W60 S e W60 D.

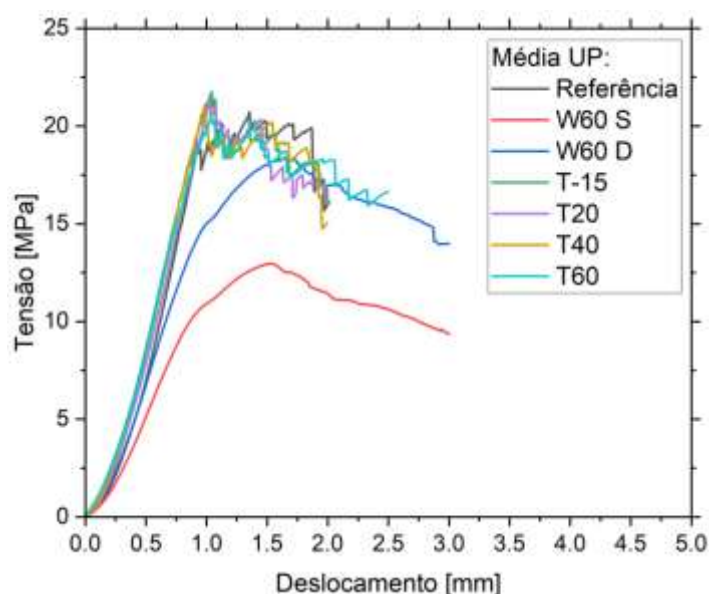


Figura 68 - Tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por série) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de GFRP com resina UP

Segundo a norma EN ISO 14130 ('EN ISO 14130', 1997), existem sete modos de rotura para o ensaio com três pontos de carga: (i) rotura por corte simples; (ii) rotura por cortes múltiplos; (iii) rotura por corte e tensão (iv) rotura por corte e compressão; (v) rotura por compressão; (vi) rotura por tração; (vii) rotura por corte plástico (ver Figura 69). Apenas a rotura por corte simples e por cortes múltiplos são aceitáveis para este ensaio. O modo de rotura da maioria dos provetes foi por fratura por cortes múltiplos e corte simples. Apenas o ambiente W60 S teve todos os provetes com modo de rotura por corte plástico, ou seja, nenhum ensaio obteve um modo de rotura aceitável. Tendo em conta os modos de rotura, pode-se verificar que o ambiente hidrotérmico (W60 S e W60 D) provoca elevada degradação, contudo verifica-se que quando ensaiado saturado (W60 S), o comportamento do compósito é significativamente afetado pois leva à alteração do modo de rotura. Tal observação é complementar à observada nos ensaios de flexão.

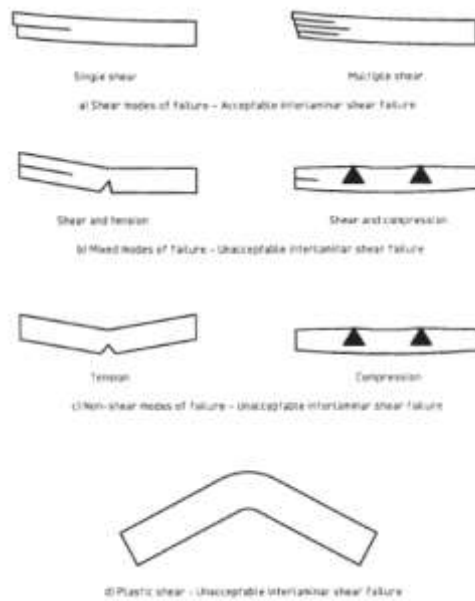


Figura 69 - Possíveis modos de rotura nos ensaios nos ensaios de corte interlaminar ('EN ISO 14130', 1997)

Tabela 23 - Resultados nos ensaios de corte interlaminar dos provetes com resina VE

Série	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]	Modos de Rotura ⁽¹⁾
Referência	17,96 (5,6%)	1,64 (3,2%)	42,09 (5,6%)	Corte múltiplo (2); Corte simples (3)
W60 S	11,08 (1,9%)	2,15 (2,0%)	25,29 (1,4%)	Rotura por tração (5)
W60 D	11,08 (0,21%)	2,02 (2,8%)	25,96 (1,9%)	Rotura por tração (5)
T-15	16,58 (2,8%)	1,61 (6,7%)	38,86 (2,8%)	Corte múltiplo (2); Corte simples (3)
T20	17,46 (5,7%)	1,67 (4,9%)	40,91 (5,7%)	Corte múltiplo (3); Corte simples (2)
T40	17,08 (6,0%)	1,62 (2,5%)	40,02 (3,0%)	Corte múltiplo (4); Corte simples (2)
T60	16,03 (5,5%)	1,55 (2,4%)	37,65 (5,2%)	Corte múltiplo (4); Corte e tração (1)

Nota: Os valores em percentagem apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação; ⁽¹⁾ Os valores entre parenteses corresponde ao número de provetes com o modo de rotura indicado. De acordo com a norma EN ISO 14130, nos modos de rotura não aceitáveis, a tensão apresentada não deve ser interpretada como tensão máxima de corte interlaminar.

Tendo como base os valores acima referidos os ambientes envelhecidos são comparados com o ambiente de referência e nota-se que todos tiveram uma diminuição da tensão máxima de corte. O ambiente que mais teve esse decréscimo foi o W60 S, com uma redução de 39.91% do valor de referência e o ambiente com menor variação foi o T20 com uma redução de 2.8% do valor de referência. Portanto, depois da referência, o ambiente com 20°C é o que possui maior resistência com valor com uma média de 40.91 MPa, em seguida o ambiente com 40°C com 40.02 MPa, depois o ambiente com -15°C com 38.86 MPa, posteriormente estão os ambientes com 60°C, W60 D e W60 S com 37.65 MPa, 25.96 MPa e 25.29 MPa, respetivamente. Novamente, pode-se admitir que nos ambientes T-15, T20, T40 e T60, a variação não é significativa. Assim como na resina poliéster insaturado, a resina viniléster também apresenta degradação significativa em ambiente com água destilada, em que há diminuição da rigidez na sua resistência. Na Figura 70, é possível observar esta maior degradação nas séries W60 S e W60 D.

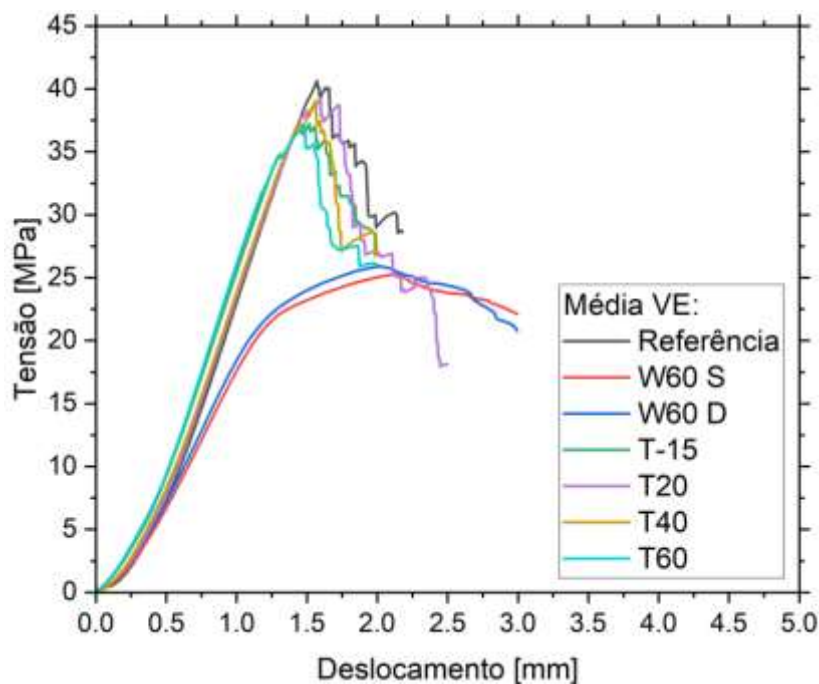


Figura 70 - Tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por série) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de GFRP com resina VE

O modo de rotura da maioria dos provetes foi por fratura por cortes múltiplos e corte simples, mas o ambiente W60 S teve todos os provetes com modo de rotura por tensão e o ambiente W60 S com todas as fraturas por tensão, ou seja, nenhum dos dois ambientes tiveram um modo de rotura aceitável. Novamente, este resultado é indicador da maior degradação devido às condições hidrotérmicas deste ambiente.

São apresentadas em seguida várias figuras com a tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por série) para os diferentes ambientes, com o objetivo de facilitar a comparação entre os compósitos com matriz em poliéster insaturado (UP) e viniléster (VE). Assim, a Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74 apresentam a comparação para as séries de referência, W60 S e W60 D, T15 e T20, e T40 e T60, respetivamente.

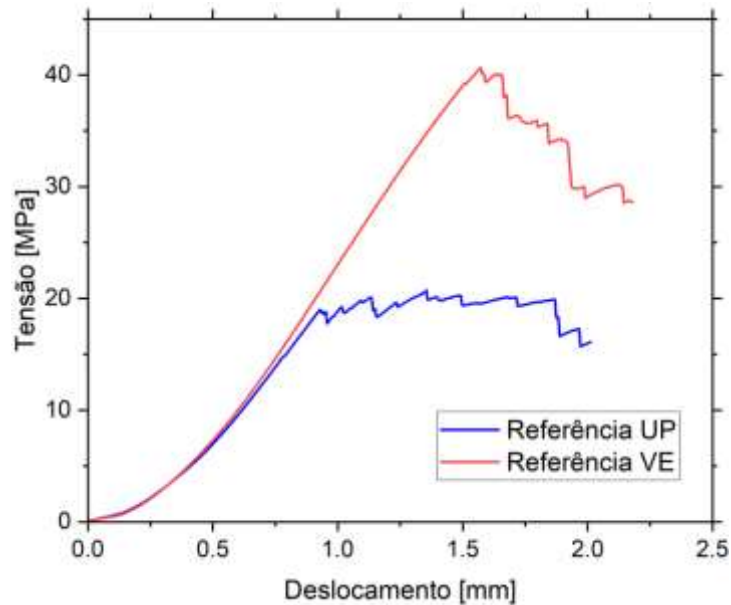


Figura 71 - Tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por série) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de referência de GFRP com resina VE e UP

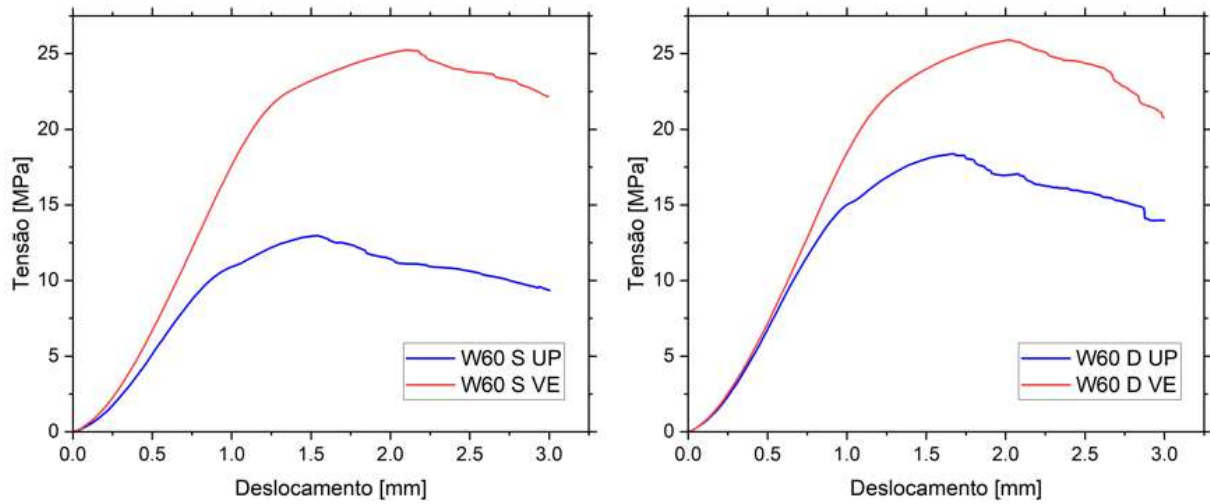


Figura 72 - Tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de W60 S e W60 D de GFRP com resina VE e UP

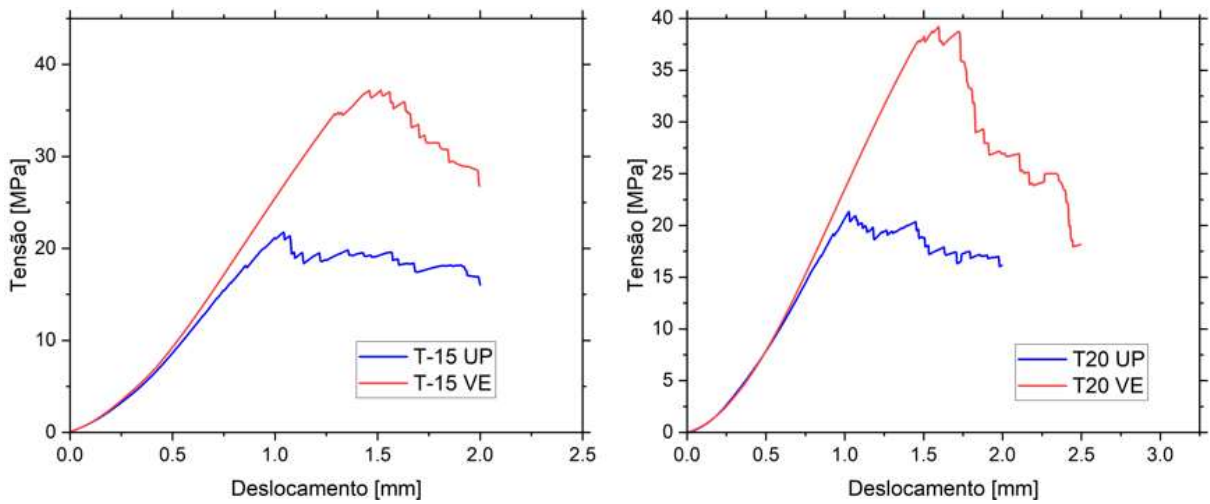


Figura 73 - Tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de T-15 e T20 de GFRP com resina VE e UP

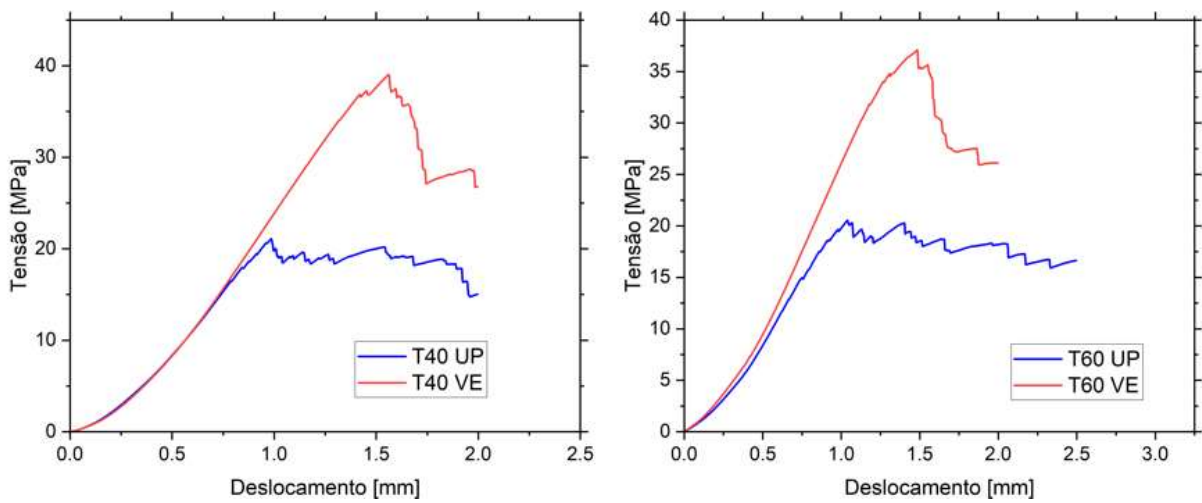


Figura 74 - Tensão *versus* deslocamento a meio vão (curva média por serie) de ensaios de corte interlaminar aos provetes de T40 e T60 de GFRP com resina VE e UP

A partir dos gráficos apresentados acima (ver Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74), torna-se claro que o compósito com resina viniléster tem maior resistência de corte interlaminar e mais rigidez que a solução com resina de poliéster insaturado. Além disso, a resina viniléster, em ambientes saturados, absorve menos umidade do que a resina poliéster insaturado e conseqüentemente obtém uma melhor durabilidade em água. Finalmente, será também de referir que os provetes com resina VE apresentam maior teor em fibras, que também contribui para um melhor comportamento destes, por comparação com os provetes com resina UP.

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões gerais

A presente dissertação tem como principal objetivo o estudo da durabilidade de compósitos de fibra de vidro (GFRP), produzidos por pultrusão, com matriz de poliéster insaturado e viniléster, utilizados em estruturas de Engenharia Civil, tendo sido desenvolvida no âmbito do projeto DURABLE-FRP.

Foi avaliado o comportamento mecânico dos provetes de referência e envelhecidos (envelhecimento acelerado em laboratório) sob o efeito de diferentes ambientes, através de ensaios de (i) tração uniaxial a 0°, (ii) tração uniaxial a 90°, (iii) compressão uniaxial a 0°, (iv) flexão, (v) corte no plano, e (vii) corte interlaminar. A campanha experimental de envelhecimento acelerado incluiu os seguintes ambientes: (i) temperatura constante de -15 °C, 20 °C, 40 °C e 60°C e (ii) imersão em água desmineralizada a 60 °C.

De forma geral, uma degradação significativa ocorreu em provetes envelhecidos em água desmineralizada (W60 S e W60 D). Na avaliação dos resultados no ensaio à flexão, houve uma degradação máxima no ambiente W60 S (41%) e mínima no T-15 (4.15%), por comparação com a série de referência (T20) cujo valor da tensão é de 481.21 MPa. Por outro lado, haverá que referir que os modos de rotura foram rotura por tração nas fibras e rotura por corte interlaminar.

Para os resultados nos ensaios de corte interlaminar, houve uma degradação máxima no ambiente W60 S e mínima no T-15, que com a influência da pós-cura teve um aumento na sua resistência. O valor máximo foi 22.78 MPa (T-15 UP) e o mínimo foi 13.05 MPa (W60 S UP), sendo que na série de referência se obteve uma tensão de 21.9 MPa. Os modos de rotura dominantes foram fratura por cortes múltiplos, corte simples, rotura por tração e rotura por corte plástico.

Os resultados nos ensaios à tração uniaxial 0°, houve uma degradação máxima no ambiente W60 S (50.34%) e mínima no T40 (5.73%), por comparação com a série de referência cujo valor da tensão é de 422.97 MPa. Por outro lado, haverá de referir que os modos de rotura foram rotura explosiva localizada e rotura na lateral do provete. Na avaliação dos resultados do ensaio à tração uniaxial 90°, houve uma degradação máxima no ambiente W60 S e mínima no T20, que com a influência da pós-cura teve um aumento na sua resistência. O valor máximo foi 56.60 MPa (T20 UP) e o mínimo foi 37.27 MPa (W60 S UP), sendo que na série de referência se obteve uma tensão de 54.8 MPa. Os modos de rotura dominantes foram fratura lateral no meio do provete, fratura angular no meio, fratura lateral no topo.

Na avaliação dos resultados no ensaio à corte no plano, houve uma degradação máxima no ambiente W60 S e mínima no T-15, que com a influência da pós-cura teve um aumento na sua resistência. O valor

máximo foi 82.22 MPa (T-15 UP) e o mínimo foi 32.52 MPa (W60 S UP), sendo que na série de referência se obteve uma tensão de 72.55 MPa. Os modos de rotura dominantes foram fratura número 1 e fratura número 2.

Na avaliação dos resultados no ensaio à compressão, houve uma degradação máxima no ambiente W60 S e mínima no T40, que com a influência da pós-cura teve um aumento na sua resistência. O valor máximo foi 661.87 MPa (T40 VE) e o mínimo foi 254.76 MPa (W60 S UP), sendo que na série de referência se obteve uma tensão de 521.53 MPa. Os modos de rotura dominantes foram fratura complexa.

Independentemente do tipo de ensaio, os provetes com a resina viniléster (VE) apresentam melhor comportamento do que os com a resina poliéster insaturada (UP) em ambiente com água.

5.2. Trabalhos futuros

No que respeita a futuros trabalhos, destacam as seguintes atividades a desenvolver:

- Dar continuidade aos ensaios para períodos de exposição maiores, pois 6 meses parecem não ter sido suficientes para alterar de forma relevante as propriedades dos compósitos, exceto os provetes em ambiente em água desmineralizada (W60);
- Fazer ensaios em ambientes reais, ou seja, em ambiente natural;
- Comparar resultados obtidos com resultados existentes na literatura;
- Analisar soluções/sistemas de proteção comercial e/ou desenvolver novos, para aumento da durabilidade em ambientes que envolvam água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ‘ASTM D3039/D3039M’ (2002) *Standard test method for shear properties of composite materials by the V-Notched beam method* [Preprint].
- ‘ASTM D5379’ (2005) , *Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method* [Preprint].
- Bakis, C.E. *et al.* (2002) ‘Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review’, *Journal of Composites for Construction*, 6(2), pp. 73–87. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73)).
- Benmokrane, B. *et al.* (2001) ‘Effects of Alkaline Environment’, p. 16.
- Berens, A.R. and Hopfenberg, H.B. (1978) ‘Diffusion and relaxation in glassy polymer powders: 2. Separation of diffusion and relaxation parameters’, *Polymer*, 19(5), pp. 489–496. Available at: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(78\)90269-0](https://doi.org/10.1016/0032-3861(78)90269-0).
- Bstien, J., Rudolf Ganz, H. and Taerwe, L. (2019) *Externally applied FRP reinforcement for concrete structures*.
- Budhe, S. *et al.* (2017) ‘An updated review of adhesively bonded joints in composite materials’, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 72, pp. 30–42. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010>.
- Cabral-Fonseca, S. *et al.* (2012) ‘Artificial Accelerated Ageing of GFRP Pultruded Profiles Made of Polyester and Vinylester Resins: Characterisation of Physical-Chemical and Mechanical Damage: Artificial Accelerated Ageing of GFRP Pultruded Profiles’, *Strain*, 48(2), pp. 162–173. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2011.00810.x>.
- Ceroni, F. *et al.* (2006) ‘Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members’, *Cement and Concrete Composites*, 28(10), pp. 857–868. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.004>.
- Chin, J.W., Martin, J. and Nguyen, T. (2001) ‘Effects of Ultraviolet (UV) Radiation’, p. 20.
- Civil Engineering Research Foundation (2001) *Gap analysis for durability of fiber reinforced polymer composites in civil infrastructure*. Washington, DC: The Civil Engineering Research Foundation.
- Correia, J.R. (2000) ‘Utilização de materiais FRP na reabilitação e reforço de estruturas’, p. 136.
- Cruz, R. *et al.* (2021) ‘Durability of Epoxy Adhesives and Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Used in Strengthening Systems: Accelerated Ageing versus Natural Ageing’, *Materials*, 14(6), p. 1533. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma14061533>.
- ‘EN ISO 527-4’ (1997) *Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites* [Preprint].

‘EN ISO 1172’ (1996) *Textile-glass-reinforced plastic - Prepregs, moulding compounds and laminates - Determination of the textile-glass and mineral filler content - Calcination methods* [Preprint]. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/5750/145d1566998f48a5a41a06ccf0bd9174/ISO-1172-1996.pdf> (Accessed: 27 October 2022).

‘EN ISO 2078’ (1993) *Textile glass - Yarn - Designation* [Preprint]. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/6865/46b9451bc2564fe6b95a74f9daa6253a/ISO-2078-1993.pdf> (Accessed: 29 July 2022).

‘EN ISO 14125’ (1998) *Fibre-reinforced plastic composites: Determination of flexural properties* [Preprint].

‘EN ISO 14126’ (1999) *Determinação das propriedades de impressão no plano laminado* [Preprint].

‘EN ISO 14130’ (1997) *Fibre-reinforced plastic composites: Determination of apparent laminar shear strength by short-beam method* [Preprint].

Fernandes, P. *et al.* (2018) ‘Durability of bond in NSM CFRP-concrete systems under different environmental conditions’, *Composites Part B: Engineering*, 138, pp. 19–34. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.022>.

Ghorbel, I. and Valentin, D. (1993) ‘Hydrothermal effects on the physico-chemical properties of pure and glass fiber reinforced polyester and vinylester resins’, *Polymer Composites*, 14(4), pp. 324–334. Available at: <https://doi.org/10.1002/pc.750140408>.

Green, M.F. *et al.* (2006) ‘FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions’, *Cement and Concrete Composites*, 28(10), pp. 928–937. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.008>.

Gudonis, E. *et al.* (2014) ‘FRP reinforcement for concrete structures: State of the art review of application and design’, *Engineering Structures and Technologies*, 5(4), pp. 147–158. Available at: <https://doi.org/10.3846/2029882X.2014.889274>.

Heshmati, M., Haghani, R. and Al-Emrani, M. (2015) ‘Environmental durability of adhesively bonded FRP/steel joints in civil engineering applications: State of the art’, *Composites Part B: Engineering*, 81, pp. 259–275. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.07.014>.

Hunston, D. *et al.* (2001) ‘Effects of Moisture/Aqueous Solutions’, p. 14.

Kaczmarek, H. (1996) ‘Changes to polymer morphology caused by u.v irradiation: 1. Surface damage’, *Polymer*, 37(2), pp. 189–194. Available at: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)81086-X](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)81086-X).

Karbhari, V.M. *et al.* (2003) ‘Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure’, *Journal of Composites for Construction*, 7(3), pp. 238–247. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:3\(238\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:3(238)).

Lee, S.-B., Rockett, T.J. and Hoffman, R.D. (1992) ‘Interactions of water with unsaturated polyester, vinyl ester and acrylic resins’, *Polymer*, 33(17), pp. 3691–3697. Available at: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(92\)90657-I](https://doi.org/10.1016/0032-3861(92)90657-I).

Liao, K., Schultheisz, C.R. and Hunston, D.L. (1999) 'Effects of environmental aging on the properties of pultruded GFRP', *Composites Part B: Engineering*, 30(5), pp. 485–493. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00013-X](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00013-X).

Luigi Ascione, Jean-François Caron, João Ramôa Correia, Wouter De Corte, Patrice Godonou, Jean Knippers, Eric Moussiaux, Toby Mottram, Matthias Oppe, Nuno Silvestre, Peter Thorning, Liesbeth Trom (2016) 'Prospect for New Guidance in the Design of FRP Structures'. Available at: https://eucia.eu/userfiles/files/Eucia_Prospect%20for%20New%20Guidance%20in%20the%20Design%20of%20FRP%20Structures_web2.pdf (Accessed: 18 May 2022).

Murphy, J. (1994) *The reinforced plastics handbook*. 1st ed. Oxford, UK: Elsevier Advanced Technology.

Myung Cheon Lee and Peppas, N.A. (1993) 'Water transport in epoxy resins', *Progress in Polymer Science*, 18(5), pp. 947–961. Available at: [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(93\)90022-5](https://doi.org/10.1016/0079-6700(93)90022-5).

Pereira, A.M. (2009) 'Materiais de construção I, ESTT'.

Pickett, J.E. and Coyle, D.J. (2013) 'Hydrolysis kinetics of condensation polymers under humidity aging conditions', *Polymer Degradation and Stability*, 98(7), pp. 1311–1320. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.04.001>.

Schutte, C.L. (1994) 'Environmental durability of glass-fiber composites', *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 13(7), pp. 265–323. Available at: [https://doi.org/10.1016/0927-796X\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0927-796X(94)90002-7).

Sena-Cruz, J. (2021) 'NSM FRP Strengthening Systems: An overview'.

Svetlik, S.L. (2008) 'An investigation in the hygrothermal degradation of an E- glass/vinyl-ester composite in humid and immersion environments', p. 429.

Ventura, A.M. (2009) 'Os Compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas', 27, p. 10.

Weitsman, Y.J. (2012) 'Fluid Effects in Polymers and Polymeric Composites', p. 189. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1059-1>.

Weitsman, Y.J. and Guo, Y.-J. (2002) 'A correlation between fluid-induced damage and anomalous fluid sorption in polymeric composites', *Composites Science and Technology*, 62(6), pp. 889–908. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00032-5).

Zhao, X.-L. and Zhang, L. (2007) 'State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures', *Engineering Structures*, 29(8), pp. 1808–1823. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.10.006>.

ANEXO I – Caracterização física

No presente anexo são mostradas as dimensões dos provetes ensaiados no ensaio de calcinação e suas em relação as suas dimensões, foi medido a espessura dos provetes (e), medido em 3 pontos diferentes do provete a largura de base (b) e a largura do provete (l).

Tabela 24 - Dimensão dos provetes para o ensaio de calcinação

Resina	Provete	e [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b ₃ [mm]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	l ₃ [mm]
UP	1	8.0	27.0	26.5	26.5	30.0	30.0	30.0
	2	8.0	27.0	26.5	26.5	30.0	29.0	29.0
	3	8.0	29.5	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
	4	8.0	29.0	29.0	29.0	26.0	26.0	25.5
VE	1	8.0	30.0	30.0	30.0	26.0	26.0	26.5
	2	8.0	28.5	28.5	28.5	30.0	30.0	30.0
	3	8.0	26.5	26.0	26.5	30.0	30.0	30.0
	4	8.0	30.5	30.0	30.0	30.0	29.0	29.0

ANEXO II – Caracterização mecânica

Neste anexo são apresentadas as dimensões, os resultados obtidos dos provetes ensaiados, junto da representação gráfica da força *vs.* deslocamento e o pós ensaio dos provetes para os ensaios de referência. No que diz respeito as dimensões dos provetes, durante a preparação do ensaio foi pesado os provetes, medido o comprimento total dos provetes (L), medido em 3 pontos diferentes do provete a largura de base (B) e altura do provete (H).

- Ensaio de flexão:

Tabela 25 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio de flexão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	52.8	239	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
	2	53.4	239	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
	3	52.5	239	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
	4	53.1	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
	5	51.8	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
	6	52.8	239	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
Média		52.73	239.3	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	53.5	239	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
	2	54.3	239	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
	3	54.1	239	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
	4	54	239	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
	5	53.7	238	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
	6	52.7	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
Média		53.2	239	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 26 - Resultados dos ensaios de flexão de referência

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	1.76	21.25	550.81
	2	1.78	20.65	557.21
	3	1.47	19.03	459.06
	4	1.70	20.53	531.04
	5	1.55	20.85	483.19
	6	1.70	21.01	532.01
	Média	1.66	20.55	518.88
	Desvio Padrão	0.10	0.51	31.84
	Coefficiente de Variação	6.1%	2.5%	6.1%
VE	1	1.62	18.46	504.88
	2	1.88	19.06	587.95
	3	1.72	17.70	536.22
	4	1.75	18.74	546.24
	5	1.70	18.52	532.40
	6	1.69	19.13	528.25
	Média	1.73	18.60	539.32
	Desvio Padrão	0.06	0.38	18.51
	Coefficiente de variação	3.4%	2.0%	3.4%

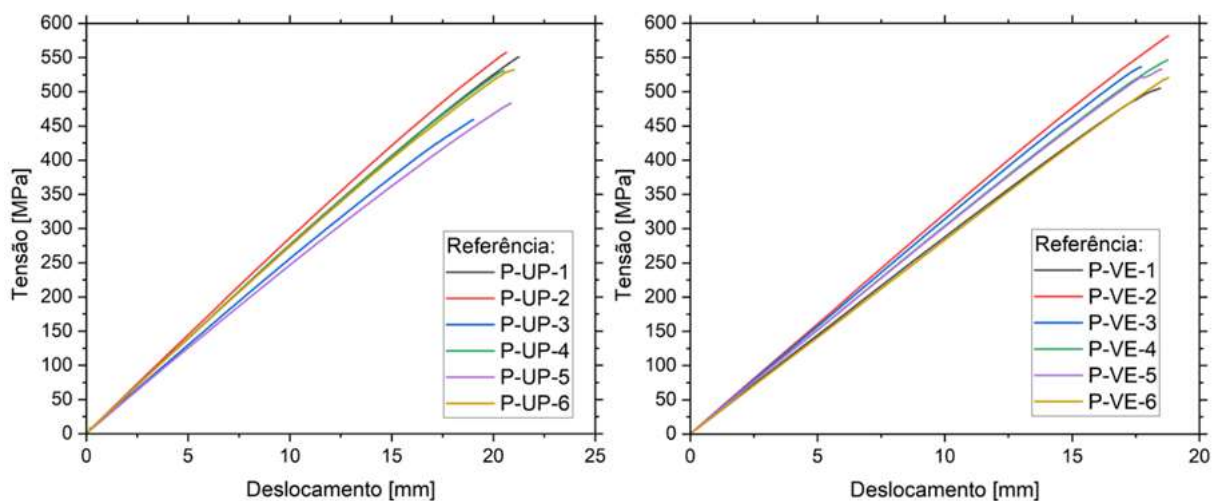


Figura 75 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de flexão



Figura 76 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de flexão UP



Figura 77 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de flexão VE

- Ensaio de corte interlaminar:

Tabela 27 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio de corte interlaminar

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	48.93	80	42	42	42	8	8	8
	2	48.97	80	42	42	41	8	8	8
	3	49.63	80	41	41	41	8	8	8
	4	48.86	80	40	40	40	8	8	8
	5	49.19	80	42	41	41	8	8	8
Média		49.12	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0
VE	1	48	80	41.5	41.3	41.2	8.0	8.0	8.0
	2	49.93	80	41.5	41.5	41.4	8.0	8.0	8.0
	3	49.95	80	41.5	41.6	41.6	8.0	8.0	8.0
	4	49.34	80	41.6	41.5	41.5	8.0	8.0	8.0
	5	49.55	80	41.5	41.3	41.3	8.0	8.0	8.0
Média		49.35	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0

Tabela 28 - Resultados dos ensaios de corte interlaminar de referência

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	9.12	1.36	21.37
	2	9.57	0.95	22.42
	3	9.03	1.86	21.16
	4	9.90	1.14	23.20
	5	9.11	1.97	21.36
	Média	9.35	1.46	21.90
	Desvio Padrão	0.31	0.37	0.73
	Coefficiente de Variação	3.3%	25.3%	3.3%
VE	1	16.15	1.58	37.86
	2	18.54	1.69	43.45
	3	17.24	1.57	40.41
	4	18.97	1.70	44.47
	5	18.89	1.68	44.28
	Média	17.96	1.64	42.09
	Desvio Padrão	1.010	0.053	2.367
	Coefficiente de variação	5.6%	3.2%	5.6%

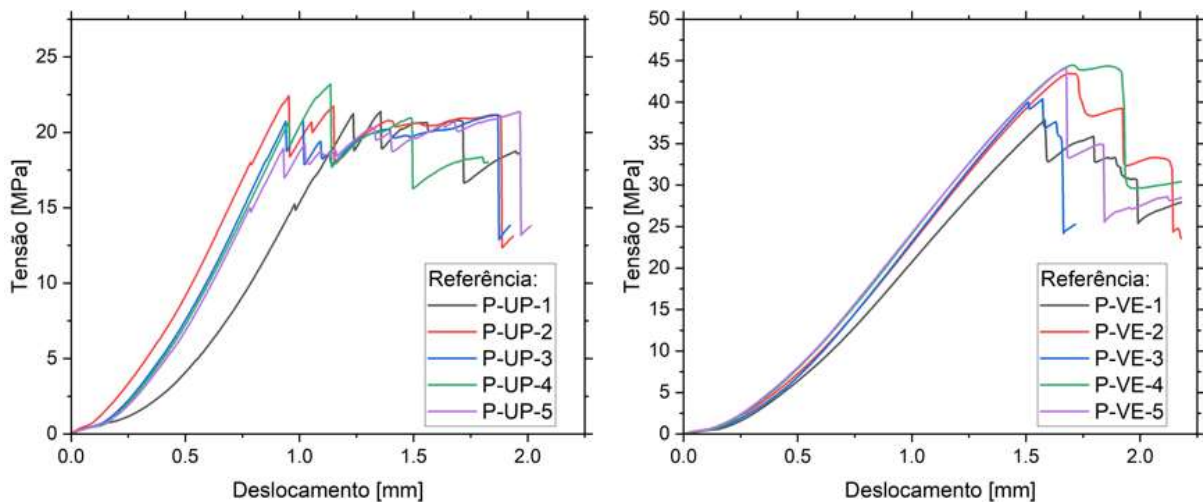


Figura 78 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de corte interlaminar



Figura 79 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de corte interlaminar UP



Figura 80 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de corte interlaminar VE

- Ensaio de tração 0°:

Tabela 29 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio tração 0°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	111.63	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	111.78	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	110.20	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	111.88	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	111.04	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	111.46	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		111.33	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	112.66	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	113.2	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	113.96	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	109.3	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	112.83	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	113.69	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		112.61	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 0° de referência

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\max}$ [MPa]	$\varepsilon_{f\max}$ [%]
UP	1	30.40	432.94	1.66
	2	30.59	422.31	1.55
	3	27.37	419.54	1.59
	4	-	-	-
	5	31.71	423.63	1.51
	6	26.62	416.43	1.18
	Média	29.34	422.97	1.50
	Desvio Padrão	1.88	4.25	0.13
	Coefficiente de Variação	6.4%	1.0%	8.6%
VE	1	33.58	450.11	1.44
	2	33.26	460.07	1.46
	3	35.43	469.85	1.46
	4	-	-	-
	5	31.54	443.20	1.45
	6	34.45	458.84	1.44
	Média	33.65	456.41	1.45
	Desvio Padrão	1.03	7.81	0.01
	Coefficiente de variação	3.1%	1.7%	0.6%

Nota: P-UP-4 teve perda de resultados e P-VE-4 teve uma rotura inválida

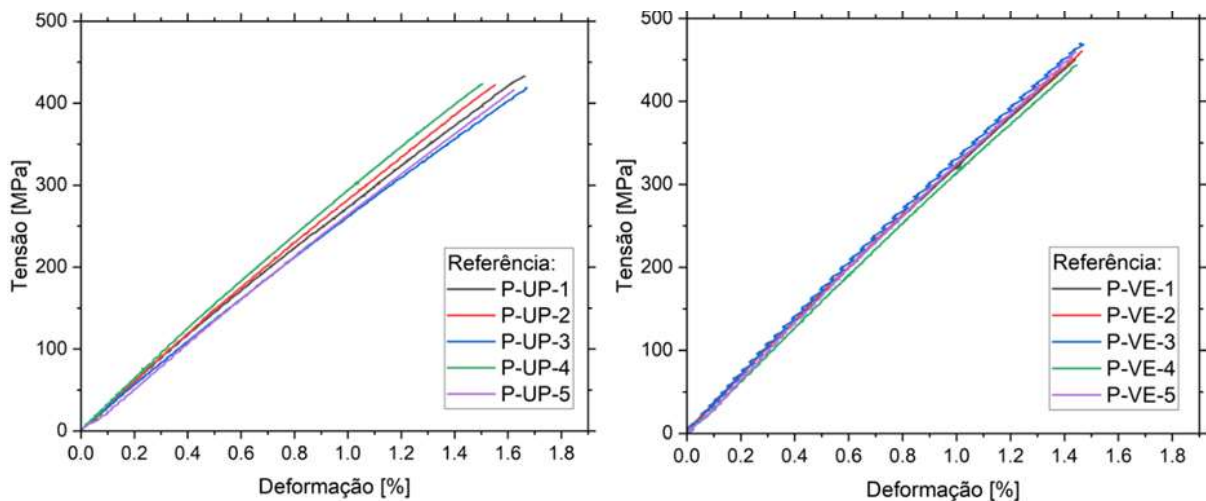


Figura 81 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de tração 0°

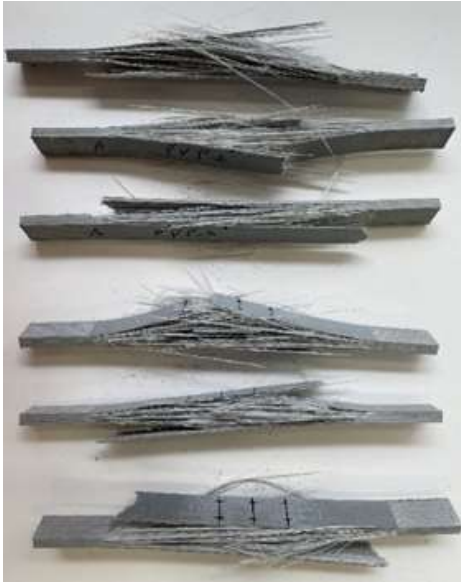


Figura 82 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de tração 0° UP



Figura 83 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de tração 0° VE

- Ensaio de tração 90°:

Tabela 30 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio tração 0°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	91.23	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	91.61	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	91.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	91.46	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	91.21	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	91.28	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		91.40	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	93.13	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	92.48	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	92.86	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	93.08	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	92.94	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	92.77	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		92.88	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado do ensaio de tração 0° de referência

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\epsilon_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	5.56	55.84	1.54
	2	6.45	57.05	1.50
	3	5.20	52.85	1.32
	4	5.84	57.69	1.71
	5	5.86	49.58	1.06
	6	6.82	55.81	1.58
	Média	5.95	54.80	1.45
	Desvio Padrão	0.45	2.39	0.18
	Coefficiente de Variação	7.6%	4.4%	12.2%
VE	1	9.94	61.53	1.14
	2	-	-	-
	3	10.17	66.63	1.38
	4	10.61	60.99	1.13
	5	10.38	65.24	1.17
	6	9.82	59.40	1.14
	Média	10.18	62.76	1.19
	Desvio Padrão	0.25	2.54	0.07
	Coefficiente de variação	2.4%	4.0%	6.3%

Nota: P-VE-2 teve perda de resultado

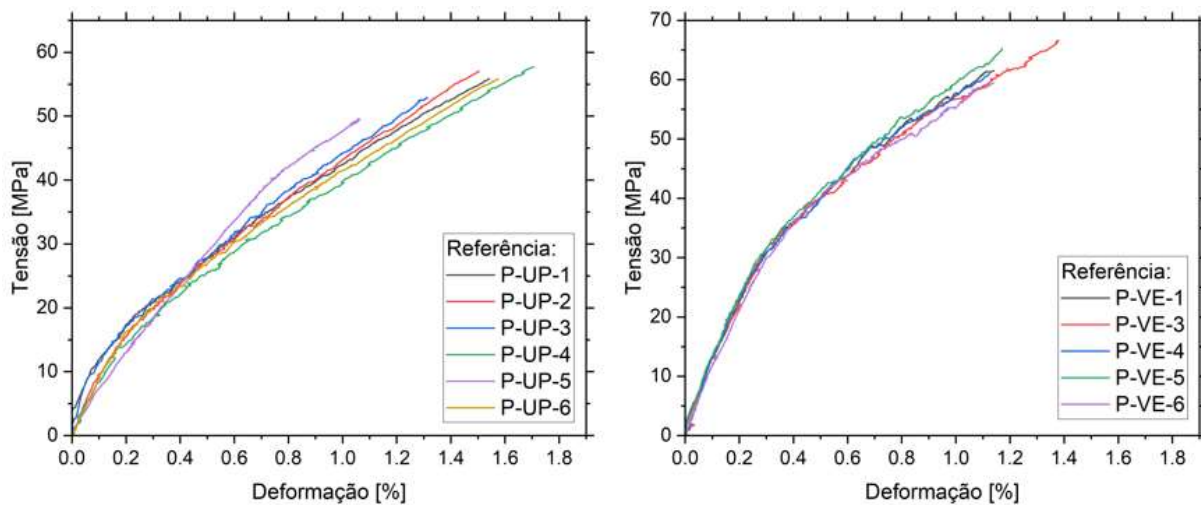


Figura 84 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de tração 90°



Figura 85 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de tração 90° UP



Figura 86 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de tração 90° VE

- Ensaio de corte no plano:

Tabela 31 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio tração 0°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	22.02	76	20.0	12.4	20.0	8.0	8.0	8.0
	2	21.89	76	20.0	12.4	20.0	8.0	8.0	8.0
	3	22.03	76	20.0	12.3	20.0	8.0	8.0	8.0
	4	21.74	76	20.0	12.3	20.0	8.0	8.0	8.0
	5	21.27	76	20.0	12.5	20.0	8.0	8.0	8.0
Média		21.79	76	20.0	12.38	20.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	22.44	76	20.0	12.5	20.0	8.0	8.0	8.0
	2	22.29	76	20.0	12.6	20.0	8.0	8.0	8.0
	3	22	76	20.0	12.5	20.0	8.0	8.0	8.0
	4	22.54	76	20.0	12.6	20.0	8.0	8.0	8.0
	6	22.69	76	20.0	12.6	20.0	8.0	8.0	8.0
Média		22.39	76	20.0	12.56	20.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 0° de referência

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\epsilon_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	3.50	69.45	2.17
	2	3.05	77.47	2.41
	3	3.79	75.58	3.10
	4	2.98	67.72	3.17
	5	-	-	-
	Média	3.33	72.55	2.71
	Desvio Padrão	0.32	3.97	0.43
	Coefficiente de Variação	9.6%	5.5%	15.7%
VE	1	4.03	89.39	3.96
	2	3.87	77.94	3.21
	3	4.41	85.45	6.30
	4	2.17	87.29	3.31
	5	4.94	83.02	3.75
	Média	3.88	84.62	4.11
	Desvio Padrão	0.69	3.31	0.88
	Coefficiente de variação	17.8%	3.9%	21.4%

Nota: P-UP-5 teve perda de resultado

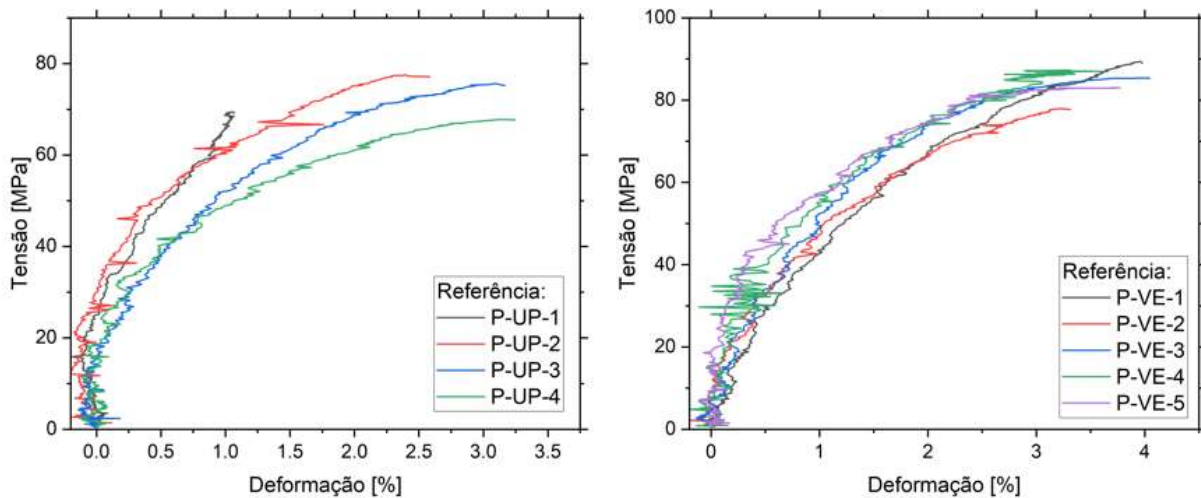


Figura 87 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de corte no plano



Figura 88 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de corte no plano UP



Figura 89 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de corte no plano VE

- Ensaio de compressão:

Tabela 32 - Dimensões dos provetes de referência para o ensaio compressão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	55.56	153	25	25	25	8	8	8
	2	55.51	153	25	25	25	8	8	8
	3	55.83	153	25	25	25	8	8	8
	4	55.77	153	25	25	25	8	8	8
	5	53.33	153	25	25	25	8	8	8
	6	55.64	153	25	25	25	8	8	8
	7	56.21	153	25	25	25	8	8	8
Média		55.41	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	57.74	153	25	25	25	8	8	8
	2	53.36	153	25	25	25	8	8	8
	3	56.65	153	25	25	25	8	8	8
	4	57.07	153	25	25	25	8	8	8
	5	56.55	153	25	25	25	8	8	8
	6	55.36	153	25	25	25	8	8	8
	7	57.06	153	25	25	25	8	8	8
Média		56.25	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 0° de referência

Resina	Provetes	$\sigma_{f\text{máx}}$ [MPa]
UP	1	492.50
	2	504.52
	3	609.60
	4	561.73
	5	-
	6	502.38
	7	458.39
	Média	521.52
	Desvio Padrão	42.76
	Coefficiente de Variação	8.2%
VE	1	490.40
	2	507.57
	3	549.30
	4	475.33
	5	628.64
	6	439.31
	7	445.58
	Média	505.16
	Desvio Padrão	48.58
	Coefficiente de variação	9.6%

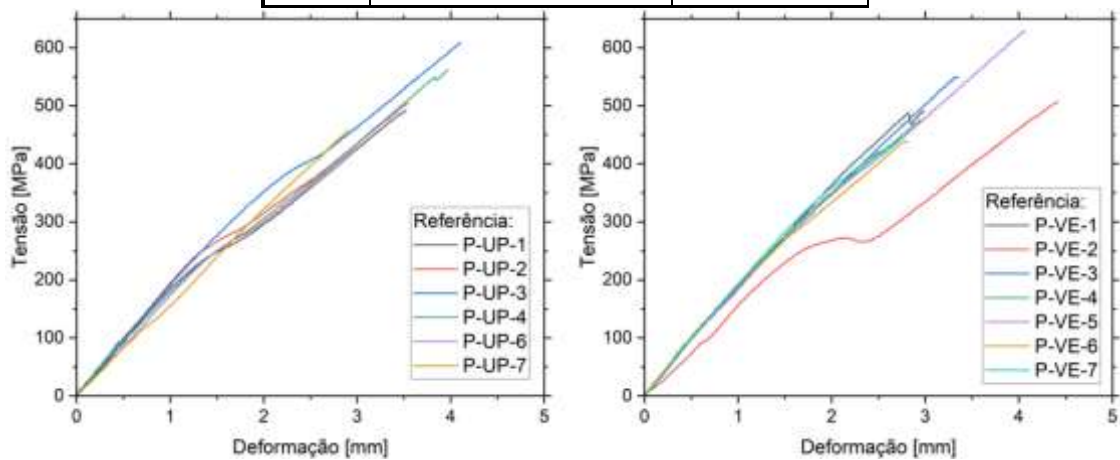


Figura 90 – Gráficos dos provetes de referência nos ensaios de compressão

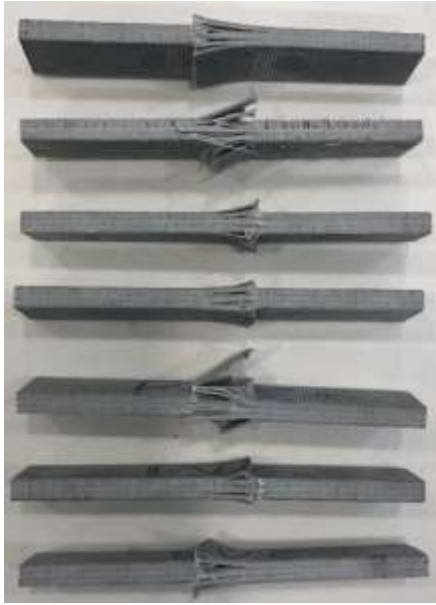


Figura 91 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de compressão VE

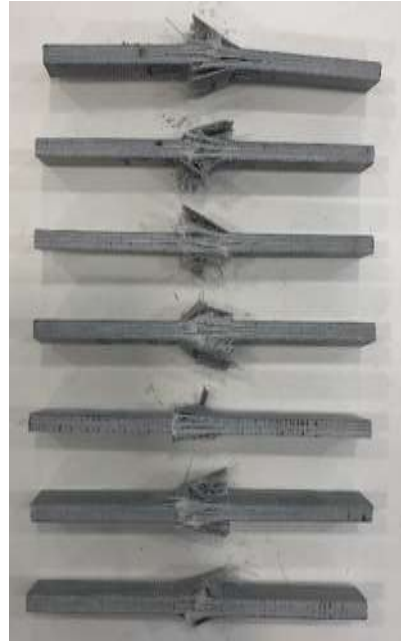


Figura 92 - Modos de rotura dos provetes de referência nos ensaios de compressão UP

ANEXO III – Ensaio de envelhecimento

Neste anexo são apresentadas as dimensões, os resultados obtidos dos provetes ensaiados, com a representação gráfica da força *vs.* deslocamento e o pós ensaio dos provetes para os ensaios de envelhecimento para temperaturas -15, 20, 40, 60 °C e em ambiente imerso em água destilada a 60°C (W60 D e W60 S), todos com duração de 6 meses para flexão, tração a 0° e 90°, compressão, corte interlaminar e corte inplane. No que diz respeito as dimensões dos provetes, durante a preparação do ensaio foi pesado os provetes, medido o comprimento total dos provetes (L), medido em 3 pontos diferentes do provete a largura de base (B) e altura do provete (H).

- Ensaio de flexão:

Ambiente W60 S:

Tabela 33 - Dimensões dos provetes W60 S para o ensaio de flexão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	52.53	240	15	15	15	8	8	8
	2	52.64	240	15	15	15	8	8	8
	3	52.11	240	15	15	15	8	8	8
	4	53.15	240	15	15	15	8	8	8
	5	53.18	240	15	15	15	8	8	8
	6	51.93	240	15	15	15	8	8	8
Média		52.59	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	54.43	240	15	15	15	8	8	8
	2	53.02	240	15	15	15	8	8	8
	3	53.89	240	15	15	15	8	8	8
	4	51.68	240	15	15	15	8	8	8
	5	54.2	240	15	15	15	8	8	8
	6	53.76	240	15	15	15	8	8	8
Média		53.5	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 34 - Resultado dos ensaios de flexão W60 S

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1*	1.03	7.33	256.44
	2*	0.97	7.01	243.17
	3	1.13	9.05	283.4
	4*	1.06	7.45	265.6
	5*	1.25	8.35	312.96
	6*	1.25	9.78	311.3
	Média	1.13	9.05	283.4
	Desvio Padrão	0	0	0
	Coefficiente de Variação	0%	0%	0%
VE	1	1.59	11.27	398.59
	2	1.63	10.68	407.32
	3	1.51	12.10	377.88
	4	1.50	10.95	373.81
	5	1.53	12.10	381.36
	6	1.62	10.27	403.77
	Média	1.56	11.23	390.46
	Desvio Padrão	0.05	0.60	12.77
	Coefficiente de variação	3.3%	5.3%	3.3%

Nota: (*) Provetes com modo de rotura não aceitáveis segundo a norma

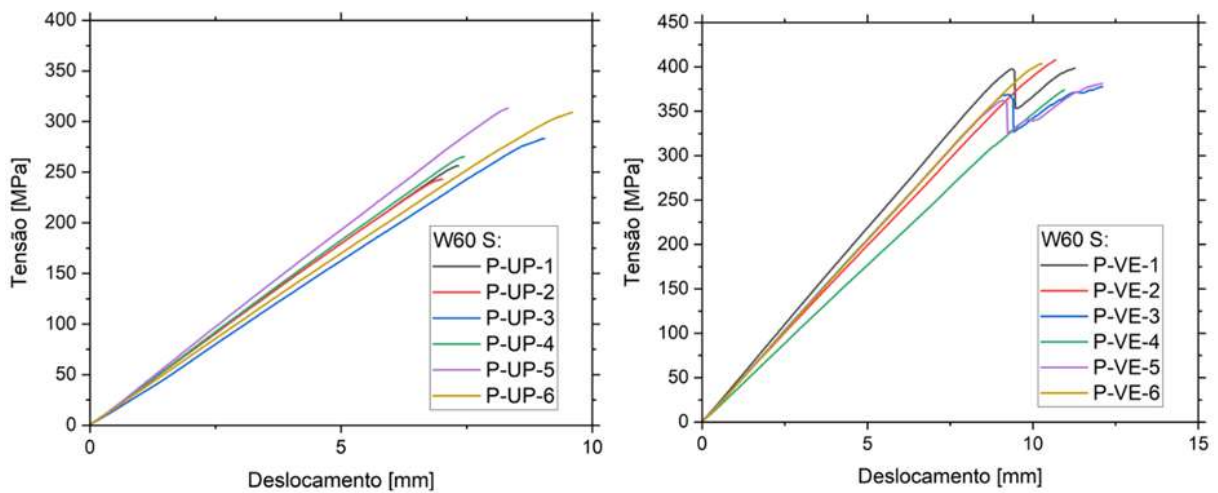


Figura 93 – Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão W60 S

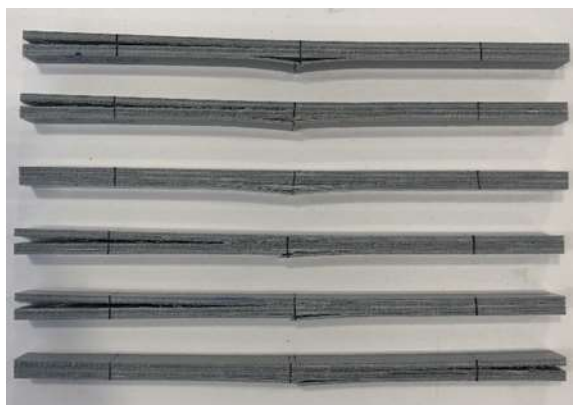


Figura 94 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão W60 S UP



Figura 95 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão W60 S VE

Ambiente W60 D:

Tabela 35 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio de flexão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	52.4	240	15	15	15	8	8	8
	2	52.7	240	15	15	15	8	8	8
	3	50.8	240	15	15	15	8	8	8
	4	52.4	240	15	15	15	8	8	8
	5	51.7	240	15	15	15	8	8	8
	6	52.6	240	15	15	15	8	8	8
Média		52.1	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	51.9	240	15	15	15	8	8	8
	2	53.6	240	15	15	15	8	8	8
	3	52.8	240	15	15	15	8	8	8
	4	53.5	240	15	15	15	8	8	8
	5	53.4	240	15	15	15	8	8	8
	6	53.8	240	15	15	15	8	8	8
Média		53.2	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 36 - Resultado dos ensaios de flexão W60 D

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	1.25	8.6	311.83
	2	1.37	8.93	342.68
	3	1.09	8.27	272.51
	4	1.49	10.28	372.89
	5	1.17	8.67	291.82
	6	1.48	9.92	369.08
	Média	1.31	9.11	326.80
	Desvio Padrão	0.14	0.66	34.75
	Coefficiente de Variação	10.6%	7.2%	10.6%
VE	1	1.74	11.75	435.83
	2	1.64	9.98	410.96
	3	1.64	10.4	410.15
	4	1.74	10.75	435.31
	5	1.58	9.9	395.37
	6	1.57	11.3	391.52
	Média	1.65	10.68	413.19
	Desvio Padrão	0.06	0.59	14.92
	Coefficiente de variação	3.6%	5.5%	3.6%

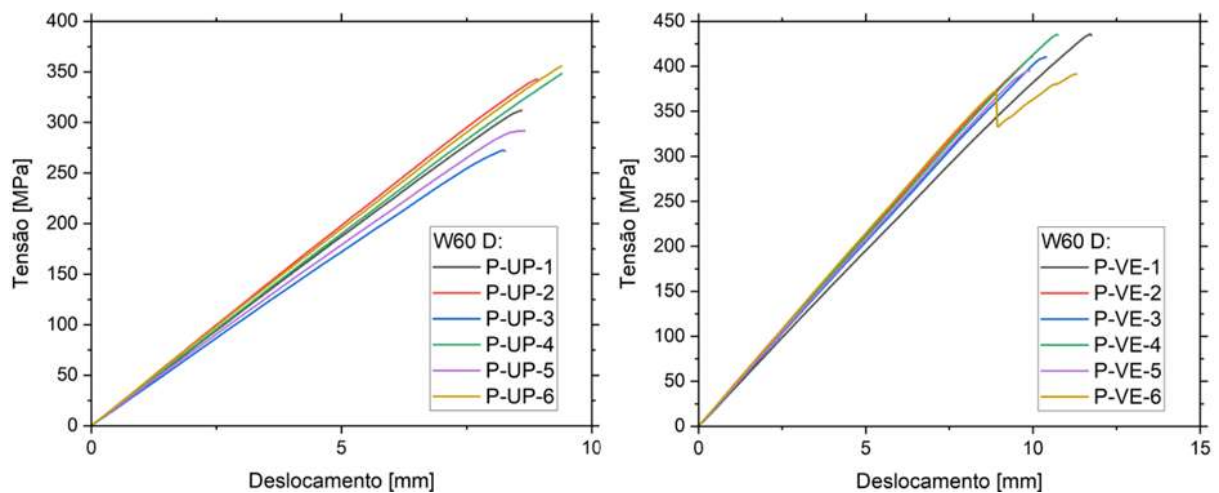


Figura 96 - Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão W60 D

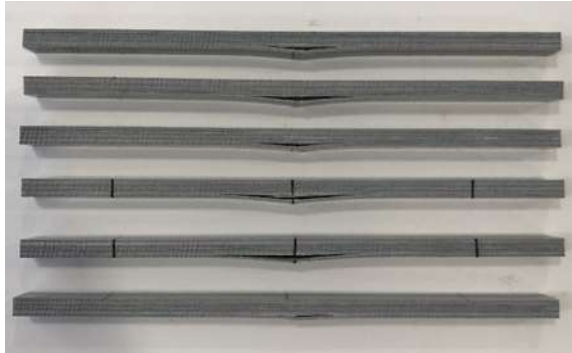


Figura 97 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão W60D UP

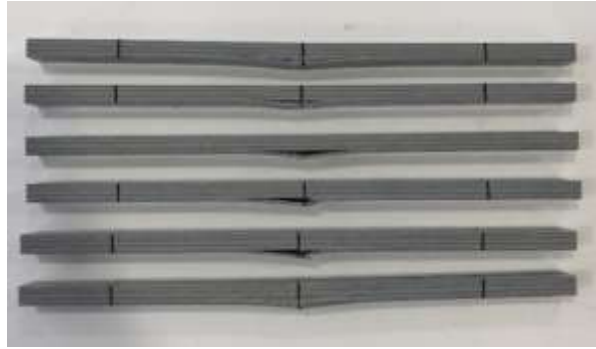


Figura 98 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão W60D VE

Ambiente T-15:

Tabela 37 - Dimensões dos provetes T-15 para o ensaio de flexão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	52.17	240	15	15	15	8	8	8
	2	53.03	240	15	15	15	8	8	8
	3	52.54	240	15	15	15	8	8	8
	4	52.73	240	15	15	15	8	8	8
	5	52.88	240	15	15	15	8	8	8
	6	52.99	240	15	15	15	8	8	8
Média		52.72	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	53.75	240	15	15	15	8	8	8
	2	53.94	240	15	15	15	8	8	8
	3	54.24	240	15	15	15	8	8	8
	4	54	240	15	15	15	8	8	8
	5	52.88	240	15	15	15	8	8	8
	6	51.63	240	15	15	15	8	8	8
Média		53.4	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 38 - Resultado dos ensaios de flexão T-15

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	1.74	13.17	436.2
	2	2.1	14.35	523.89
	3	2.06	14.05	515.25
	4	1.96	14.72	491.16
	5	2.16	13.85	539.78
	6	2	13.27	500.88
	Média	2.00	13.90	501.19
	Desvio Padrão	0.10	0.47	25.11
	Coefficiente de Variação	5.2%	3.4%	5.0%
VE	1	2.13	12.87	531.9
	2	2.07	13.9	517.19
	3	2.24	13.28	561.06
	4	2.2	13.07	550.82
	5	1.97	12.9	492.41
	6	2.02	15	506.17
	Média	2.11	13.50	526.59
	Desvio Padrão	0.09	0.63	21.34
	Coefficiente de variação	4.0%	4.7%	4.1%

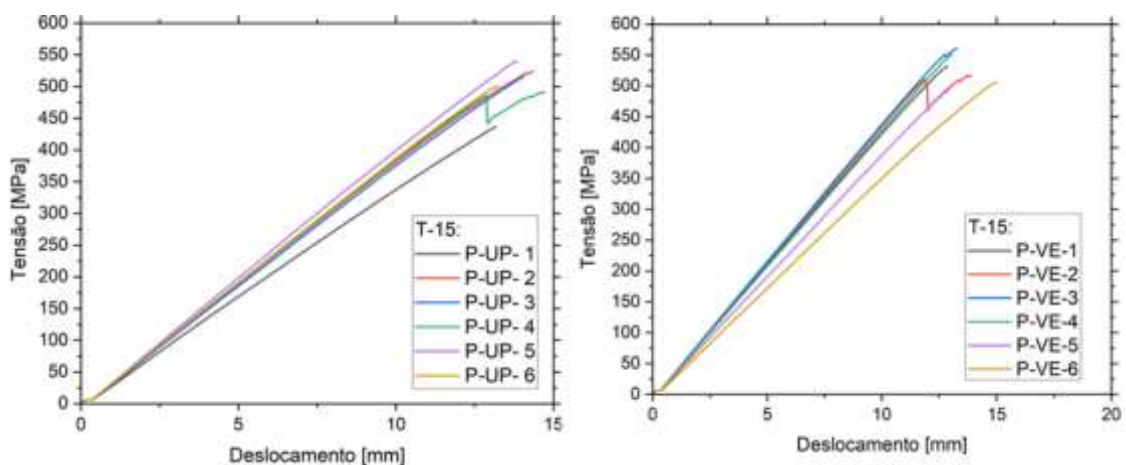


Figura 99 - Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão T-15



Figura 100 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T-15 UP



Figura 101 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de T-15 VE

Ambiente T20:

Tabela 39 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio de flexão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	53.1	240	15	15	15	8	8	8
	2	52.8	240	15	15	15	8	8	8
	3	51.9	240	15	15	15	8	8	8
	4	52.4	240	15	15	15	8	8	8
	5	52.4	240	15	15	15	8	8	8
	6	51.7	240	15	15	15	8	8	8
Média		52.38	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	53.3	240	15	15	15	8	8	8
	2	52.5	240	15	15	15	8	8	8
	3	53.4	240	15	15	15	8	8	8
	4	53.5	240	15	15	15	8	8	8
	5	52.3	240	15	15	15	8	8	8
	6	53.4	240	15	15	15	8	8	8
Média		53.1	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 40 - Resultado dos ensaios de flexão T20

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	2.04	13.05	509.13
	2	2.01	12.85	503.58
	3	1.87	12.6	467.4
	4	1.83	11.65	456.48
	5	1.94	12.98	485
	6	1.86	13.22	465.69
	Média	1.93	12.73	481.21
	Desvio Padrão	0.07	0.40	18.02
	Coefficiente de Variação	3.7%	3.1%	3.7%
VE	1	2.01	11.63	502.02
	2	2.03	12.62	508.36
	3	1.93	11.28	483.43
	4	2.09	11.72	522.63
	5	1.95	12.07	488.09
	6	2.08	12.35	520.15
	Média	2.02	11.95	504.11
	Desvio Padrão	0.05	0.40	12.93
	Coefficiente de variação	2.6%	3.4%	2.6%

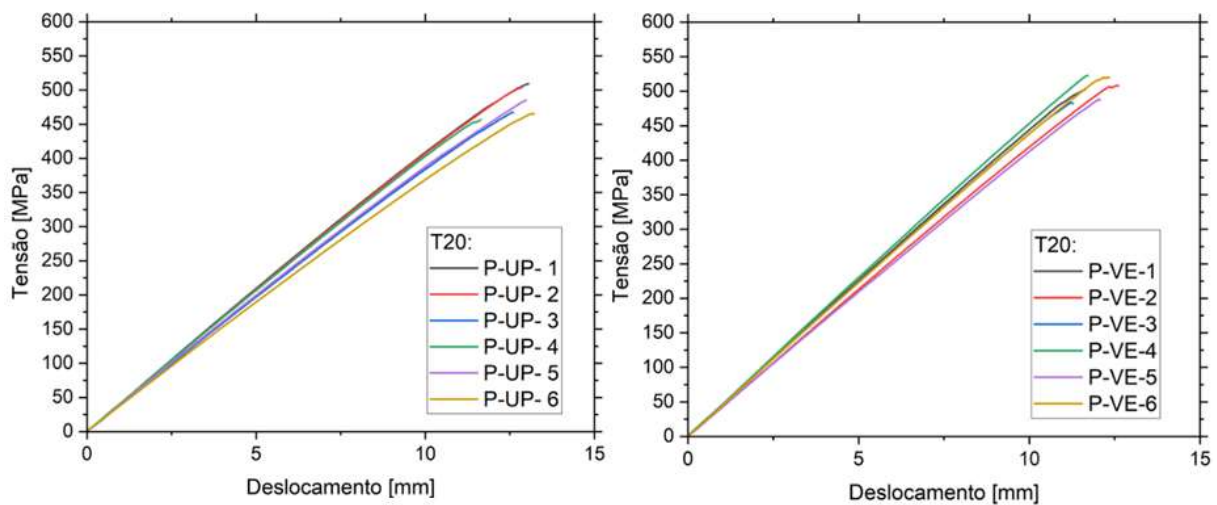


Figura 102 – Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão T20

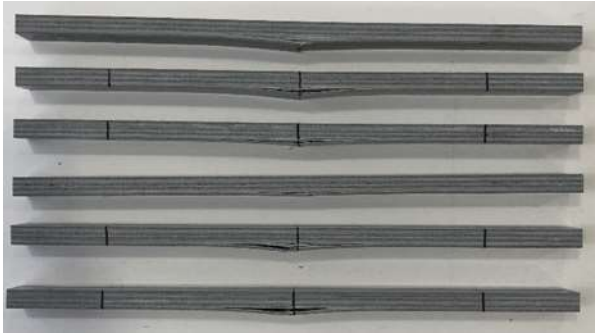


Figura 103 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T20 UP

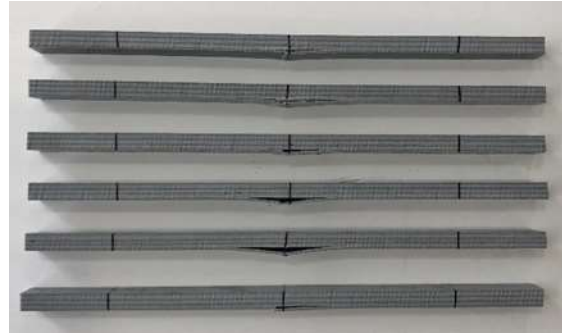


Figura 104 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T20 VE

Ambiente T40:

Tabela 41 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio de flexão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	51.7	240	15	15	15	8	8	8
	2	51.9	240	15	15	15	8	8	8
	3	51.1	240	15	15	15	8	8	8
	4	52.2	240	15	15	15	8	8	8
	5	51.5	240	15	15	15	8	8	8
	6	52	240	15	15	15	8	8	8
Média		52.73	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	54.5	240	15	15	15	8	8	8
	2	53.3	240	15	15	15	8	8	8
	3	54.1	240	15	15	15	8	8	8
	4	52.9	240	15	15	15	8	8	8
	5	53.9	240	15	15	15	8	8	8
	6	51.1	240	15	15	15	8	8	8
Média		53.3	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 42 - Resultado dos ensaios de flexão T40

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	1.89	13.2	472.76
	2	1.93	13.2	483.41
	3	1.8	13.05	451.15
	4	2.07	13.45	518.25
	5	1.99	15.45	496.33
	6	2.04	13.5	510.12
	Média	1.95	13.64	488.67
	Desvio Padrão	0.08	0.60	19.56
	Coefficiente de Variação	4.1%	4.4%	4.0%
VE	1	2.27	12.25	568.59
	2	2.02	14.28	505.96
	3	2.23	12.33	558.5
	4	2	12.28	500.67
	5	2.05	11.65	511.53
	6	1.9	13.68	474.22
	Média	2.08	12.75	519.91
	Desvio Padrão	0.11	0.82	29.09
	Coefficiente de variação	5.5%	6.5%	5.6%

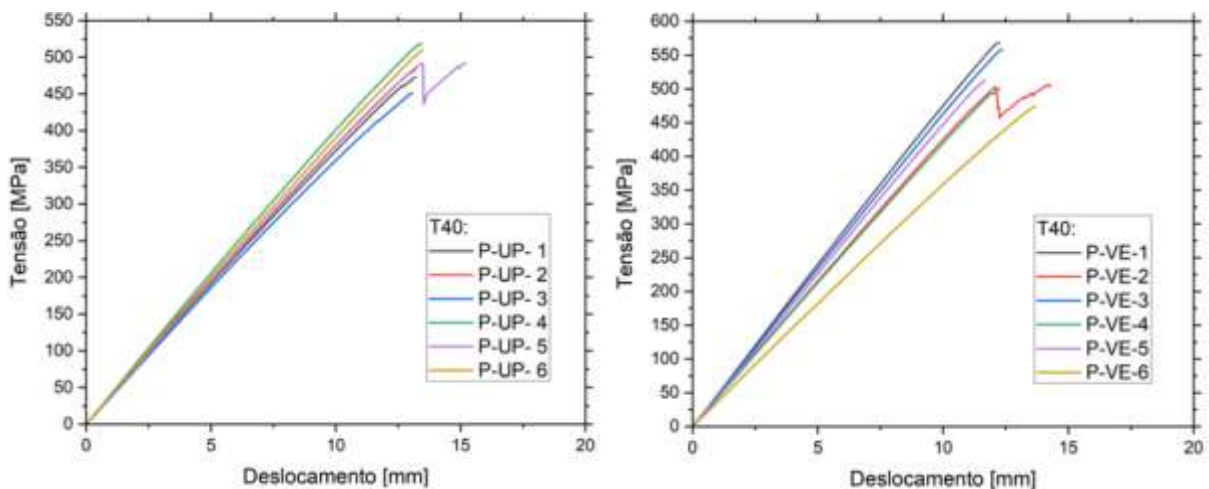


Figura 105 - Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão T40

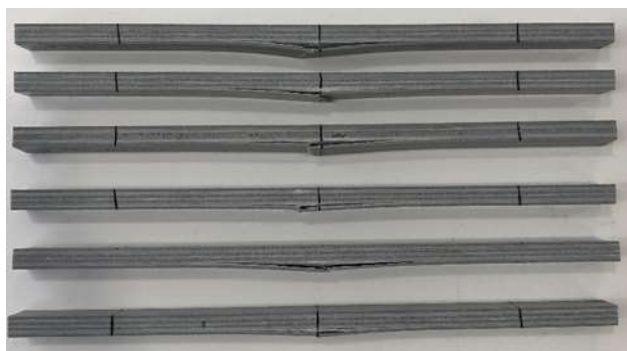


Figura 106 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T40 UP

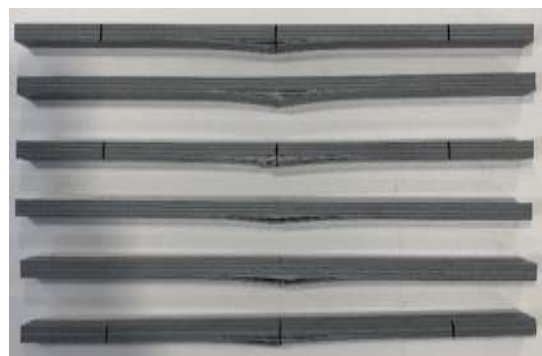


Figura 107 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T40 VE

Ambiente T60

Tabela 43 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio de flexão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	52.5	240	15	15	15	8	8	8
	2	53.21	240	15	15	15	8	8	8
	3	52.93	240	15	15	15	8	8	8
	4	52.04	240	15	15	15	8	8	8
	5	53.15	240	15	15	15	8	8	8
	6	53.01	240	15	15	15	8	8	8
Média		52.81	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	53.24	240	15	15	15	8	8	8
	2	53.79	240	15	15	15	8	8	8
	3	54.27	240	15	15	15	8	8	8
	4	54.06	240	15	15	15	8	8	8
	5	53.81	240	15	15	15	8	8	8
	6	52.41	240	15	15	15	8	8	8
Média		53.6	240	15.0	15.0	15.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 44 - Resultado dos ensaios de flexão T60

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	2.06	15.38	515.08
	2	2.09	14.02	514.15
	3	1.91	13.28	478.46
	4	1.9	14.27	475.14
	5	1.94	13.55	485.8
	6	2	13.6	499.4
	Média	1.98	14.02	494.67
	Desvio Padrão	0.07	0.54	14.87
	Coefficiente de Variação	3.4%	3.9%	3.0%
VE	1	1.98	12.73	495.14
	2	2	14.4	499.64
	3	2.03	14.28	506.65
	4	2.1	12.9	523.84
	5	2.15	13.23	538.51
	6	1.87	12.58	466.35
	Média	2.02	13.35	505.02
	Desvio Padrão	0.07	0.66	17.98
	Coefficiente de variação	3.5%	4.9%	3.6%

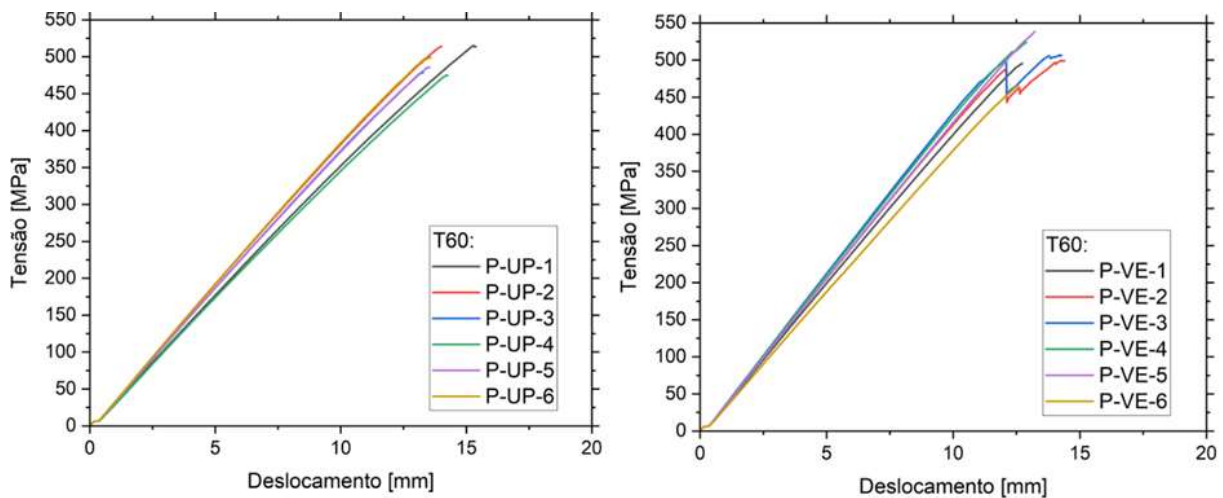


Figura 108 – Gráficos dos provetes nos ensaios de flexão T60

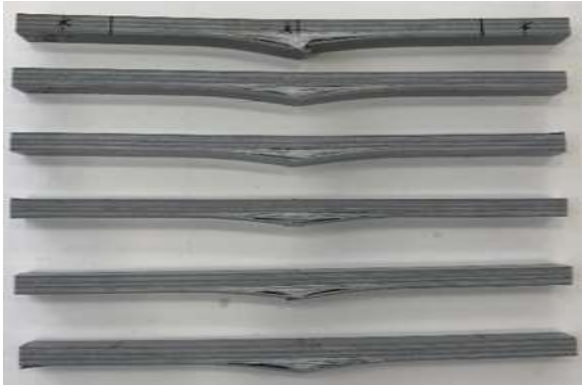


Figura 109 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T60 UP



Figura 110 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de flexão T60 VE

- Ensaio corte interlaminar:

Ambiente W60 S:

Tabela 45 - Dimensões dos provetes W60 S para o ensaio de corte interlaminar

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	47.39	80	40	40	40	8	8	8
	2	47.09	80	40	40	40	8	8	8
	3	47.02	80	40	40	40	8	8	8
	4	47.45	80	40	40	40	8	8	8
	5	47.5	80	40	40	40	8	8	8
Média		47.29	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0
VE	1	47.98	80	40	40	40	8	8	8
	2	48.11	80	40	40	40	8	8	8
	3	47.77	80	40	40	40	8	8	8
	4	48.2	80	40	40	40	8	8	8
	5	47.85	80	40	40	40	8	8	8
Média		47.98	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0

Tabela 46 - Resultado dos ensaios de corte interlaminar W60 S

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1*	5.84	1.63	13.68
	2*	5.39	1.54	12.64
	3*	5.46	1.54	12.79
	4*	5.49	1.59	12.87
	5*	5.47	1.33	12.82
	Média	5.57	1.53	13.05
	Desvio Padrão	0.15	0.07	0.36
	Coefficiente de Variação	2.8%	4.4%	2.8%
VE	1*	11.36	2.12	25.73
	2*	11.15	2.19	24.69
	3*	11.34	2.21	25.06
	4*	10.8	2.11	25.87
	5*	10.91	2.08	25.36
	Média	11.08	2.15	25.29
	Desvio Padrão	0.21	0.04	0.36
	Coefficiente de variação	1.9%	2.0%	1.4%

Nota: (*) Provetes com modo de rotura não aceitáveis segundo a norma

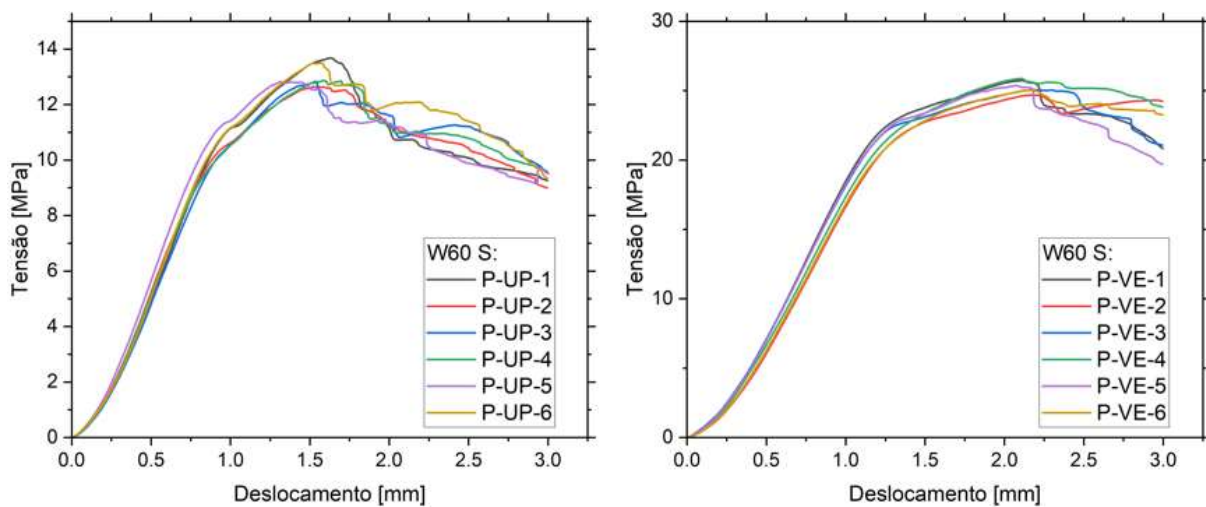


Figura 111 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 S

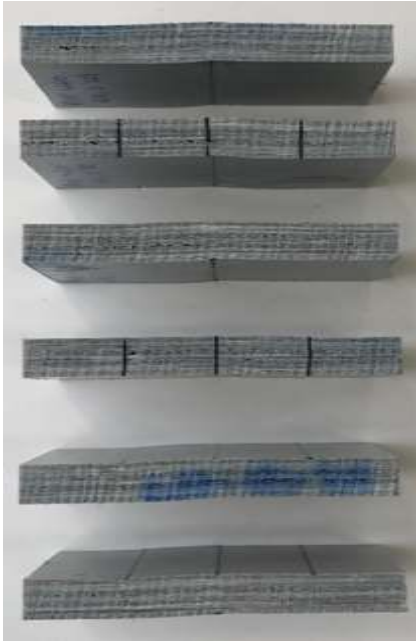


Figura 112 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 S UP

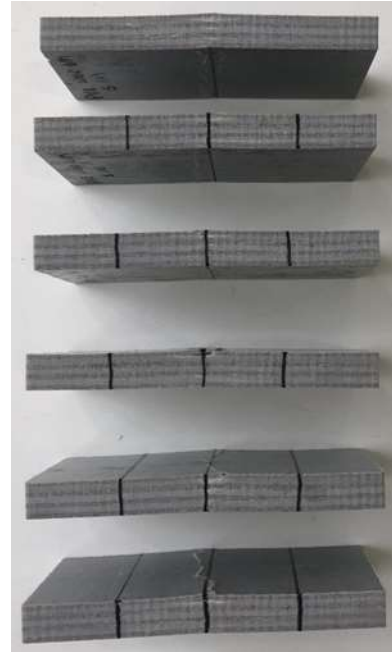


Figura 113 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 S VE

Ambiente W60 D:

Tabela 47 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio de corte interlaminar

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	47.4	80	40	40	40	8	8	8
	2	47.2	80	40	40	40	8	8	8
	3	47.6	80	40	40	40	8	8	8
	4	47.4	80	40	40	40	8	8	8
	5	47.3	80	40	40	40	8	8	8
	6	47.5	80	40	40	40	8	8	8
Média		47.4	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0
VE	1	48.2	80	40	40	40	8	8	8
	2	48.2	80	40	40	40	8	8	8
	3	48.2	80	40	40	40	8	8	8
	4	47.8	80	40	40	40	8	8	8
	5	47.8	80	40	40	40	8	8	8
	6	47.8	80	40	40	40	8	8	8
Média		48	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0

Tabela 48 - Resultado dos ensaios de corte interlaminar W60 D

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	7.98	1.8	18.7
	2	7.69	1.87	18.02
	3	7.72	1.54	18.1
	4	7.92	1.8	18.55
	5	8.05	1.74	18.87
	6	8.02	1.89	18.79
	Média	7.90	1.77	18.51
	Desvio Padrão	0.13	0.09	0.30
	Coefficiente de Variação	1.6%	5.0%	1.6%
VE	1	11.36	2.01	26.62
	2	11.15	2.01	26.13
	3	11.34	2.11	26.58
	4	10.8	1.88	25.32
	5	10.91	2.07	25.57
	6	10.9	2.06	25.55
	Média	11.08	2.02	25.96
	Desvio Padrão	0.21	0.06	0.48
	Coefficiente de variação	1.9%	2.8%	1.9%

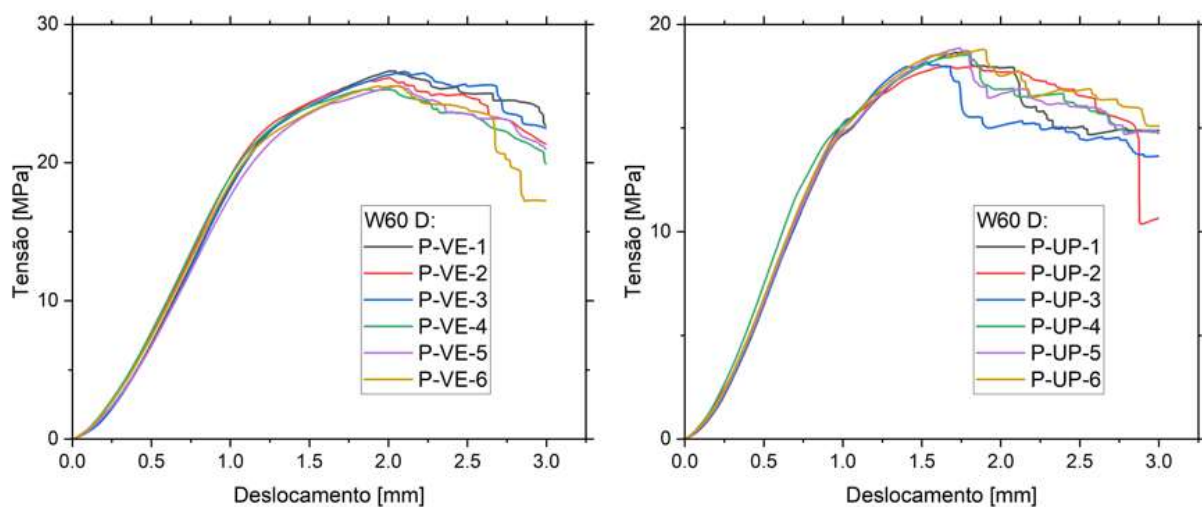


Figura 114 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 D

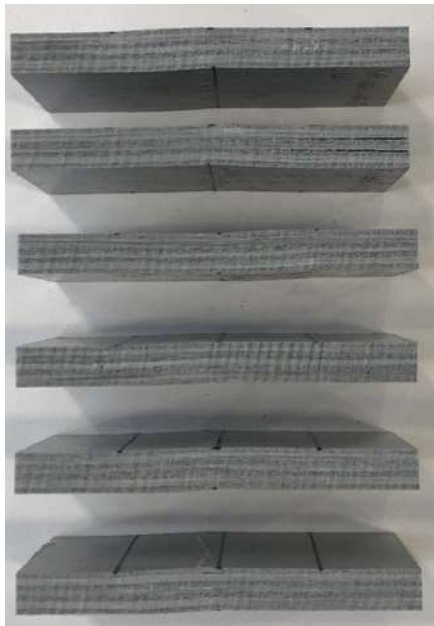


Figura 115 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 D UP

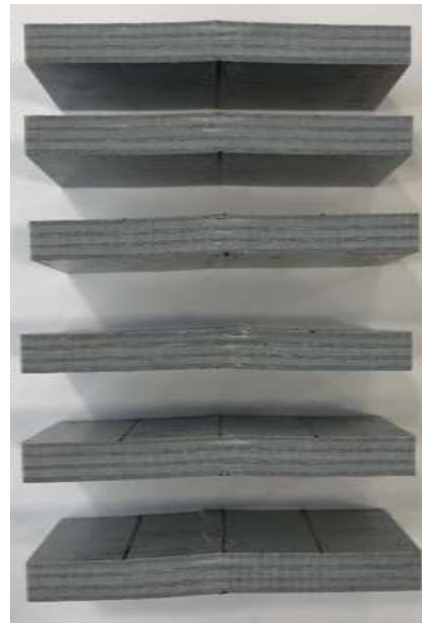


Figura 116 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar W60 D VE

Ambiente T-15:

Tabela 49 - Dimensões dos provetes T-15 para o ensaio de corte interlaminar

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	46.98	80	40	40	40	8	8	8
	2	46.97	80	40	40	40	8	8	8
	3	47.05	80	40	40	40	8	8	8
	4	47.03	80	40	40	40	8	8	8
	5	46.92	80	40	40	40	8	8	8
	6	46.92	80	40	40	40	8	8	8
Média		46.98	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0
VE	1	47.44	80	40	40	40	8	8	8
	2	47.67	80	40	40	40	8	8	8
	3	47.92	80	40	40	40	8	8	8
	4	47.73	80	40	40	40	8	8	8
	5	47.82	80	40	40	40	8	8	8
	6	47.47	80	40	40	40	8	8	8
Média		47.68	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0

Tabela 50 - Resultado dos ensaios de corte interlaminar T-15

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	9.79	1.13	22.95
	2	9.94	1.22	23.29
	3	9.91	1.08	23.23
	4	9.42	1.04	22.07
	5	9.85	1.07	23.09
	6	9.4	1.09	22.02
	Média	9.72	1.11	22.78
	Desvio Padrão	0.21	0.05	0.49
	Coefficiente de Variação	2.1%	4.2%	2.1%
VE	1	16.72	1.72	39.26
	2	17.29	1.75	40.52
	3	16.98	1.66	39.81
	4	15.51	1.33	36.34
	5	16.26	1.56	38.1
	6	16.7	1.62	39.14
	Média	16.58	1.61	38.86
	Desvio Padrão	0.46	0.11	1.09
	Coefficiente de variação	2.8%	6.7%	2.8%

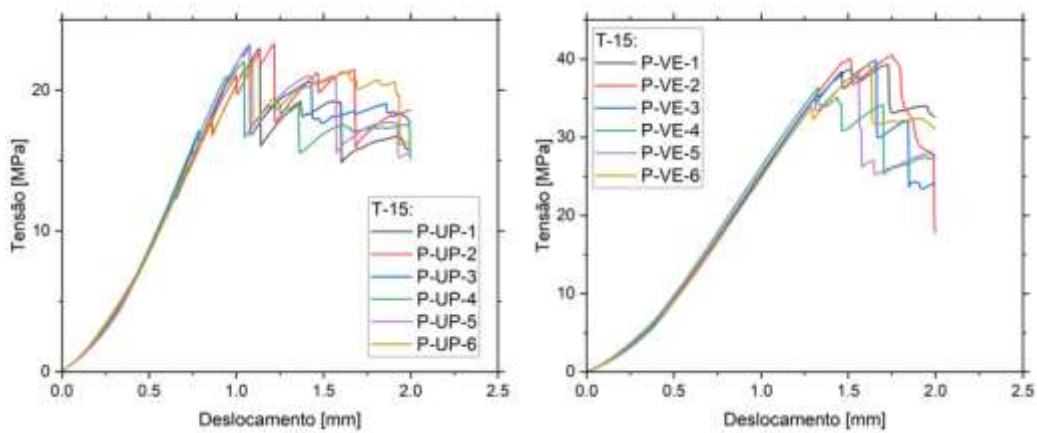


Figura 117 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T-15

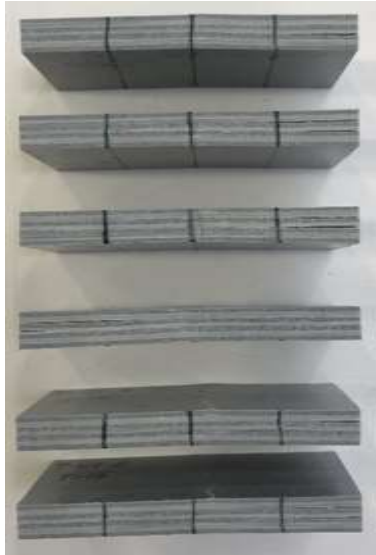


Figura 118 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T-15 UP



Figura 119 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T-15 VE

Ambiente T20:

Tabela 51 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio de corte interlaminar

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	46.5	80	40	40	40	8	8	8
	2	46.8	80	40	40	40	8	8	8
	3	46.6	80	40	40	40	8	8	8
	4	46.9	80	40	40	40	8	8	8
	5	46.5	80	40	40	40	8	8	8
	6	47.2	80	40	40	40	8	8	8
Média		46.75	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0
VE	1	47.6	80	40	40	40	8	8	8
	2	47.5	80	40	40	40	8	8	8
	3	47.9	80	40	40	40	8	8	8
	4	47.6	80	40	40	40	8	8	8
	5	47.9	80	40	40	40	8	8	8
	6	47.8	80	40	40	40	8	8	8
Média		47.72	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0

Tabela 52 - Resultado dos ensaios de corte interlaminar T20

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	9.73	1.11	22.82
	2	9.16	1.08	21.48
	3	10.25	1.13	24.08
	4	9.61	1.03	22.53
	5	9.26	1.03	21.69
	6	9.16	1.56	21.47
	Média	9.53	1.16	22.35
	Desvio Padrão	0.34	0.13	0.80
	Coefficiente de Variação	3.5%	11.6%	3.6%
VE	1	16.38	1.5	38.4
	2	17.54	1.6	41.11
	3	18.24	1.74	42.74
	4	15.57	1.78	36.49
	5	18.55	1.73	43.47
	6	18.46	1.68	43.27
	Média	17.46	1.67	40.91
	Desvio Padrão	0.99	0.08	2.31
	Coefficiente de variação	5.7%	4.9%	5.7%

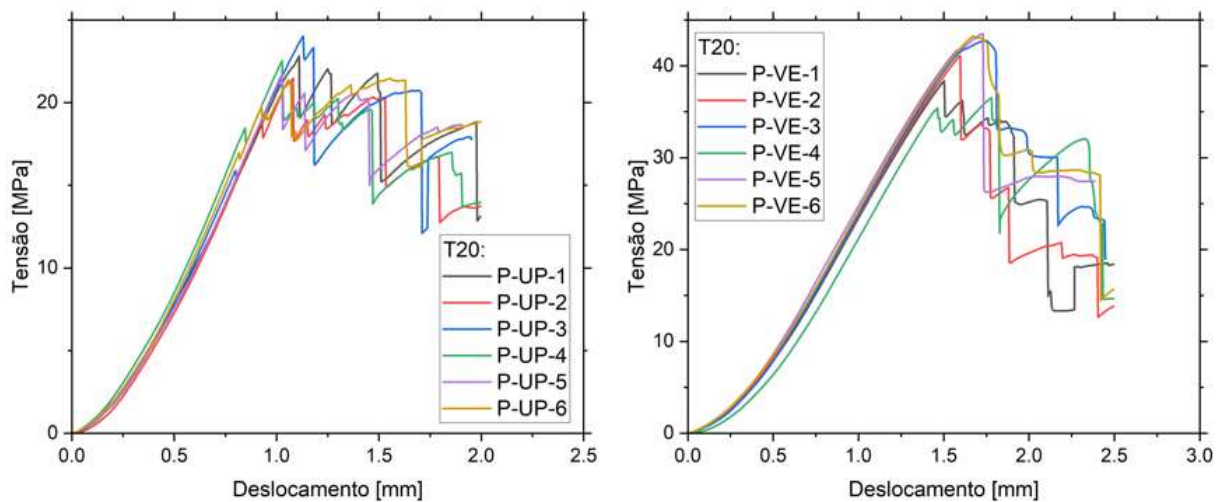


Figura 120 – Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T20

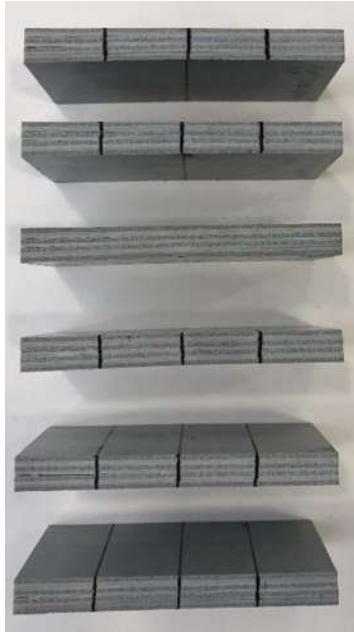


Figura 121 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T20 UP



Figura 122 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T20 UP

Ambiente T40:

Tabela 53 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio de corte interlaminar

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	46.3	80	40	40	40	8	8	8
	2	46.5	80	40	40	40	8	8	8
	3	46.8	80	40	40	40	8	8	8
	4	46.7	80	40	40	40	8	8	8
	5	46.8	80	40	40	40	8	8	8
	6	46.3	80	40	40	40	8	8	8
Média		46.57	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0
VE	1	47.2	80	40	40	40	8	8	8
	2	47.7	80	40	40	40	8	8	8
	3	47.5	80	40	40	40	8	8	8
	4	47.8	80	40	40	40	8	8	8
	5	47.6	80	40	40	40	8	8	8
	6	47.6	80	40	40	40	8	8	8
Média		47.57	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0

Tabela 54 - Resultado dos ensaios de corte interlaminar T40

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	9.04	0.96	21.18
	2	9.47	1.02	22.21
	3	9.4	1.64	22.04
	4	9.84	1.09	23.07
	5	9.54	1.03	22.37
	6	9.3	1.01	21.79
	Média	9.43	1.13	22.11
	Desvio Padrão	0.19	0.17	0.44
	Coefficiente de Variação	2.0%	15.3%	2.0%
VE	1	16.36	1.62	38.35
	2	17.07	1.66	40
	3	17.48	1.68	40.96
	4	16.27	1.56	38.13
	5	17.77	1.65	41.64
	6	17.5	1.57	41.02
	Média	17.08	1.62	40.02
	Desvio Padrão	0.51	0.04	1.19
	Coefficiente de variação	3.0%	2.5%	3.0%

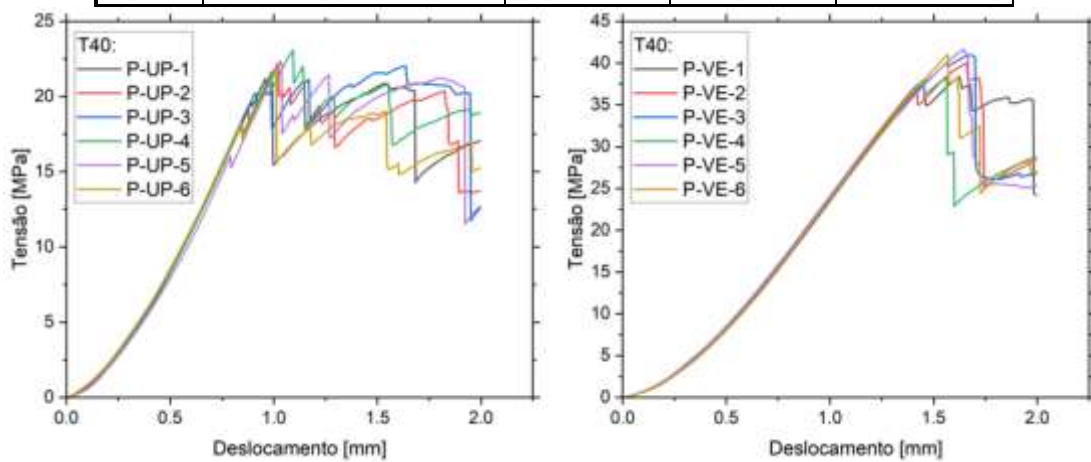


Figura 123 – Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T40

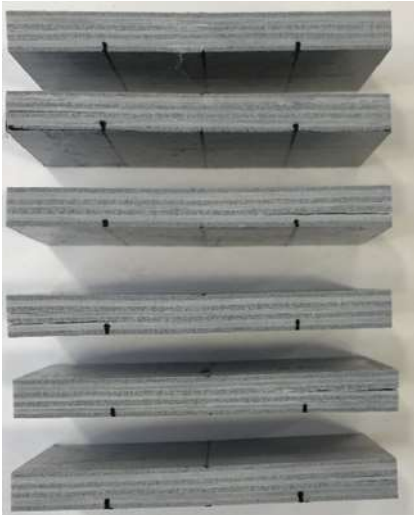


Figura 124 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T40 VE



Figura 125 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T40 UP

Ambiente T60:

Tabela 55 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio de corte interlaminar

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	47.55	80	40	40	40	8	8	8
	2	47.24	80	40	40	40	8	8	8
	3	47.11	80	40	40	40	8	8	8
	4	47.36	80	40	40	40	8	8	8
	5	47.2	80	40	40	40	8	8	8
	6	47.2	80	40	40	40	8	8	8
Média		47.28	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0
VE	1	47.72	80	40	40	40	8	8	8
	2	48.81	80	40	40	40	8	8	8
	3	48.92	80	40	40	40	8	8	8
	4	49	80	40	40	40	8	8	8
	5	47.37	80	40	40	40	8	8	8
	6	47.46	80	40	40	40	8	8	8
Média		48.21	80	40	40	40	8.0	8.0	8.0

Tabela 56 - Resultado do ensaio de corte interlaminar T60

Resina	Provetes	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]
UP	1	8.28	1.63	19.4
	2	9.6	1.29	22.5
	3	8.5	1.7	19.92
	4	9.62	1.14	22.55
	5	10.16	1.13	23.81
	6	8.62	1.07	20.62
	Média	9.13	1.33	21.47
	Desvio Padrão	0.66	0.23	1.49
	Coefficiente de Variação	7.3%	17.0%	6.9%
VE	1	15.18	1.57	36.05
	2	16.09	1.56	37.7
	3	-	-	-
	4	17.28	1.59	40.49
	5	14.67	1.48	34.39
	6	15.61	1.51	36.59
	Média	15.77	1.54	37.04
	Desvio Padrão	0.74	0.04	1.64
	Coefficiente de variação	4.7%	2.4%	4.4%

Nota: P-VE-3 com modo de rotura inválido

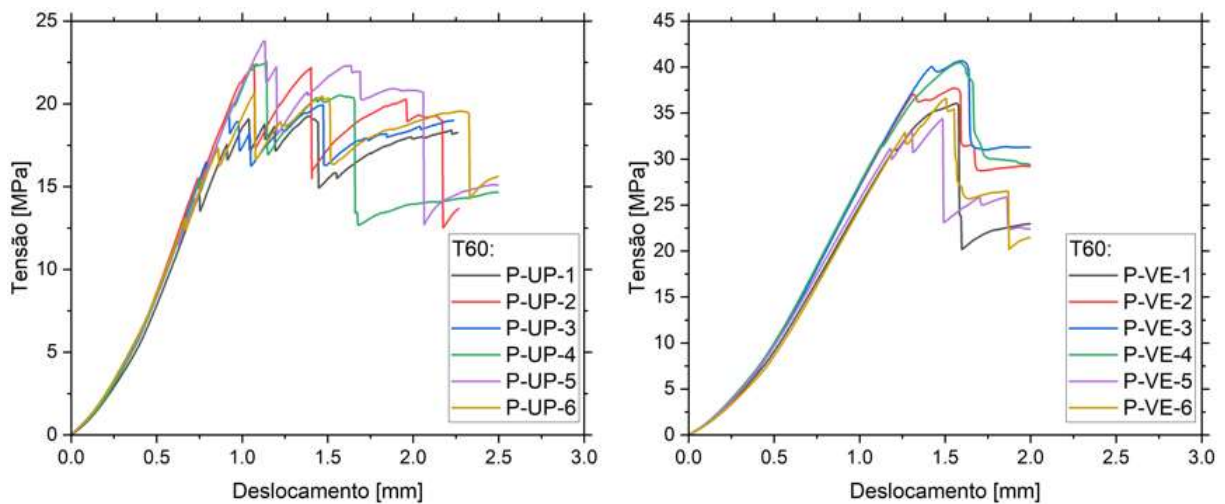


Figura 126 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T60

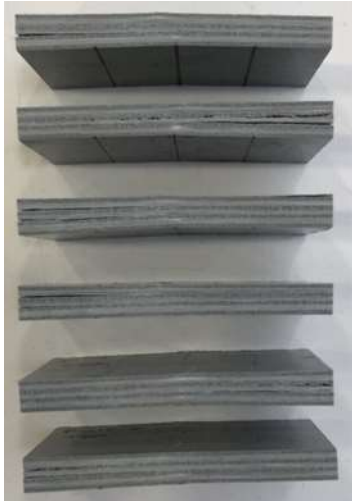


Figura 127 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T60 UP

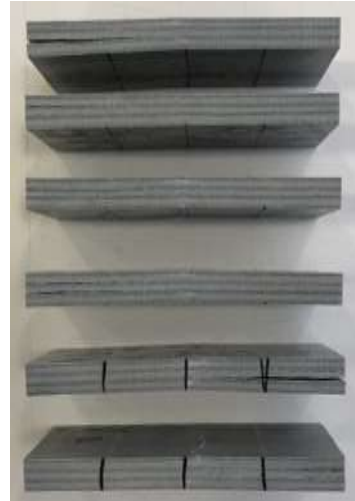


Figura 128 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte interlaminar T60 VE

- Ensaio tração a 0°:

Ambiente W60 S

Tabela 57 - Dimensões dos provetes a W60 S para o ensaio tração 0°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	109.54	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	110.39	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	110.05	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	109.72	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	111.15	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	111.55	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		110.4	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	113.36	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	111.6	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	109.19	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	111.28	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	110.93	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	114.51	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		111.81	300	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado do ensaio de tração 0° de referência W60 S

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\max}$ [MPa]	$\epsilon_{f\max}$ [%]
UP	1	29.53	226.26	0.80
	2	-	-	-
	3	30.18	197.85	0.74
	4	23.79	195.33	0.65
	5	32.35	206.30	0.70
	6	33.89	224.44	0.72
	Média	29.95	210.04	0.72
	Desvio Padrão	2.63	12.25	0.04
	Coefficiente de Variação	8.8%	5.8%	5.3%
VE	1	38.25	319.66	0.97
	2	35.27	311.84	0.98
	3	33.52	353.87	1.20
	4	37.43	187.50	0.52
	5	33.93	345.98	0.98
	6	39.73	350.07	1.00
	Média	36.35	311.49	0.94
	Desvio Padrão	2.12	41.33	0.14
	Coefficiente de variação	5.8%	13.3%	15.0%

Nota: P-UP-2 teve perda de resultado

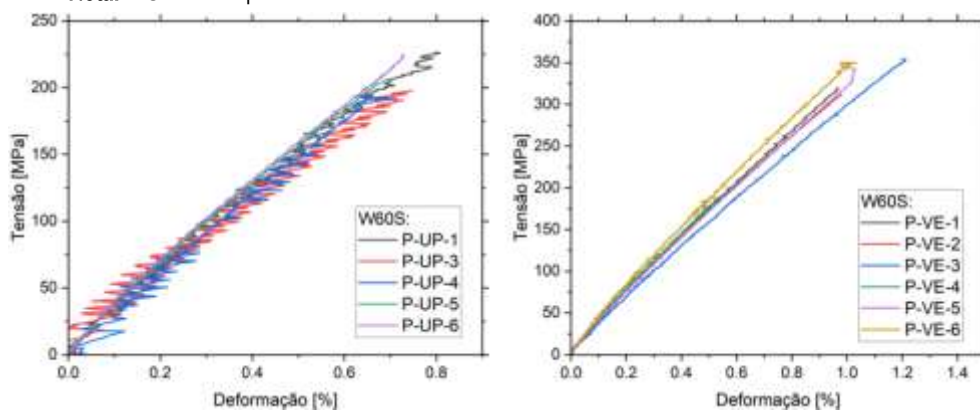


Figura 129 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 S

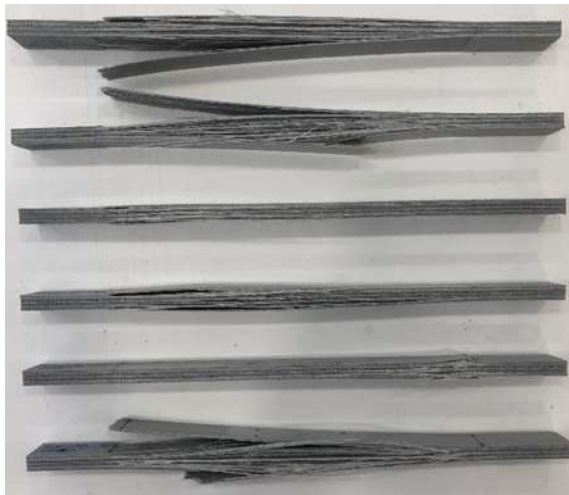


Figura 130 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 S UP

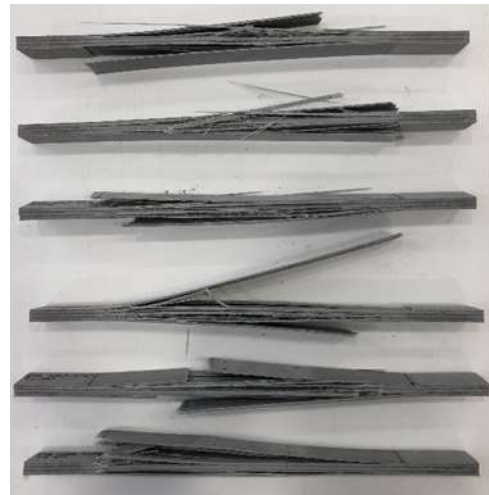


Figura 131 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 S VE

Ambiente a W60 D

Tabela 58 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio tração 0°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	109.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	110.2	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	107.5	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	111.5	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	109.9	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	110.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		109.88	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	112.5	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	112.1	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	111.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	109	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	112.9	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	112.3	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		111.75	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 0° W60 D

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\epsilon_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	35.61	260.84	0.84
	2	33.30	270.41	0.96
	3	31.11	230.18	0.76
	4	-	-	-
	5	31.18	275.86	0.97
	6	33.14	297.30	1.01
	Média	32.87	266.92	0.91
	Desvio Padrão	1.38	17.13	0.09
	Coefficiente de Variação	4.2%	6.4%	9.7%
VE	1	35.77	320.24	0.93
	2	35.37	346.54	1.05
	3	-	-	-
	4	37.79	365.25	1.24
	5	40.61	331.71	0.95
	6	-	-	-
	Média	37.39	340.94	1.04
	Desvio Padrão	1.82	14.96	0.10
	Coefficiente de variação	4.9%	4.4%	9.7%

Nota: P-UP-4, P-VE-3 e P-VE-6 tiveram perda de resultado

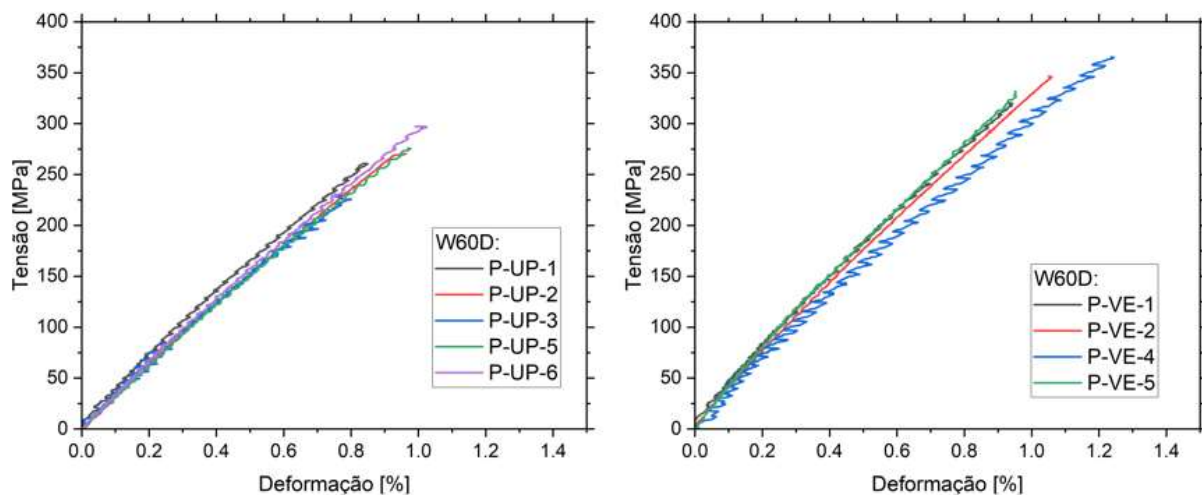


Figura 132 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 D



Figura 133 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 D UP

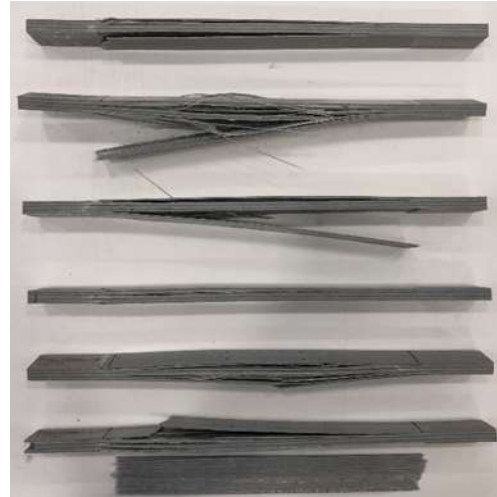


Figura 134 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° W60 D VE

Ambiente -15°C

Tabela 59 - Dimensões dos provetes T-15 de referência para o ensaio tração 0°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	110.28	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	109.65	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	108.98	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	109.97	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	111.08	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	110.24	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		110.03	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	108.82	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	111.07	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	113	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	112.91	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	112.08	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	111.71	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		111.60	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 0° T-15

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\max}$ [MPa]	$\epsilon_{f\max}$ [%]
UP	1	28.97	372.12	1.38
	2	18.82	374.58	1.60
	3	21.14	371.90	1.43
	4	28.43	381.40	1.40
	5	31.71	391.50	1.34
	6	23.04	379.35	1.47
	Média	25.35	378.48	1.43
	Desvio Padrão	4.35	5.61	0.07
	Coefficiente de Variação	17.2%	1.5%	4.6%
VE	1	28.18	380.19	1.35
	2	29.79	407.97	1.40
	3	35.75	385.03	1.18
	4	37.10	419.85	1.32
	5	34.34	421.62	1.38
	6	28.79	404.83	1.37
	Média	32.32	403.25	1.33
	Desvio Padrão	3.40	13.76	0.06
	Coefficiente de variação	10.5%	3.4%	4.2%

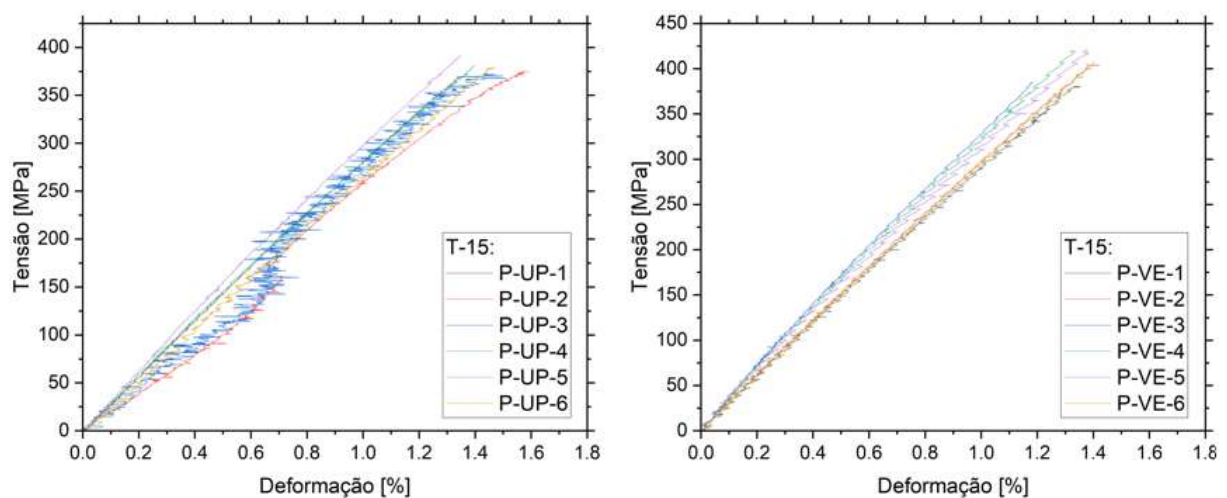


Figura 135 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° T-15

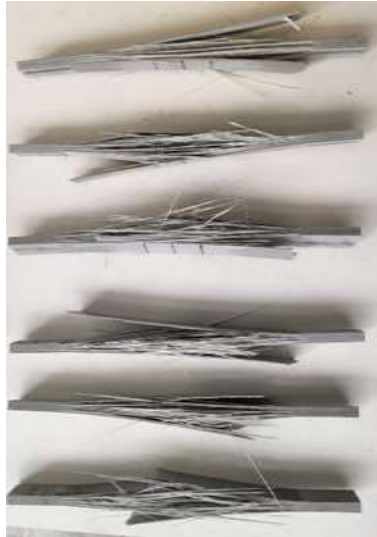


Figura 136 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T-15 UP



Figura 137 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T-15 VE

Ambiente 20°C

Tabela 60 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio tração 0°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	108.5	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	109.1	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	109.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	110.8	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	110	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	110.4	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		109.73	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	111.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	110.1	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	112	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	111.2	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	111.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	111.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		111.4	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 0° T20

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f_{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{f_{máx}}$ [%]
UP	1	36.67	357.12	1.22
	2	34.20	375.33	1.33
	3	33.69	399.11	1.39
	4	35.33	395.28	1.32
	5	35.03	409.63	1.43
	6	36.32	402.80	1.35
	Média	35.20	389.88	1.34
	Desvio Padrão	0.90	15.77	0.05
	Coefficiente de Variação	2.6%	4.0%	3.9%
VE	1	38.97	416.75	1.28
	2	37.23	387.75	1.24
	3	40.15	417.32	1.23
	4	37.03	432.62	1.35
	5	37.46	401.32	1.24
	6	38.34	406.23	1.25
	Média	38.20	410.33	1.26
	Desvio Padrão	0.96	11.90	0.03
	Coefficiente de variação	2.5%	2.9%	2.7%

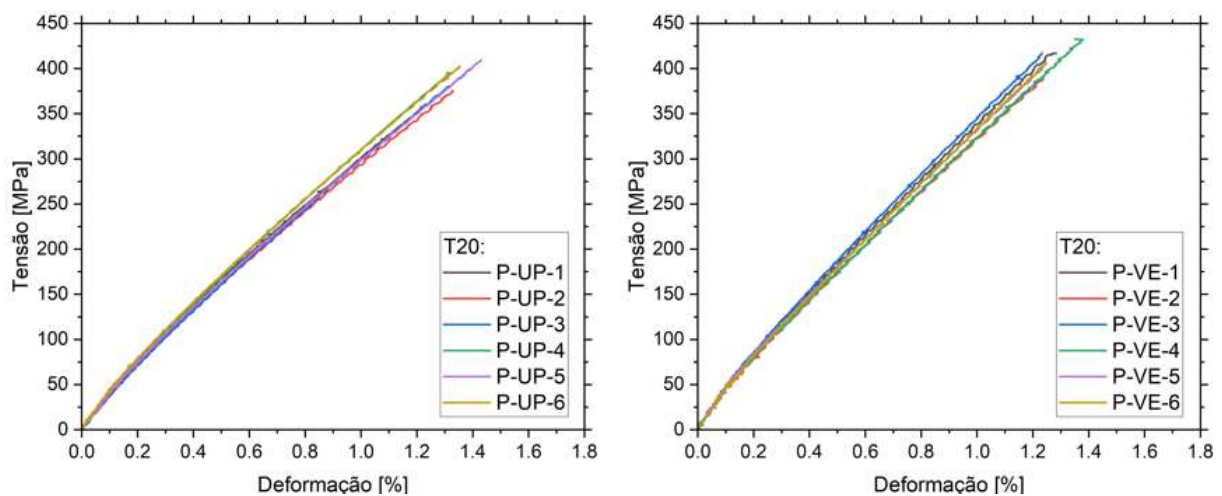


Figura 138 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° T20



Figura 139 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T20 UP



Figura 140 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T20 VE

Ambiente 40°C

Tabela 61 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio tração 0°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	108.3	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	110.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	109.4	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	110	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	108.1	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	109.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		109.35	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	108.3	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	112.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	111.4	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	112.4	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	112	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	111.9	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		111.45	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 0° T40

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\epsilon_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	34.54	409.10	1.47
	2	37.32	406.02	1.36
	3	35.38	406.44	1.43
	4	40.40	402.03	1.31
	5	32.23	373.34	1.34
	6	32.61	395.41	1.39
	Média	35.41	398.72	1.38
	Desvio Padrão	2.30	9.57	0.05
	Coefficiente de Variação	6.5%	2.4%	3.4%
VE	1	37.36	355.19	1.10
	2	40.92	440.24	1.22
	3	44.03	418.16	1.22
	4	40.42	419.23	1.23
	5	39.49	416.40	1.20
	6	40.70	414.80	1.23
	Média	40.49	410.67	1.20
	Desvio Padrão	1.40	18.49	0.03
	Coefficiente de variação	3.4%	4.5%	2.8%

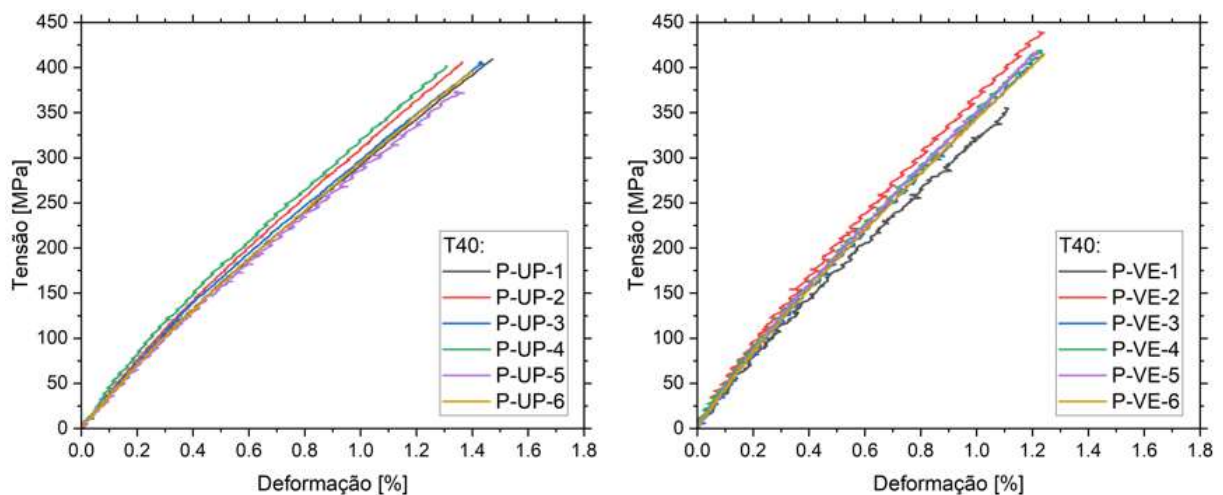


Figura 141 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° T40



Figura 142 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T40 UP

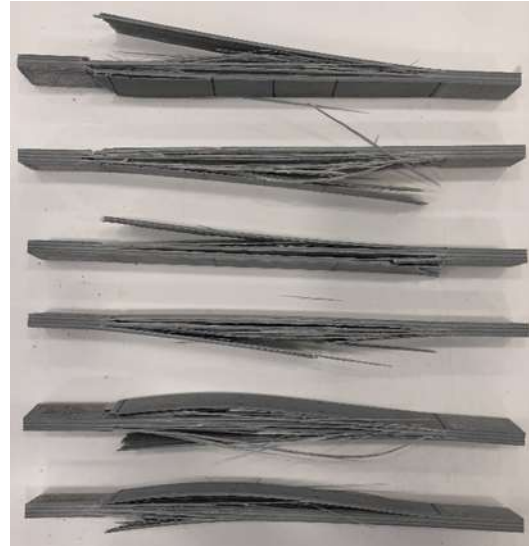


Figura 143 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T40 VE

Ambiente 60°C

Tabela 62 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio tração 0°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	111.39	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	111.68	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	111.12	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	110.89	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	109.88	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	111.51	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		111.08	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	112.75	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	111.5	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	113.4	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	109.45	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	112.53	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	111.99	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		111.94	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 0° T60

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\max}$ [MPa]	$\epsilon_{f\max}$ [%]
UP	1	29.58	397.40	1.44
	2	30.22	399.48	1.46
	3	30.57	378.28	1.40
	4	29.38	393.21	1.48
	5	24.45	397.96	1.62
	6	24.11	388.50	1.46
	Média	28.05	392.47	1.48
	Desvio Padrão	2.51	6.05	0.05
	Coefficiente de Variação	9.0%	1.5%	3.3%
VE	1	32.63	372.91	1.18
	2	33.57	417.00	1.37
	3	34.82	422.58	1.29
	4	30.60	392.24	1.40
	5	34.66	415.25	1.35
	6	33.63	430.44	1.40
	Média	33.32	408.40	1.33
	Desvio Padrão	1.14	17.22	0.06
	Coefficiente de variação	3.4%	4.2%	4.7%

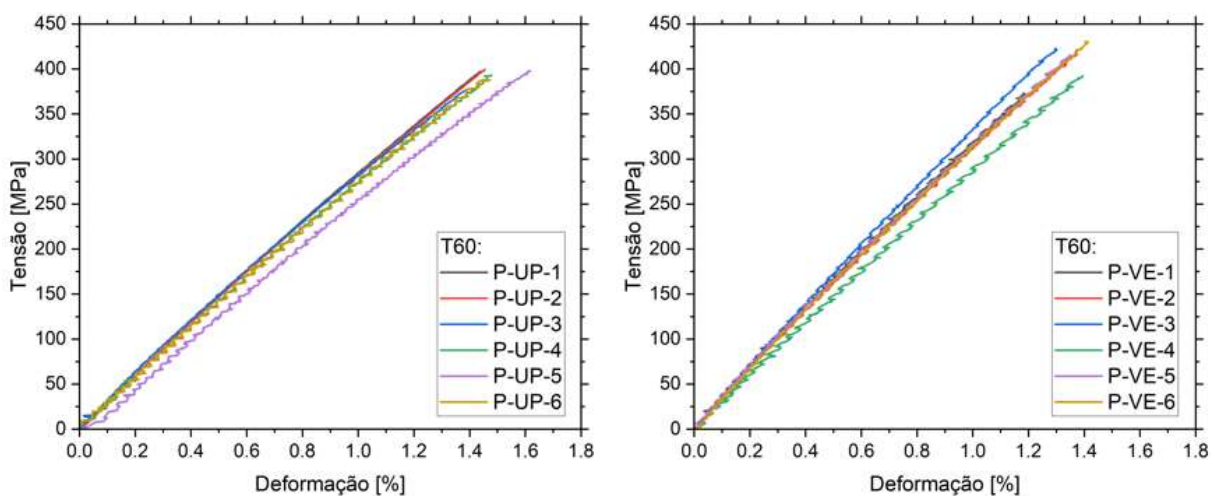


Figura 144 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 0° T60



Figura 145 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T60 UP



Figura 146 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 0° T60 VE

- Ensaio tração 90°:

Ambiente W60 S

Tabela 63 - Dimensões dos provetes W60 S para o ensaio tração 90°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	92.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	92.42	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	92.66	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	92.23	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	92.25	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		92.45	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	92.52	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	92.84	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	92.85	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	92.97	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	93.19	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		92.87	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 90° W60 S

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\epsilon_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	5.62	34.87	0.85
	2	5.20	36.18	0.90
	3	5.99	38.17	0.83
	4	5.51	38.36	0.95
	5	5.57	38.76	1.00
	Média	5.58	37.27	0.91
	Desvio Padrão	0.18	1.39	0.06
	Coefficiente de Variação	3.3%	3.7%	6.1%
VE	1	10.66	42.26	0.77
	2	8.72	46.45	1.00
	3	-	-	-
	4	8.73	45.55	0.98
	5	10.15	44.51	0.86
	Média	9.56	44.69	0.90
	Desvio Padrão	0.84	1.31	0.09
	Coefficiente de variação	8.8%	2.9%	9.6%

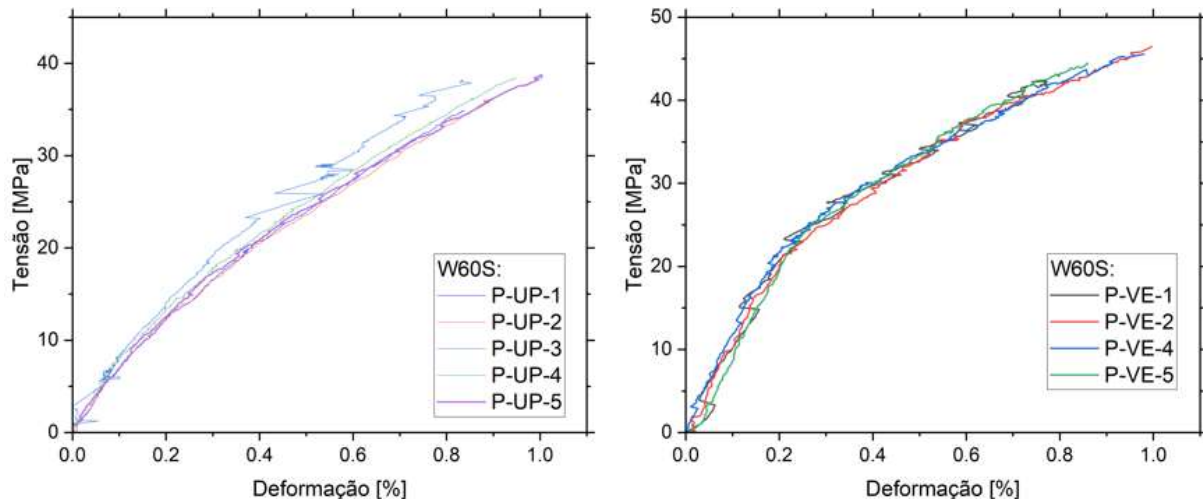


Figura 147 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° W60 S



Figura 148 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° W60 S UP



Figura 149 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° W60 S VE

Ambiente W60 D

Tabela 64 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio tração 90°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	91	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	91.1	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	90.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	90.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	91.2	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		90.9	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	92.2	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	92.8	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	93.1	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	91.8	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	92.3	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		92.44	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 90° W60 D

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\max}$ [MPa]	$\epsilon_{f\max}$ [%]
UP	1	5.82	41.63	1.12
	2	5.88	37.55	0.93
	3	6.14	37.77	0.97
	4	5.86	38.23	0.91
	5	5.72	38.14	1.03
	Média	5.88	38.66	0.99
	Desvio Padrão	0.10	1.18	0.06
	Coefficiente de Variação	1.8%	3.1%	6.4%
VE	1	-	-	-
	2	9.64	47.64	0.88
	3	9.70	47.39	0.91
	4	9.08	44.38	0.89
	5	9.42	44.75	0.85
	Média	9.46	46.04	0.88
	Desvio Padrão	0.21	1.48	0.02
	Coefficiente de variação	2.2%	3.2%	2.0%

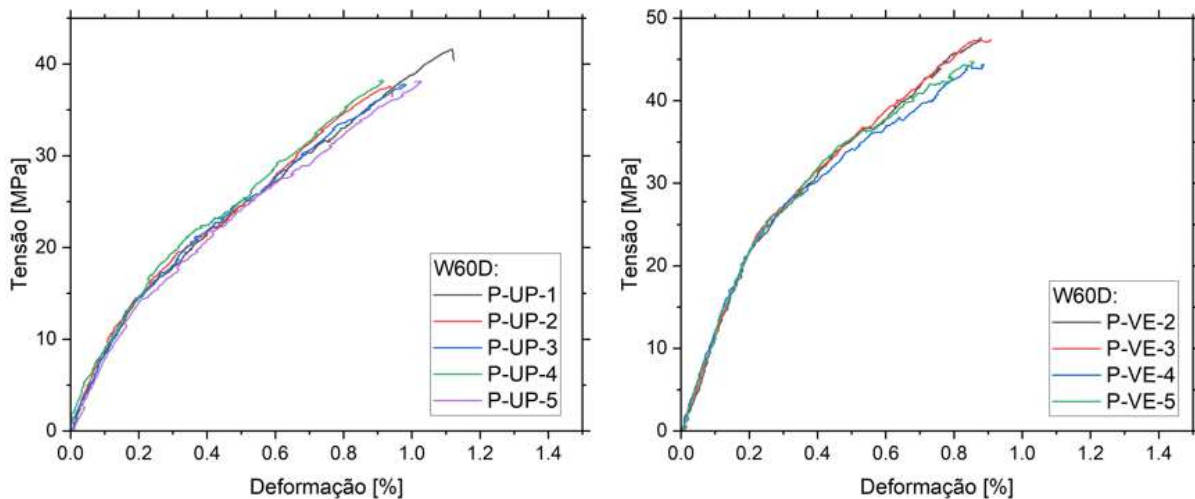


Figura 150 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° W60D

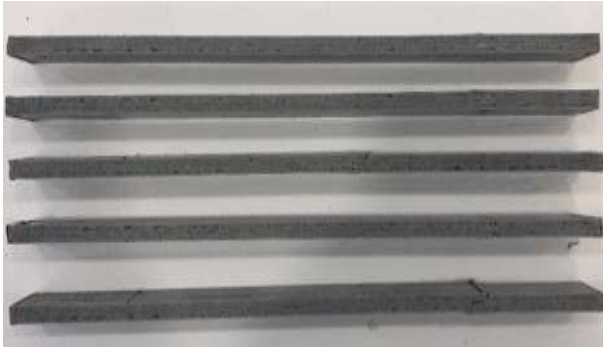


Figura 151 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° W60 D UP

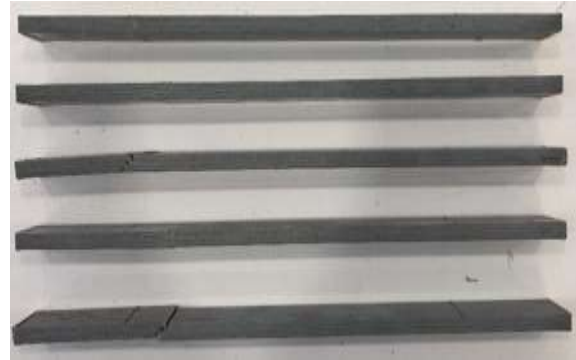


Figura 152 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° W60 D VE

Ambiente -15°C

Tabela 65 - Dimensões dos provetes T-15 para o ensaio tração 90°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	91.17	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	91.06	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	91.12	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	91.19	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	5	91.09	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		91.13	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	92.65	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	92.96	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	92.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	92.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	92.58	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		92.72	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 90° T-15

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\max}$ [MPa]	$\epsilon_{f\max}$ [%]
UP	1	5.49	55.07	1.54
	2	4.79	50.38	1.45
	3	5.43	54.94	1.55
	4	-	-	-
	5	5.66	51.73	1.57
	Média	5.34	53.03	1.53
	Desvio Padrão	0.28	1.97	0.04
	Coefficiente de Variação	5.2%	3.7%	2.7%
VE	1	9.57	55.40	1.16
	2	10.09	58.89	1.14
	3	8.26	59.17	1.26
	4	8.67	58.37	1.24
	5	9.30	60.24	1.31
	Média	9.18	58.41	1.22
	Desvio Padrão	0.57	1.22	0.06
	Coefficiente de variação	6.2%	2.1%	4.8%

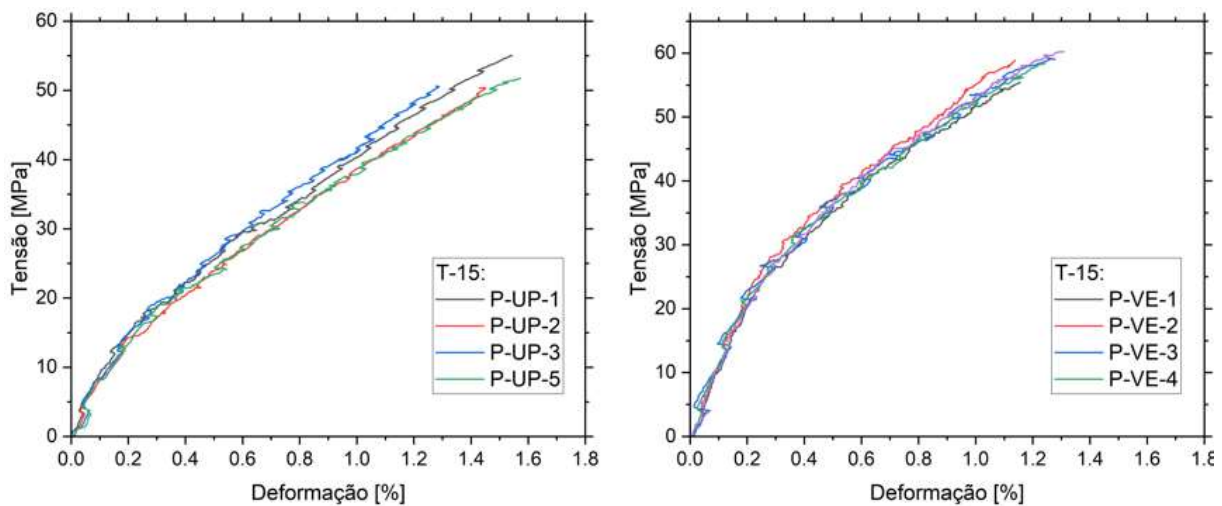


Figura 153 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° T-15



Figura 154 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T-15 UP



Figura 155 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T-15 VE

Ambiente 20°C

Tabela 66 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio tração 90°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	91.2	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	90.4	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	90.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	90.3	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		90.65	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	92.5	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	92.1	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	92.5	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	91.9	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	92.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		92.32	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 90° T20

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\epsilon_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	6.50	62.86	1.48
	2	6.74	59.27	1.48
	3	6.86	55.93	1.45
	4	6.27	48.34	1.31
	5	-	-	-
	Média	6.59	56.60	1.43
	Desvio Padrão	0.21	4.46	0.06
	Coefficiente de Variação	3.2%	7.9%	4.3%
VE	1	10.12	66.15	1.10
	2	10.79	60.36	1.08
	3	10.66	64.61	1.30
	4	11.00	57.42	1.11
	5	-	-	-
	Média	10.64	62.13	1.15
	Desvio Padrão	0.26	3.24	0.08
	Coefficiente de variação	2.4%	5.2%	6.7%

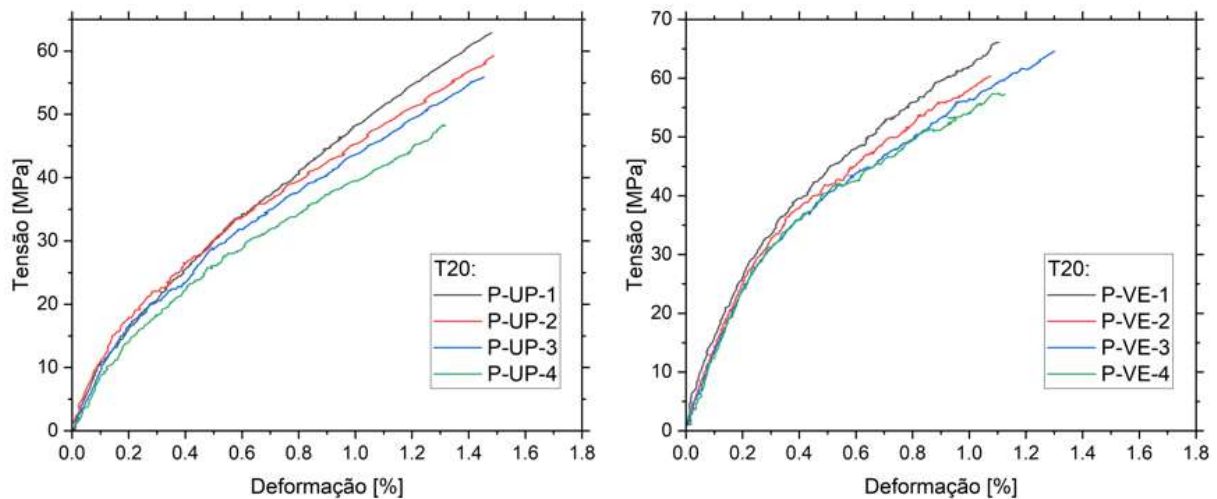


Figura 156 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° T20



Figura 157 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T20 UP

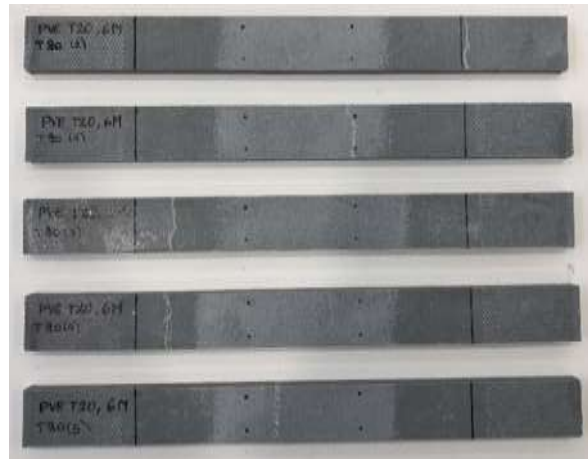


Figura 158 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T20 VE

Ambiente 40°C

Tabela 67 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio tração 90°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	90.5	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	90	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	90.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	90.5	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	90.7	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		90.46	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	92.1	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	92	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	91.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	92	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	91.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		91.86	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 90° T40

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\max}$ [MPa]	$\epsilon_{f\max}$ [%]
UP	1	6.11	52.69	1.40
	2	5.58	54.42	1.55
	3	6.44	57.73	1.48
	4	5.24	57.47	1.36
	5	6.08	58.49	1.40
	Média	5.89	56.16	1.44
	Desvio Padrão	0.38	2.08	0.06
	Coefficiente de Variação	6.5%	3.7%	4.3%
VE	1	11.49	60.21	1.19
	2	10.75	55.41	1.11
	3	9.72	63.27	1.32
	4	10.26	57.14	0.93
	5	10.98	52.35	0.95
	Média	10.64	57.67	1.10
	Desvio Padrão	0.52	3.25	0.13
	Coefficiente de variação	4.9%	5.6%	11.8%

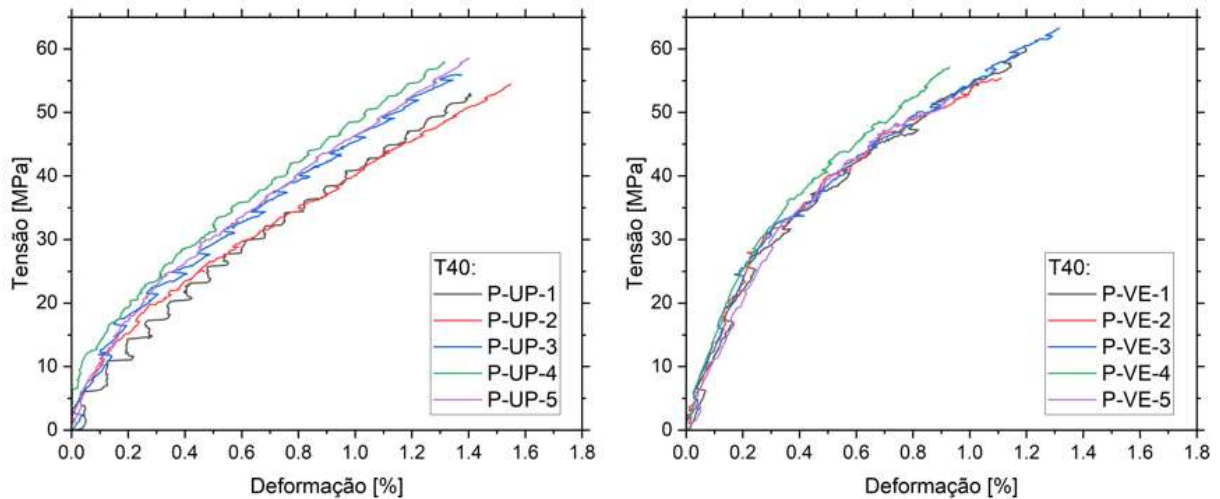


Figura 159 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° T40



Figura 160 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T40 UP



Figura 161 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T40 VE

Ambiente 60°C

Tabela 68 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio tração 90°

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	92.03	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	91.71	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	90.99	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	91.88	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	91.39	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		91.6	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	92.45	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	2	92.3	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	3	92.38	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	4	92.17	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
	6	92.67	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
Média		92.39	250	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de tração 90° T60

Resina	Provetes	E[GPa]	$\sigma_{f\max}$ [MPa]	$\epsilon_{f\max}$ [%]
UP	1	6.83	53.64	1.16
	2	6.52	53.96	1.43
	3	5.90	54.68	1.43
	4	5.77	55.11	1.34
	5	6.05	52.21	1.31
	Média	6.22	53.92	1.33
	Desvio Padrão	0.37	0.80	0.08
	Coefficiente de Variação	5.9%	1.5%	6.0%
VE	1	9.27	55.76	1.15
	2	9.49	52.84	1.10
	3	10.43	55.48	1.17
	4	9.05	55.96	1.27
	5	10.24	54.21	1.09
	Média	9.70	54.85	1.15
	Desvio Padrão	0.51	1.06	0.05
	Coefficiente de variação	5.3%	1.9%	4.4%

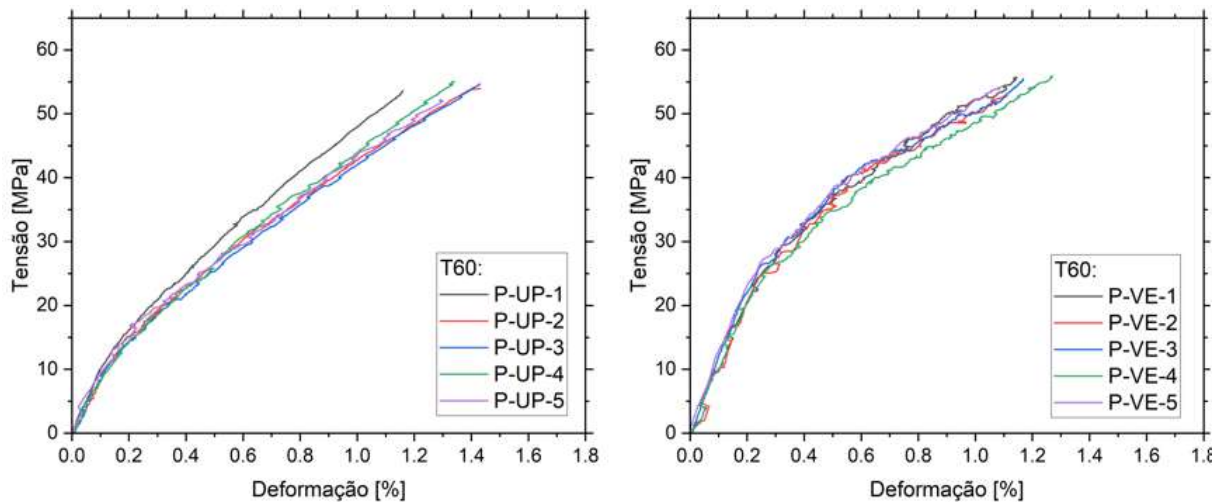


Figura 162 - Gráficos dos provetes nos ensaios de tração 90° T60

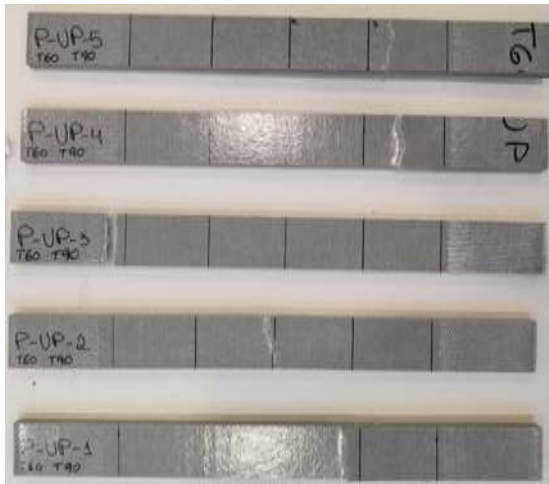


Figura 163 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T60 UP

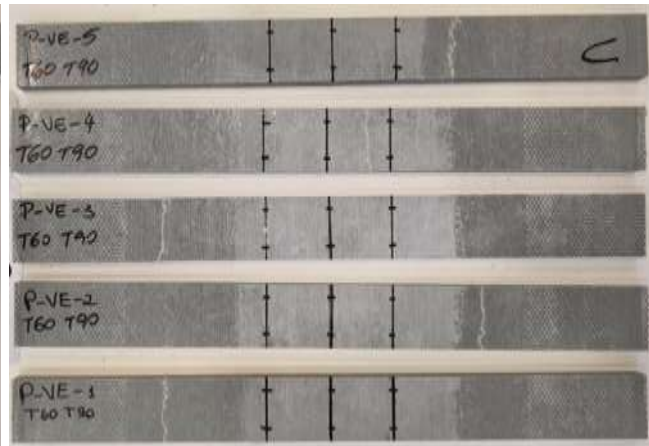


Figura 164 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de tração 90° T60 VE

- Ensaio corte no plano

Ambiente W60 S:

Tabela 69 - Dimensões dos provetes W60 S para o ensaio corte no plano

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	20.77	76	20	11.76	20	8.0	8.0	8.0
	2	20.93	76	20	12.42	20	8.0	8.0	8.0
	3	20.66	76	20	12.06	20	8.0	8.0	8.0
	4	20.74	76	20	11.6	20	8.0	8.0	8.0
	5	21.04	76	20	12.12	20	8.0	8.0	8.0
	6	20.84	76	20	11.9	20	8.0	8.0	8.0
Média		20.83	76	20.0	11.98	20.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	21.7	76	20	11.9	20	8.0	8.0	8.0
	2	21.56	76	20	11.8	20	8.0	8.0	8.0
	3	21.96	76	20	12.12	20	8.0	8.0	8.0
	4	21.61	76	20	11.9	20	8.0	8.0	8.0
	5	22.18	76	20	11.98	20	8.0	8.0	8.0
	6	22	76	20	12	20	8.0	8.0	8.0
Média		21.84	76	20.0	11.95	20.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de corte no plano W60 S

Resina	Provetes	G[GPa]	$\tau_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\gamma_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	1.15	31.68	2.03
	2	1.83	32.22	1.82
	3	1.56	31.94	1.72
	4	-	-	-
	5	0.80	33.26	1.93
	6	1.36	33.52	2.23
	Média	1.34	32.52	1.95
	Desvio Padrão	0.29	0.69	0.15
	Coefficiente de Variação	21.7%	2.1%	7.6%
VE	1	-	-	-
	2	3.13	65.06	2.86
	3	3.79	67.39	3.04
	4	2.40	66.23	2.60
	5	3.58	67.16	3.54
	6	2.16	67.93	4.26
	Média	3.01	66.75	3.26
	Desvio Padrão	0.59	0.89	0.51
	Coefficiente de variação	19.4%	1.3%	15.7%

Nota: P-UP-4 e P-VE-1 teve perda de resultado

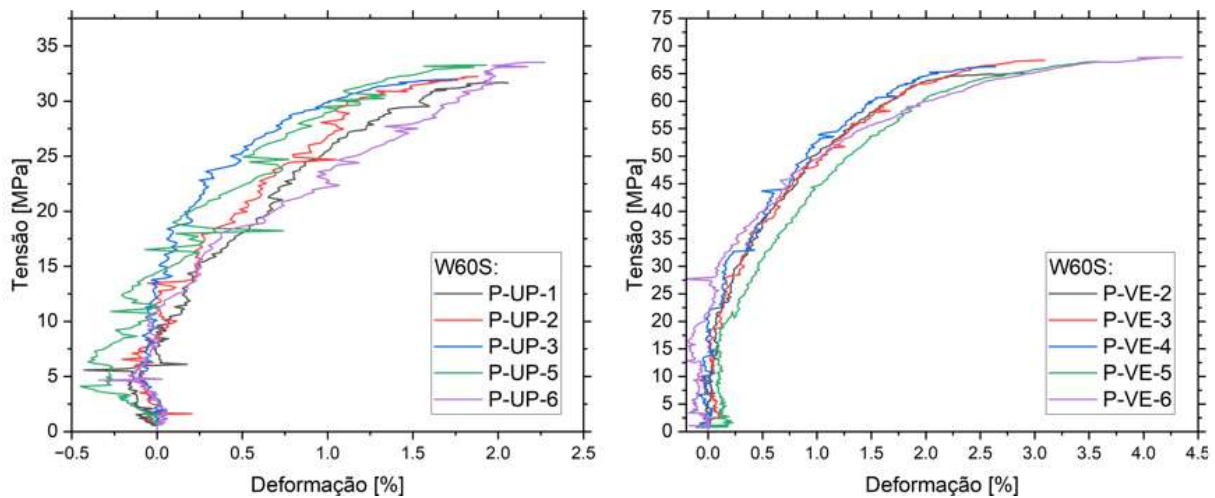


Figura 165 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano W60 S

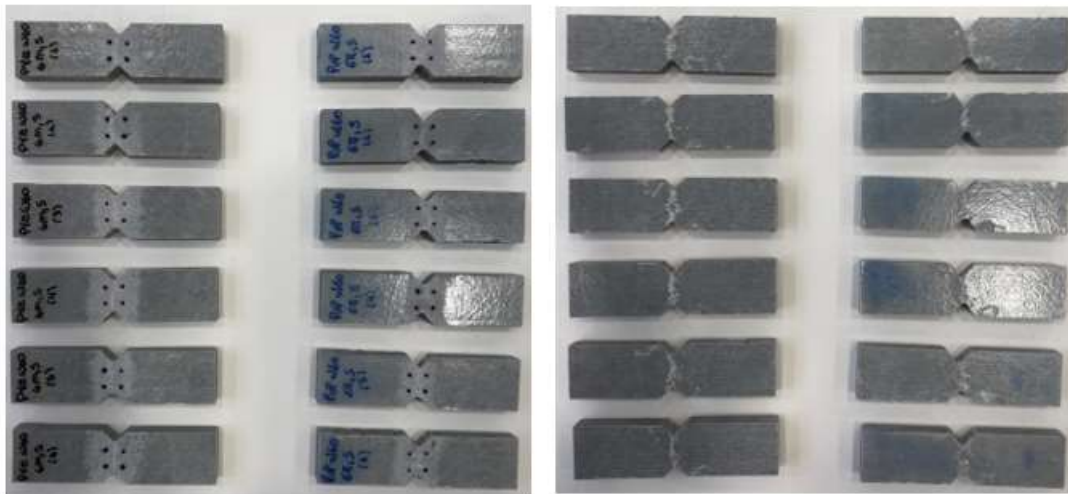


Figura 166 – Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano W60 S

Ambiente W60 D:

Tabela 70 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio corte no plano

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	21.5	76	20	11.89	20	8.0	8.0	8.0
	2	21.4	76	20	11.56	20	8.0	8.0	8.0
	3	20.6	76	20	12	20	8.0	8.0	8.0
	4	20.5	76	20	12.1	20	8.0	8.0	8.0
	5	20.7	76	20	12.2	20	8.0	8.0	8.0
	6	20.5	76	20	12.45	20	8.0	8.0	8.0
Média		20.87	76	20	12.03	20	8.0	8.0	8.0
VE	1	21.01	76	20	11.9	20	8.0	8.0	8.0
	2	20.88	76	20	12.5	20	8.0	8.0	8.0
	3	21.79	76	20	11.5	20	8.0	8.0	8.0
	4	21.14	76	20	11.5	20	8.0	8.0	8.0
	5	21.3	76	20	11.65	20	8.0	8.0	8.0
	6	21.97	76	20	12	20	8.0	8.0	8.0
Média		21.35	76	20	11.84	20	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de corte no plano W60 D

Resina	Provetes	G[GPa]	$\tau_{f\max}$ [MPa]	$\gamma_{f\max}$ [%]
UP	1	2.58	52.61	3.29
	2	2.07	53.13	3.36
	3	2.64	53.79	2.05
	4	2.15	52.62	2.61
	5	2.36	54.30	2.84
	6	3.26	57.25	3.86
	Média	2.51	53.95	3.00
	Desvio Padrão	0.32	1.22	0.50
	Coefficiente de Variação	12.6%	2.3%	16.7%
VE	1	2.68	72.02	3.32
	2	3.68	71.53	3.08
	3	-	-	-
	4	2.85	65.28	3.57
	5	2.24	72.32	3.57
	6	2.28	70.12	2.67
	Média	2.75	70.25	3.24
	Desvio Padrão	0.41	2.04	0.29
	Coefficiente de variação	15.1%	2.9%	9.0%

Nota: P-VE-3 teve perda de resultado

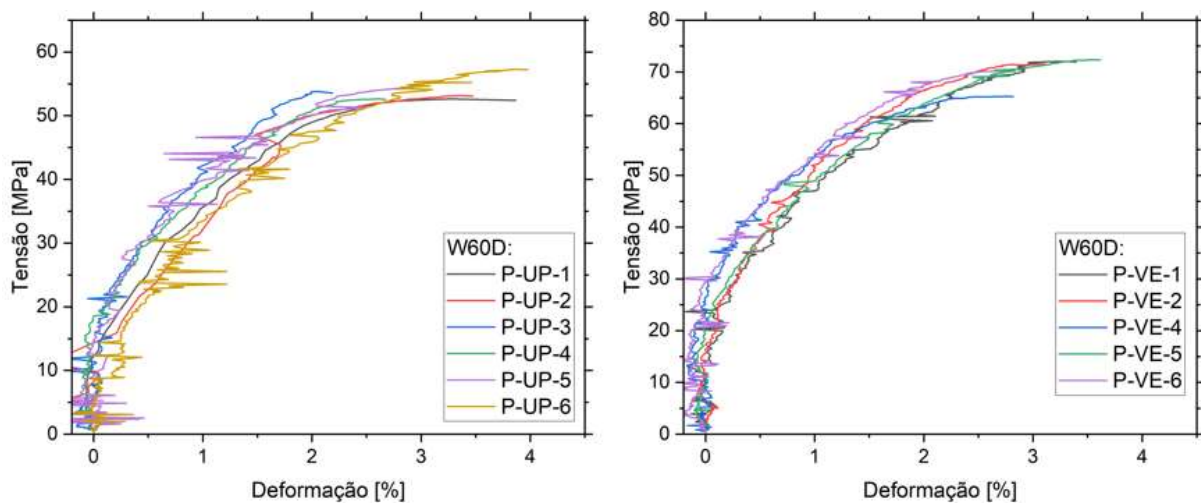


Figura 167 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano W60 D

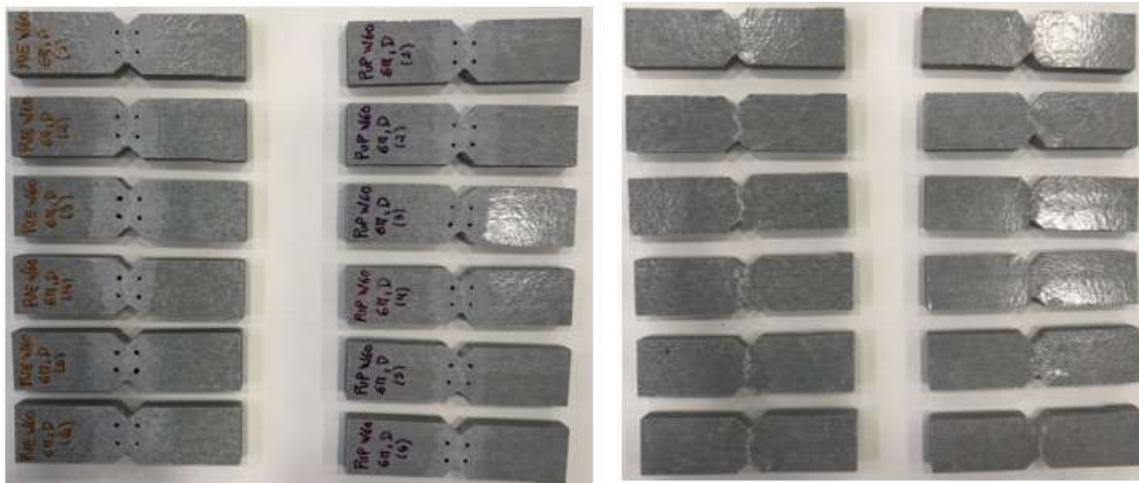


Figura 168 – Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano W60 D

Ambiente T-15:

Tabela 71 - Dimensões dos provetes T-15 para o ensaio corte no plano

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	21.74	76	20	11.88	20	8.0	8.0	8.0
	2	21.72	76	20	11.96	20	8.0	8.0	8.0
	3	21.32	76	20	11.91	20	8.0	8.0	8.0
	4	21.39	76	20	11.9	20	8.0	8.0	8.0
	5	21.63	76	20	11.88	20	8.0	8.0	8.0
	6	21.52	76	20	11.77	20	8.0	8.0	8.0
Média		21.53	76	20	11.88	20	8.0	8.0	8.0
VE	1	21.58	76	20	11.88	20	8.0	8.0	8.0
	2	21.7	76	20	11.9	20	8.0	8.0	8.0
	3	22.06	76	20	11.86	20	8.0	8.0	8.0
	4	21.68	76	20	12.34	20	8.0	8.0	8.0
	5	22.12	76	20	12.02	20	8.0	8.0	8.0
	6	22.14	76	20	11.86	20	8.0	8.0	8.0
Média		21.88	76	20	11.98	20	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de corte no plano T-15

Resina	Provetes	G[GPa]	$\tau_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\gamma_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	3.94	82.40	4.20
	2	7.11	86.12	2.31
	3	5.67	79.99	2.60
	4	4.01	82.25	3.89
	5	5.75	83.0	2.41
	6	4.32	79.62	1.91
	Média	5.13	82.23	2.89
	Desvio Padrão	1.04	1.61	0.77
	Coefficiente de Variação	20.3%	2.0%	26.7%
VE	1	3.95	83.13	4.59
	2	3.80	87.59	4.12
	3	3.35	88.42	3.80
	4	2.87	89.48	4.40
	5	2.72	88.74	5.47
	6	4.40	90.51	4.08
	Média	3.51	87.98	4.41
	Desvio Padrão	0.53	1.75	0.41
	Coefficiente de variação	15.2%	2.0%	9.4%

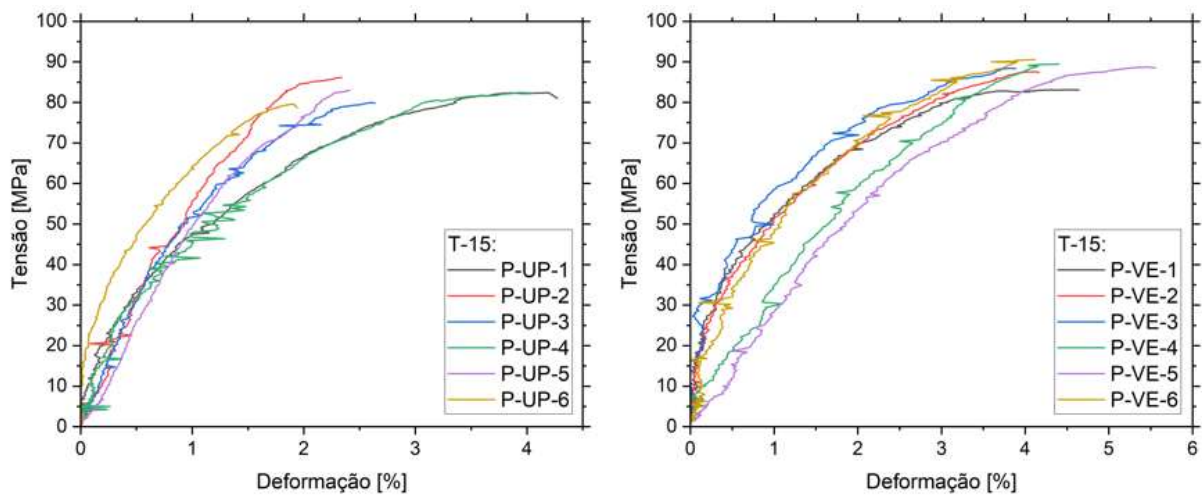


Figura 169 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano T-15

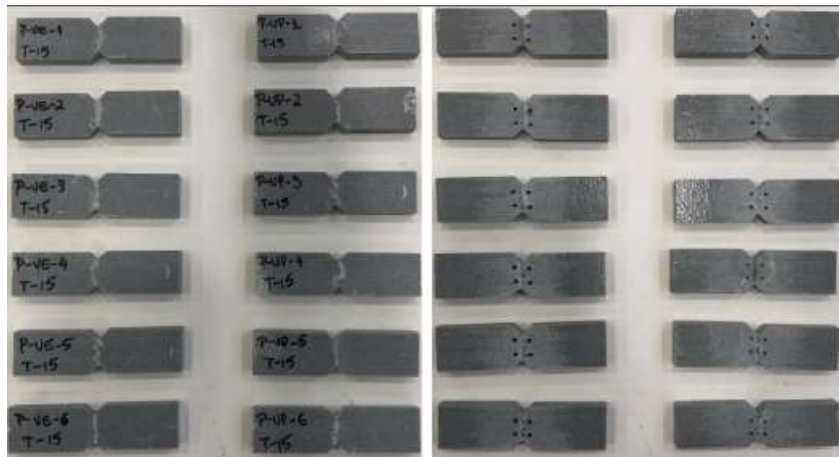


Figura 170 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano T-15

Ambiente T20:

Tabela 72 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio corte no plano

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	21	76	20	11.9	20	8.0	8.0	8.0
	2	20.9	76	20	11.63	20	8.0	8.0	8.0
	3	21.3	76	20	12.77	20	8.0	8.0	8.0
	4	21.2	76	20	11.5	20	8.0	8.0	8.0
	5	21	76	20	11.97	20	8.0	8.0	8.0
	6	20.9	76	20	12.1	20	8.0	8.0	8.0
Média		21.05	76	20	11.98	20	8.0	8.0	8.0
VE	1	21.3	76	20	12	20	8.0	8.0	8.0
	2	21.7	76	20	11.6	20	8.0	8.0	8.0
	3	20.9	76	20	11.6	20	8.0	8.0	8.0
	4	21.7	76	20	11.47	20	8.0	8.0	8.0
	5	20.8	76	20	11.87	20	8.0	8.0	8.0
	6	20.8	76	20	11.33	20	8.0	8.0	8.0
Média		21.2	76	20	11.65	20	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de corte no plano T20

Resina	Provetes	G[GPa]	$\tau_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\gamma_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	4.62	82.73	4.26
	2	4.51	84.43	4.35
	3	3.65	80.24	4.31
	4	3.75	83.89	4.92
	5	3.15	77.04	3.86
	6	-	-	-
	Média	3.94	81.67	4.34
	Desvio Padrão	0.51	2.42	0.23
	Coefficiente de Variação	12.8%	3.0%	5.4%
VE	1	3.73	80.99	3.37
	2	3.82	87.10	3.46
	3	5.00	84.99	5.12
	4	3.82	77.77	2.96
	5	3.86	78.03	3.56
	6	3.55	81.55	3.16
	Média	3.96	81.74	3.60
	Desvio Padrão	0.34	2.87	0.50
	Coefficiente de variação	8.7%	3.5%	14.0%

Nota: P-UP-6 teve perda de resultado

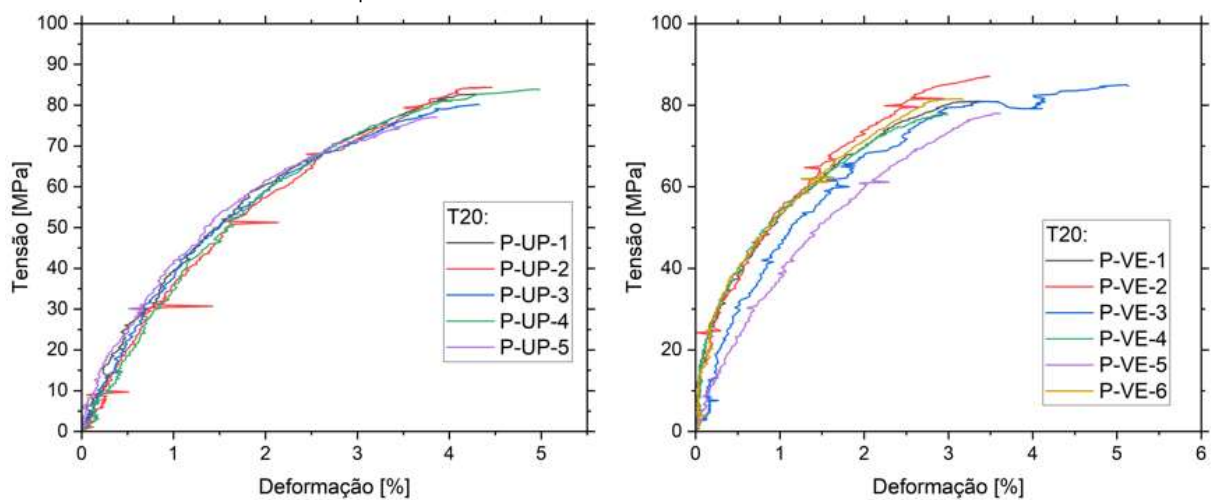


Figura 171 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano T20

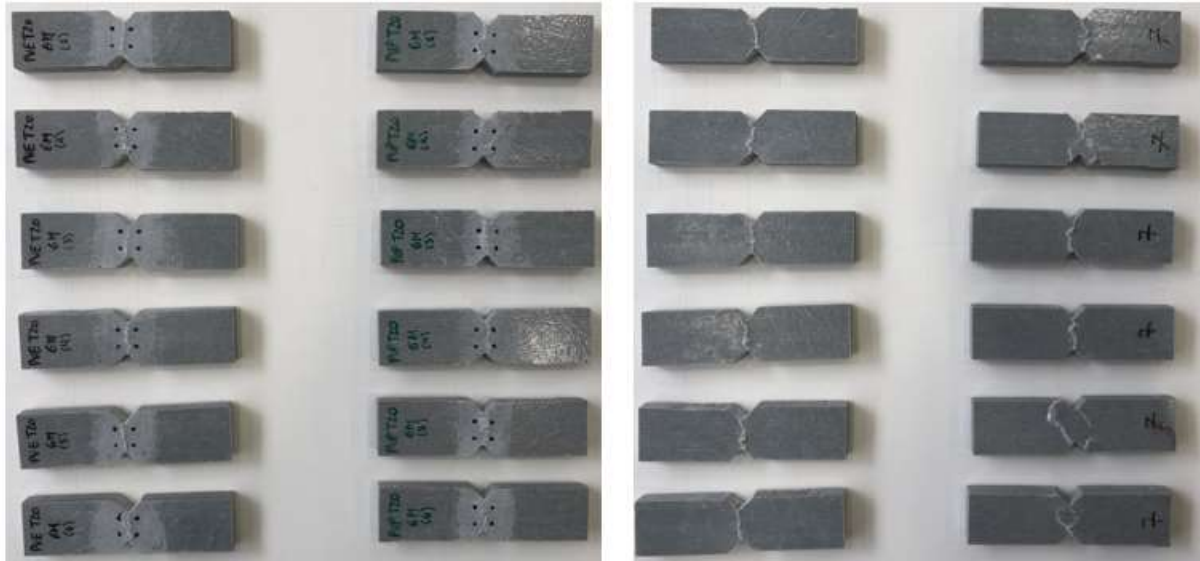


Figura 172 – Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano T20

Ambiente T40:

Tabela 73 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio corte no plano

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	20.9	76	20	11.96	20	8.0	8.0	8.0
	2	21.1	76	20	11.85	20	8.0	8.0	8.0
	3	21.2	76	20	11.69	20	8.0	8.0	8.0
	4	21.2	76	20	12.4	20	8.0	8.0	8.0
	5	21.4	76	20	11.7	20	8.0	8.0	8.0
	6	21.3	76	20	11.25	20	8.0	8.0	8.0
Média		21.18	76	20	11.81	20	8.0	8.0	8.0
VE	1	21.5	76	20	11.86	20	8.0	8.0	8.0
	2	21.2	76	20	11.75	20	8.0	8.0	8.0
	3	21.2	76	20	11.2	20	8.0	8.0	8.0
	4	21.5	76	20	11.35	20	8.0	8.0	8.0
	5	21.5	76	20	11.44	20	8.0	8.0	8.0
	6	21.5	76	20	11.1	20	8.0	8.0	8.0
Média		21.4	76	20	11.45	20	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de corte no plano T40

Resina	Provetes	G[GPa]	$\tau_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\gamma_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	4.03	76.85	4.59
	2	2.79	77.56	4.26
	3	4.75	83.26	3.95
	4	1.25	81.51	3.97
	5	4.28	79.57	4.25
	6	2.17	84.48	4.58
	Média	3.21	80.54	4.27
	Desvio Padrão	1.14	2.54	0.21
	Coefficiente de Variação	35.6%	3.2%	4.9%
VE	1	3.00	86.18	3.99
	2	3.31	90.95	3.61
	3	5.34	85.18	3.30
	4	5.39	92.83	5.17
	5	4.00	84.44	4.15
	6	-	-	-
	Média	4.21	87.92	4.05
	Desvio Padrão	0.93	3.18	0.49
	Coefficiente de variação	22.0%	3.6%	12.2%

Nota: P-VE-6 teve perda de resultado

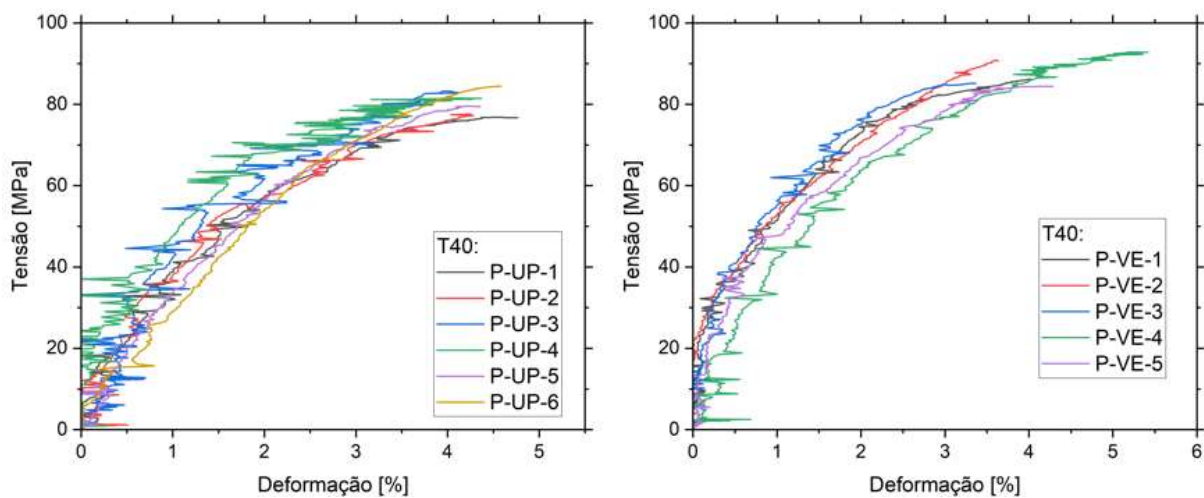


Figura 173 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano T40

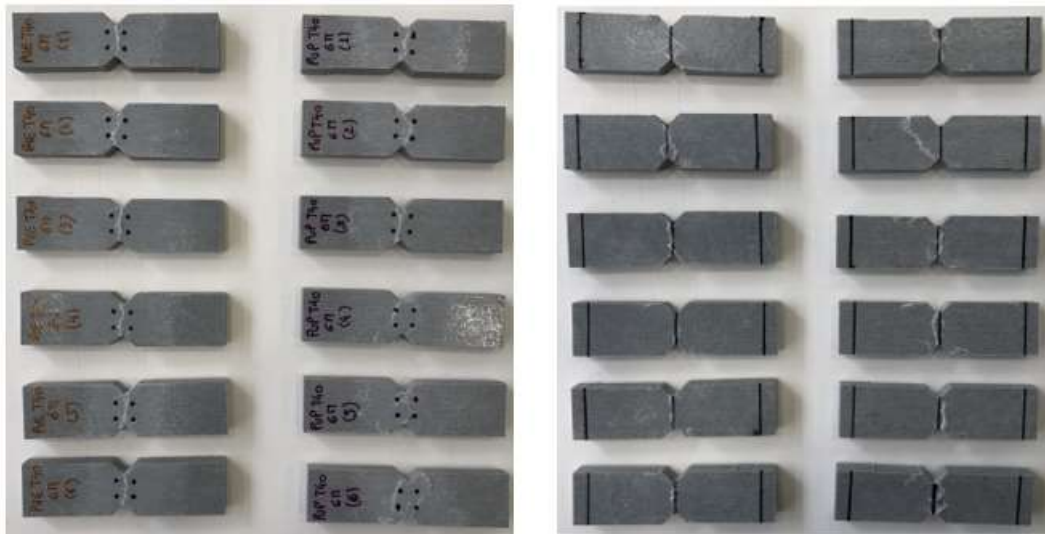


Figura 174 – Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano T40

Ambiente T60:

Tabela 74 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio corte no plano

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	21.5	76	20	11.92	20	8.0	8.0	8.0
	2	21.63	76	20	11.87	20	8.0	8.0	8.0
	3	21.63	76	20	11.9	20	8.0	8.0	8.0
	4	21.17	76	20	11.58	20	8.0	8.0	8.0
	5	21.52	76	20	11.82	20			
	6	21.64	76	20	11.74	20	8.0	8.0	8.0
Média		21.51	76	25.0	11.8	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	21.37	76	20	11.79	20	8.0	8.0	8.0
	2	21.78	76	20	11.97	20	8.0	8.0	8.0
	3	21.45	76	19	11.78	19	8.0	8.0	8.0
	4	22.13	76	20	12.17	20	8.0	8.0	8.0
	5	21.31	76	20	11.91	20	8.0	8.0	8.0
	6	20.61	76	19	11.05	19	8.0	8.0	8.0
Média		21.44	76	25.0	11.78	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de corte no plano T60

Resina	Provetes	G[GPa]	$\tau_{f\acute{m}ax}$ [MPa]	$\gamma_{f\acute{m}ax}$ [%]
UP	1	3.97	75.98	4.07
	2	-	-	-
	3	3.83	74.61	3.68
	4	3.25	74.12	3.70
	5	3.64	71.21	3.13
	6	3.95	70.61	3.04
	Média	3.73	73.31	3.52
	Desvio Padrão	0.23	1.92	0.35
	Coefficiente de Variação	6.1%	2.6%	10.0%
VE	1	3.85	93.14	4.31
	2	4.21	91.27	3.92
	3	-	-	-
	4	2.98	90.08	4.92
	5	3.44	87.32	4.10
	6	-	-	-
	Média	3.62	90.45	4.31
	Desvio Padrão	0.41	1.75	0.31
	Coefficiente de variação	11.3%	1.9%	7.1%

Nota: P-UP-2, P-VE-3 e P-VE-6 tiveram perda de resultado

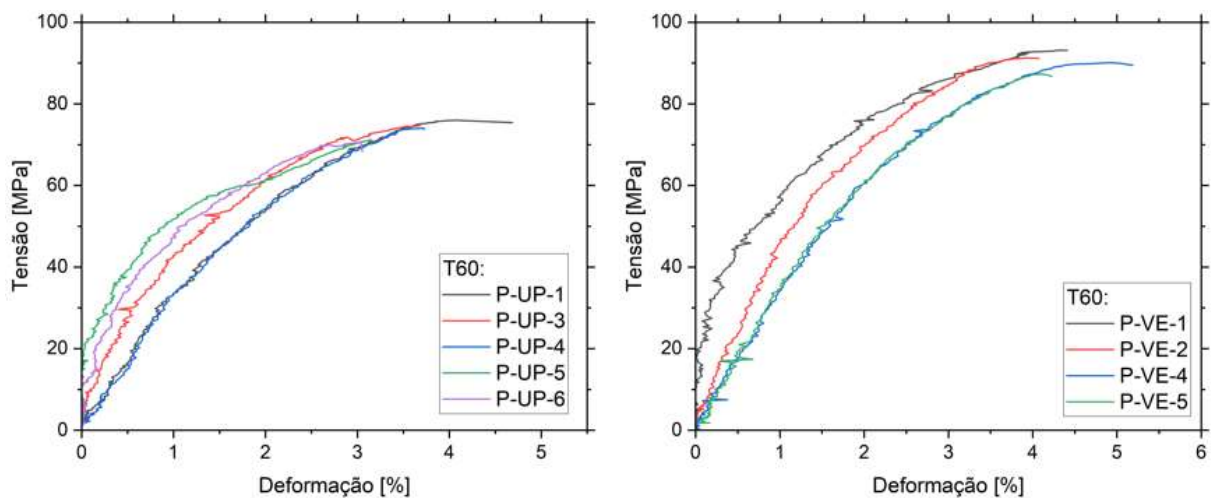


Figura 175 - Gráficos dos provetes nos ensaios de corte no plano T60

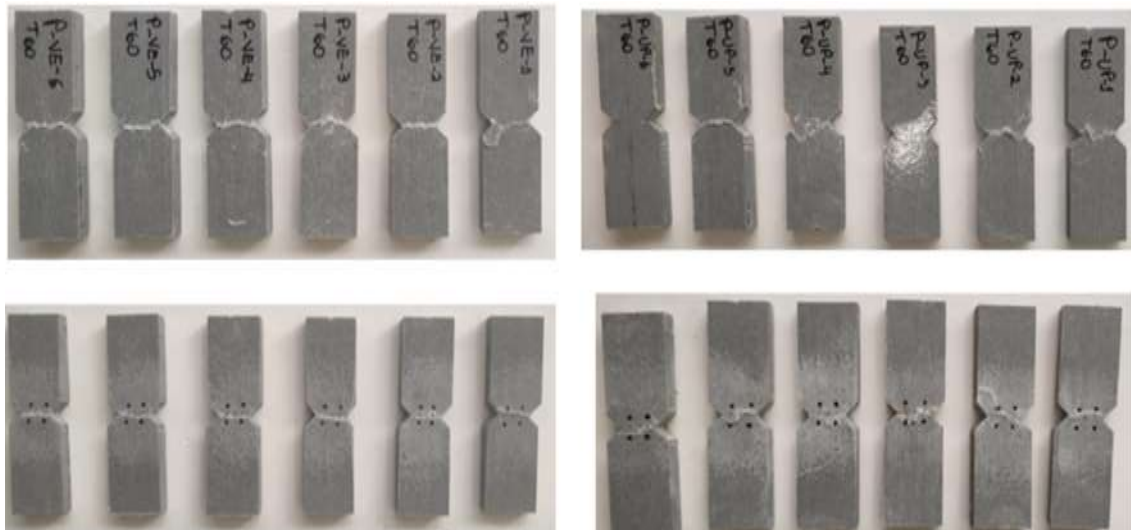


Figura 176 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de corte no plano T60

- Ensaio de compressão:

Ambiente W60 S:

Tabela 75 - Dimensões dos provetes W60 S para o ensaio de compressão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	56.34	153	25	25	25	8	8	8
	2	55.49	153	25	25	25	8	8	8
	3	56.19	153	25	25	25	8	8	8
	4	56.88	153	25	25	25	8	8	8
	5	56.63	153	25	25	25	8	8	8
	6	56.15	153	25	25	25	8	8	8
	7	56.71	153	25	25	25	8	8	8
Média		56.34	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	55.57	153	25	25	25	8	8	8
	2	57.48	153	25	25	25	8	8	8
	3	57.28	153	25	25	25	8	8	8
	4	57.57	153	25	25	25	8	8	8
	5	57.93	153	25	25	25	8	8	8
	6	57.28	153	25	25	25	8	8	8
	7	57.92	153	25	25	25	8	8	8
Média		57.29	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de compressão W60 S

Resina	Provetes	$\sigma_{f\max}$ [MPa]
UP	1	251.80
	2	280.81
	3	242.73
	4	311.63
	5	238.08
	6	233.28
	7	224.99
	Média	254.76
	Desvio Padrão	23.69
	Coefficiente de Variação	9.3%
VE	1	419.57
	2	395.53
	3	371.44
	4	350.46
	5	397.17
	6	404.40
	7	396.83
	Média	390.77
	Desvio Padrão	17.04
	Coefficiente de variação	4.4%

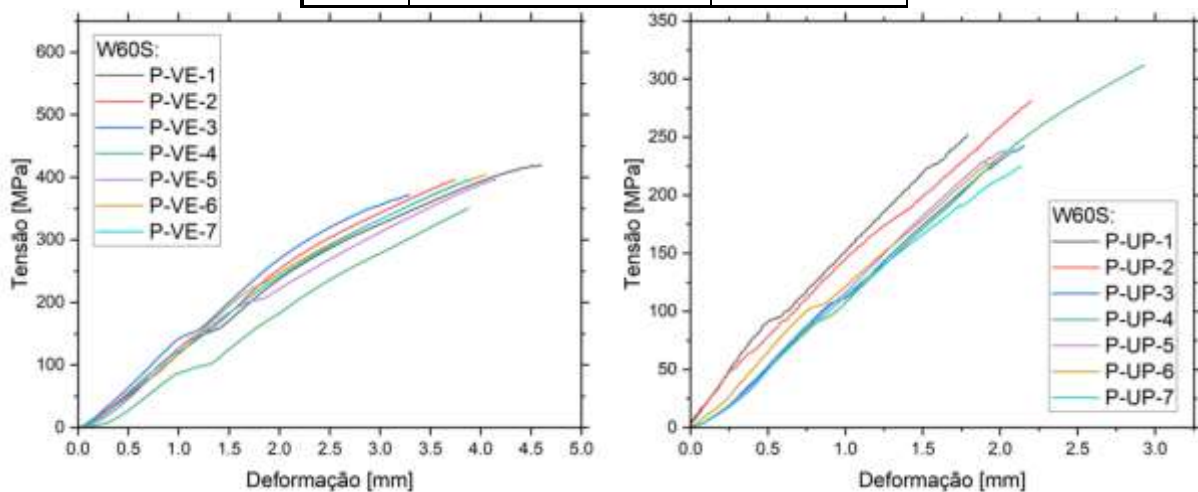


Figura 177 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão W60S



Figura 178 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão W60 S UP

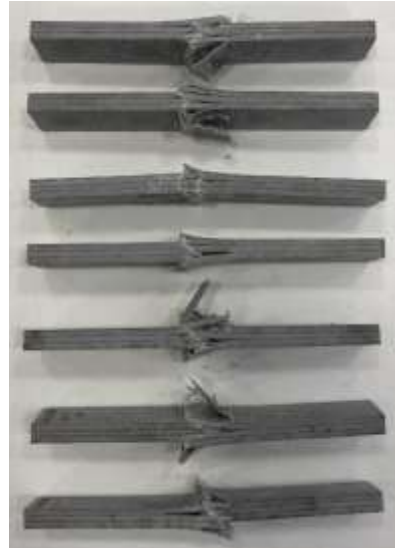


Figura 179 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão W60 S VE

Ambiente W60 D:

Tabela 76 - Dimensões dos provetes W60 D para o ensaio de compressão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	55.86	153	25	25	25	8	8	8
	2	55.81	153	25	25	25	8	8	8
	3	55.92	153	25	25	25	8	8	8
	4	55.99	153	25	25	25	8	8	8
	5	54.85	153	25	25	25	8	8	8
	6	56.36	153	25	25	25	8	8	8
	7	56.18	153	25	25	25	8	8	8
Média		55.85	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	57.2	153	25	25	25	8	8	8
	2	57.4	153	25	25	25	8	8	8
	3	57.81	153	25	25	25	8	8	8
	4	57.46	153	25	25	25	8	8	8
	5	56.93	153	25	25	25	8	8	8
	6	57.8	153	25	25	25	8	8	8
	7	55.91	153	25	25	25	8	8	8
Média		57.22	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de compressão W60 D

Resina	Provetes	$\sigma_{f\text{máx}}$ [MPa]
UP	1	397.72
	2	397.95
	3	382.09
	4	438.00
	5	401.00
	6	427.89
	7	414.32
	Média	408.42
	Desvio Padrão	15.70
	Coefficiente de Variação	3.8%
VE	1	569.19
	2	589.02
	3	600.01
	4	520.39
	5	455.17
	6	549.95
	7	467.19
	Média	535.85
	Desvio Padrão	47.08
	Coefficiente de variação	8.8%

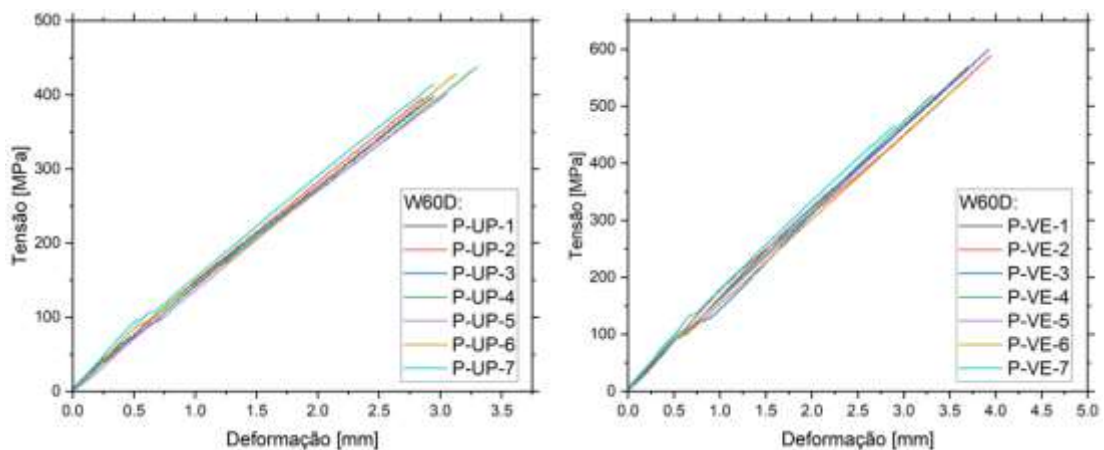


Figura 180 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão W60D



Figura 181 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão W60 D UP



Figura 182 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão W60 D VE

Ambiente T-15:

Tabela 77 - Dimensões dos provetes T-15 para o ensaio de compressão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	56.2	153	25	25	25	8	8	8
	2	56.53	153	25	25	25	8	8	8
	3	55.63	153	25	25	25	8.5	8	8
	4	56.28	153	25	25	25	8	8	8
	5	56.71	153	25	25	25	8	8.8	10
	6	55.92	153	25	25	25	8	8.6	9.6
	7	56.73	153	25	25	25	8	8.5	10
Média		56.29	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	56.89	153	25	25	25	8	8	8
	2	56.94	153	25	25	25	8	8	8
	3	55.08	153	25	25	25	8	8	8
	4	57.02	153	25	25	25	8	8	8
	5	56.96	153	25	25	25	8	8	8
Média		56.58	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de compressão T-15

Resina	Provetes	$\sigma_{f\text{máx}}$ [MPa]
UP	1	-
	2	620.00
	3	455.00
	4	510.00
	5	-
	6	-
	7	-
	Média	528.33
	Desvio Padrão	61.11
	Coefficiente de Variação	11.6%
VE	1	635.11
	2	621.06
	3	512.43
	4	685.53
	5	537.88
	Média	598.40
	Desvio Padrão	58.60
	Coefficiente de variação	9.8%

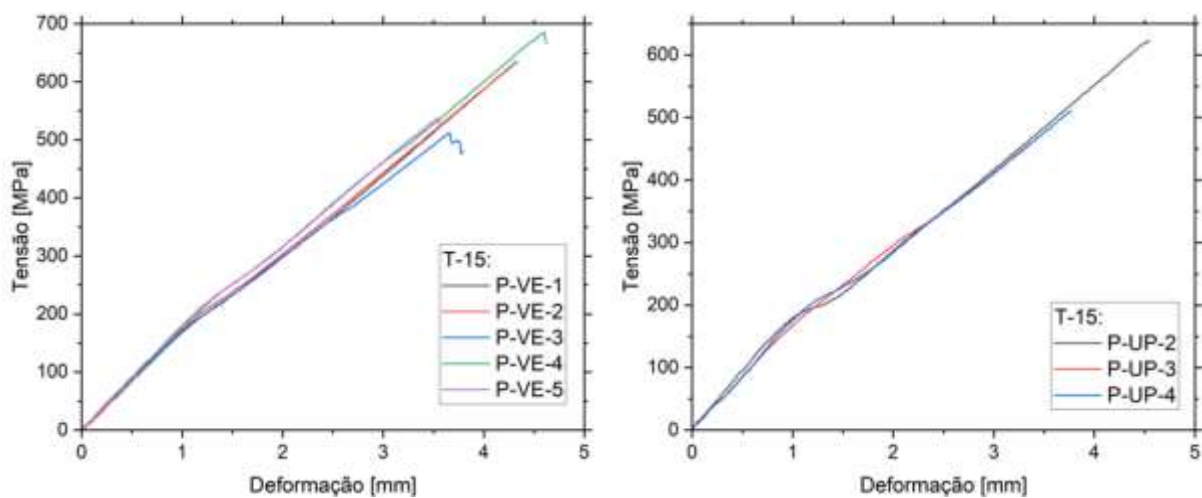


Figura 183 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão T-15



Figura 184 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T-15 UP



Figura 185 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T-15 VE

Ambiente T20:

Tabela 78 - Dimensões dos provetes T20 para o ensaio de compressão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	55.5	153	25	25	25	8	8	8
	2	55.6	153	25	25	25	8	8	8
	3	55.9	153	25	25	25	8	8	8
	4	55.3	153	25	25	25	8	8	8
	5	55.5	153	25	25	25	8	8	8
	6	54.5	153	25	25	25	8	8	8
	7	56.1	153	25	25	25	8	8	8
Média		55.49	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	57.5	153	25	25	25	8	8	8
	2	55.4	153	25	25	25	8	8	8
	3	56.7	153	25	25	25	8	8	8
	4	57	153	25	25	25	8	8	8
	5	57	153	25	25	25	8	8	8
	6	57.2	153	25	25	25	8	8	8
	7	56.9	153	25	25	25	8	8	8
Média		56.81	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de compressão T20

Resina	Provetes	$\sigma_{f\text{máx}}$ [MPa]
UP	1	647.08
	2	-
	3	-
	4	585.56
	5	454.33
	6	498.16
	7	552.43
	Média	547.51
	Desvio Padrão	57.01
	Coefficiente de Variação	10.4%
VE	1	550.60
	2	587.38
	3	-
	4	649.75
	5	732.36
	6	572.17
	7	-
	Média	618.45
	Desvio Padrão	58.08
	Coefficiente de variação	9.4%

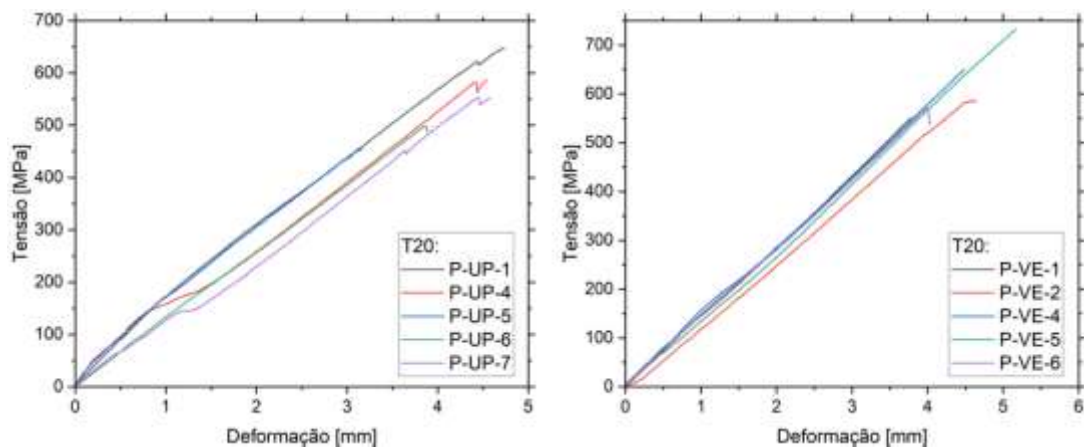


Figura 186 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão T20

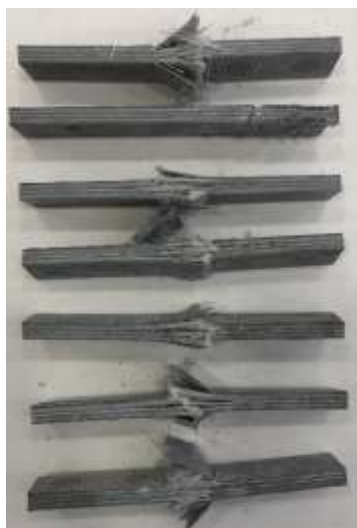


Figura 187 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T20 UP



Figura 188 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T20 VE

Ambiente T40:

Tabela 79 - Dimensões dos provetes T40 para o ensaio compressão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	56.1	153	25	25	25	8	8	8
	2	55.7	153	25	25	25	8	8	8
	3	55.5	153	25	25	25	8	8	8
	4	54.5	153	25	25	25	8	8	8
	5	55.6	153	25	25	25	8	8	8
	6	55.9	153	25	25	25	8	8	8
	7	55.5	153	25	25	25	8	8	8
Média		55.54	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	56.7	153	25	25	25	8	8	8
	2	56.5	153	25	25	25	8	8	8
	3	56.8	153	25	25	25	8	8	8
	4	57.6	153	25	25	25	8	8	8
	5	56.1	153	25	25	25	8	8	8
	6	54.8	153	25	25	25	8	8	8
	7	57.2	153	25	25	25	8	8	8
Média		56.53	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de compressão T40

Resina	Provetes	$\sigma_{f\text{máx}}$ [MPa]
UP	1	678.89
	2	572.22
	3	557.15
	4	576.67
	5	617.28
	6	-
	7	699.29
	Média	616.92
	Desvio Padrão	48.24
	Coefficiente de Variação	7.8%
VE	1	664.34
	2	681.42
	3	-
	4	619.47
	5	-
	6	646.76
	7	697.38
	Média	661.87
	Desvio Padrão	23.01
	Coefficiente de variação	3.5%

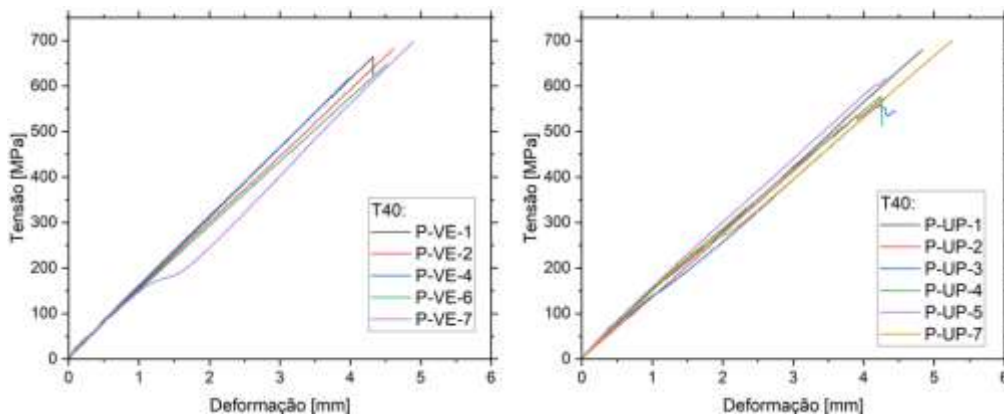


Figura 189 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão T40



Figura 190 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T40 UP



Figura 191 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T40 VE

Ambiente T60:

Tabela 80 - Dimensões dos provetes T60 para o ensaio de compressão

Resina	Provetes	Peso [g]	L [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]
UP	1	56.16	153	25	25	25	8	8	8
	2	56.6	153	25	25	25	8	8	8
	3	56.37	153	25	25	25	8	8	8
	4	56.69	153	25	25	25	8	8	8
	5	56.37	153	25	25	25	8	8	8
	6	55.43	153	25	25	25	8	8	8
Média		56.27	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0
VE	1	56.79	153	25	25	25	8	8	8
	2	56.22	153	25	25	25	8	8	8
	3	58.12	153	25	25	25	8	8	8
	4	57.38	153	25	25	25	8	8	8
	5	57.01	153	25	25	25	8	8	8
	6	55.39	154	25	25	25	8	8	8
	7	56.99	153	25	25	25	8	8	8
Média		56.84	153	25.0	25.0	25.0	8.0	8.0	8.0

Tabela 35 - Resultado dos ensaios de compressão T60

Resina	Provetes	$\sigma_{f\text{máx}}$ [MPa]
UP	1	615.31
	2	604.64
	3	556.31
	4	583.07
	5	637.48
	6	-
	Média	599.36
	Desvio Padrão	23.74
	Coefficiente de Variação	4.0%
VE	1	-
	2	-
	3	660.08
	4	635.75
	5	633.17
	6	614.56
	Média	635.89
	Desvio Padrão	12.09
	Coefficiente de variação	1.9%

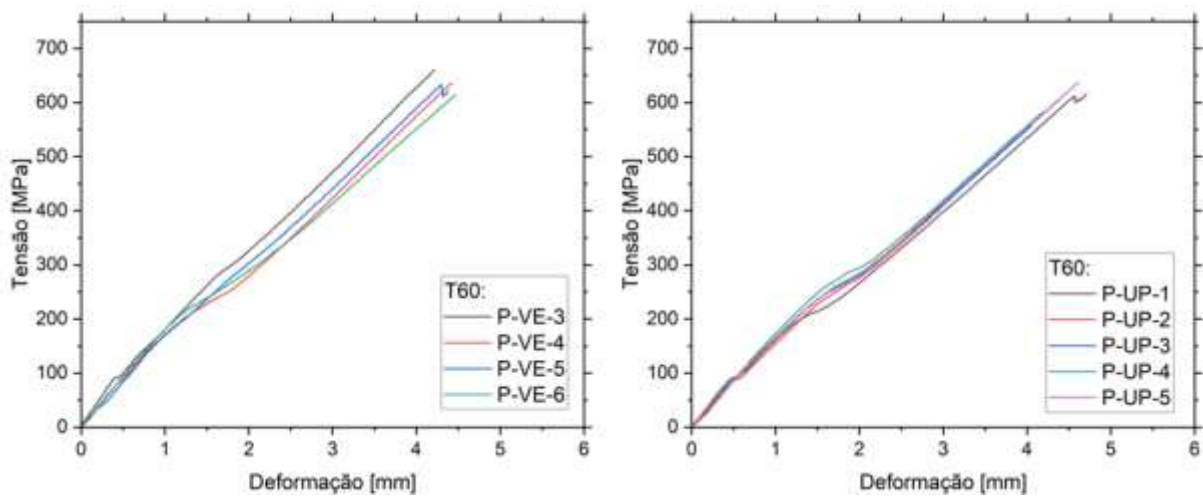


Figura 192 - Gráficos dos provetes nos ensaios de compressão T60



Figura 193 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T60 UP



Figura 194 - Modos de rotura dos provetes nos ensaios de compressão T60 VE