



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Helena Maria Torres Matos Leal

Durabilidade de Colagens Estruturais em
Elementos de Madeira

Helena Maria Torres Matos Leal
Durabilidade de Colagens Estruturais em
Elementos de Madeira

UMinho | 2015

dezembro de 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Helena Maria Torres Matos Leal

Durabilidade de Colagens Estruturais em
Elementos de Madeira

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Aires F. Camões de Azevedo

AGRADECIMENTOS

“Deus quer, o homem sonha, a obra nasce.” Todos os caminhos, por mais longos ou difíceis que sejam, se tornam mais leves na companhia daqueles que nos ajudam. Por isso, quero deixar o meu agradecimento a todos aqueles que me ajudaram, apoiaram e ensinaram no decorrer da realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Aires F. Camões de Azevedo, orientador deste trabalho, pela rápida resposta a todas as minhas questões, pela partilha de conhecimento, esclarecimento e conselhos, e pela compreensão nos momentos de dificuldade.

Aos técnicos de laboratório que muito me auxiliaram na realização da campanha experimental e que sempre se prontificaram para me esclarecer em todas as dúvidas que pudessem ocorrer. Ao Senhor Matos, ao Engenheiro Marco Jorge e ao Engenheiro Carlos Jesus, por toda a ajuda prestada, boa disposição e incentivo na realização deste trabalho. Um agradecimento especial ao Marco, pela sua ajuda preciosa e apoio e conhecimento fundamentais para que este trabalho fosse realizado.

Ao Instituto Politécnico de Bragança, em cujos laboratórios foi possível realizar-se parte do trabalho experimental aqui exposto.

À minha família, que me apoiou ao longo de todo o percurso que me conduziu até aqui, e que sempre disponibilizou a ajuda, o apoio e o carinho em todos os momentos.

Por último, mas não de somenos importância, um agradecimento aos meus amigos que me apoiaram, ouviram, incentivaram e encorajaram nos momentos de maior dificuldade.

RESUMO

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos utilizados pelo Homem. Nos finais do século XVIII, começaram a alterar-se as exigências das construções, a par da utilização cada vez maior de outros materiais, como o vidro, o aço e o betão armado. Neste sentido, as ligações entre peças de madeira utilizadas na construção têm assumido também grande relevância, com a busca de melhores soluções para as ligações, mais eficientes, económicas e duradouras, com vantagens em termos de produção, desempenho, estética e custo. As colagens estruturais, com a utilização de materiais epoxídicos são, assim, um importante desenvolvimento nas construções de madeira, e o objecto de estudo do presente trabalho.

O objetivo desta Dissertação é a determinação dos efeitos que podem influenciar a durabilidade das colagens estruturais em madeira, aprofundando o conhecimento de alguns efeitos já conhecidos, como os associados a altas temperaturas e à saturação da madeira, e testando o efeito de outros, como a presença de gelo ou temperaturas negativas na resistência das juntas de ligação.

Para isso, os principais agentes a estudar são o teor de humidade nos provetes de madeira ensaiados, as variações de temperatura nos mesmos, a exposição a ciclos de gelo-degelo e ciclos de temperatura variáveis, estabelecendo-se, assim, uma relação destes fatores com a resistência das colagens em diversos tipos de ensaios.

Da análise final do trabalho, concluíram-se vários aspetos: quanto maior o teor de humidade presente nas fibras da madeira, menor a sua resistência a solicitações externas; a exposição das colagens estruturais a temperaturas negativas (na ordem dos -15°C) e a ciclos de gelo e degelo não afectam a capacidade resistente em maior escala do que ambientes amenos (20°C , 60% de humidade relativa); quanto maior o tempo de cura da resina epóxy, maior a sua capacidade resistente, sobretudo quando essa cura acontece sob temperaturas elevadas (desde que abaixo da temperatura de transição vítrea).

Palavras-chave: colagens estruturais, ensaio de corte, *pull-out*, *pull-off*, temperatura, teor de humidade, gelo-degelo, epóxy

ABSTRACT

Wood is one of the oldest construction materials used by man. In the late eighteenth century, the requirements of the buildings began to change, along with the increasing use of other materials such as glass, steel and concrete. In this sense, the bonds between pieces of wood used in construction have also assumed great relevance with the search for better solutions to the bonding, more efficient, economical and durable, with advantages in terms of production, performance, aesthetics and cost. The structural bonding, with the use of epoxy materials are therefore, an important development in timber buildings, and the object of study of this work.

The purpose of this Dissertation is to determine the effects that can influence the durability of structural bonding in wood, deepening knowledge of some effects already known, such as those associated with high temperatures and the saturation of the wood, and testing the effect of others, such as the presence of ice or negative temperature resistance of the connection joints.

For this, the main agents to study are the moisture content of the tested wood specimens and the temperature variations, exposure to freeze-thaw cycles and variable temperature cycles, establishing a ratio of these factors with the strength of bonding in several types of tests.

In the final analysis, the work led to various aspects: the higher the moisture content present in the fibres of wood, the lower its resistance to external requests; the exposure of structural bonding to freezing temperatures (around -15°C) and ice-thaw cycles do not affect the load capacity in a larger scale than in mild environments (20°C , 60% moisture content); the longer the curing time of the epoxy resin, the greater its load bearing capacity, particularly when such curing takes place at elevated temperatures (below the glass transition temperature).

Keywords: structural bonding, shear test, pull-out, pull-off, temperature, moisture content, freeze-thaw, epoxy

Índice Geral

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO	V
ABSTRACT.....	VII
1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Motivação e pertinência do tema.....	23
1.2. Metodologia e objetivos	24
1.3. Organização.....	25
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	27
2.1. Resinas Epoxídicas.....	28
2.1.1. Caracterização das colas.....	28
2.1.2. Tipos de resinas epóxy	29
2.2. Madeiras.....	30
2.2.1. Características gerais.....	30
2.2.2. Caracterização da madeira utilizada.....	31
2.2.3. Características Físico-Mecânicas da madeira.....	31
2.3. Vantagens e limitações das colagens estruturais.....	33
2.4. Factores que condicionam a ligação cola-madeira.....	35
2.4.1. Influência da Temperatura.....	36
2.4.2. Influência do Teor de Humidade.....	37
2.4.3. Outros factores	37
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	39
3.1. Introdução	40
3.2. Materiais.....	40
	IX

3.3.	Condições de Exposição.....	41
3.4.	Procedimentos de Ensaio.....	45
3.4.1.	Ensaio de Tração de Provetes de Epóxy Normalizados	45
3.4.2.	Ensaio de <i>Pull-Out</i>	68
3.4.3.	Ensaio de Corte	86
3.4.4.	Ensaio de <i>Pull-Off</i>	102
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	117
4.1.	Introdução.....	118
4.2.	Resultados dos ensaios de tração de provetes de cola com diferentes tempos de cura	119
4.3.	Resultados dos ensaios de <i>pull-out</i> para determinação do comprimento de ancoragem	121
4.4.	Resultados dos ensaios de tração em provete de cola para várias condições de exposição.	122
4.5.	Resultados dos ensaios de corte.....	127
4.6.	Resultados dos ensaios de <i>pull-out</i>	131
4.7.	Resultados dos ensaios de <i>pull-off</i>	134
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	139
6.	BIBLIOGRAFIA	143

Índice de Figuras

Figura 1: Exemplos detalhados de juntas de ligação coladas [4].	33
Figura 2 (a) e (b): Degradação dos provetes para a condição de humidade de saturação.	43
Figura 3 (a) e(b): Estufa a 40°C e arca congeladora a -15°C para tentar degradar-se os provetes.	44
Figura 4 (a) – (g): Preparação dos provetes de cola para ensaio à tração.....	46
Figura 5: Rotura de um provete de epóxy ensaiado à tração.....	53
Figura 6: (a) Modo de rotura dos provetes. (b) Gráfico Tensão vs Extensão do Provede	54
Figura 7: (a) Modo de rotura dos provetes. (b) Gráfico Tensão vs Extensão do Provede.	55
Figura 8: (a) Modo de rotura dos provetes. (b) Gráfico Tensão vs Extensão do Provede	56
Figura 9: (a) Modo de rotura dos provetes. (b) Gráfico Tensão vs Extensão do Provede	57
Figura 10: (a) Modo de rotura dos provetes. (b) Gráfico Tensão vs Extensão do Provede.	58
Figura 11: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição TH=8%. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.	59
Figura 12: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição TH saturação (b) Gráfico Tensão vs Extensão.	60
Figura 13: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição de gelo-degelo. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.	61
Figura 14: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição T= 10/50°C. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.	62
Figura 15: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição T= -15/+60°C. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.	63
Figura 16: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição temperatura -15°C (b) Gráfico Tensão vs Extensão.....	64
Figura 17: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição temperatura 40°C. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.....	65
Figura 18: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição temperatura 60°C. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.....	66

Figura 19: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição temperatura 100°C. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.....	67
Figura 20: Provete para ensaio de arrancamento <i>Pull-out</i>	68
Figura 21 (a) – (d): Ensaio de <i>pull-out</i> de arrancamento de varões de aço.	74
Figura 22: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> para provetes com 40mm de ancoragem. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento do ensaio de <i>pull-out</i>	75
Figura 23: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> para provetes com 60mm de ancoragem. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento do ensaio de <i>pull-out</i>	76
Figura 24: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> para provetes com 80mm de ancoragem. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento do ensaio de <i>pull-out</i>	77
Figura 25: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> para provetes com 100mm de ancoragem. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento do ensaio de <i>pull-out</i>	78
Figura 26: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> da condição TH=8%. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	79
Figura 27: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> da condição TH saturado. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	80
Figura 28: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> da condição gelo-degelo. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	81
Figura 29: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> da condição T= 10/50°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	81
Figura 30: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> da condição T= -15/+60°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	82
Figura 31: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> da condição temperatura -15°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	83
Figura 32: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> da condição temperatura 40°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.....	84
Figura 33: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> da condição temperatura 60°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.....	85
Figura 34: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-out</i> da condição temperatura 100°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	86

Figura 35 (a) e (b): Geometria dos provetes usados nos ensaios de corte por compressão (medidas em mm).	87
Figura 36 (a), (b), (c): Ensaio de corte dos provetes.	91
Figura 37: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição de referência. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	92
Figura 38: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição TH=8%. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	93
Figura 39: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição TH saturado. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	94
Figura 40: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição de gelo-degelo. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	95
Figura 41: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição T= 10/+50°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	96
Figura 42: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição T= -15/+60°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	97
Figura 43: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição temperatura -15°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	98
Figura 44: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição temperatura 40°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	99
Figura 45: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição temperatura 60°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	100
Figura 46: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição temperatura 100°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	101
Figura 47 (a) – (e): Preparação dos provetes para ensaio de <i>Pull-off</i>	103
Figura 48 (a) e(b): Ensaio de <i>pull-off</i> de arrancamento de discos de cola.	106
Figura 49: Equipamento utilizado para o ensaio de <i>pull-off</i>	106
Figura 50: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-off</i> da condição de referência. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	107
Figura 51: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-off</i> da condição TH=8%. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	108

Figura 52: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-off</i> da condição TH saturado (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	109
Figura 53: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-off</i> da condição de gelo-degelo. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	110
Figura 54: Rotura pela interface dos provetes 2 e 4 no ensaio de <i>pull-off</i>	110
Figura 55: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-off</i> da condição T= 10/50°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	111
Figura 56: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-off</i> da condição T= -15/+60°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.	112
Figura 57: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-off</i> da condição temperatura -15°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.....	112
Figura 58: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-off</i> da condição temperatura 40°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.....	113
Figura 59: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-off</i> da condição temperatura 60°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.....	114
Figura 60: (a) Modo de rotura do ensaio de <i>pull-off</i> da condição temperatura 100°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.....	115
Figura 61: Gráfico-resumo da extensão máxima média para cada tempo de cura definido	119
Figura 62: Gráfico-resumo da tensão máxima média para cada tempo de cura definido.....	120
Figura 63: Gráfico-resumo da tensão instalada para cada comprimento de ancoragem.....	121
Figura 64: Variação da extensão em provetes de epóxy sujeitos a variações de humidade	123
Figura 65: Variação da tensão em provetes de epóxy sujeitos a variações de humidade	123
Figura 66: Variação da extensão em provetes de epóxy sujeitos a ciclos de temperatura e humidade	124
Figura 67: Variação da tensão em provetes de epóxy sujeitos a ciclos de temperatura e humidade...	125
Figura 68: Variação da extensão em provetes de epóxy sujeitos a temperaturas distintas.....	126
Figura 69: Variação da tensão em provetes de epóxy sujeitos a temperaturas distintas.....	126
Figura 70: Gráfico de comparação entre a tensão máxima média para a campanha de variação do teor de humidade.....	128

Figura 71: Gráfico de comparação entre a tensão máxima média para a campanha de ciclos de temperatura e humidade	129
Figura 72: Gráfico de comparação entre a tensão máxima média para a campanha de temperaturas variáveis.	130
Figura 73: Gráfico de comparação entre os vários Teores de Humidade dos provetes.....	131
Figura 74: Gráfico de comparação entre os vários Ciclos de temperatura e humidade	132
Figura 75. Gráfico de comparação entre as várias temperaturas dos provetes.....	133
Figura 76: Gráfico de comparação entre as várias humidades relativas dos provetes	134
Figura 77: Gráfico de comparação entre os ciclos de temperatura e humidade dos provetes	135
Figura 78: Gráfico de comparação entre as diferentes temperaturas dos provetes	136

Índice de Tabelas

Tabela 1: Provetes com três dias de cura.....	47
Tabela 2: Provetes com sete dias de cura	48
Tabela 3: Provetes com quinze dias de cura.....	48
Tabela 4: Provetes com trinta dias de cura	48
Tabela 5: Provetes com mais de três meses de cura e teor de umidade 12% (Referência)	49
Tabela 6: Teor de Umidade 8%	49
Tabela 7: Teor de Umidade Saturado	49
Tabela 8: Ciclo de Temperaturas -15/+60°C	50
Tabela 9: Ciclo de Temperaturas +10/+50°C	50
Tabela 10: Ciclo de Gelo-Degelo	50
Tabela 11: Temperatura -15°C.....	51
Tabela 12: Temperatura 40°C.....	51
Tabela 13: Temperatura 60°C.....	52
Tabela 14: Temperatura 100°C.....	52
Tabela 15: Resultados do ensaio de tração dos provetes de cola com três dias de cura.....	54
Tabela 16: Resultados do ensaio de tração dos provetes de cola com sete dias de cura	55
Tabela 17: Resultados do ensaio de tração dos provetes de cola com quinze dias de cura	56
Tabela 18: Resultados do ensaio de tração dos provetes de cola com trinta dias de cura.	57
Tabela 19: Resultados do ensaio de tração dos provetes de cola com três meses de cura.....	58
Tabela 20: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição TH=8%.	60
Tabela 21: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição TH saturação	61
Tabela 22: Resultado do ensaio de tração dos provetes de gelo-degelo.....	62
Tabela 23: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição T= 10/50°C.....	63

Tabela 24: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição T= -15/+60°C.....	64
Tabela 25: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição temperatura -15°C.....	65
Tabela 26: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição temperatura 40°C.....	66
Tabela 27: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição temperatura 60°C.....	67
Tabela 28: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição temperatura 100°C.....	68
Tabela 29: Comprimento de ancoragem 40mm.....	70
Tabela 30: Comprimento de ancoragem 60mm e Teor de Humidade 12% (Referência).....	70
Tabela 31: Comprimento de ancoragem 80mm.....	70
Tabela 32: Comprimento de ancoragem 100mm.....	70
Tabela 33: Teor de Humidade 8%.....	71
Tabela 34: Teor de Humidade Saturado.....	71
Tabela 35: Ciclo de Temperaturas -15/+60°C.....	71
Tabela 36: Ciclo de Temperaturas +10/+50°C.....	71
Tabela 37: Ciclo de Gelo-Degelo.....	72
Tabela 38: Temperatura -15°C.....	72
Tabela 39: Temperatura 40°C.....	72
Tabela 40: Temperatura 60°C.....	72
Tabela 41: Temperatura 100°C.....	73
Tabela 42: Resultados do ensaio de <i>pull-out</i> dos provetes com 40mm de ancoragem.....	75
Tabela 43: Resultados do ensaio de <i>pull-out</i> dos provetes com 60mm de ancoragem.....	76
Tabela 44: Resultados do ensaio de <i>pull-out</i> dos provetes com 80mm de ancoragem.....	77
Tabela 45: Resultados do ensaio de <i>pull-out</i> dos provetes com 100mm de ancoragem.....	78
Tabela 46: Resultado do ensaio de <i>pull-out</i> aos provetes da condição TH=8%.	79
Tabela 47: Resultado do ensaio de <i>pull-out</i> aos provetes da condição TH saturado.....	80

Tabela 48: Resultado do ensaio de <i>pull-out</i> aos provetes de gelo-degelo.	81
Tabela 49: Resultado do ensaio de <i>pull-out</i> aos provetes da condição T= 10/50°C.	82
Tabela 50: Resultado do ensaio de <i>pull-out</i> aos provetes da condição T= -15/+60°C.	82
Tabela 51: Resultado do ensaio de <i>pull-out</i> aos provetes da condição temperatura -15°C.	83
Tabela 52: Resultado do ensaio de <i>pull-out</i> aos provetes da condição temperatura 40°C.	84
Tabela 53: Resultado do ensaio de <i>pull-out</i> aos provetes da condição temperatura 60°C.	85
Tabela 54: Resultado do ensaio de <i>pull-out</i> aos provetes da condição temperatura 100°C.	86
Tabela 55: Teor de Humidade 8%	88
Tabela 56: Teor de Humidade 12% (Referência)	88
Tabela 57: Teor de Humidade Saturado	88
Tabela 58: Ciclo de Temperaturas -15/+60°C	89
Tabela 59: Ciclo de Temperaturas +10/+50°C	89
Tabela 60: Ciclo de Gelo-Degelo	89
Tabela 61: Temperatura -15°C.	90
Tabela 62: Temperatura 40°C.	90
Tabela 63: Temperatura 60°C.	90
Tabela 64: Temperatura 100°C.	90
Tabela 65: Resultado do ensaio de corte aos provetes de referência.	92
Tabela 66: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição TH=8%.	93
Tabela 67: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição TH saturado.	94
Tabela 68: Resultado do ensaio de corte aos provetes de gelo-degelo.	95
Tabela 69: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição T= -15/+60°C.	96
Tabela 70: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição T= -15/+60°C.	97
Tabela 71: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição temperatura -15°C.	98

Tabela 72: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição temperatura 40°C.	99
Tabela 73: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição temperatura 60°C.	100
Tabela 74: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição temperatura 100°C.	101
Tabela 75: Teor de Humidade 8%.....	104
Tabela 76: Teor de Humidade 12% (Referência).....	104
Tabela 77: Teor de Humidade Saturado.....	104
Tabela 78: Ciclo de Temperaturas -15/+60°C.....	104
Tabela 79: Ciclo de Temperaturas +10/+50°C.....	104
Tabela 80: Ciclo de Gelo-Degelo.....	105
Tabela 81: Temperatura -15°C.....	105
Tabela 82: Temperatura 40°C.....	105
Tabela 83: Temperatura 60°C.....	105
Tabela 84: Temperatura 100°C.....	105
Tabela 85: Resultado do ensaio de <i>pull-off</i> aos provetes de referência.....	107
Tabela 86: Resultado do ensaio de <i>pull-off</i> aos provetes da condição TH=8%.	108
Tabela 87: Resultado do ensaio de <i>pull-off</i> aos provetes da condição TH saturado	109
Tabela 88: Resultado do ensaio de <i>pull-off</i> aos provetes de gelo-degelo.....	110
Tabela 89: Resultado do ensaio de <i>pull-off</i> aos provetes da condição T= 10/50°C.....	111
Tabela 90: Resultado do ensaio de <i>pull-off</i> aos provetes da condição T= -15/+60°C.....	112
Tabela 91: Resultado do ensaio de <i>pull-off</i> aos provetes da condição temperatura -15°C.....	113
Tabela 92: Resultado do ensaio de <i>pull-off</i> aos provetes da condição temperatura 40°C	113
Tabela 93: Resultado do ensaio de <i>pull-off</i> aos provetes da condição temperatura 60°C	114
Tabela 94: Resultado do ensaio de <i>pull-off</i> aos provetes da condição temperatura 100°C	115

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos utilizado pelo Homem. No entanto, nos finais do século XVIII, começaram a alterar-se as exigências das construções, a par da utilização cada vez maior de outros materiais, como o vidro, o aço e o betão armado. A combinação destes resultou numa panóplia alargada de soluções, que tinham o aspecto económico como factor mais importante a ter em conta, em detrimento do aspecto ambiental.

Contudo, tem-se assistido nos últimos tempos a uma crescente consciencialização ambiental no sector da construção, quer por parte dos consumidores, como dos projectistas, o que tem conduzido a alguma contenção na utilização dos materiais transformados e o retorno aos materiais naturais, como a madeira [1].

Em Portugal, verificou-se um significativo aumento da utilização deste material a partir dos finais da década de 90, tanto em novas construções, como em reabilitação. A aplicação de madeira na construção permite desenvolver soluções construtivas bastante sustentáveis e deixando, ao mesmo tempo, uma reduzida pegada de carbono [2].

Neste sentido, as ligações entre peças de madeira utilizadas na construção têm assumido também grande relevância, com a busca de melhores soluções para as ligações, mais eficientes, económicas e duradouras, com vantagens comprovadas em termos de produção, desempenho, estética e custo. As colagens estruturais, com a utilização de materiais epoxídicos são, assim, um importante desenvolvimento nas construções de madeira, e o objecto de estudo do presente trabalho.

A tecnologia de colagens estruturais e a engenharia de ligações em madeira sofreram um importante crescimento nos últimos anos. Ligações com varões embutidos na madeira são usadas muitas vezes em reabilitação (reparo ou reforço) de edifícios históricos, ou que utilizam madeiras antigas. Este processo apareceu pela primeira vez em monumentos históricos franceses, em 1979 [3].

Desde há cerca de vinte anos, a utilização de epóxy para reparação e melhoramento de estruturas tem-se intensificado, apesar de já ser um material explorado com sucesso há mais de cinquenta anos na aviação e indústria de transportes em geral, na ligação de vários tipos de materiais, como madeira, alumínio, aço, vidro e CFRPs (*carbon fiber reinforced plastic*) [4].

As ligações de madeira com varões colados com resinas epoxídicas consistem num grande avanço no projeto de construções em madeira, que podem ser expandidas para além dos tipos mais comuns de ligação atualmente utilizados, como é o caso das ligações metálicas. Conseguir alcançar um melhoramento nas ligações é um dos desafios da engenharia, no que respeita a madeiras, e traduz-se num grande potencial a nível da construção de edifícios novos e também nos projetos de renovação de edifícios antigos.

1.1. Motivação e pertinência do tema

A ligação entre o reforço de uma estrutura e o seu substrato é geralmente feita com recurso a um material epoxídico. Nesse sentido, o estudo da durabilidade da ligação entre os materiais utilizados é de grande importância, sendo o conceito de durabilidade definido como a capacidade de resistir às condições de serviço, durante um determinado período de tempo, designado por vida útil.

Alguns aspectos podem comprometer a durabilidade das colagens estruturais e reduzir as suas propriedades mecânicas, tais como as variações de temperatura, humidade, radiação UV, exposição às condições atmosféricas, ataque químico e biológico e cargas de diversos tipos, entre outros [5]. Como tal, será objecto do presente trabalho o estudo do efeito da humidade e da temperatura na capacidade resistente de provetes de madeira colados com resina epóxy.

Para além destes factores, a resistência de um adesivo também pode ser comprometida quer por exposições de curto ou longo prazo a ambientes agressivos. Nesse sentido, tentou-se simular experimentalmente o envelhecimento dos elementos de construção, submetendo-os a diversos ciclos de temperaturas e humidades, de modo a tentar acelerar a sua eventual degradação.

Apesar dos amplos estudos já realizados neste campo, alguns factores ainda podem ser aprofundados, tal como o efeito de temperaturas negativas na durabilidade das ligações coladas, e também o efeito de fenómenos de gelo-degelo nas mesmas. Estabelecer-se-á, assim, uma comparação entre todos os tipos de ensaios efectuados, de forma a avaliar eventuais riscos *in situ* na utilização de epóxy em elementos de madeira.

Este tipo de ligações é atualmente utilizado em vários países da Europa, mas os requisitos de desempenho e as normas de projeto variam muito de país para país, o que se torna um grande entrave à utilização generalizada deste tipo de técnica [6].

De acordo com Bainbridge *et al.*[6], o conhecimento da durabilidade das colagens estruturais é ainda insuficiente para que se produza uma norma comumente aceite em toda a Europa,

pelo que o presente trabalho tem por objectivo contribuir para o aprofundar de conhecimentos nesse campo.

1.2. Metodologia e objetivos

Apesar de ser relativamente fácil obter uma grande resistência inicial numa ligação colada, a durabilidade da mesma é difícil de prever e pode ser mais difícil de manter. A capacidade de uma junta de ligação manter um desempenho satisfatório a longo-termo, muitas vezes em ambientes severos, é portanto um requisito das colagens estruturais, uma vez que estas devem ser capazes de suportar cargas de projeto, sob determinadas das condições de serviço, e durante o tempo de vida-útil determinado pra a estrutura [7].

O objetivo do presente trabalho é, portanto, a determinação dos efeitos que podem influenciar a durabilidade das colagens estruturais em madeira, aprofundando o conhecimento de alguns efeitos já conhecidos, como os associados a altas temperaturas e à saturação da madeira, e testando o efeito de outros, como a presença de gelo ou temperaturas negativas na resistência das juntas de ligação.

Para isso, os principais agentes a estudar são o teor de humidade nos provetes de madeira ensaiados, as variações de temperatura nos mesmos, a exposição a ciclos de gelo-degelo e ciclos de temperatura variáveis, estabelecendo-se, assim, uma relação destes fatores com a resistência das colagens em diversos tipos de ensaios.

Os ensaios a realizar serão, essencialmente, de corte em provetes de madeira colados; de tração em provetes normalizados de cola; ensaios *pull-out* de arrancamento de varões de aço ancorados em peças de madeira; e ensaios *pull-off* de tração em discos de cola em provetes de madeira.

Pretende-se que os resultados obtidos ajudem na compreensão dos complexos processos de degradação das colas estruturais utilizadas na ligação de elementos de madeira. Apesar de a bibliografia encontrada assegurar que as resinas epoxídicas têm um bom comportamento a

curto prazo, a sua durabilidade a longo prazo deve ser um fenómeno bem estudado, através da simulação acelerado do envelhecimento de provetes em laboratório. Assim, ao fazer-se variar os teores de humidade relativa, temperatura e carga aplicada, bem como empreendendo os diferentes tipos de ensaios acima referidos, pretende-se compreender melhor o processo de degradação das ligações.

Outro dos objetivos é perceber se a resina epoxídica em estudo é mais suscetível a temperaturas elevadas ou negativas, e até que ponto a humidade na madeira poderá afetar o desempenho da colagem.

Os resultados devem ser comparados com a bibliografia encontrada, de forma a estabelecer um paralelo, e verificando se os valores obtidos se encontram dentro da mesma gama apontada por outros investigadores.

1.3. Organização

De forma a facilitar o estudo e compreensão dos conceitos abordados neste trabalho, optou-se por subdividi-lo em diferentes capítulos.

O primeiro capítulo introduz o tema de estudo, incluindo uma nota histórica, a motivação que levou à escolha deste tema e a sua pertinência no panorama académico actual, a metodologia a ser implementada e também os objetivos que se espera alcançar com este trabalho. É ainda explicitada a divisão e organização do mesmo.

O Capítulo 2 constitui uma síntese do estado do conhecimento actual sobre o assunto em causa. Define os conceitos, e expõe os conhecimentos que a comunidade científica já dispõe sobre as resinas epoxídicas, a madeira, vantagens e limitações das colagens estruturais e os factores que condicionam as ligações coladas.

O terceiro capítulo trata dos materiais e procedimentos de ensaio. Encontra-se dividido em três subcapítulos principais: “Materiais”, que apresenta os materiais utilizados durante a campanha experimental e as suas características mais relevantes; “Procedimentos de Ensaio”,

onde se explica como foram preparados os provetes, as suas características e propriedades, e todo o processo experimental, para cada tipo de ensaio realizado (Tração, *Pull-out*, Corte e *Pull-off*); e “Condições de Exposição”, que expõe a forma como se pretendeu degradar os provetes às diversas condições de ensaio objecto deste estudo. Apresentam-se neste terceiro capítulo os modos de rotura dos provetes para cada tipo de campanha realizada, com recurso a fotos, tabelas e gráficos relativos aos ensaios.

O quarto capítulo trata da apresentação e discussão dos resultados obtidos nos ensaios anteriormente descritos. Nele, analisar-se-ão os valores das resistências, com base nas condições de exposição a que os provetes foram sujeitos, traçar-se-ão gráficos e tabelas que resumam e clarifiquem os resultados, ao mesmo tempo que se apresentará uma explicação, baseada no conhecimento previamente adquirido, para os valores encontrados.

O capítulo “Conclusões” engloba tudo aquilo que de mais importante resultou da campanha experimental realizada e sintetiza as principais observações efectuadas ao longo desta Dissertação, inclui um resumo geral do trabalho realizado, e também um comentário ao mesmo, apontando os principais aspectos positivos e os que poderiam ser melhorados. Nesta secção irá tentar-se responder aos objectivos propostos *a priori*, apontando-se ainda novas vias de investigação seguintes e sugestões de trabalhos futuros.

O último capítulo diz respeito à bibliografia consultada e na qual assentam os fundamentos deste estudo.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Resinas Epoxídicas

A palavra epóxy vem do grego "EP"(sobre ou entre) e do inglês "OXI"(oxigênio), ou em sentido literal, o termo significa oxigênio entre carbonos.

Uma resina epoxídica é um polímero que endurece quando sofre um processo de cura e quando é misturado com um agente catalisador ou endurecedor. Por ser um material muito versátil, pode ter diversas aplicações, como na indústria química, elétrica e tecnológica, na construção civil, na aeronáutica e indústria dos transportes, e até na medicina [8].

2.1.1. Caracterização das colas

Os requisitos exigidos a qualquer tipo de cola estrutural são promover uma boa adesão à madeira, atingir uma boa resistência ao corte, de forma a manter a sua integridade através da camada de adesivo, e promover um meio de ancoragem no caso de utilização de varões nas ligações, através de uma combinação entre adesão e encravamento.

Na utilização de adesivos, a opção preferível é o sistema de resinas epoxídicas curadas à temperatura ambiente. Estas têm sido usadas na reparação e melhoramento de madeiras estruturais, bem como na indústria aeronáutica e de transportes gerais por mais de 50 anos, colando variados materiais para além da madeira, como por exemplo, alumínio, aço, vidro e CFRP's (*carbon fibre reinforcement plastic*). Pode afirmar-se, portanto, que as resinas epóxy têm bom comportamento, quer mecânico, quer em termos de durabilidade [4].

A família das colas epóxy inclui uma grande variedade de produtos com diferentes propriedades e formulações mais adequadas a cada tipo de utilização. Não requerem grandes níveis de pressão durante a aplicação e cura e são razoavelmente tolerantes no que diz respeito a variações de espessura da junta estrutural. Por outro lado também exibem uma grande

aderência a uma variada gama de materiais, com pouca ou nenhuma retração durante o processo de cura, estabilidade dimensional depois do endurecimento, excelente resistência mecânica e a produtos químicos e água. Os adesivos epóxy estão disponíveis numa grande variedade de formulações e, correspondentemente, apresentam diferentes propriedades em termos de adesão à madeira, viscosidade, tempo de reação e cura, resistência a cargas e tensões atuantes [4].

Contrariamente a outros tipos de adesivos genéricos tradicionais, as famílias de resinas epoxídicas podem ser produzidas para curarem sob uma grande gama de condições ambientais, o que se traduz num importante requisito para aplicações *in-situ*. Devido à sua capacidade para aderir eficazmente a outros materiais para além da madeira, o epóxy pode ser usado conjuntamente em placas ou varões de aço, FRP's, e outros materiais compósitos usados na consolidação e reforço de madeiras estruturais [4].

2.1.2. Tipos de resinas epóxy

As resinas epoxídicas podem ser de diversos tipos [9], tais como:

Resinas Líquidas ou Multifuncionais: As resinas líquidas têm pesos moleculares baixos e são muito viscosas. As resinas multifuncionais são líquidas ou sólidas, contendo mais que duas funcionalidades epóxy na mesma molécula. Alguns usos comuns para resinas epóxy líquidas incluem aplicações para revestimento, compostos de fibra reforçada, soalhos, pavimentos, adesivos, moldes, tintas e diluentes. Epóxy multifuncionais oferecem o desempenho a altas temperaturas, necessário para aplicações com compostos reforçados.

Resinas Sólidas: As resinas sólidas têm um peso molecular mais alto. Geralmente apresentam ligações cruzadas entre os grupos hidroxila e epóxy. Alguns usos comuns incluem revestimentos em pó, compostos de moldagem para fins gerais, adesivos, compostos, aplicações eletrónicas.

Resinas Líquidas Modificadas e Diluentes Reativos: Essas podem ser resinas líquidas ou sólidas que são modificadas pela adição de solventes ou diluentes reativos. Tanto produtos

químicos, como água podem ser usados como solventes. Quando é usada água, as resinas são chamadas de “resinas à base de água”. Em ambos os casos, o solvente tipicamente evapora para fora do sistema durante o processo de cura. Os diluentes reativos são produtos químicos que diminuem a viscosidade da resina epóxy, mas não evaporam para fora do sistema durante o processo de cura; em vez disso tornam-se quimicamente ligados no sistema de cura [9].

2.2. Madeiras

A madeira é outro dos materiais utilizados neste trabalho, pelo que importa referenciar algumas das suas características gerais, conhecer o tipo de madeira utilizada e também as características físico-mecânicas da mesma.

2.2.1. Características gerais

A madeira tem sido explorada durante séculos como material estrutural devido à sua combinação de propriedades físicas, disponibilidade, trabalhabilidade, e relativamente baixo custo. Mais recentemente, as preocupações ambientais têm também contribuído para um interesse global mais intensificado no uso de madeira como um material sustentável [4].

A madeira é higroscópica, ou seja, absorve e expõe humidade (vapor de água), e quando este fenómeno ocorre de forma muito rápida, dá-se a formação de fendas e deformações [2]. Para este fenómeno contribui a temperatura ambiente e a percentagem de água nela existente. Assim, quando é aplicada na construção, é necessário: deixar um espaço "entre madeiras" para que ela possa inchar sem prejuízo da obra; quando em contacto com outros materiais que contenham água, deve ser objeto de um tratamento apropriado nas zonas de contacto, pois a madeira irá naturalmente absorvê-la. Hoje em dia, e principalmente devido à falta de qualidade do material e à escassez de mão-de-obra especializada, torna-se necessário recorrer a estudos de carácter científico que façam com que deste material na construção se processe

nas melhores condições. Para tal contribuem os processos de homologação do L.N.E.C., que informam sobre a sua conservação, manutenção e durabilidade [2].

2.2.2. Caracterização da madeira utilizada

O tipo de madeira sobre o qual recaiu este estudo é o abeto, classificada como um madeira resinosa, e representativa do tipo de madeira comumente utilizada em Portugal. As árvores que fornecem as madeiras resinosas são da família das coníferas, a resina é a seiva destas árvores. Também muito empregues na construção, entre as mais importantes contam-se o pinheiro bravo o pinheiro manso, o abeto, o cedro e o cipreste. Dado que todas estas pertencem à mesma família genética (*Pinaceae*), algumas das características da madeira de pinho podem servir de paralelo com a madeira de abeto.

2.2.3. Características Físico-Mecânicas da madeira

Seguidamente apresentam-se as principais características físico-mecânicas da madeira, a saber:

Massa Volúmica: a massa volúmica da madeira é uma das características que mais está relacionada com a sua qualidade, e é utilizada como indicador de muitas outras propriedades, tal como a secagem, a resistência mecânica, a durabilidade e a permeabilidade. Define-se a massa volúmica como a massa de matéria lenhosa por unidade de volume, e calcula-se através de uma relação entre o peso e o volume. Esta característica pode apresentar uma grande variabilidade, pois depende da espécie de árvore, da humidade, das condições ambientais e até da posição da árvore onde a madeira é formada [1]. Segundo Lousada, J. *et al.* [10], a massa volúmica básica média da madeira é da ordem dos $0,4 \text{ g/cm}^3$.

Higroscopicidade: sendo a madeira um material higroscópico, possui a capacidade de trocar humidade com o meio exterior até atingir o equilíbrio. Esta propriedade confere-lhe características de retractilidade e inchamento, isto é, abaixo de determinado teor de humidade, a madeira pode apresentar variações de dimensão. Sabe-se ainda que a resistência da madeira é afectada pela humidade, na proporção de quanto maior a humidade, menor a resistência [1].

Anisotropia: a madeira é um material anisotrópico, uma vez que as suas propriedades se manifestam de forma desigual nas diferentes direcções de crescimento da árvore. Define-se, assim, coeficiente de anisotropia como a relação entre a retração tangencial e radial, e é um parâmetro indicador do nível de instabilidade da madeira. Se se estabelecer um paralelo entre a madeira em estudo e os dados obtidos relativos à madeira de pinho, pode afirmar-se que esta possui valores médios ou baixos em termos de anisotropia [1].

Propriedades mecânicas: Dadas as propriedades heterogéneas e anisotrópicas de um material como a madeira, deve ter-se em conta que o seu comportamento mecânico pode variar consoante o plano de aplicação do esforço. A resistência mecânica define-se como a capacidade de sustentação de cargas ou forças externas que conduzem a tensões internas, e que por sua vez conduzem à deformação do próprio corpo [1]. O arranjo longitudinal das fibras da madeira, assim como a proporção entre os espaços vazios e as paredes celulares são as características que conferem elasticidade à madeira, e consequentemente, resistência mecânica.

Dureza: esta característica corresponde à capacidade de resistência à entrada de corpos estranhos na madeira, sendo que o que mais influencia a dureza é a massa volúmica [1].

Reacção ao fogo: a reacção ao fogo corresponde ao tempo que a estrutura resiste ao colapso, quando sofre a actuação do fogo plenamente desenvolvido. A madeira tem baixa condutibilidade térmica, e apresenta uma camada carbonizada isolante, pelo que, mesmo em temperaturas da ordem dos 1000°C, não perde as suas capacidades de resistência mecânica, ao contrário do aço, cujas propriedades sofrem uma grande alteração a partir dos 300°C [1].

2.3. Vantagens e limitações das colagens estruturais

O uso generalizado de colagens estruturais em madeira pode atribuir-se ao facto de estas apresentarem muitas vantagens, tais como o facto de o adesivo poder redistribuir as cargas aplicadas por toda a área solicitada, apresentando uma distribuição de tensões mais uniforme. Isto traz como benefício menores concentrações de tensões e menores danos localizados, bem como o pouco peso acrescentado à estrutura, e a grande resistência à fadiga, comparativamente com outros métodos de ligação.

Por outro lado, este tipo de colagem pode ligar materiais de diferentes naturezas, e também reduzir os custos de montagem [11].

As ligações entre peças de madeira utilizando varões de aço ocultos na madeira ou FRP (*fibre reinforcement plastic*) consistem numa maior eficiência no que respeita aos métodos de ligação, já que permitem transmitir mais esforços (Figura 1).

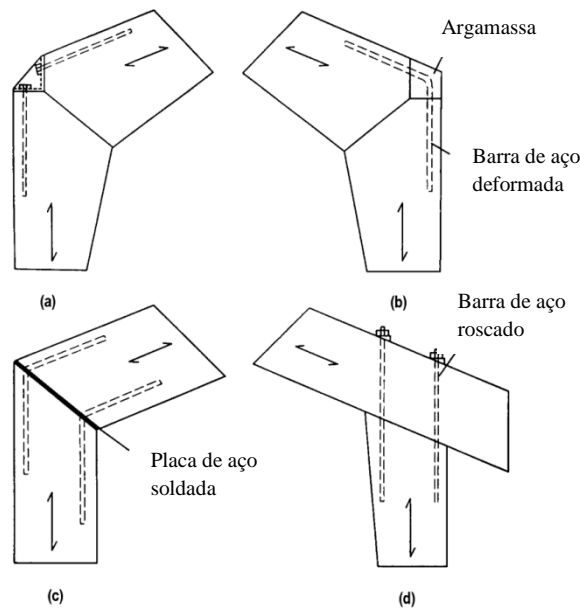


Figura 1: Exemplos detalhados de juntas de ligação coladas [4].

Quando se utilizam ligações por varões, as ligações rígidas exigidas nos nós das estruturas podem ser formadas tanto:

- a) por meio de ligações em barras com uma porção exposta de rosca, que pode então ser ligado a um encaixe de aço (Figura 1 (a) e d));
- b) por meio de um varão contínuo ligado a cada membro e envolto em argamassa sobre o seu comprimento exposto (Figura 1 (b));
- c) usando varões para fixar as placas de aço que podem então ser soldadas (Figura 1 (c)).

Assim sendo, as vantagens incluem uma grande eficiência de ligação, em termos de capacidade de carga e tensão, redução do peso, alternativamente aos métodos tradicionais utilizados. Por outro lado, há ainda a questão estética, onde este tipo de ligações é uma grande aposta, em contraponto com as técnicas usuais, uma vez que a utilização de varões de aço envolvidos por epóxy não é visível nas ligações de madeira [4].

Apesar de existirem vários manuais de aplicação definidos pelos fabricantes, que permitem evitar muitas anomalias nas ligações metálicas de peças de madeira, verifica-se muitas vezes a abertura de fendas devido ao incumprimento das distâncias mínimas entre bordos, à escorrência de produtos da oxidação, derivada da insuficiente protecção dos ligadores mecânicos ou insuficiente capacidade resistente das ligações metálicas às cargas atuantes. [2] Nesse sentido, e com provas dadas da sua resistência mecânica a esforços de elevada escala, as resinas epoxídicas apresentam-se como uma excelente alternativa, ou até método complementar de ligação entre peças de madeira.

No entanto, nem tudo são vantagens, pois as colas estruturais apresentam um comportamento perecível às variações de temperatura e ao teor de humidade, em serviço. [12] As ligações em epóxy sofrem sobretudo com a variação da humidade em dois momentos fulcrais da vida da estrutura, que são durante a colagem, e durante a secagem, o que pode causar enrugamento e redução da secção de cola, bem como efeitos distorcionais. Por este motivo, o grande potencial de utilização das colagens com resinas epoxídicas não está ainda bem definido, e deve ser alvo de maior estudo [4].

Outro dos aspetos a que se deve ter atenção é o cuidado com a preparação das superfícies de contato entre os materiais aderentes, de modo a não se formarem tensões tangenciais de corte.

Há ainda a referir a dificuldade de desmontagem das peças para inspeção e operações de reparação [11].

2.4. Factores que condicionam a ligação cola-madeira

Da revisão bibliográfica realizada para este trabalho, nomeadamente o Eurocódigo 5 [13] pode afirmar-se que há vários efeitos que influenciam a durabilidade e vida útil das colagens estruturais em madeira, nomeadamente: as diferentes propriedades dos materiais, o comportamento dos materiais ao longo do tempo (fadiga, duração da carga), a situação de projeto (necessidade de adaptação do projeto, fase do mesmo), e condições climáticas, neste caso a variação de humidade e temperatura. É sobre estes dois últimos fatores que recai o âmbito do presente trabalho.

Sendo o objectivo deste trabalho estudar a durabilidade das colagens através de ensaios laboratoriais com carregamentos vários, importa compreender melhor de que forma esses dois agentes influenciam as ligações coladas.

Para um correcto dimensionamento das estruturas de madeira com recurso a ligações coladas, deve ter-se em atenção as normas de dimensionamento de madeiras, neste caso o Eurocódigo 5 [13]. Este determina as classes de serviço 1 e 2 como sendo aceitável o uso de colagens com resinas epóxy, mas adverte quanto à utilização em classe de serviço 3, devido às condições de exposição extremas. [12]

2.4.1. Influência da Temperatura

A temperatura de transição vítrea (T_g) define-se como a temperatura, acima da qual, os polímeros sofrem alterações de consistência, passando de materiais relativamente duros e elásticos para materiais viscosos, com consistência de borracha. Para além disso, a resistência à temperatura de transição vítrea diminui, quando a resina é exposta a elevados teores de humidade [5]. Este conceito é de suma importância, uma vez que constitui um dos principais agentes comprometedores da durabilidade das colagens em madeira.

No entanto, os autores não são unânimes relativamente à temperatura exata a que ocorre o amolecimento da resina epoxídica. Segundo Richter e Steiger [14], temperaturas superiores a 70°C reduzem a tensão ao corte, tanto em cargas de curta como de longa duração. Já Lartigau *et al.* [15] aponta uma temperatura de 58°C para a transição vítrea, com um acentuado decréscimo das propriedades dos provetes a partir dos 60°C, bem como uma redução de 45% no módulo de elasticidade e de 6% na rigidez.

Outro conjunto de estudos aponta ainda o ponto de transição vítrea correspondente à temperatura de 50°C [3], [11], [16], [17], ao passo que Michels *et al.* [18] afirmam que a expressão “temperatura de transição vítrea” pode ser enganadora, já que não se refere a um ponto em específico, a partir do qual se alteram as propriedades dos materiais poliméricos de sólidos para viscoso, mas sim, uma gama de temperaturas que pode variar 10 a 20°C em torno do valor indicado para a T_g . O mesmo autor aponta ainda uma gama de temperaturas entre os 70 e os 100°C, a partir das quais se verifica uma redução das propriedades do epóxy, referindo também que a pós-cura das resinas permite uma segurança estrutural adicional, em comparação com a cura simples a baixas temperaturas.

Por outro lado, já Aicher e Dill-Langer [17] afirmam que a aplicação de uma elevada temperatura (abaixo da T_g), sem aplicação de grandes cargas leva a um fenómeno de pós-cura da cola, o que conduz a um aumento da capacidade de carga a curto prazo.

2.4.2. Influência do Teor de Humidade

Muitas das anomalias ocorridas em construções de madeira têm que ver com a alteração significativa do ambiente de exposição da estrutura, sobretudo, a exposição a teores de humidade, que levam à ocorrência de fendas, degradação biológica e até delaminações de compósitos, quando estes são utilizados. Assim, o facto de a madeira ser um material de comportamento higroscópico, conduz a um impacto nas propriedades mecânicas, geométricas e de durabilidade. Deve acautelar-se, portanto, o estado de conservação, os riscos de degradação biológica e a exposição aos elementos a que a madeira fica sujeita durante a sua vida útil [2].

É amplamente sabido que a massa volúmica da madeira afecta a sua capacidade resistente [12], no entanto o seu efeito nos ensaios de arrancamento tipo *pull-out* já é mais controverso. Ainda assim, segundo alguns autores [19], há uma inegável relação entre o teor de humidade e a carga de rotura em provetes, na medida em que o aumento da humidade pode diminuir até 50% a carga de rotura em ensaios de arrancamento *pull-out*.

2.4.3. Outros factores

Para além de a humidade poder ser um efeito determinante na durabilidade das colagens estruturais, sobretudo quando utilizadas em ambientes exteriores, há que ter ainda atenção que, no caso dos ambientes interiores, podem existir outro tipo de contaminantes, como o cloro ou compostos ácidos, que podem afectar a ligação. Nesse caso, deve ser considerada a aplicação de uma boa resistência química à estrutura [12], [20].

O tipo de ensaio que é levado a cabo quando se testam os factores condicionantes da durabilidade das colas é também um factor condicionante, em si próprio. Segundo Pizzo *et al.* [21], que investigaram o efeito de diferentes expansões térmicas na madeira e epóxy e aço, as

diferentes tensões derivadas da temperatura que se instalam nas interfaces cola-madeira e interfaces cola-aço, induzem uma tensão de corte na cola.

Outro aspecto que tem influência na capacidade de carga das juntas de ligação coladas é o tempo de cura da resina. Broughton [4] demonstrou que uma cura de 21 dias corresponde a um aumento de 25% da capacidade resistente, relativamente a provetes com 7 dias de cura. Isto deve-se ao rearranjo das ligações entre a madeira e o epóxy, em conjunto com um melhoramento das propriedades da madeira, já que há uma perda de humidade na interface adesivo-madeira ao longo do processo de cura.

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.1. Introdução

O presente capítulo trata da descrição dos ensaios efectuados durante a campanha experimental, sendo que, em primeiro lugar se apresentam os materiais utilizados e suas características. De seguida, importa explicitar as condições de exposição a que os provetes foram sujeitos, de forma a tentar produzir-se a degradação dos mesmos.

Por último, e para cada tipo de ensaio realizado (ensaio de tração de provetes de cola, *pull-out*, corte e *pull-off*), demonstra-se como foram preparados os provetes e suas propriedades físicas, e como foram realizados os ensaios experimentais. Apresentam-se ainda os resultados-tipo para cada ensaio, com imagens do modo de rotura e do gráfico resultante do ensaio.

3.2. Materiais

Os provetes a ensaiar são constituídos por madeira de abeto, em representação das madeiras mais comumente utilizadas em Portugal. Segundo a Norma EN 338 [22], o abeto pertence à classe C24, possui uma resistência à compressão paralela de 16 MPa, tem um módulo de elasticidade à flexão de 4700 MPa, tensão de rotura à flexão de 14 MPa e uma resistência ao corte paralelo de 1.7 MPa.

A resina epóxy utilizada nesta campanha experimental é da marca *Mapei*, e da gama *Mapewood Gel 120*. Segundo o catálogo do fabricante [23], “*Mapewood Gel 120* é um adesivo epóxy sem solventes, com consistência de gelatina, constituída por duas partes, e que devem ser misturadas antes da sua utilização (Parte A equivale à resina e Parte B corresponde a um endurecedor)”, na proporção de quatro para um, respectivamente. No mesmo catálogo é ainda referido que a aplicação da resina deve acontecer a uma temperatura entre os 10°C e os 30°C, e que a sua cura completa acontece aos sete dias.

Outro dos materiais utilizados foi o aço, em varões roscados de classe 8.8 e diâmetro de 10mm. Recorreu-se a este material apenas para os ensaios de arrancamento por *pull-out*, como se explicará adiante.

3.3. Condições de Exposição

A primeira campanha de ensaios consistiu no estudo da evolução da resistência dos provetes normalizados de cola, variando o tempo de cura dos mesmos. Para isso, realizaram-se apenas ensaios de tração aos provetes com idades de três, sete, quinze e trinta dias, e ainda após três meses. Os provetes utilizados nesta campanha foram mantidos à temperatura ambiente do laboratório, enquanto sofriam o processo de cura, a uma temperatura de cerca de 14°C e aproximadamente 40% de humidade relativa do ar, até ao dia do ensaio.

Quanto à segunda campanha, que visou perceber qual o comprimento de amarração mais vantajoso para os provetes sujeitos a ensaio de *pull-out*, não era relevante o estudo da degradação por humidade e temperatura, pelo que os provetes permaneceram numa câmara climática com temperatura e humidade controladas, o que conduziu a um teor de humidade aproximado na madeira de 12%, o valor tomado como referência.

Na terceira campanha realizaram-se os ensaios de temperatura e humidade de referência, na qual os provetes são mantidos com um teor de humidade de 12%, permanecendo na câmara climática, a uma temperatura de 20°C e humidade relativa de 60%, até à altura do ensaio.

A quarta campanha diz respeito aos ciclos de temperatura e humidade. Na condição “Temperatura +10/+50°C”, os provetes foram submetidos a uma variação cíclica de temperatura entre os dez e os cinquenta graus, com uma humidade relativa do ar mantida constante, a 90%, durante oito meses. O objectivo foi simular o envelhecimento natural das colagens estruturais ao longo do tempo, e quando sujeitas a um teor de humidade relativa elevado. A exposição destes provetes às condições de temperatura e humidade referidas foi realizada numa câmara climática, no Instituto Politécnico de Bragança.

Do mesmo modo, na condição “Temperatura -15/+60°C”, os provetes foram submetidos a quatro meses de variações cíclicas de temperatura entre os quinze e os sessenta graus, a uma humidade também variável, numa câmara climática programada para esse efeito, de forma a poder-se analisar a durabilidade das ligações coladas quando expostas a variações extremas.

A última condição desta campanha de ciclos foi a exposição ao efeito de gelo-degelo. Simulou-se este efeito de gelo-degelo, através de ciclos de imersão dos provetes em água, seguida do abaixamento da temperatura a valores negativos (com o congelamento da água presente nos provetes), e depois uma nova molhagem em água à temperatura ambiente, permitindo o degelo dos provetes. Este processo repetiu-se durante dois meses, em câmara programada para o efeito.

É de referir que no final de cada um destes processos de exposição, os provetes foram retirados das respectivas câmaras e colocados durante pelo menos um mês na câmara de humidade e temperaturas controladas (20°C, 60% Humidade Relativa). Pretendeu-se com isto que o teor de humidade dos provetes estabilizasse em valores próximo dos 12%, procurando-se, deste modo, uma maior fiabilidade dos resultados.

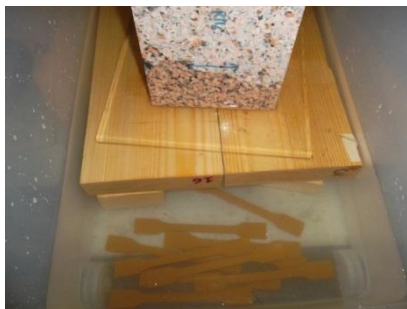
Na quinta campanha de ensaios, estudou-se o efeito do teor de humidade nos provetes, submetendo-os, então, a vários teores: 8%, 12% (ensaio de referência, já anteriormente referido) e >30% (saturação das fibras), mantendo-se a temperatura constante e igual à temperatura ambiente (aproximadamente 12°C). Para se atingir uma humidade na madeira de 8% bastou deixar os provetes em local fresco e arejado, sem grandes variações da temperatura ambiente durante cerca de um mês. Já para se garantir um teor de humidade de 12%, e tal como referido anteriormente, recorreu-se à câmara climatizada, durante um período não inferior a um mês.

Relativamente ao teor de humidade de saturação da madeira, segundo a bibliografia consultada [1], o seu valor situa-se entre os 25 e 35% para madeiras da família da utilizada.

Para definir-se o conceito de ponto saturação da madeira, deve clarificar-se os conceitos de água livre e água de impregnação ou saturação. Designa-se por “água de saturação” aquela que se encontra retida nas próprias paredes das fibras da madeira, ao passo que “água livre” corresponde à água no interior das fibras, e aparece quando as suas paredes já se encontram

saturadas [24]. Deste modo, e segundo Barroso Aguiar, J. L. [24], “o teor de humidade no instante em que se perde toda a água livre e começa a perder-se a água de impregnação, chama-se ponto de saturação”, sendo que para as madeiras portuguesas, esse valor situa-se na ordem dos 30%.

Para se promover a saturação total das fibras da madeira, imergiram-se os provetes em água à temperatura ambiente, contidos em recipientes fechados, durante cerca de um mês (Figura 2 (a) e (b)).



(a)



(b)

Figura 2 (a) e (b): Degradação dos provetes para a condição de humidade de saturação.

Tal como nas campanhas de ciclos mencionadas, depois de se dar cada um dos tipos de exposição aos agentes agressores, os provetes foram colocados na câmara climatizada para estabilização do teor de humidade em 12%. Quanto mais tempo os provetes permaneceram nessa câmara, maior a capacidade do teor de humidade estabilizar no valor de referência de 12%. A exceção deu-se apenas no caso dos provetes saturados (cerca de 30% de teor de humidade), que foram ensaiados logo após saírem dos recipientes de imersão. Isto é, após o período de exposição, não foram submetidos à estabilização do teor de humidade, pois o objectivo seria estudar o comportamento dos materiais saturados, quando solicitados pelos diversos ensaios.

Quanto à sexta, e última campanha, esta visou avaliar a degradação das ligações através de variações de temperatura. Para este caso, submeteram-se os provetes à temperatura de

referência de 20°C (já estudados na terceira campanha), e também a -15°C, 40°C, 60°C e 100°C. Para as temperaturas 40°C, 60°C e 100°C, cada conjunto de provetes permaneceu numa estufa regulada para a temperatura em estudo (Figura 3 (a)) durante pelo menos um ou dois meses (no caso da temperatura negativa). Relativamente à temperatura negativa -15°C, utilizou-se uma arca congeladora (Figura 3 (b)), com temperatura regulada para esse valor, onde se mantiveram os provetes durante cerca de dois meses. Após os períodos de exposição respectivos, os provetes foram mais uma vez transferidos para a estufa de temperatura e humidade controladas, para estabilização do teor de humidade.



(a)



(b)

Figura 3 (a) e(b): Estufa a 40°C e arca congeladora a -15°C para tentar degradar-se os provetes.

3.4. Procedimentos de Ensaio

Seguidamente, irá apresentar-se a metodologia experimental levada a cabo neste trabalho, subdividida pelos tipos de ensaios realizados: ensaios de tração de provetes de cola, ensaios de pull-out, ensaios de corte e ensaios de pull-off.

Para cada um destes, começa-se por descrever o processo de preparação dos provetes, indicando, de seguida, as suas características físicas, e por fim, explica-se como foram realizados os ensaios e apresentam-se os resultados obtidos, com o modo de rotura-tipo e os resultados gráficos dos ensaios.

3.4.1. Ensaio de Tração de Provetes de Epóxy Normalizados

i) Preparação dos Provetes

Para o primeiro tipo de ensaios, os ensaios de tração de provetes de cola, utilizaram-se moldes normalizados para fabricar os provetes. Os parafusos metálicos utilizados para unir os moldes foram cuidadosamente revestidos com vaselina, para que a cola, ao ser vertida nos moldes não alcançasse os parafusos, o que impossibilitaria a sua retirada no final da cura (Figura 4 (a)). Depois de ter os moldes preparados, procedeu-se à preparação da cola.

Esta resulta da mistura de duas partes: a Parte A correspondente à resina e a parte B composta por um endurecedor. Ambas as partes devem ser misturadas na proporção de 4 partes de resina para uma parte de endurecedor, tal como já referido, e por indicação do catálogo do fabricante. A mistura deve ser pesada numa balança de alta sensibilidade, num recipiente tarado, e misturando-se muito bem ambos os compostos para obter uma mistura o mais homogénea possível. (Figura 4 (b), (c), (d)). Em seguida, verteu-se a mistura nos moldes, e, cobrindo-se os mesmos com folha de acetato, passou-se um rolo por toda a área dos moldes,

de forma que o excesso de cola vertida transbordasse, e se garantisse, assim, uma quantidade igual em cada um dos moldes (Figura 4 (e), (f), (g)).

Após este processo, a cola foi deixada a secar em local seco, protegida pelas folhas de acetato, durante os dias de cura pré-determinados.

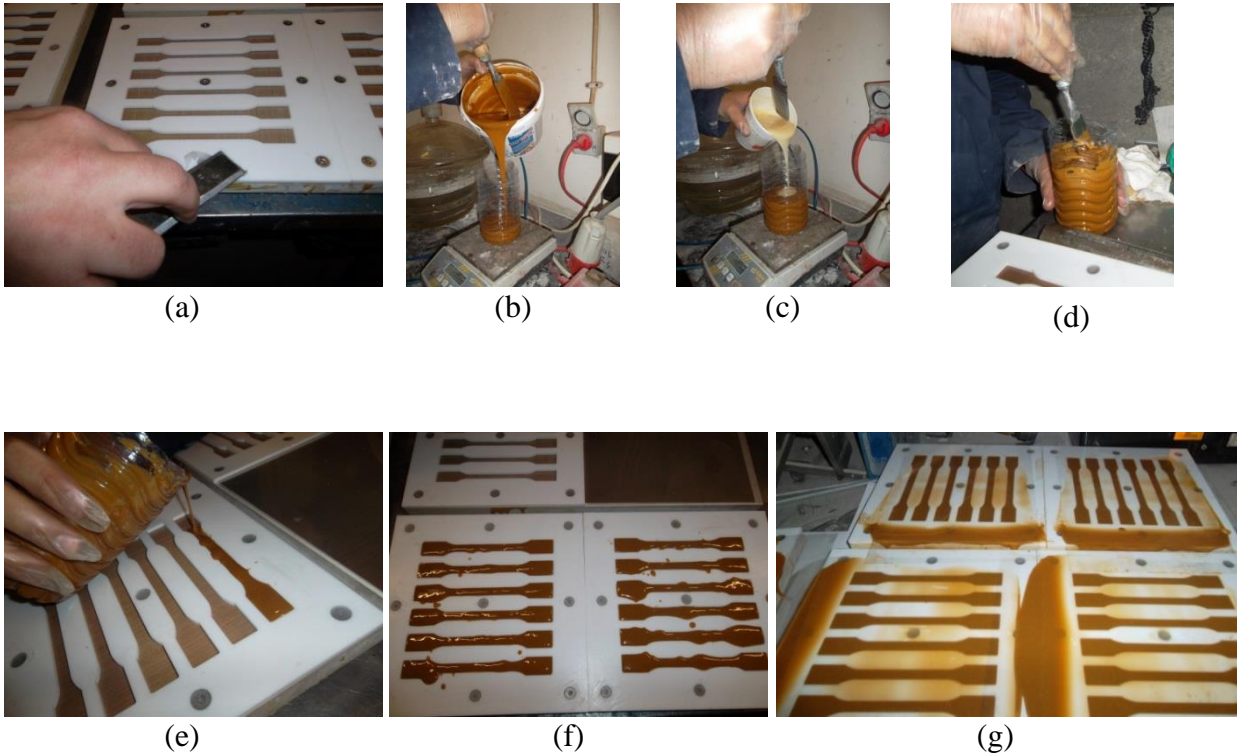


Figura 4 (a) – (g): Preparação dos provetes de cola para ensaio à tração.

ii) Propriedades Físicas dos Provetes

De seguida apresentam-se as tabelas-resumo das propriedades dos provetes por tipo de condição de exposição.

Para os provetes apenas de epóxy, a utilizar no ensaio à tração, as tabelas abaixo apresentam as medidas das secções dos mesmos, em termos de espessura e secção transversal (Tabelas 1 a 14). Para tal, foram traçadas em cada provete três marcas: uma exatamente a meio do mesmo,

uma 25mm acima dessa, e outra 25mm abaixo. Deste modo, dividiu-se a secção central do provete em três partes iguais, denominadas nas tabelas por “Centro”, “Lado A” e “Lado B”, com o objectivo de estudar o padrão de rotura aquando do ensaio à tração.

Para cada uma dessas três marcas em cada provete, foi medida a espessura da secção (aproximadamente 4mm) e a largura da mesma (aproximadamente 10mm).

Os valores incluem os provetes para ensaio do tempo de cura, e para as condições de exposição já descritas, e são apresentadas as tabelas seguidamente. De realçar que os provetes de referência correspondem àqueles com teor de humidade de 12% e idade superior a três meses, pelo que a tabela de resultados nesse caso, coincide.

É importante referir que, no caso dos teores de humidade de 8%, 12% e de saturação, estas designações referem-se aos valores medidos nos provetes de madeira. Embora os teores de humidade nos provetes de epóxy não tenham sido medidos, optou-se por utilizar a mesma designação, por uma questão de similaridade com os restantes tipos de provetes. De facto, quando ocorreu, por exemplo, a imersão dos provetes em água para saturação dos mesmos, foram imersos provetes de epóxy para tração, e também de madeira para ensaios de corte, *pull-out*, e *pull-off*. Apesar de só se poder garantir a saturação dos provetes de madeira, adoptou-se a designação “teor de humidade saturado” para todos esses provetes, incluindo os de epóxy apenas.

Tabela 1: Provetes com três dias de cura

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,32	4,29	4,39	10,10	10,11	10,13	43,82
2	4,33	4,58	4,63	10,31	10,40	10,45	46,88
3	4,22	4,25	4,24	9,98	10,03	10,03	42,42
4	4,46	4,48	4,48	9,70	9,78	9,78	43,63
5	4,44	4,34	4,19	10,09	10,08	10,05	43,55
6	4,43	4,43	4,32	10,06	10,08	10,08	44,26
7	4,23	4,63	4,44	10,06	10,13	10,14	44,82
8	4,16	4,49	4,53	9,99	10,06	10,09	44,14

Tabela 2: Provetes com sete dias de cura

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,06	4,07	4,02	9,81	9,85	9,85	39,84
2	4,05	4,13	4,32	9,40	9,58	9,63	39,74
3	3,89	3,93	3,98	9,86	9,50	9,99	38,48
4	4,32	4,16	4,30	10,00	9,98	9,97	42,53
5	4,28	4,22	4,23	9,62	9,97	9,70	41,43
6	3,98	3,94	4,95	9,72	9,77	9,70	41,74
7	4,06	4,12	4,03	9,88	9,84	9,86	40,13

Tabela 3: Provetes com quinze dias de cura

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,15	4,22	4,10	9,84	9,76	9,80	40,74
2	4,09	4,18	4,09	9,79	9,73	9,90	40,40
3	4,11	4,27	4,19	9,82	10,08	9,90	41,62
4	4,20	4,29	4,24	9,88	9,81	9,91	41,87
5	4,00	4,10	4,05	9,88	9,88	9,98	40,15
6	4,03	3,97	4,05	9,89	9,92	9,83	39,68
7	4,29	4,27	4,44	9,88	9,93	9,68	42,60
8	4,04	4,07	4,02	9,87	9,94	9,86	39,99

Tabela 4: Provetes com trinta dias de cura

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,32	4,41	4,53	10,05	10,05	10,03	44,39
2	4,23	4,36	4,15	9,89	9,90	9,95	42,10
3	4,18	4,25	4,40	9,72	9,82	9,84	41,88
4	4,18	4,38	4,35	9,68	9,78	9,85	42,04
5	4,09	4,25	4,29	9,65	9,76	9,75	40,92
6	4,12	4,11	4,10	9,99	9,99	10,01	41,09
7	4,24	4,31	4,25	10,01	10,00	9,97	42,64
8	4,22	4,23	4,24	9,97	10,00	10,01	42,27

Tabela 5: Provetes com mais de três meses de cura e teor de humidade 12% (Referência)

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,12	4,17	4,18	10,05	10,08	10,09	41,87
2	4,10	4,25	4,27	9,71	9,83	9,81	41,16
3	4,16	4,22	4,21	10,11	10,11	10,14	42,47
4	4,16	4,18	4,23	10,02	10,01	10,04	42,00
5	4,33	4,25	4,28	10,21	10,16	10,11	43,55
6	4,08	4,07	4,12	10,01	10,01	9,96	40,87
7	4,17	4,24	4,29	9,80	9,99	9,96	41,98
8	4,07	4,12	4,26	10,22	10,26	10,26	42,52

Tabela 6: Teor de Humidade 8%

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	3,96	3,95	4,00	9,88	9,95	9,82	39,24
2	3,87	3,95	3,95	10,03	9,92	9,85	38,97
3	4,01	4,08	4,13	9,69	9,76	9,66	39,52
4	3,92	3,89	3,90	9,48	9,57	9,62	37,30
5	3,99	4,06	4,17	9,56	9,65	9,64	39,17
6	3,90	3,86	3,85	9,75	9,79	9,78	37,82
7	3,91	3,87	3,94	9,79	9,76	9,76	38,17
8	4,06	4,06	4,07	9,71	9,81	9,72	39,60
9	3,84	3,90	3,90	9,87	9,79	9,77	38,06
10	3,93	3,93	3,97	9,94	9,77	9,74	38,71

Tabela 7: Teor de Humidade Saturado

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,02	3,95	4,08	9,61	9,62	9,67	38,69
2	4,02	4,04	3,97	9,75	9,78	9,80	39,20
3	4,03	3,99	4,00	9,60	9,83	9,73	38,94
4	4,21	4,08	4,44	9,59	9,71	9,69	41,00
5	3,90	4,07	4,00	9,56	9,69	9,67	38,46
6	4,04	4,03	4,82	9,92	10,02	10,01	42,90
7	3,94	4,18	4,15	9,84	9,65	9,74	39,85
8	3,96	3,87	3,96	9,81	9,83	9,75	38,50
9	3,96	4,33	4,16	9,81	9,92	9,91	41,00

Tabela 8: Ciclo de Temperaturas -15/+60°C

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,32	4,27	4,26	9,96	9,98	9,98	42,72
2	3,96	4,03	4,03	9,98	9,87	9,89	39,72
3	4,05	4,05	4,03	4,03	9,89	9,86	32,05
4	4,09	4,21	4,05	10,01	10,06	10,04	41,32
5	3,95	3,94	4,01	9,78	9,78	9,76	38,77
6	4,01	4,22	4,04	9,63	9,75	9,70	39,65
7	4,18	4,17	4,19	9,98	9,97	10,10	41,87
8	4,00	4,28	4,11	9,95	10,00	9,97	41,19

Tabela 9: Ciclo de Temperaturas +10/+50°C

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,21	4,35	4,18	9,87	9,92	9,90	42,03
2	4,14	4,12	4,12	10,08	10,07	10,09	41,60
3	4,12	4,11	4,18	9,85	9,95	9,87	40,91
4	4,09	4,09	4,16	10,13	10,10	10,10	41,59
5	4,43	4,44	4,42	10,11	10,08	10,12	44,76
6	4,35	4,38	4,37	10,08	10,08	10,11	44,06
7	4,20	4,22	4,21	10,12	10,12	10,14	42,63
8	4,28	4,24	4,25	10,14	10,15	10,12	43,15
9	4,30	4,26	4,34	10,09	10,10	10,09	43,40
10	4,08	4,1	4,23	9,54	9,73	9,71	39,96

Tabela 10: Ciclo de Gelo-Degelo

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,05	4,13	4,16	10,17	10,13	10,23	41,86
2	4,07	4,29	4,30	10,12	10,15	10,14	42,78
3	4,21	4,25	4,21	10,06	10,06	10,05	42,47
4	4,06	4,24	4,23	9,84	9,94	9,93	41,36
5	4,03	4,12	4,20	9,44	9,57	9,60	39,26
6	4,04	4,08	4,09	10,07	10,09	10,07	41,01
7	4,15	4,12	4,14	10,00	10,03	10,06	41,49
8	4,03	4,11	4,12	9,70	9,77	9,78	39,85
9	4,21	4,21	4,32	9,96	9,99	10,00	42,40
10	4,14	4,23	4,27	10,01	10,08	10,05	42,33
11	4,29	4,31	4,37	9,92	9,98	9,91	42,96
12	4,05	4,14	4,09	9,62	9,72	9,74	39,68

Tabela 11: Temperatura -15°C

N° Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,22	4,68	4,48	10,05	10,20	10,12	45,15
2	4,40	4,67	4,56	9,95	9,98	10,01	45,34
3	4,40	4,41	4,39	9,78	9,83	9,84	43,19
4	4,10	4,30	4,12	9,79	9,84	9,86	41,02
5	4,21	4,25	4,19	10,07	10,07	10,08	42,48
6	4,49	4,64	4,65	10,05	10,07	10,04	46,18
7	4,70	4,84	4,78	10,05	10,06	10,02	47,94
8	4,41	4,55	4,48	10,13	10,14	10,11	45,37
9	4,49	4,69	4,70	9,85	9,98	9,98	45,97
10	4,14	4,16	4,13	10,04	10,00	10,04	41,54
11	4,43	4,42	4,40	9,91	10,00	9,96	43,98
12	4,23	4,46	4,36	9,69	10,01	9,94	42,98
13	4,57	4,68	4,81	10,00	10,04	10,06	47,02
14	4,72	4,89	4,74	9,90	9,97	9,93	47,51

Tabela 12: Temperatura 40°C

N° Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,08	4,15	4,27	10,18	10,22	10,24	42,56
2	4,14	4,14	4,15	10,12	10,10	10,09	41,86
3	4,32	4,28	4,30	9,75	9,78	9,82	42,07
4	4,13	4,15	4,26	10,25	10,31	10,26	42,94
5	4,28	4,25	4,45	10,13	10,09	10,11	43,74
6	4,47	4,55	4,49	9,90	9,93	10,00	44,78
7	4,27	4,39	4,23	9,88	9,94	9,94	42,62
8	4,10	4,41	4,31	9,84	9,99	9,99	42,48
9	4,13	4,24	4,30	10,15	10,25	10,22	43,11
10	4,25	4,30	4,33	9,95	10,00	9,95	42,79

Tabela 13: Temperatura 60°C

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,17	4,24	4,14	10,05	10,04	10,03	42,00
2	4,10	4,11	4,12	10,29	10,42	10,28	42,46
3	4,16	4,15	4,19	10,32	10,37	10,35	43,11
4	4,12	4,08	4,11	10,13	10,12	10,13	41,55
5	4,14	4,17	4,10	9,80	9,84	9,87	40,69
6	4,13	4,18	4,23	9,83	9,94	9,98	41,45
7	4,21	4,28	4,33	10,06	10,06	10,07	43,00
8	4,10	4,11	4,10	10,08	10,11	10,08	41,40
9	4,16	4,23	4,15	9,65	9,76	9,78	40,67
10	4,17	4,18	4,13	10,06	10,06	10,06	41,85

Tabela 14: Temperatura 100°C

Nº Provete	Espessura (mm)			Secção transversal (mm)			Área de secção média (mm ²)
	Centro	Lado A	Lado B	Centro	Lado A	Lado B	
1	4,35	4,39	4,34	10,00	10,03	10,02	43,67
2	4,23	4,15	4,15	10,07	10,10	10,07	42,10
3	4,07	4,24	4,09	10,01	10,01	10,03	41,40
4	4,12	4,19	4,13	10,06	10,08	10,07	41,76
5	4,05	4,20	4,16	10,45	10,44	10,45	43,21
6	4,08	4,10	4,09	10,05	10,07	10,05	41,13
7	4,13	4,14	4,10	10,09	10,08	10,09	41,59
8	4,18	4,17	4,17	10,07	10,03	10,05	41,94
9	4,28	4,34	4,26	9,90	9,94	9,94	42,62
10	4,15	4,23	4,35	10,02	10,07	10,03	42,60

iii) Ensaio Experimental

No presente sub-capítulo será exposta a forma como decorreram os ensaios experimentais, a descrição de cada um deles, e apresentar-se-ão os resultados da rotura dos provetes, bem como a variação da tensão e extensão, para cada condição de exposição.

No ensaio de tração dos provetes de cola, estes foram colocados verticalmente na máquina de ensaio, com recurso a duas amarras, e utilizou-se um extensómetro que permitiu medir a extensão do provete durante o ensaio, tal como se pode observar pela Figura 5.

O equipamento procedeu à tração do provete até à sua rotura, medindo a força e o deslocamento necessários para que tal ocorresse. Este ensaio deu-se por controlo de deslocamento, a uma velocidade de 1mm por minuto e permitiu saber, a cada segundo, qual o valor da força (N) e do deslocamento (mm). Para o cálculo da extensão, calculou-se a variação de comprimento a cada segundo, dividida pelo comprimento inicial (L_0), de 50mm.



Figura 5: Rotura de um provete de epóxy ensaiado à tração.

Seguidamente, serão apresentados os resultados do ensaio de tração dos provetes, bem como a relação entre a tensão e a extensão sofridas pelos mesmos até ao momento da rotura, referentes a cada um dos tempos de cura em análise. Por se tratar de um elevado número de provetes, optou-se por apresentar apenas o gráfico Tensão vs Extensão de um dos ensaios, já que as configurações dos gráficos dos restantes provetes são muito semelhantes. Calculou-se ainda a média desses valores, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV), compilados em tabelas, para cada tempo de cura estudado. Em alguns casos, optou-se por não se considerar os resultados de ensaio provetes cujos valores de tensão se desviavam muito da média, de forma a obterem-se resultados o mais representativos possível.

Tempo de cura de três dias

Na Figura 6 pode observar-se o modo de rotura dos provetes ensaiados à tração com três dias de cura, bem como o gráfico Tensão vs Extensão para um dos provetes ensaiado. A Tabela 15 resume os valores máximos da força, tensão e extensão na força máxima dos restantes provetes.

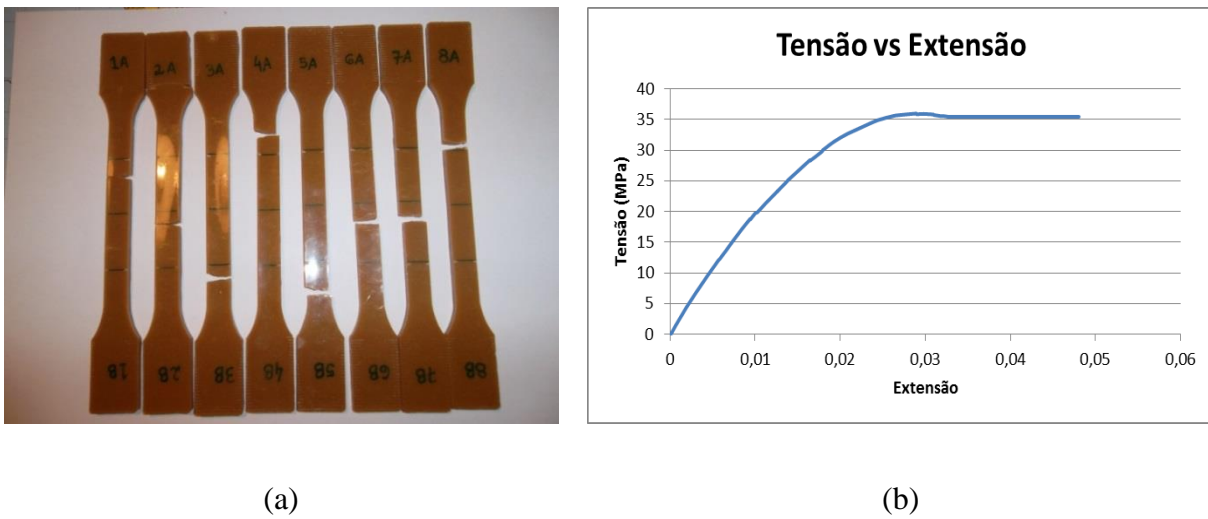


Figura 6: (a) Modo de rotura dos provetes. (b) Gráfico Tensão vs Extensão do Proвете

Tabela 15: Resultados do ensaio de tração dos provetes de cola com três dias de cura

Nº Proвете	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
1	0,048	35,99
2	0,034	41,44
3	0,034	40,57
4	0,030	34,74
5	0,021	34,44
6	0,053	37,76
7	0,035	41,59
8	0,024	30,69
Valor médio:	0,035	37,15
Desvio Padrão:	0,011	3,90
CV:	31%	10%

Tempo de cura de sete dias

Na Figura 7 pode observar-se o modo de rotura dos provetes ensaiados à tração com sete dias de cura, bem como o gráfico Tensão vs Extensão para um dos provetes ensaiados. A Tabela 16 resume os valores máximos da força, tensão e extensão dos restantes provetes.

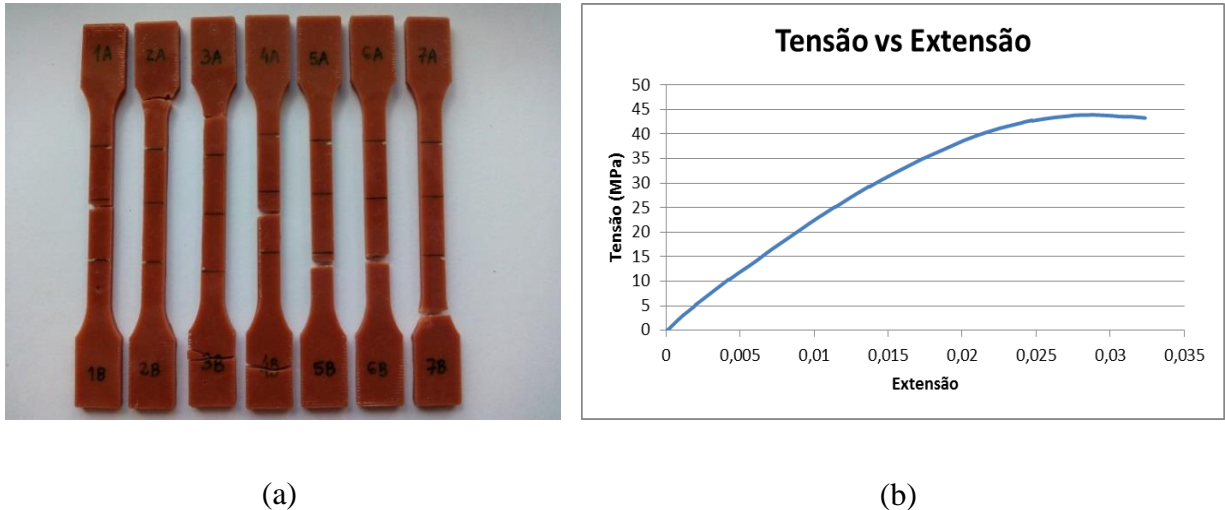


Figura 7: (a) Modo de rotura dos provetes. (b) Gráfico Tensão vs Extensão do Proвете.

Tabela 16: Resultados do ensaio de tração dos provetes de cola com sete dias de cura

Nº Proвете	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
1	0,032	43,89
2	0,022	46,95
3	0,021	46,87
4	0,028	46,84
5	0,026	49,23
6	0,028	49,08
7	0,016	38,15
Valor médio:	0,025	45,86
Desvio Padrão:	0,006	3,84
CV:	22%	8%

Tempo de cura de quinze dias

Na Figura 8 pode observar-se o modo de rotura dos provetes ensaiados à tração com quinze dias de cura, bem como o gráfico Tensão vs Extensão para um dos provetes ensaiados. A Tabela 17 resume os valores máximos da força, tensão e extensão dos restantes provetes.

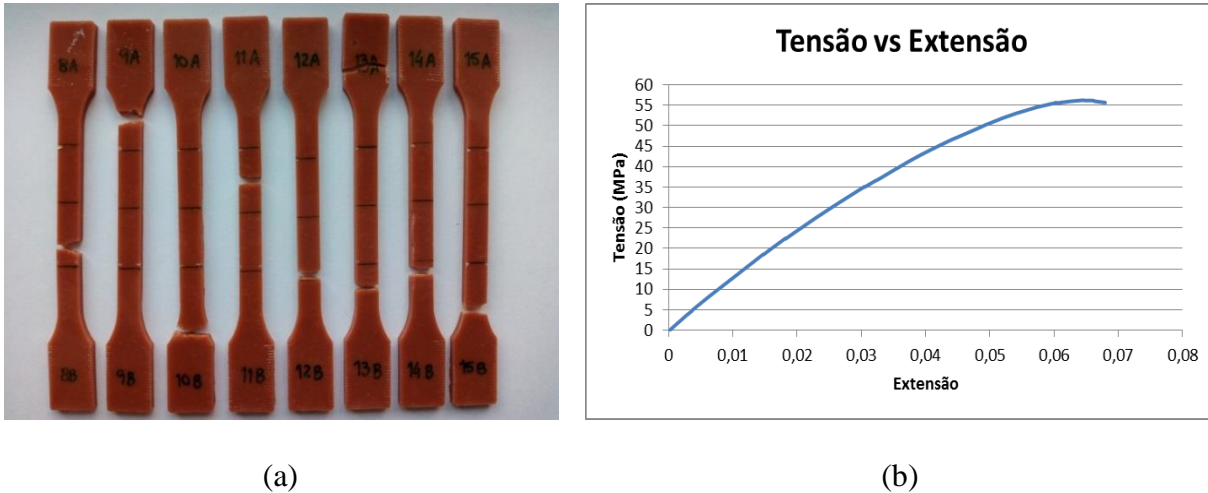


Figura 8: (a) Modo de rotura dos provetes. (b) Gráfico Tensão vs Extensão do Proвете

Tabela 17: Resultados do ensaio de tração dos provetes de cola com quinze dias de cura

Nº Proвете	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
1	0,068	56,22
2	0,042	41,95
3	0,048	45,62
4	0,075	54,42
6	0,078	53,11
7	0,067	52,19
8	0,062	51,72
Valor médio:	0,063	50,75
Desvio Padrão:	0,013	5,10
CV:	21%	10%

Tempo de cura de trinta dias

Na Figura 9 pode observar-se o modo de rotura dos provetes ensaiados à tração com três dias de cura, bem como o gráfico Tensão vs Extensão para um dos provetes ensaiados. A Tabela 18 resume os valores máximos da força, tensão e extensão dos restantes provetes.

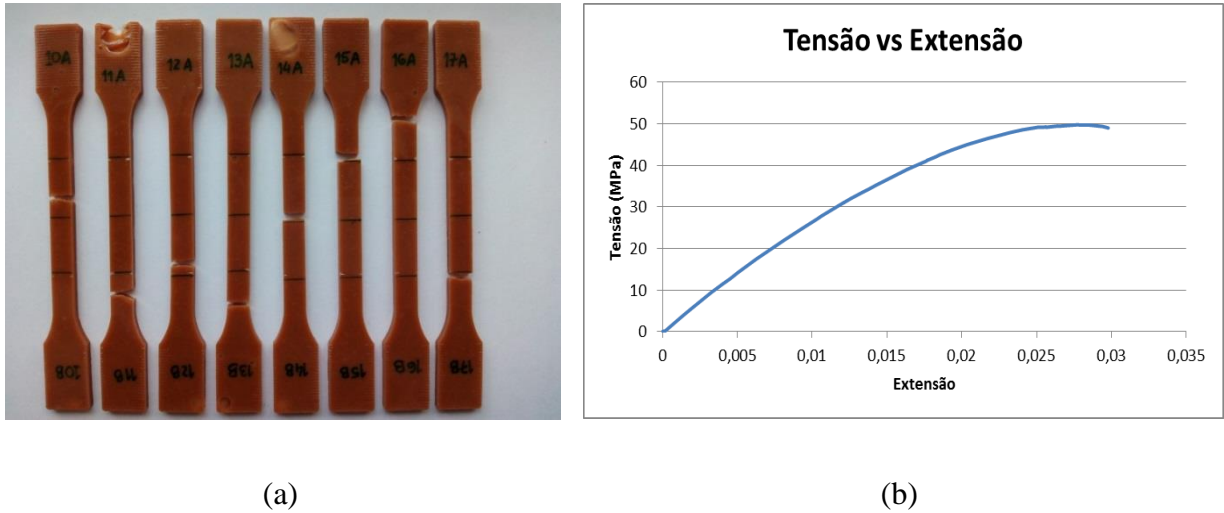


Figura 9: (a) Modo de rotura dos provetes. (b) Gráfico Tensão vs Extensão do Provede

Tabela 18: Resultados do ensaio de tração dos provetes de cola com trinta dias de cura.

Nº Provede	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
2	0,030	49,71
3	0,021	43,41
6	0,035	48,25
7	0,015	36,56
8	0,033	47,22
Valor médio:	0,027	45,03
Desvio Padrão:	0,0083	5,28
CV:	31%	12%

Tempo de cura superior a três meses

Na Figura 10 pode observar-se o modo de rotura dos provetes ensaiados à tração com três dias de cura, bem como o gráfico Tensão vs Extensão para um dos provetes ensaiados. A Tabela 19 resume os valores máximos da força, tensão e extensão dos restantes provetes.

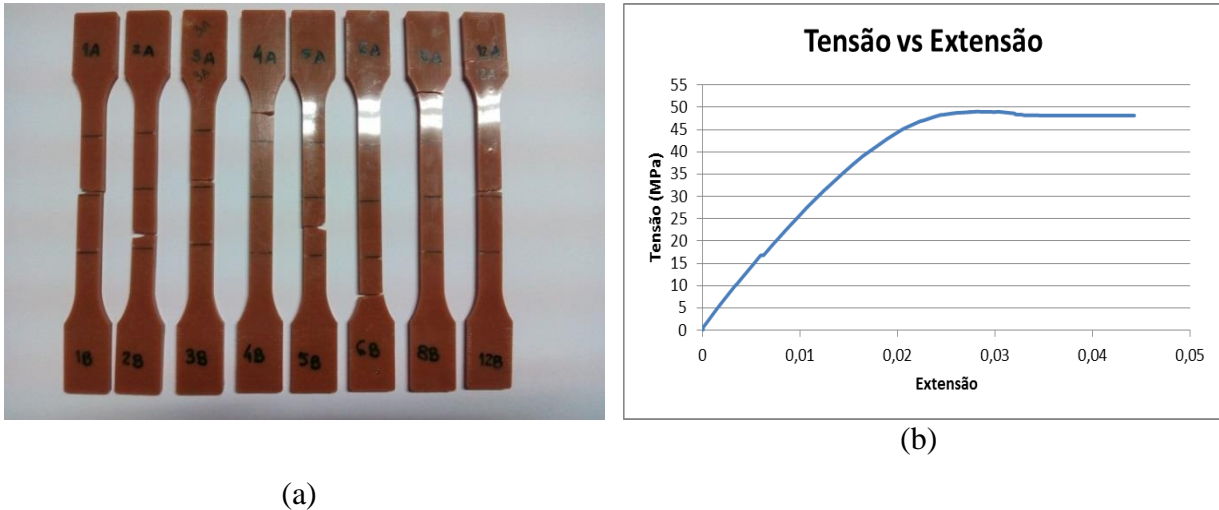


Figura 10: (a) Modo de rotura dos provetes. (b) Gráfico Tensão vs Extensão do Provede.

Tabela 19: Resultados do ensaio de tração dos provetes de cola com três meses de cura

Nº Provede	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
1	0,045	49,01
2	0,023	46,21
3	0,042	48,73
4	0,031	49,87
5	0,033	48,60
6	0,020	44,21
8	0,027	46,71
Valor médio:	0,032	47,62
Desvio Padrão:	0,009	1,98
CV:	30%	4%

No Capítulo 4, Apresentação e Discussão dos Resultados, faz-se uma comparação entre os diferentes tempos de cura, optando-se por definir como tempo mínimo de cura um mês. Em todos os ensaios apresentados em seguida, as resinas epoxídicas sofreram, pelo menos, um mês de cura.

Ensaio de Referência (20°C, 60% HR)

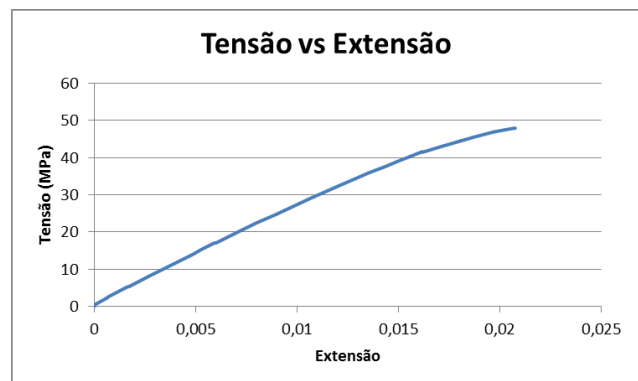
Relativamente ao ensaio de referência de tração de provetes de epóxy, estes correspondem à exposição a uma temperatura de 20°C e 60% de humidade relativa. Sendo que todos os provetes anteriormente apresentados estiveram sujeitos ao mesmo de tipo de condições de exposição, optou-se por utilizar como resultados de referência aqueles correspondentes a três meses de cura.

Teor de Humidade 8%

Na Figura 11 pode observar-se o modo de rotura dos provetes de cola e o gráfico Tensão vs Extensão para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 20.



(a)



(b)

Figura 11: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição TH=8%. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.

Tabela 20: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição TH=8%.

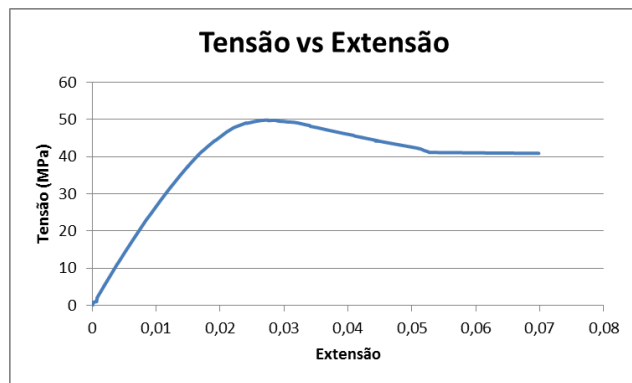
Nº Provette	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
2	0,021	47,991
3	0,026	56,740
4	0,025	55,478
5	0,049	55,737
6	0,037	56,962
7	0,030	57,317
8	0,036	58,699
9	0,040	58,179
10	0,027	54,953
Valor médio:	0,032	55,784
Desvio Padrão:	0,009	3,170
CV:	28%	6%

Teor de Humidade de Saturação

Na Figura 12 pode observar-se o modo de rotura dos provetes de cola e o gráfico Tensão vs Extensão para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 21.



(a)



(b)

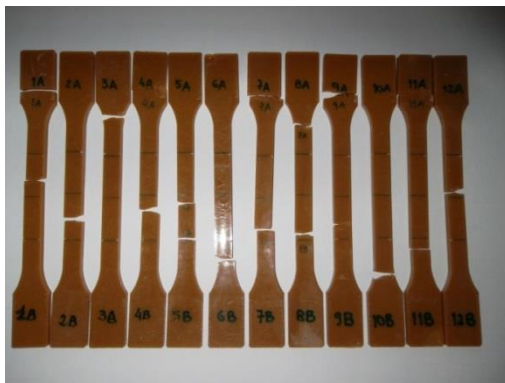
Figura 12: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição TH saturação (b) Gráfico Tensão vs Extensão.

Tabela 21: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição TH saturação

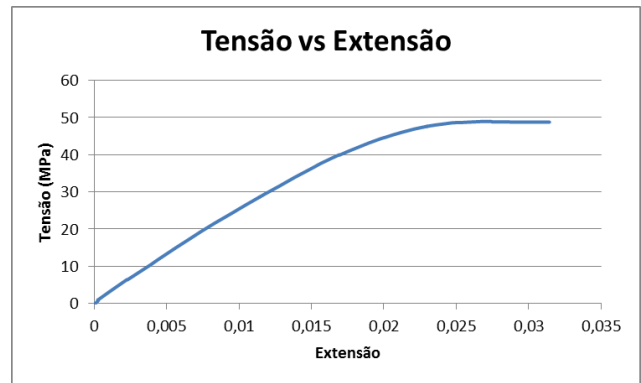
Nº Provette	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
1	0,070	49,900
2	0,018	41,015
3	0,037	44,978
4	0,022	42,386
5	0,016	37,360
7	0,059	44,338
8	0,035	44,950
9	0,034	46,815
Valor médio:	0,036	43,968
Desvio Padrão:	0,019	3,785
CV:	53%	9%

Ciclo de Gelo-Degelo

Na Figura 13 pode observar-se o modo de rotura dos provetes de cola e o gráfico Tensão vs Extensão para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 22.



(a)



(b)

Figura 13: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição de gelo-degelo. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.

Tabela 22: Resultado do ensaio de tração dos provetes de gelo-degelo.

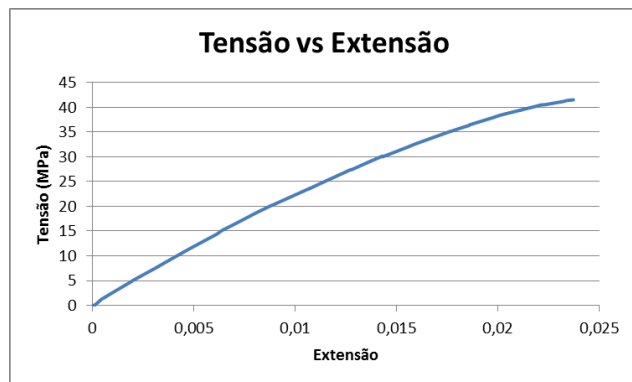
Nº Provette	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
1	0,034	48,983
2	0,021	41,976
3	0,029	42,003
4	0,041	45,918
5	0,038	46,679
6	0,094	46,224
7	0,033	49,140
9	0,038	48,262
10	0,017	39,182
11	0,025	44,436
12	0,026	42,845
Valor médio:	0,036	45,059
Desvio Padrão:	0,021	3,251
CV:	58%	7%

Ciclo de Temperatura +10/+50°C

Na Figura 14 pode observar-se o modo de rotura dos provetes de cola e o gráfico Tensão vs Extensão para um provete . Os restantes resultados são apresentados na Tabela 23.



(a)



(b)

Figura 14: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição T= 10/50°C. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.

Tabela 23: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição T= 10/50°C.

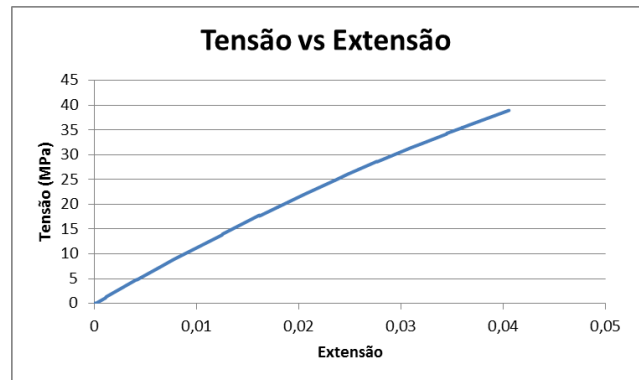
Nº Provette	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
2	0,024	41,518
3	0,037	47,231
5	0,055	48,884
6	0,037	45,967
7	0,019	39,820
8	0,022	40,504
9	0,027	35,681
Valor médio:	0,031	42,801
Desvio Padrão:	0,013	4,711
CV:	40%	11%

Ciclo de Temperatura -15/+60°C

Na Figura 15 pode observar-se o modo de rotura dos provetes de cola e o gráfico Tensão vs Extensão para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 24.



(a)



(b)

Figura 15: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição T= -15/+60°C. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.

Tabela 24: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição T= -15/+60°C.

Nº Provette	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
4	0,041	38,962
5	0,047	44,468
6	0,058	50,554
7	0,054	51,047
8	0,050	44,183
Valor médio:	0,050	45,843
Desvio Padrão:	0,007	5,031
CV:	13%	11%

Temperatura -15°C

Na Figura 16 pode observar-se o modo de rotura dos provetes de cola e o gráfico Tensão vs Extensão para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 25.

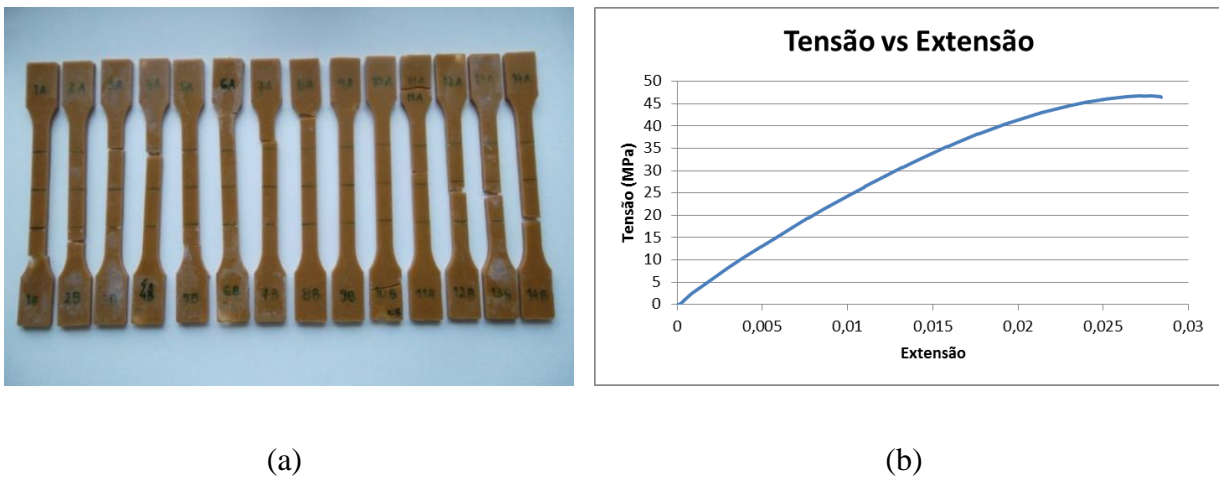


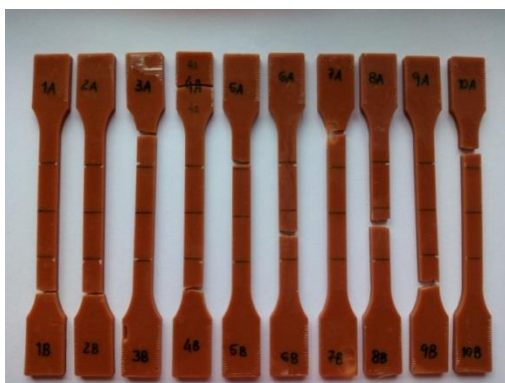
Figura 16: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição temperatura -15°C (b) Gráfico Tensão vs Extensão.

Tabela 25: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição temperatura -15°C

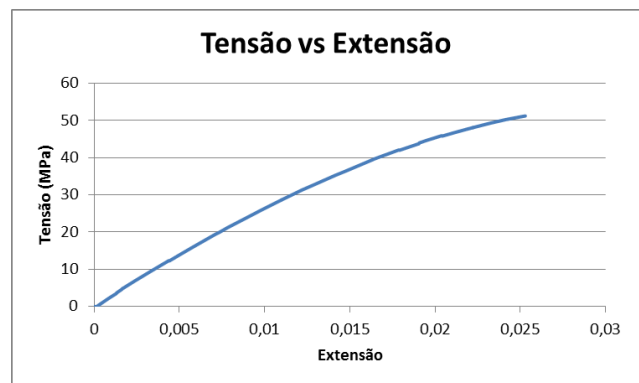
Nº Provette	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
2	0,028	46,801
3	0,034	45,698
4	0,026	42,357
5	0,026	46,247
6	0,019	39,100
7	0,033	47,204
9	0,015	33,618
10	0,018	38,689
11	0,034	46,399
12	0,027	40,289
13	0,037	46,202
14	0,039	48,548
Valor médio:	0,028	43,429
Desvio Padrão:	0,008	4,572
CV:	27%	11%

Temperatura 40°C

Na Figura 17 pode observar-se o modo de rotura dos provetes de cola e o gráfico Tensão vs Extensão para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 26.



(a)



(b)

Figura 17: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição temperatura 40°C. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.

Tabela 26: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição temperatura 40°C

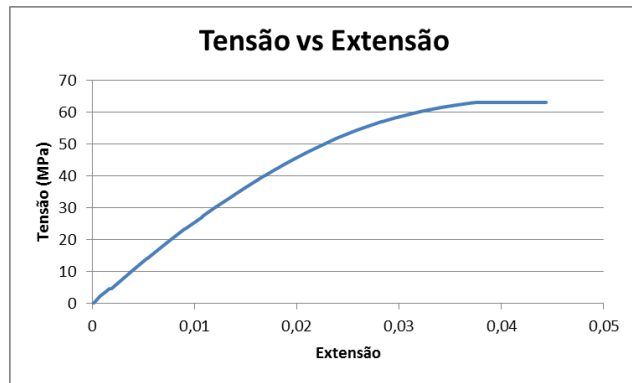
Nº Provette	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
1	0,025	51,283
2	0,024	51,566
4	0,023	52,644
5	0,029	61,144
6	0,022	49,432
8	0,027	47,330
9	0,019	44,659
Valor médio:	0,024	51,151
Desvio Padrão:	0,003	5,196
CV:	14%	10%

Temperatura 60°C

Na Figura 18 pode observar-se o modo de rotura dos provetes de cola e o gráfico Tensão vs Extensão para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 27.



(a)



(b)

Figura 18: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição temperatura 60°C. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.

Tabela 27: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição temperatura 60°C

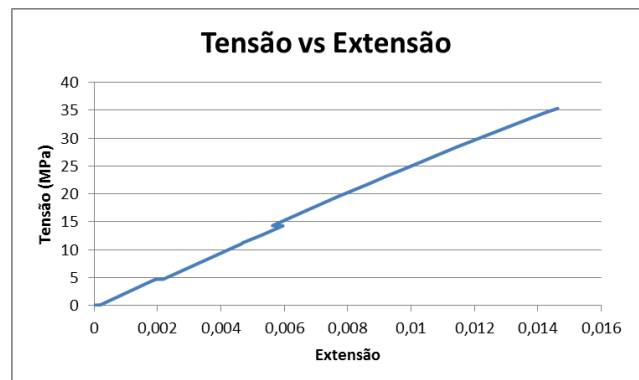
Nº Provette	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
1	0,047	63,133
2	0,051	65,088
3	0,047	62,713
4	0,056	64,971
5	0,045	63,643
7	0,046	63,220
8	0,058	64,344
9	0,035	61,491
Valor médio:	0,048	63,575
Desvio Padrão:	0,007	1,210
CV:	15%	2%

Temperatura 100°C

Na Figura 19 pode observar-se o modo de rotura dos provetes de cola e o gráfico Tensão vs Extensão para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 28.



(a)



(b)

Figura 19: (a) Modo de rotura do ensaio de tração da condição temperatura 100°C. (b) Gráfico Tensão vs Extensão.

Tabela 28: Resultado do ensaio de tração dos provetes da condição temperatura 100°C

Nº Provette	Extensão máxima	Tensão máxima (MPa)
2	0,015	35,357
3	0,017	39,400
5	0,024	41,984
6	0,020	42,751
8	0,020	33,505
9	0,019	42,779
Valor médio:	0,019	39,296
Desvio Padrão:	0,003	4,009
CV:	16%	10%

3.4.2. Ensaio de *Pull-Out*

i) Preparação dos Provetes

Relativamente aos ensaios de *pull-out*, utilizaram-se paralelepípedos de madeira com dimensões 100x160x150 mm³, onde se perfurou uma abertura com 600mm de profundidade e 14mm de diâmetro. Esta perfuração ocorreu sempre no sentido das fibras da madeira. O objectivo da perfuração no provete é inserir um varão de aço roscado de 10mm de diâmetro, colado à madeira através de um anel de epóxy com cerca 2mm (Figura 20).



Figura 20: Provete para ensaio de arrancamento *Pull-out*.

O objectivo deste ensaio é o de avaliar a tensão de arrancamento necessária para romper a ligação entre o varão e a madeira, quando submetida a diversos tipos de degradação. Esta tensão é resultante do quociente entre a força necessária para o arrancamento, medida pelo equipamento laboratorial, e a área das interfaces entre a cola e a madeira e entre a cola e o varão. Resultam, portanto, dois tipos de tensões, uma vez que existem duas interfaces com áreas distintas.

ii) Propriedades Físicas dos Provetes

De seguida apresentam-se as tabelas-resumo das propriedades dos provetes por tipo de condição de exposição.

O teor de humidade da madeira foi calculado com base na norma NP-614 [11], sendo o “quociente, expresso em percentagem, da massa de água que se evapora do provete por secagem a $103^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ até massa constante, pela massa do provete depois de seco” e a massa volúmica da madeira foi calculada tal como indica a norma NP-616 [12], através do “quociente da massa do provete pelo seu volume”.

Os ensaios de *pull-out* dividem-se em duas fases. Numa primeira fase os ensaios para estudo do comprimento de ancoragem (*Anchorage Length, A. L.*) mais favorável, com varões do tipo A (comprimento de ancoragem igual a quatro vezes o diâmetro, ou seja 40mm); tipo B (seis vezes o diâmetro, equivalente a 60mm), tipo C (com comprimento de ancoragem igual a oito vezes o diâmetro do varão, isto é 80mm); e finalmente o tipo D (dez vezes o diâmetro, perfazendo 100mm de ancoragem), como pode ver-se nas Tabelas 29 a 32. Já na segunda fase, apresentam-se as tabelas com as propriedades dos provetes utilizados em cada condição de exposição (Tabelas 33 a 41).

Para cada um dos provetes é indicado: o número e nome do mesmo, a sua massa no dia do ensaio (massa húmida), e depois da secagem em estufa a 100°C (massa seca), a humidade relativa (HR %), resultante do quociente entre a diferença de massas (húmida e seca), e a massa da madeira seca e a massa volúmica da madeira do provete, correspondente ao quociente entre a massa de madeira e o seu volume.

É ainda indicado o valor exacto do comprimento do varão envolvido em epóxy. Este valor foi medido após o ensaio, logo após o arrancamento do varão e servirá para o cálculo mais exato da tensão instalada, quer na interface entre cola e madeira, como na interface cola-varão.

Tabela 29: Comprimento de ancoragem 4Ø

Nº provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (A1)	P-Out A.L. 4ø_P1	997,92	891,38	11,95%	0,36	40	1256,64	1759,29
P2 (A2)	P-Out A.L. 4ø_P2	1176,24	1052,54	11,75%	0,46	40	1256,64	1759,29
P3 (A3)	P-Out A.L. 4ø_P3	1234,5	1103,57	11,86%	0,45	41	1288,05	1803,27
P4 (A4)	P-Out A.L. 4ø_P4	1043,31	931,15	12,05%	0,44	40	1256,64	1759,29
		Valor médio:		12%	0,43			

Tabela 30: Comprimento de ancoragem 6 Ø e Teor de Humidade 12% (Referência)

Nº provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (B1)	P-Out A.L. 6ø_P1	1179,03	1055,58	11,69%	0,44	60	1884,96	2638,94
P2 (B3)	P-Out A.L. 6ø_P2	1189	1067,03	11,43%	0,46	61	1916,37	2682,92
P3 (30)	P-Out A.L. 6ø_P3	1207,04	1078,86	11,88%	0,42	61	1916,37	2682,92
P4 (29)	P-Out A.L. 6ø_P4	1179	1056,68	11,58%	0,42	62	1947,79	2726,90
		Valor médio:		12%	0,43			

Tabela 31: Comprimento de ancoragem 8Ø

Nº provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (C1)	P-Out A.L. 8ø_P1	1232,11	1101,34	11,87%	0,48	81	2544,69	3562,57
P2 (C2)	P-Out A.L. 8ø_P2	1073,14	954,1	12,48%	0,39	80	2513,27	3518,58
		Valor médio:		12%	0,44			

Tabela 32: Comprimento de ancoragem 10Ø

Nº provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (D4)	P-Out A.L. 10ø_P1	1133,78	1011,68	12,07%	0,43	101	3173,01	4442,21
P2 (D1)	P-Out A.L. 10ø_P2	1020,92	913,96	11,70%	0,44	100	3141,59	4398,23
P3 (D2)	P-Out A.L. 10ø_P3	1069,22	947,84	12,81%	0,37	101	3173,01	139556,21
		Valor médio:		12%	0,42			

Para todos os provetes indicados a seguir, o comprimento de ancoragem utilizado foi 6Ø.

Tabela 33: Teor de Humidade 8%

Nº provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (50)	P-Out MC 8%_P1	1186,58	1095,71	8,29%	0,48	61	1916,37	2682,92
P2 (49)	P-Out MC 8%_P2	1020,81	941,62	8,41%	0,44	61	1916,37	2682,92
P3 (43)	P-Out MC 8%_P3	1114,11	1028,28	8,35%	0,42	62	1947,79	2726,90
Valor médio:				8%	0,45			

Tabela 34: Teor de Humidade Saturado

Nº provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (28)	P-Out Sat._P1	1228,2	891,46	37,77%	0,38	61	1916,37	2682,92
P2 (47)	P-Out Sat._P2	1292,3	971,05	33,08%	0,43	62	1947,79	2726,90
P3 (26)	P-Out Sat._P3	1408,58	1058,55	33,07%	0,43	61	1916,37	2682,92
P4 (25)	P-Out Sat._P4	1268,04	957,84	32,39%	0,37	62	1947,79	2726,90
Valor médio:				33%	0,41			

Tabela 35: Ciclo de Temperaturas -15/+60°C

Nº provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (19)	P-Out -15/+60_P1	1142,88	1034,64	10,46%	0,44	62	1947,79	2726,90
P2 (20)	P-Out -15/+60_P2	992,23	904,39	9,71%	0,38	60	1884,96	2638,94
P3 (21)	P-Out -15/+60_P3	980,55	895	9,56%	0,39	62	1947,79	2726,90
P4 (23)	P-Out -15/+60_P4	1157,65	1054,44	9,79%	0,48	62	1947,79	2726,90
P5 (24)	P-Out -15/+60_P5	990,77	898,49	10,27%	0,38	61	1916,37	2682,92
Valor médio:				10%	0,41			

Tabela 36: Ciclo de Temperaturas +10/+50°C

Nº provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (5)	P-Out +10/+50_P1	1152,98	1023,41	12,66%	0,45	60	1884,96	2638,94
P2 (3)	P-Out +10/+50_P2	930,91	836,09	11,34%	0,35	61	1916,37	2682,92
P3 (2)	P-Out +10/+50_P3	1171,02	1042,63	12,31%	0,44	62	1947,79	2726,90
Valor médio:				12%	0,41			

Tabela 37: Ciclo de Gelo-Degelo

N° provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (38)	P-Out Gelo-Degelo_P1	1142,36	1018,29	12,18%	0,44	62	1947,79	2726,90
P2 (36)	P-Out Gelo-Degelo_P2	1202,87	1071,64	12,25%	0,44	63	1979,20	2770,88
P3 (44)	P-Out Gelo-Degelo_P3	1361,45	1205,6	12,93%	0,48	62	1947,79	2726,90
P4 (33)	P-Out Gelo-Degelo_P4	1102,44	986,47	11,76%	0,45	64	2010,62	2814,87
P5 (34)	P-Out Gelo-Degelo_P5	1020,89	905,81	12,70%	0,38	63	1979,20	2770,88
		Valor médio:		12%	0,44			

Tabela 38: Temperatura -15°C

N° provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (12)	P-Out -15°C_P1	1071,2	961,13	11,45%	0,38	62	1947,79	2726,90
P2 (13)	P-Out -15°C_P2	1056,56	948,64	11,38%	0,43	62	1947,79	2726,90
P3 (14)	P-Out -15°C_P3	1187,76	1065,55	11,47%	0,44	61	1916,37	2682,92
P4 (16)	P-Out -15°C_P4	1178,78	1054,31	11,81%	0,45	62	1947,79	2726,90
		Valor médio:		11%	0,43			

Tabela 39: Temperatura 40°C

N° provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (10)	P-Out 40°C_P1	1045,19	930,61	12,31%	0,44	61	1916,37	2682,92
P2 (9)	P-Out 40°C_P2	989,2	880,65	12,33%	0,38	60	1884,96	2638,94
P3 (11)	P-Out 40°C_P3	1179,8	1045,1	12,89%	0,44	61	1916,37	2682,92
P4 (15)	P-Out 40°C_P4	1166,29	1039,44	12,20%	0,50	61	1916,37	2682,92
		Valor médio:		12%	0,44			

Tabela 40: Temperatura 60°C

N° provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (32)	P-Out 60°C_P1	978,02	879,8	11,16%	0,36	64	2010,62	2814,87
P2 (37)	P-Out 60°C_P2	1025,7	930,43	10,24%	0,37	63	1979,20	2770,88
P3 (54)	P-Out 60°C_P3	930,44	836,84	11,18%	0,34	63	1979,20	2770,88
P4 (27)	P-Out 60°C_P4	1032,06	925,14	11,56%	0,36	63	1979,20	2770,88
		Valor médio:		11%	0,36			

Tabela 41: Temperatura 100°C

Nº provete	Nome	Peso (g)		HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Área Interface Cola-Varão (mm ²)	Área Interface Cola-Madeira (mm ²)
		Húmido	Seco					
P1 (39)	P-Out 100°C_P1	941,31	872,67	7,87%	0,35	62	1947,79	2726,90
P2 (35)	P-Out 100°C_P2	1203,1	1115,21	7,88%	0,44	63	1979,20	2770,88
P4 (42)	P-Out 100°C_P3	1036,17	957,25	8,24%	0,39	62	1947,79	2726,90
		Valor médio:		8%	0,39			

iii) Ensaio Experimental

Relativamente ao ensaio de *pull-out*, foram aparafusados nas laterais dos provetes dois suportes para os LVDTs, e também foi enroscada uma peça metálica no varão de aço, na qual os LVDTs se apoiaram para medir os deslocamentos (Figura 21 (a) e (b)).

Os provetes foram colocados dentro de uma caixa de metal, que servirá de confinamento, enquanto a amarra exerce uma força de tração no varão de aço até que se dê a rotura, isto é, o arrancamento do mesmo (Figura 21 (c) e (d))



(a)



(b)

Figura 21 (a) e (b): Ensaio de *pull-out* de arrancamento de varões de aço.



(c)



(d)

Figura 22 (c) e (d): Ensaio de *pull-out* de arrancamento de varões de aço.

De seguida são apresentados os resultados do ensaio de *pull-out* para os diferentes comprimentos de ancoragem dos varões, nomeadamente $4\emptyset$, $6\emptyset$, $8\emptyset$ e $10\emptyset$, em que \emptyset representa o diâmetro do varão de aço, correspondente a 10mm. O tempo de cura da resina epoxídica para estes provetes foi de pelo um mês, dependendo da ordem pela qual os provetes foram ensaiados. Para cada ensaio, traçou-se um gráfico Tensão vs Deslocamento, onde constam as curvas relativas à interface cola-madeira (Tensão c-m) e à interface cola-varão (Tensão c-v).

Devido ao elevado número de provetes ensaiados, serão apenas exibidos os resultados de um provete por cada comprimento de ancoragem, já que os modos de rotura e a configuração dos gráficos são muito semelhantes entre os provetes da mesma condição. Os restantes resultados foram compilados em tabelas, onde pode observar-se a força máxima e a tensão máxima para ambas as interfaces. Para estes valores, calculou-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) dos resultados. Quando algum dos valores se desviou significativamente da média, optou-se por não incluir esse valor.

Comprimento de Ancoragem 4Ø

Na Figura 22 pode observar-se o modo de rotura típico dos provetes com 40mm de ancoragem e o gráfico Tensão vs Deslocamento para a interface cola-madeira (c-m) e cola-varão (c-v) do provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 42.

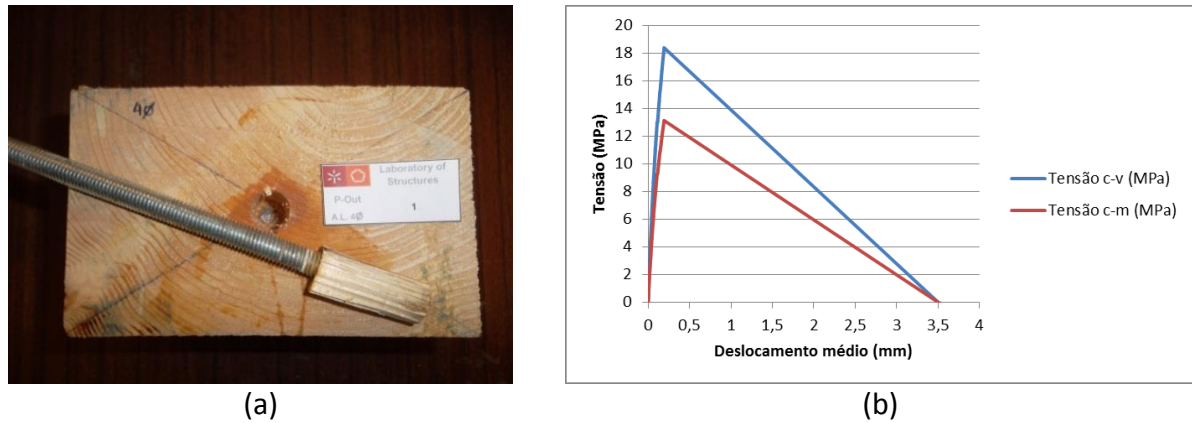


Figura 23: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* para provetes com 40mm de ancoragem. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento do ensaio de *pull-out*.

Tabela 42: Resultados do ensaio de *pull-out* dos provetes com 40mm de ancoragem.

Nome	HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out A.L. 4Ø_P1	11,95%	0,36	40	23,10	18,39	13,13	Interface + Madeira
P-Out A.L. 4Ø_P2	11,75%	0,46	40	24,13	19,20	13,71	Interface + Madeira
P-Out A.L. 4Ø_P3	11,86%	0,45	41	23,50	18,24	13,03	Interface + Madeira
P-Out A.L. 4Ø_P4	12,05%	0,44	40	21,53	17,14	12,24	Interface + Madeira
Média:	12%	0,43		23,07	18,24	13,03	
				Desvio Padrão:	0,85	0,61	
				CV:	4,7%	4,7%	

O modo de rotura pela interface designa a internasse entre a cola e a madeira, pois em caso algum existiu a rotura pela interface entre o varão e a cola. Neste caso em específico, também houve arrancamento de madeira, juntamente com o varão e o epóxy.

Comprimento de Ancoragem 60

Na Figura 23 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes com 60mm de ancoragem e o gráfico Tensão vs Deslocamento para a interface cola-madeira (c-m) e cola-varão (c-v) do provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 43.

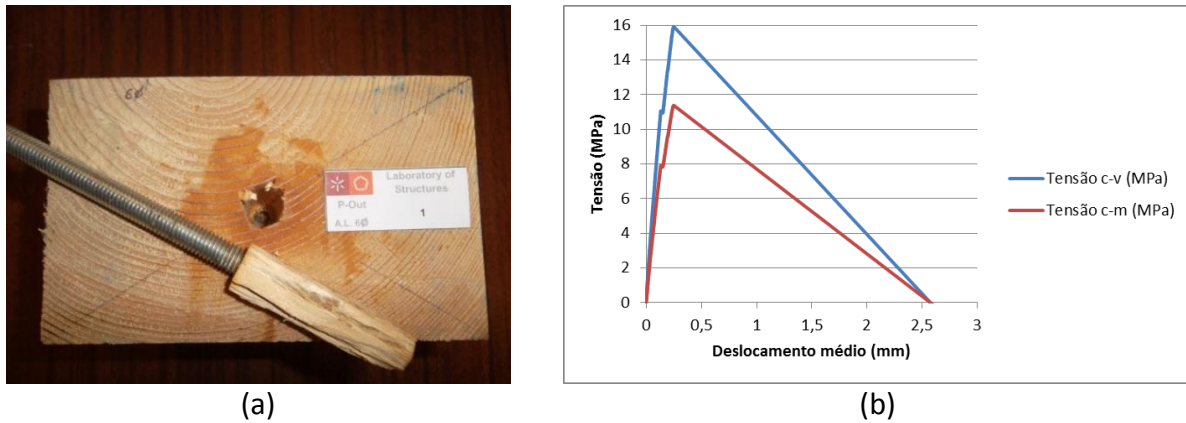


Figura 24: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* para provetes com 60mm de ancoragem. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento do ensaio de *pull-out*.

Tabela 43: Resultados do ensaio de *pull-out* dos provetes com 60mm de ancoragem

Nome	HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out A.L. 60_P1	11,69%	0,44	60	30,04	15,94	11,38	Madeira
P-Out A.L. 60_P2	11,43%	0,46	61	27,50	14,35	10,25	Madeira
P-Out A.L. 60_P3	11,88%	0,42	61	28,33	14,78	10,56	Madeira
P-Out A.L. 60_P4	11,58%	0,42	62	28,10	14,43	10,30	Madeira
Média:	12%	0,43		28,49	14,87	10,62	
				Desvio Padrão:	0,73	0,52	
				CV:	4,9%	4,9%	

Neste caso, para todos os ensaios efectuados, foi arrancado o varão de aço, a cola e também madeira em torno da cola.

Comprimento de Ancoragem 8Ø

Na Figura 24 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes com 80mm de ancoragem e o gráfico Tensão vs Deslocamento para a interface cola-madeira (c-m) e cola-varão (c-v) do provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 44.

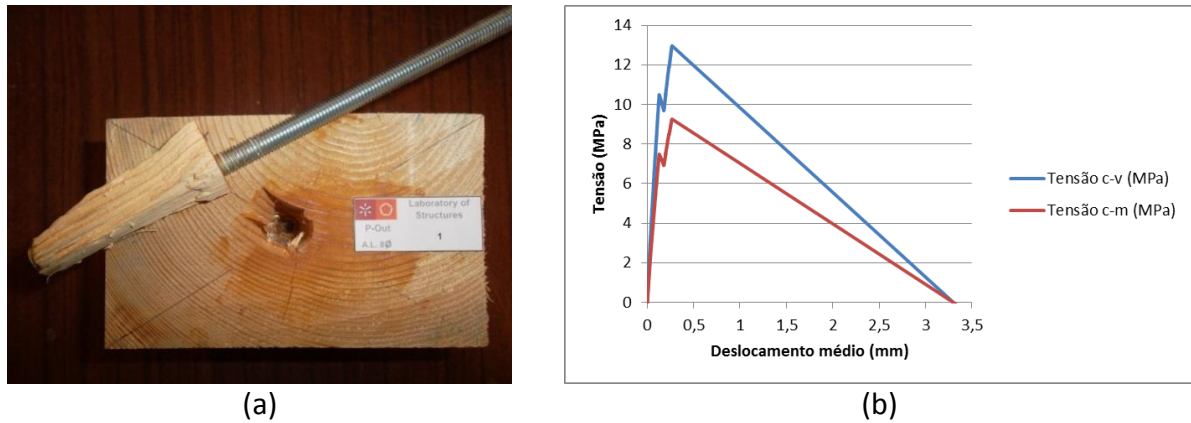


Figura 25: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* para provetes com 80mm de ancoragem. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento do ensaio de *pull-out*.

Tabela 44: Resultados do ensaio de *pull-out* dos provetes com 80mm de ancoragem

Nome	HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out A.L. 8Ø_P1	11,87%	0,48	81	33,00	12,97	9,26	Interface + Madeira
P-Out A.L. 8Ø_P2	12,48%	0,39	80	32,90	13,09	9,35	Interface + Madeira
Média:	12%	0,44		32,95	13,03	9,31	
				Desvio Padrão:	0,09	0,06	
				CV:	0,7%	0,7%	

Mais uma vez, a rotura dos provetes ocorreu pela interface cola-madeira, dando-se também o arrancamento de madeira em conjunto com o varão e a cola em algumas zonas.

Comprimento de Ancoragem 10Ø

Na Figura 25 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes com 100mm de ancoragem e o gráfico Tensão vs Deslocamento para a interface cola-madeira (c-m) e cola-varão (c-v) do provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 45.

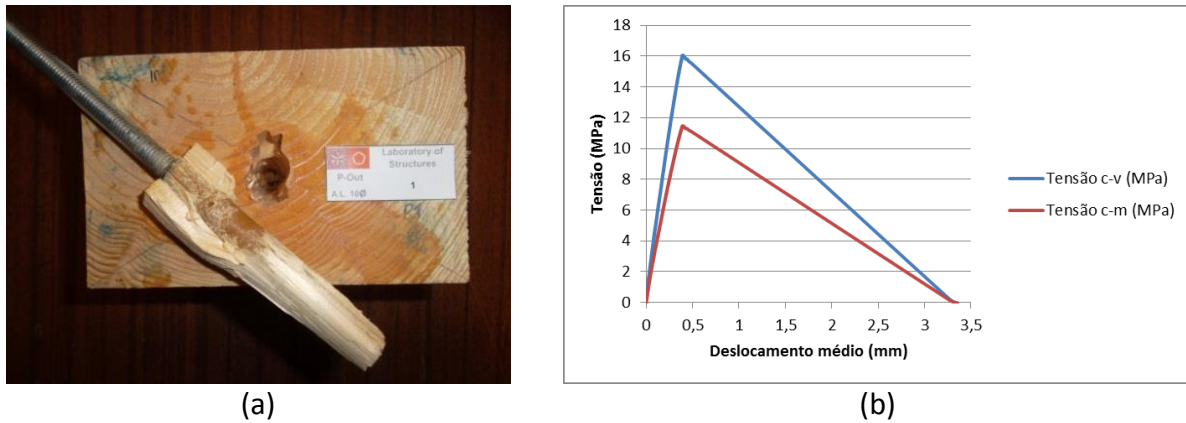


Figura 26: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* para provetes com 100mm de ancoragem. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento do ensaio de *pull-out*.

Tabela 45: Resultados do ensaio de *pull-out* dos provetes com 100mm de ancoragem

Nome	HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out A.L. 10Ø_P1	12,07%	0,43	101	50,97	16,06	11,47	Interface + Madeira
P-Out A.L. 10Ø_P2	11,70%	0,44	100	50,69	16,14	11,53	Interface + Madeira
Média:	12%	0,42		50,83	13,03	9,31	
				Desvio Padrão:	0,05	0,04	
				CV:	0,4%	0,4%	

O tipo de rotura nestes provetes foi muito semelhante ao anterior, com arrancamento em algumas zonas, e rotura pela interface cola-madeira noutras zonas em torno do varão arrancado.

No Capítulo 4, Apresentação e Discussão de Resultados, faz-se a análise comparativa entre os quatro tipos de comprimentos de ancoragem, determinando-se que aquele a ser utilizado seria o de 60mm. Nesse sentido, todos os restantes ensaios de *pull-out* serão em provetes cujos varões se encontram ancorados na madeira 60mm.

Ensaio de Referência (20°C, 60% HR)

O ensaio de referência são aqueles em que os provetes foram sujeitos a uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa de 60%, conduzindo a um teor de humidade na madeira de 12%, e também com um comprimento de ancoragem de 60mm. Ora, estes provetes coincidem com os já ensaiados acima, para o comprimento 60, pelo que os resultados a utilizar na análise de dados serão os mesmos.

Teor de Humidade 8%

Na Figura 26 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-out* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete, para ambas as interfaces. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 46.

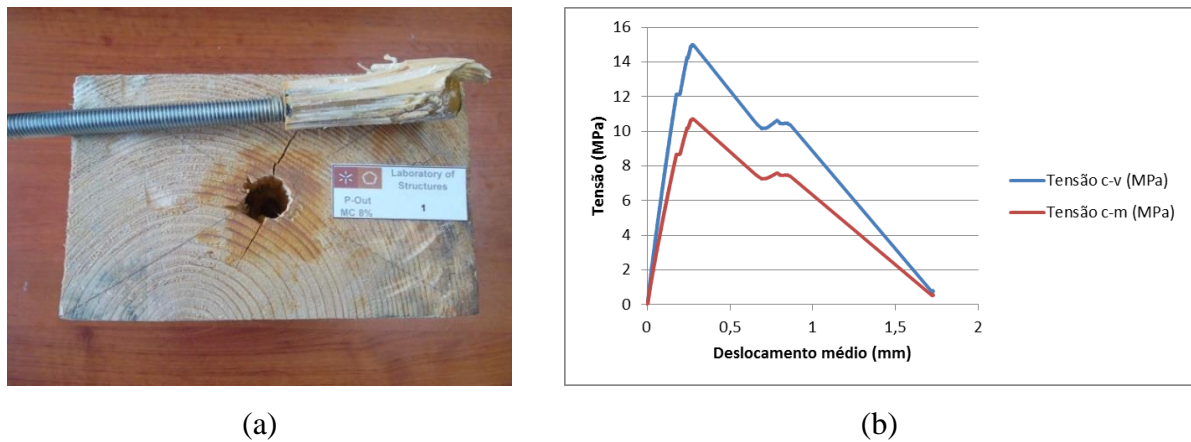


Figura 27: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* da condição TH=8%. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 46: Resultado do ensaio de *pull-out* aos provetes da condição TH=8%.

Nome	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out MC 8%_P1	8,29%	0,48	61	28,75	15,00	10,72	Interface + Madeira
P-Out MC 8%_P2	8,41%	0,44	61	30,35	15,84	11,31	Interface + Madeira
P-Out MC 8%_P3	8,35%	0,42	62	27,59	14,16	10,12	Interface
Média:	8%	0,45		28,89	15,00	10,71	
				Desvio Padrão:	0,84	0,60	
				CV:	5,6%	5,6%	

Teor de Humidade de Saturação

Na Figura 27 pode observar-se o modo de rotura típica dos provetes de *pull-out* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete, para ambas as interfaces. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 47.

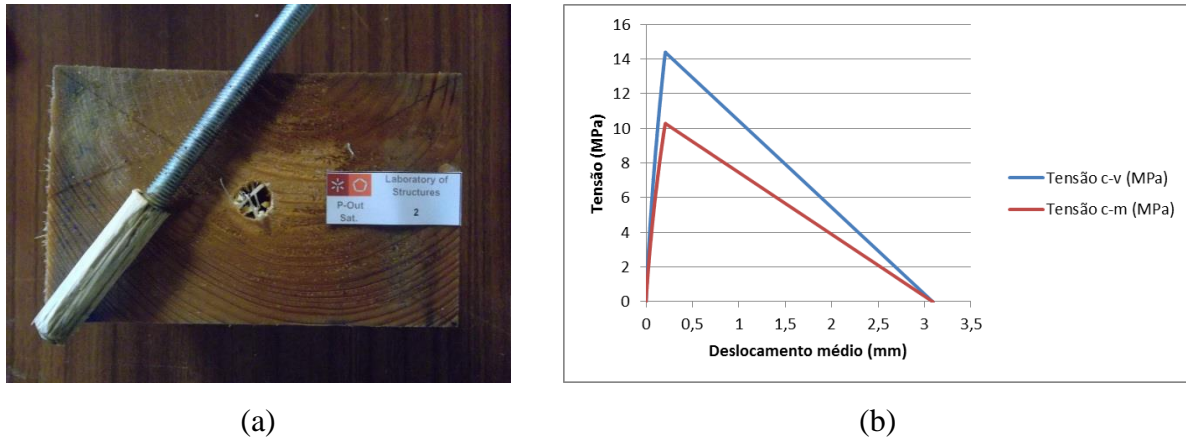


Figura 28: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* da condição TH saturado. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 47: Resultado do ensaio de *pull-out* aos provetes da condição TH saturado

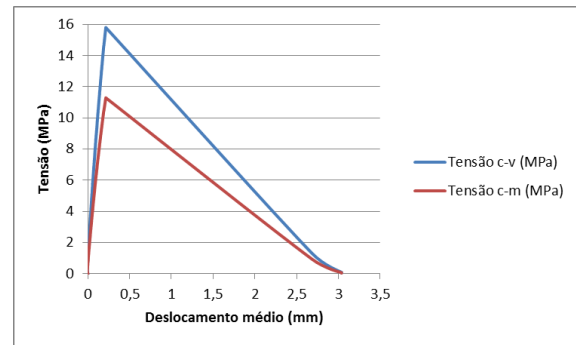
Nome	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out Sat_P2	33,08%	0,43	62	28,03	14,39	10,28	Interface
P-Out Sat_P3	33,07%	0,43	61	25,88	13,51	9,65	Interface
P-Out Sat_P4	32,39%	0,37	62	25,77	13,23	9,45	Madeira
Média:	34%	0,41		26,56	13,71	9,79	
				Desvio Padrão:	0,61	0,43	
				CV:	4,4%	4,4%	

Ciclo de Gelo-Degelo

Na Figura 28 pode observar-se o modo de rotura típico dos provetes de *pull-out* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete, para ambas as interfaces. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 48.



(a)



(b)

Figura 29: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* da condição gelo-degelo. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 48: Resultado do ensaio de *pull-out* aos provetes de gelo-degelo.

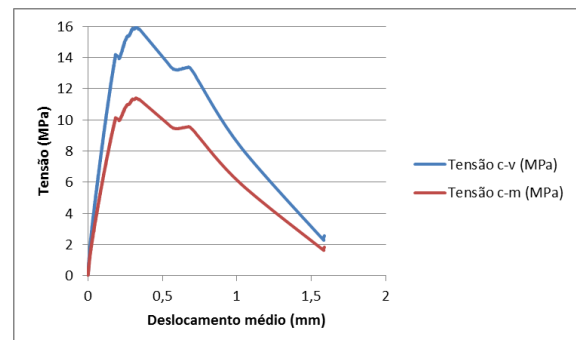
Nome	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out Gelo-Degelo_P1	12,18%	0,44	62	30,77	15,80	11,28	Interface + Madeira
P-Out Gelo-Degelo_P2	12,25%	0,44	63	29,23	14,77	10,55	Interface + Madeira
P-Out Gelo-Degelo_P3	12,93%	0,48	62	26,08	13,39	9,56	Interface + Madeira
P-Out Gelo-Degelo_P4	11,76%	0,45	64	25,42	12,64	9,03	Interface + Madeira
Média:	12%	0,44		27,87	14,15	10,11	
				Desvio Padrão:	1,41	1,01	
				CV:	10,0%	10,0%	

Ciclo de Temperatura +10/+50°C

Na Figura 29 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-out* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete, para ambas as interfaces. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 49.



(a)



(b)

Figura 30: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* da condição T= 10/50°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 49: Resultado do ensaio de *pull-out* aos provetes da condição T= 10/50°C.

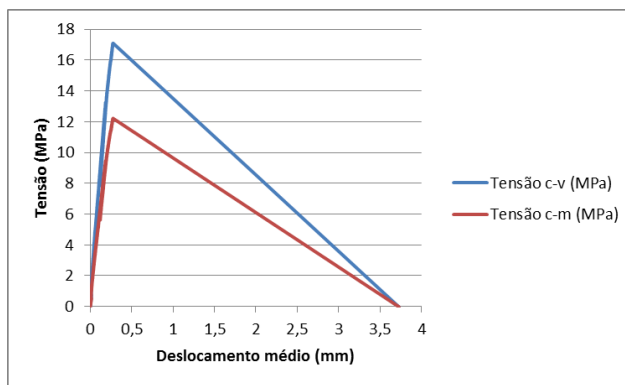
Nome	HR(%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out +10/+50_P1	12,66%	0,45	60	30,10	15,97	11,41	Madeira
P-Out +10/+50_P2	11,34%	0,35	61	26,08	13,61	9,72	Madeira
Média:	12%	0,41		28,09	14,79	10,56	
				Desvio Padrão:	1,67	1,19	
				CV:	11,3%	11,3%	

Ciclo de Temperatura -15/+60°C

Na Figura 30 pode observar-se o modo de rotura típico dos provetes de *pull-out* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete, para ambas as interfaces. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 50.



(a)



(b)

Figura 31: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* da condição T= -15/+60°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 50: Resultado do ensaio de *pull-out* aos provetes da condição T= -15/+60°C.

Nome	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out -15/+60_P1	10,46%	0,44	62	33,31	17,10	12,21	Interface
P-Out -15/+60_P2	9,71%	0,38	60	27,06	14,36	10,26	Interface + Madeira
P-Out -15/+60_P4	9,79%	0,48	62	33,27	17,08	12,20	Interface + Madeira
P-Out -15/+60_P5	10,27%	0,38	61	31,42	16,40	11,71	Interface
Média:	10%	0,41		31,27	16,23	11,60	
				Desvio Padrão:	1,29	0,92	
				CV:	8,0%	8,0%	

Temperatura -15°C

Na Figura 31 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-out* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete, para ambas as interfaces. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 51.

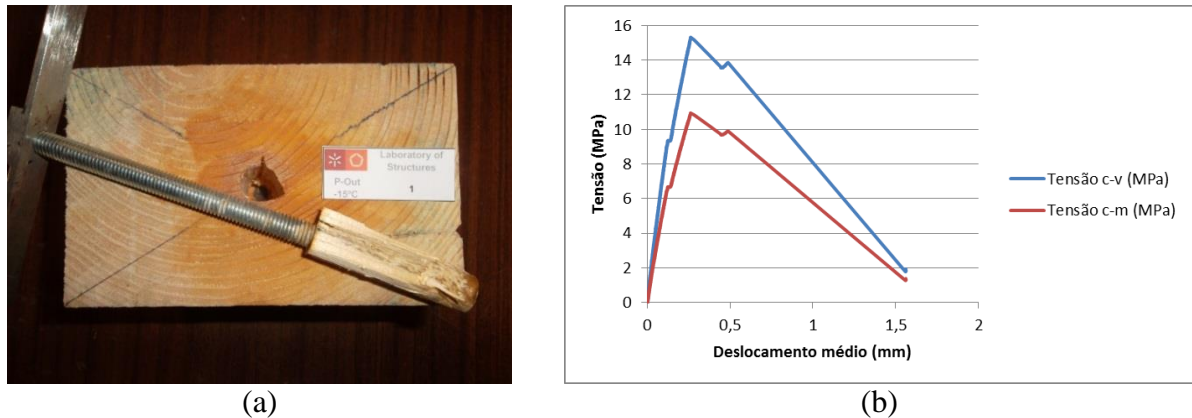


Figura 32: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* da condição temperatura -15°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 51: Resultado do ensaio de *pull-out* aos provetes da condição temperatura -15°C.

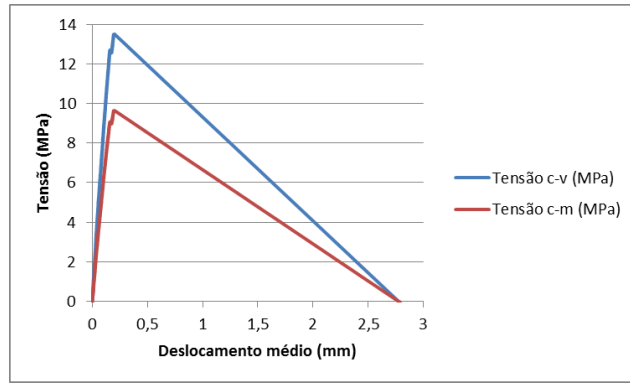
Nome	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out -15°C_P1	11,45%	0,38	62	29,82	15,31	10,94	Interface + Madeira
P-Out -15°C_P2	11,38%	0,43	62	29,15	14,96	10,69	Madeira
P-Out -15°C_P3	11,47%	0,44	61	28,68	14,97	10,69	Interface + Madeira
Média:	12%	0,43		29,22	15,08	10,77	
				Desvio Padrão:	0,20	0,14	
				CV:	1,3%	1,3%	

Temperatura 40°C

Na Figura 32 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-out* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete, para ambas as interfaces. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 52.



(a)



(b)

Figura 33: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* da condição temperatura 40°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 52: Resultado do ensaio de *pull-out* aos provetes da condição temperatura 40°C.

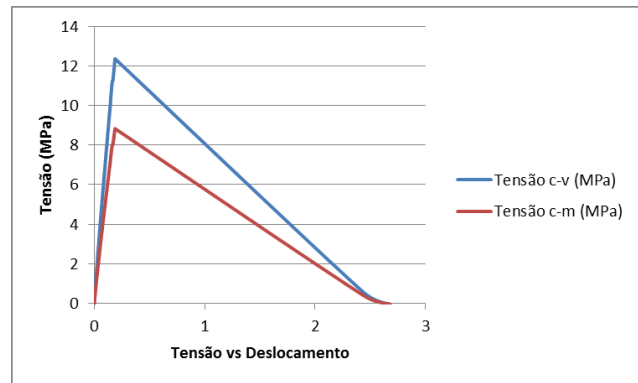
Nome	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out 40°C_P1	12,31%	0,44	61	25,88	13,51	9,65	Interface + Madeira
P-Out 40°C_P2	12,33%	0,38	60	26,31	13,96	9,97	Interface + Madeira
P-Out 40°C_P3	12,89%	0,44	61	38,24	19,95	14,25	Interface + Madeira
P-Out 40°C_P4	12,20%	0,50	61	35,05	18,29	13,06	Interface + Madeira
Média:	12%	0,44		31,37	16,43	11,73	
				Desvio Padrão:	3,19	2,28	
				CV:	19,4%	19,4%	

Temperatura 60°C

Na Figura 33 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-out* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para o provete 1, para ambas as interfaces. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 53.



(a)



(b)

Figura 34: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* da condição temperatura 60°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 53: Resultado do ensaio de *pull-out* aos provetes da condição temperatura 60°C.

Nome	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out 60°C_P1	11,16%	0,36	64	24,86	12,36	8,83	Interface + Madeira
P-Out 60°C_P2	10,24%	0,37	63	19,46	9,83	7,02	Interface + Madeira
P-Out 60°C_P3	11,18%	0,34	63	17,50	8,84	6,31	Interface + Madeira
P-Out 60°C_P4	11,56%	0,36	63	28,35	14,33	10,23	Interface + Madeira
Média:	11%	0,36		22,54	11,34	8,10	
				Desvio Padrão:	2,48	1,77	
				CV:	21,9%	21,9%	

Temperatura 100°C

Na Figura 34 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-out* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete, para ambas as interfaces. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 54.

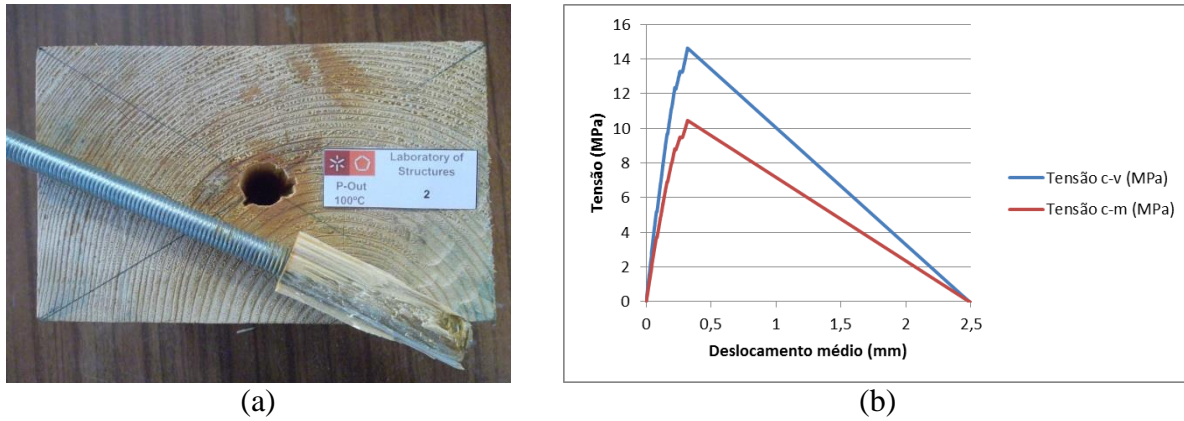


Figura 35: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-out* da condição temperatura 100°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 54: Resultado do ensaio de *pull-out* aos provetes da condição temperatura 100°C.

Nome	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Comprimento Ancoragem (mm)	Força máxima (kN)	Tensão máx. interface c-v (MPa)	Tensão máx. interface c-m (MPa)	Modo de Rotura
P-Out 100°C_P2	7,88%	0,44	63	28,95	14,63	10,45	Interface + Madeira
P-Out 100°C_P3	8,24%	0,39	62	27,42	14,08	10,05	Interface + Madeira
Média:	8%	0,39		28,19	14,35	10,25	
				Desvio Padrão:	0,39	1,12	
				CV:	2,7%	11,0%	

3.4.3. Ensaio de Corte

i) Preparação dos Provetes

Relativamente aos ensaios de corte, foram realizados provetes constituídos por três paralelepípedos de 30x50x40 mm³, desfasados de 25mm, e colados com uma superfície de cola de 25x30 mm², e 2mm de espessura, tal como mostram a Figura 35. Dado que existem duas superfícies coladas, denominaram-se estas por “Lado A” e “Lado B”, e para cada um destes dois lados, efectuaram-se duas medições da largura da camada de cola, cuja média foi utilizada no cálculo da área total de colagem de cada provete.

O objectivo do ensaio de corte será aplicar uma tensão descendente e constante na face superior do paralelepípedo central, de modo a romper as ligações coladas com as peças

laterais, medindo, dessa forma, a força necessária para ocorrer a ruptura por corte da ligação e o deslocamento relativo entre os paralelepípedos.

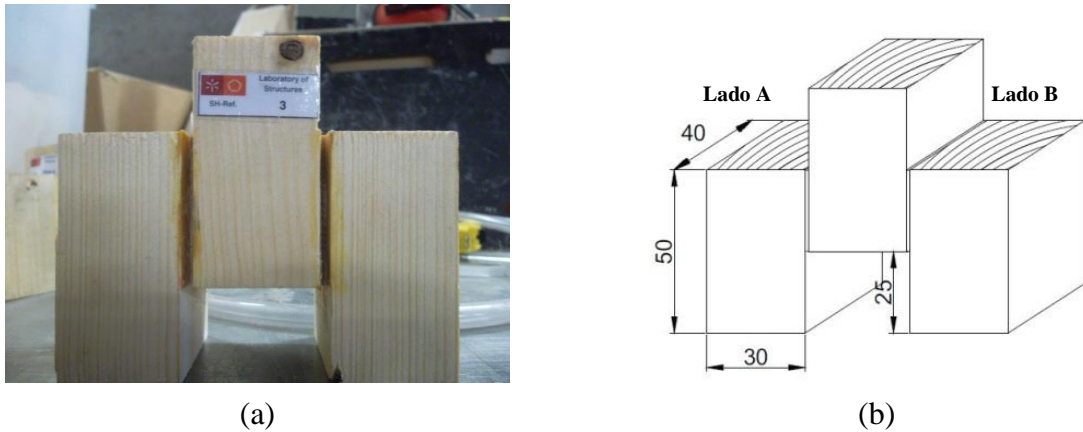


Figura 36 (a) e (b): Geometria dos provetes usados nos ensaios de corte por compressão (medidas em mm).

ii) Propriedades Físicas dos Provetes

De seguida apresentam-se as tabelas-resumo das propriedades dos provetes por tipo de condição de exposição.

Para cada um dos provetes de ensaio de corte, é apresentada: a sua designação; a massa húmida; a massa seca; a percentagem de humidade (HR %); e a massa volúmica da madeira (γ). O cálculo destes parâmetros foi realizado do mesmo modo que o descrito nos ensaios de *pull-out*. Para além disso, mediu-se área de resina epoxídica utilizada para ligar os paralelepípedos, para posteriormente se calcular a tensão exercida na interface cola-madeira, resultando esta tensão do quociente entre a força de corte (dada pelo equipamento de ensaio) e a área de cola medida.. As tabelas-resumo com estes valores (Tabelas 55 a 64) são apresentadas abaixo.

Tabela 55: Teor de Humidade 8%

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Secção de cola (mm)				Total (mm ²)
	Húmido	Seco			Lado A		Lado B		
					medição 1	medição 2	medição 1	medição 2	
SH-MC 8%_P1	230,16	212,72	8,20	0,38	30,98	32,66	29,84	31,56	1563,00
SH-MC 8%_P2	234,01	216,46	8,11	0,48	30,79	32,31	30,75	32,06	1573,88
SH-MC 8%_P3	238,08	220,68	7,88	0,42	31,01	31,77	30,63	31,89	1566,25
SH-MC 8%_P4	207,33	191,74	8,13	0,40	31,78	33,00	31,90	32,82	1618,75
SH-MC 8%_P5	225,02	208,29	8,03	0,40	32,29	32,62	30,77	31,44	1589,00
	Valor médio:		8,11	0,42					

Tabela 56: Teor de Humidade 12% (Referência)

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Secção de cola (mm)				Total (mm ²)
	Húmido	Seco			Lado A		Lado B		
					medição 1	medição 2	medição 1	medição 2	
SH-MC 12%_P1	230,01	205,59	11,88	0,45	29,41	29,96	28,89	29,6	1473,25
SH-MC 12%_P2	242,48	217,52	11,47	0,46	29,68	29,44	29,07	29,6	1472,38
SH-MC 12%_P3	246,7	219,04	12,63	0,45	29,3	30,27	29,8	31,04	1505,13
SH-MC 12%_P4	230,02	205,02	12,19	0,41	28,98	29,53	29,04	30,93	1481,00
	Valor médio:		12,04	0,44					

Tabela 57: Teor de Humidade Saturado

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Secção de cola (mm)				Total (mm ²)
	Húmido	Seco			Lado A		Lado B		
					medição 1	medição 2	medição 1	medição 2	
SH-Sat._P1	297,42	201,76	47,41	0,38	28,74	29,82	28,70	29,16	1455,25
SH-Sat._P2	279,61	202,45	38,11	0,37	28,90	29,02	29,81	30,55	1478,50
SH-Sat._P3	304,92	212,68	43,37	0,44	29,66	30,73	28,82	29,67	1486,00
SH-Sat._P4	290,01	202,98	42,88	0,38	29,26	29,60	30,27	30,8	1499,13
	Valor médio:		43,12	0,39					

Tabela 58: Ciclo de Temperaturas -15/+60°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Secção de cola (mm)				
	Húmido	Seco			Lado A		Lado B		Total (mm ²)
					medição 1	medição 2	medição 1	medição 2	
SH-T°C -15+60_P1	221,18	196,04	11,37	0,40	28,89	30,54	30,27	31,54	1515,50
SH-T°C -15+60_P2	233,81	206,79	11,56	0,45	29,81	30,65	29,48	30,18	1501,50
SH-T°C -15+60_P3	230,12	201,38	12,49	0,44	28,51	29,88	28,46	29,69	1456,75
SH-T°C -15+60_P4	235,59	206,44	12,37	0,48	28,57	29,69	28,97	30,09	1466,50
SH-T°C -15+60_P5	226,6	197,92	12,66	0,42	29,73	30,95	29,48	30,62	1509,75
SH-T°C -15+60_P6	223,43	198,14	11,32	0,41	30,19	31,47	29,95	30,63	1528,00
	Valor médio:		11,965	0,44					

Tabela 59: Ciclo de Temperaturas +10/+50°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Secção de cola (mm)				
	Húmido	Seco			Lado A		Lado B		Total (mm ²)
					medição 1	medição 2	medição 1	medição 2	
SH-T°C +10+50_P1	226,3	200,5	12,87	0,22	30,6	31,79	30,66	31,89	1561,75
SH-T°C +10+50_P2	237,9	211,05	12,72	0,45	30,9	31,76	30,4	31,79	1560,63
SH-T°C +10+50_P3	231,8	205,33	12,89	0,48	30,77	31,39	29,77	31,47	1542,50
SH-T°C +10+50_P4	232,7	207,61	12,09	0,44	29,9	30,88	30,51	31,24	1531,63
SH-T°C +10+50_P5	243,1	216,2	12,44	0,44	29,69	30,95	29,70	30,58	1511,50
SH-T°C +10+50_P6	218,4	194,36	12,37	0,39	29,61	30,49	30,54	31,07	1521,38
	Valor médio:		12,44	0,40					

Tabela 60: Ciclo de Gelo-Degelo

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Secção de cola (mm)				
	Húmido	Seco			Lado A		Lado B		Total (mm ²)
					medição 1	medição 2	medição 1	medição 2	
SH Gelo-Degelo_P1	235,798	210,442	12,05	0,44	31,34	30,98	29,48	30,47	1528,38
SH Gelo-Degelo_P2	244,742	218,57	11,97	0,46	29,57	30,44	29,39	30,62	1500,25
SH Gelo-Degelo_P3	216,787	193,529	12,02	0,40	29,91	30,63	28,89	29,43	1485,75
SH Gelo-Degelo_P4	223,739	200,198	11,76	0,40	28,94	30,12	29,94	30,66	1495,75
SH Gelo-Degelo_P5	240,369	213,848	12,40	0,46	29,76	30,79	30,65	30,81	1525,13
SH Gelo-Degelo_P6	227,65	203,631	11,80	0,38	29,41	30,24	29,36	30,79	1497,50
	Valor médio:		12,00	0,42					

Tabela 61: Temperatura -15°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Secção de cola (mm)				Total (mm ²)
	Húmido	Seco			Lado A		Lado B		
					medição 1	medição 2	medição 1	medição 2	
SH -15°C_P1	243,2	219,95	10,57	0,33	30,88	31,42	30,61	31,01	1549,00
SH -15°C_P2	229,49	207,389	10,66	0,40	30,07	30,75	30,16	31,45	1530,38
SH -15°C_P3	233,41	209,81	11,25	0,40	29,46	30,13	29,89	30,85	1504,13
SH -15°C_P4	231,94	210,26	10,31	0,45	29,22	30,03	29,38	30,51	1489,25
	Valor médio:		10,61	0,39					

Tabela 62: Temperatura 40°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Secção de cola (mm)				Total (mm ²)
	Húmido	Seco			Lado A		Lado B		
					medição 1	medição 2	medição 1	medição 2	
SH 40°C_P1	232,58	209,258	11,15	0,50	28,89	30,6	28,75	29,71	1474,38
SH 40°C_P2	209,55	188,08	11,42	0,40	28,53	29,9	28,14	29,29	1448,25
SH 40°C_P3	237,65	213,738	11,19	0,50	29,12	30,01	28,51	29,32	1462,00
SH 40°C_P4	237,83	213,56	11,36	0,43	28,75	29,42	29,22	29,81	1465,00
	Valor médio:		11,28	0,46					

Tabela 63: Temperatura 60°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Secção de cola (mm)				Total (mm ²)
	Húmido	Seco			Lado A		Lado B		
					medição 1	medição 2	medição 1	medição 2	
SH 60°C_P1	232,75	211,793	9,90	0,46	29,36	30,66	29,87	30,92	1510,13
SH 60°C_P2	224,49	204,396	9,83	0,45	28,86	29,91	29,11	30,42	1478,75
SH 60°C_P3	245,17	223,435	9,73	0,50	29,76	30,21	29,65	29,48	1488,75
SH 60°C_P4	242,51	220,817	9,82	0,43	29,21	30,07	30,23	31,01	1506,50
	Valor médio:		9,83	0,46					

Tabela 64: Temperatura 100°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Secção de cola (mm)				Total (mm ²)
	Húmido	Seco			Lado A		Lado B		
					medição 1	medição 2	medição 1	medição 2	
SH 100°C_P1	218,2	201,2	8,45	0,46	28,18	29,88	29,28	28,48	1447,75
SH 100°C_P2	225,2	207,9	8,32	0,44	28,35	29,51	25,96	25,98	1372,50
SH 100°C_P3	215,17	199,1	8,07	0,40	31,36	33,20	31,18	31,35	1588,63
SH 100°C_P4	204,19	188,8	8,15	0,40	30,99	31,84	30,28	30,51	1545,25
	Valor médio:		8,24	0,43					

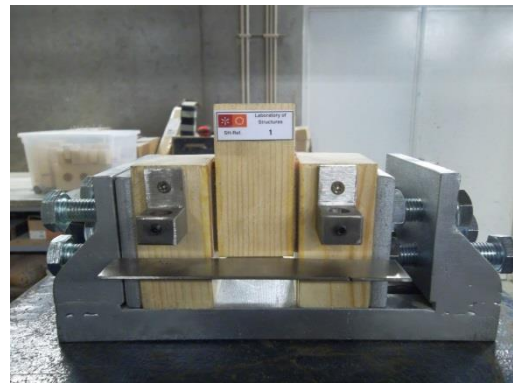
iii) Ensaio Experimental

Quanto aos ensaios de corte, aos provetes foram aparafusados dois suportes para os LVDTs, possibilitando a medição dos deslocamentos da peça central relativamente às laterais, decorrentes do ensaio de compressão (Figura 36 (a)). Os provetes foram ainda colocados num sistema de confinamento ajustável, de forma a garantir que não sofressem deslocamentos transversais indesejáveis durante o ensaio (Figura 36 (b), (c)).

O ensaio dá-se pela compressão do bloco de madeira central, relativamente aos laterais, criando tensões de corte na camada de epóxy utilizada para unir os blocos (Figura 36), e o ensaio acaba quando se dá a rotura da ligação, quer pela cola, quer pela madeira.



(a)



(b)



(c)

Figura 37 (a), (b), (c): Ensaio de corte dos provetes.

Este ensaio dá-se por controlo de deslocamento, e permite determinar, a cada décimo de segundo, a força (N) e o deslocamento (mm) de cada LVDT. A força medida pelo equipamento em cada ensaio, quando dividida pela área total de epóxy anteriormente medida, resulta na tensão a que o provete esteve sujeito. Estes resultados permitiram traçar a relação tensão vs deslocamento, apresentada mais à frente neste documento.

Ensaio de Referência (20°C, 60% HR)

Na Figura 37 pode observar-se o modo de rotura típico dos provetes de corte e o gráfico Tensão vs Deslocamento de um . Os restantes resultados são apresentados na Tabela 65.

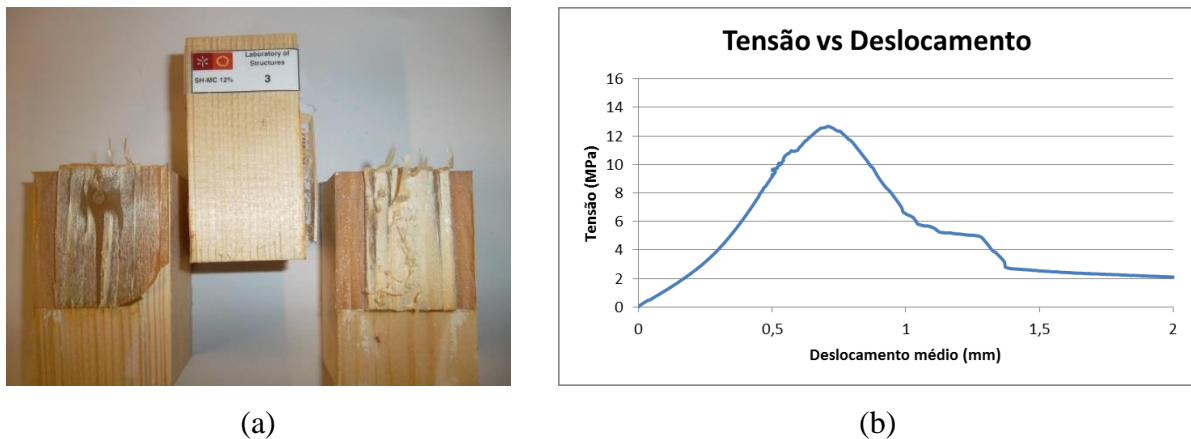


Figura 38: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição de referência. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 65: Resultado do ensaio de corte aos provetes de referência.

Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)	Modo de Rotura
SH-MC 12%_P1	11,88	0,45	20,63	0,39	14,00	Interface
SH-MC 12%_P2	11,47	0,46	18,98	0,33	12,89	Interface
SH-MC 12%_P3	12,63	0,45	19,07	0,71	12,67	Interface
SH-MC 12%_P4	12,19	0,41	23,09	0,74	15,59	Interface + Madeira
valor médio:	12,04	0,44	20,44	0,54	13,79	
desvio padrão:					1,34	
				CV:	9,7%	

De referir que, quando se indica que a rotura se dá pela interface, esta corresponde à separação entre cola e a peça central do provete, deixando a face da cola visível após o ensaio. Quando se refere que a rotura se dá pela madeira, significa que não é possível visualizar a face da cola, uma vez que o material por onde se deu a rotura foi a madeira. A rotura pelo epóxy ocorre quando se há uma fratura na camada de cola. Há ainda o caso de haver uma rotura combinada de mais do que um destes tipos de rotura referidos.

Teor de Humidade 8%

Na Figura 38 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de corte e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 66.



Figura 39: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição TH=8%. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 66: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição TH=8%.

Proвете	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)	Modo de Rotura
SH-MC 8%_P1	8,20	0,38	27,91	0,68	17,86	Interface
SH-MC 8%_P2	8,11	0,48	30,57	0,58	19,42	Madeira
SH-MC 8%_P3	7,88	0,42	26,46	0,72	16,89	Madeira e Interface
SH-MC 8%_P4	8,13	0,40	24,44	0,62	15,10	Madeira e Epoxy
valor médio:	8,07	0,42	25,83	0,58	17,32	
desvio padrão:					1,81	
				CV:	10,5%	

Teor de Humidade de Saturação

Na Figura 39 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de corte e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 67.

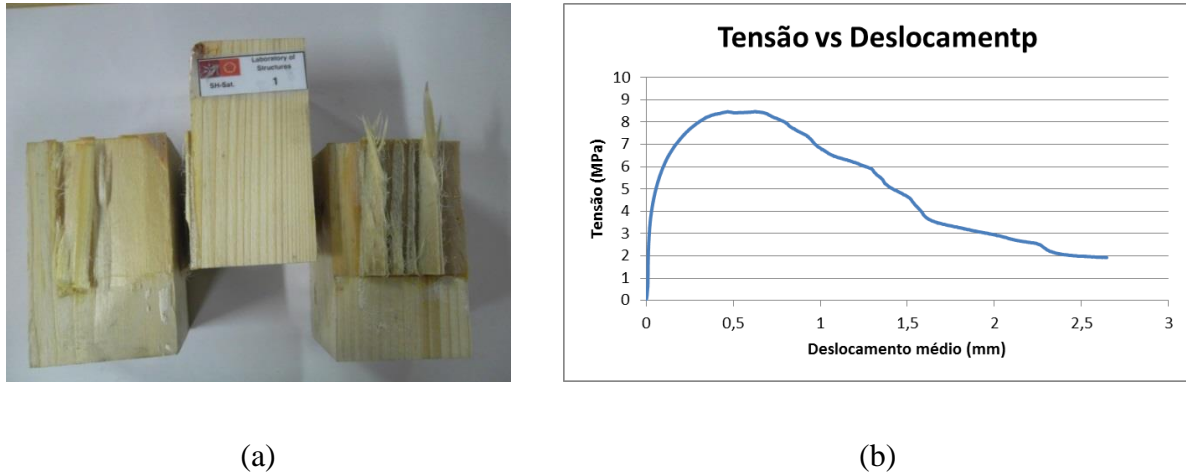


Figura 40: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição TH saturado. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 67: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição TH saturado.

Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)	Modo de Rotura
SH-Sat._P1	47,41	0,38	12,70	0,95	8,73	Madeira
SH-Sat._P2	38,11	0,37	13,58	0,85	9,18	Madeira
SH-Sat._P4	42,88	0,38	12,69	0,63	8,46	Madeira
valor médio:	42,94	0,39	11,24	0,77	8,79	
desvio padrão:					0,36	
				CV:	4,1%	

Ciclo de Gelo-Degelo

Na Figura 40 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de corte e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 68.

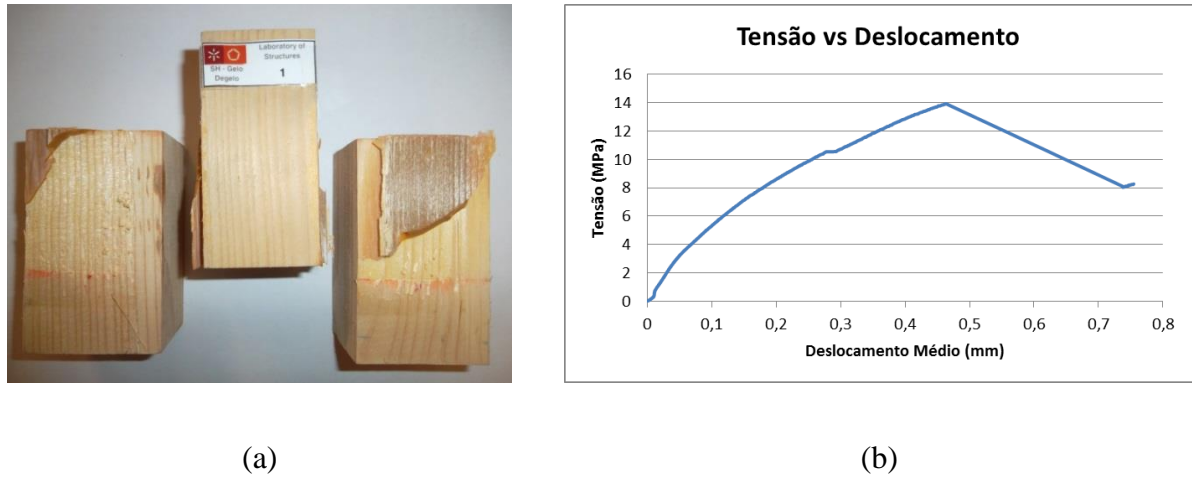


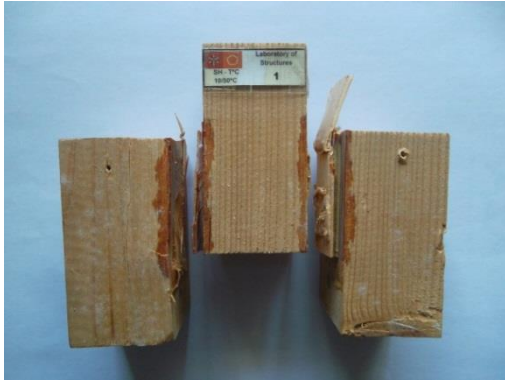
Figura 41: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição de gelo-degelo. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 68: Resultado do ensaio de corte aos provetes de gelo-degelo.

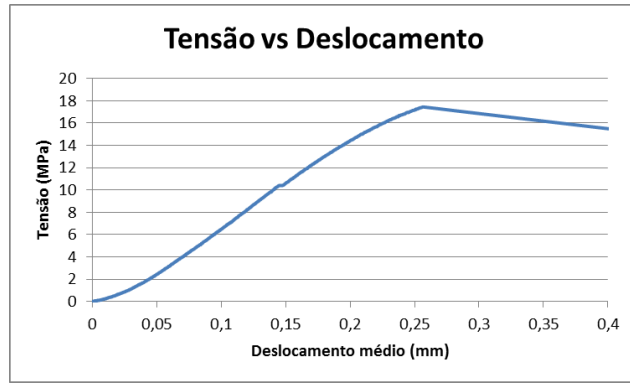
Proвете	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)	Modo de Rotura
SH Gelo-Degelo_P1	12,05	0,44	21,27	0,46	13,92	Époxy
SH Gelo-Degelo_P2	11,97	0,46	25,10	1,38	16,73	Madeira
SH Gelo-Degelo_P3	12,02	0,40	24,08	0,64	16,20	Interface
SH Gelo-Degelo_P4	11,76	0,40	24,58	0,78	16,43	Interface e Madeira
SH Gelo-Degelo_P5	12,40	0,46	22,34	0,48	14,64	Madeira
SH Gelo-Degelo_P6	11,80	0,38	21,89	0,45	14,62	Madeira
valor médio:	12,00	0,42	23,21	0,70	15,42	
desvio padrão:					1,17	
				CV:	8%	

Ciclo de Temperatura +10/+50°C

Na Figura 41 pode observar-se o modo de rotura típico dos provetes de corte e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 69.



(a)



(b)

Figura 42: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição $T= 10/+50^{\circ}\text{C}$ (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 69: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição $T= -15/+60^{\circ}\text{C}$.

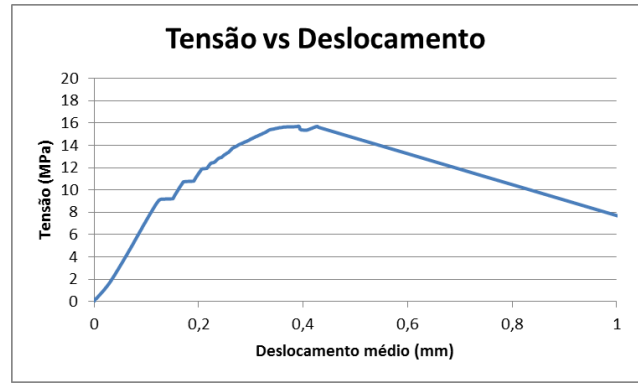
Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)	Modo de Rotura
SH-T°C +10+50_P1	12,87	0,22	24,16	0,17	15,47	Madeira + Époxy
SH-T°C +10+50_P2	12,72	0,45	29,26	0,24	18,75	Interface
SH-T°C +10+50_P3	12,89	0,48	26,90	0,26	17,44	Interface
SH-T°C +10+50_P4	12,09	0,44	24,76	0,20	16,16	Interface
SH-T°C +10+50_P5	12,44	0,44	26,35	0,20	17,43	Madeira + Époxy
valor médio:	12,56	0,40	24,41	0,19	17,05	
desvio padrão:					1,27	
				CV:	7%	

Ciclo de Temperatura -15/+60°C

Na Figura 42 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de corte e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 70.



(a)



(b)

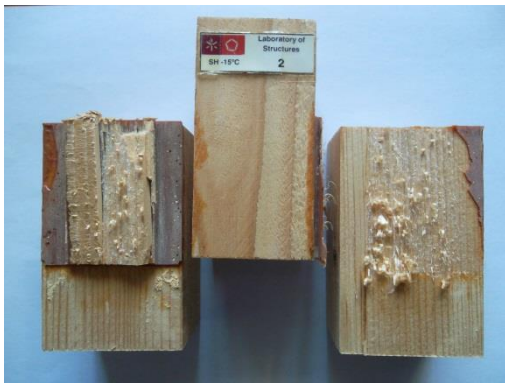
Figura 43: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição T= -15/+60°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 70: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição T= -15/+60°C.

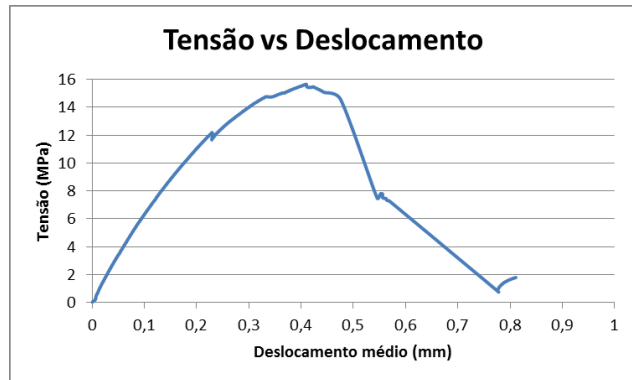
Proвете	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)	Modo de Rotura
SH-T°C -15+60_P2	11,56	0,45	23,55	0,4341	15,684316	Madeira + Interface
SH-T°C -15+60_P3	12,49	0,44	27,18	0,42495	18,657972	Epóxy + Interface
SH-T°C -15+60_P4	12,37	0,48	23,05	0,39155	15,717695	Interface
SH-T°C -15+60_P6	11,32	0,41	28,09	0,6381	18,383508	Madeira
valor médio:	11,960	0,44	23,1717	0,4554	17,1109	
desvio padrão:					1,6318827	
				CV:	10%	

Temperatura -15°C

Na Figura 43 pode observar-se o modo de rotura típico dos provetes de corte e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 71.



(a)



(b)

Figura 44: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição temperatura -15°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 71: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição temperatura -15°C.

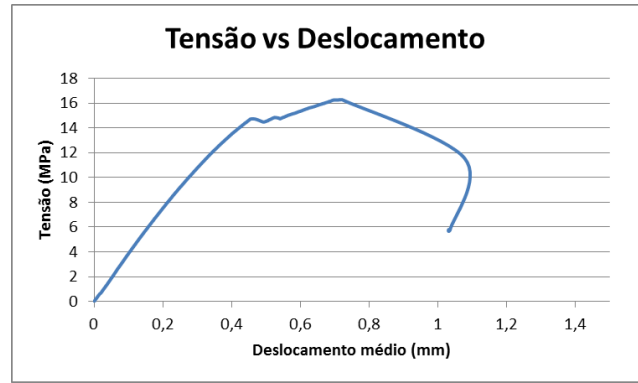
Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)	Modo de Rotura
SH -15°C_P2	10,66	0,40	23,9600	0,4100	15,6563	Interface
SH -15°C_P3	11,25	0,40	21,1100	0,4480	14,0347	Madeira
valor médio:	10,95	0,39	22,5350	0,4290	14,8455	
desvio padrão:					1,146613	
				CV:	8%	

Temperatura 40°C

Na Figura 44 pode observar-se o modo de rotura típico dos provetes de corte e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 72.



(a)



(b)

Figura 45: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição temperatura 40°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

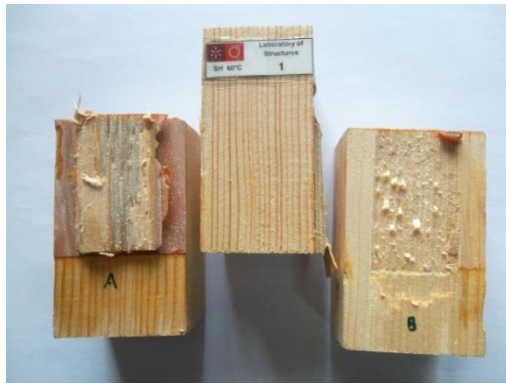
Tal como se pode observar pela foto do provete ensaiado e também pela tabela abaixo, a rotura acontece pela interface entre a cola e as peças laterais de madeira, com arrancamento de pedaços de madeira também.

Tabela 72: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição temperatura 40°C.

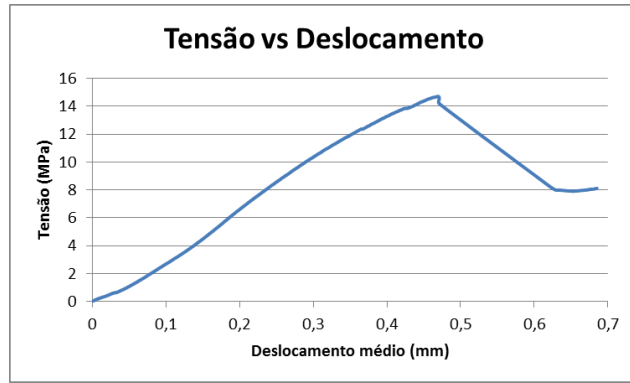
Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)	Modo de Rotura
SH 40°C_P3	11,19	0,50	23,0500	0,5729	15,7661	Interface + Madeira
SH 40°C_P4	11,36	0,43	23,8600	0,7198	16,2867	Interface + Madeira
valor médio:	11,28	0,46	23,4550	0,6463	16,0264	
desvio padrão:					0,3681308	
				CV:	2%	

Temperatura 60°C

Na Figura 45 pode observar-se o modo de rotura típico dos provetes de corte e o gráfico Tensão vs Deslocamento para o provete 1. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 73.



(a)



(b)

Figura 46: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição temperatura 60°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 73: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição temperatura 60°C.

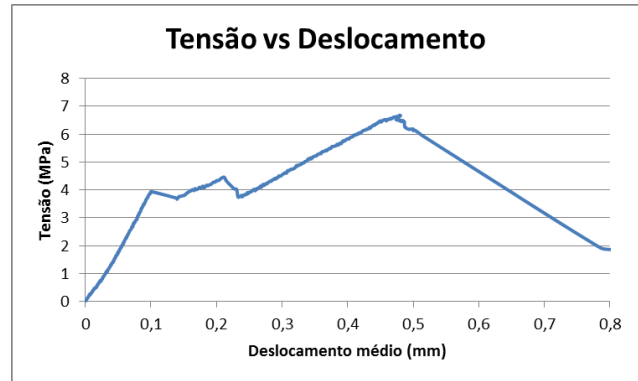
Proвете	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)	Modo de Rotura
SH 60°C_P1	9,90	0,46	22,2200	0,4691	14,7140	Interface
SH 60°C_P3	9,73	0,50	25,3500	0,7776	17,0277	Madeira
SH 60°C_P4	9,82	0,43	26,1200	0,5565	17,3382	Époxy + Madeira
valor médio:	9,82	0,46	23,1175	0,6594	16,3600	
desvio padrão:					1,4338727	
				CV:	9%	

Temperatura 100°C

Na Figura 46 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de corte e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 74.



(a)



(b)

Figura 47: (a) Modo de rotura do ensaio de corte da condição temperatura 100°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 74: Resultado do ensaio de corte aos provetes da condição temperatura 100°C.

Ref.	Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)	Modo de Rotura
2 (75)	SH 100°C_P2	8,32	0,44	10,23	0,10	7,45	Interface
3 (76)	SH 100°C_P3	8,07	0,40	10,62	0,48	6,68	Interface
	valor médio:	8,25	0,43	14,85	0,29	8,72	
	desvio padrão:					2,88	
					CV:	33%	

3.4.4. Ensaios de *Pull-Off*

i) Preparação dos Provetes

No que diz respeito à preparação dos provetes para ensaio de *pull-off*, utilizaram-se placas de madeira de dimensão 350x160x45 mm³, nas quais se colocaram moldes em PVC (Figura 47 (a)), e onde se verteu resina epóxy, de forma a criar três discos de cola com diâmetro de 50mm e espessura de 2mm (Figura 47 (b)). Dos moldes fazem parte, também, uns discos no mesmo material, que se colocam por cima da cola vertida, fazendo transbordar o excesso. Isto garante que a quantidade de epóxy em cada molde e o formato dos discos se mantém o mais homogéneo e estandardizado possível (Figura 47 (c)). Os provetes são, então, mantidos num local seco e fresco, a curar durante cerca de um mês. Ao fim deste processo, passa-se à segunda fase da preparação dos mesmos, que consiste em acoplar aos discos de cola uns cilindros de aço, com 50mm de diâmetro e 600g de peso. Estes cilindros foram colados à resina em estudo com um outro tipo de epóxy, *Sikadur 32 N* [10] de cor cinzenta, tal como se pode observar na Figura 47 (d) e possuem uma abertura roscada (Figura 47 (e)), que permitirá a ligação do provete com o sistema de arrancamento, durante o ensaio de *pull-off*.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 48 (a) – (e): Preparação dos provetes para ensaio de *Pull-off*.

ii) Propriedades Físicas dos Provetes

De seguida apresentam-se as tabelas-resumo das propriedades dos provetes por tipo de condição de exposição.

Relativamente aos ensaios de *pull-off*, cada placa de madeira contém três discos de epóxy, ou seja, três provetes. Assim, as medidas da massa dos provetes, teor de humidade na madeira e massa volúmica da mesma, são relativas às placas P1 e P2, compreendendo três provetes cada. Para além disso, são apresentadas as medidas do diâmetro de cada disco de epóxy, para futuro cálculo da tensão instalada na interface dos materiais. As tabelas-resumo (Tabelas 75 a 84) são apresentadas seguidamente.

Tabela 75: Teor de Humidade 8%

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Largura do Disco 1 (mm)				Largura do Disco 2 (mm)				Largura do Disco 3 (mm)			
	Seco	Húmido			lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área
P1 (11)	1083,80	1172,34	8,2%	0,47	50,10	49,44	49,77	1945,47	50,08	48,62	49,35	1912,78	50,19	48,62	49,41	1917,04
P2 (12)	1034,80	1122,68	8,5%	0,41	49,94	48,81	49,38	1914,71	50,99	49,12	50,06	1967,82	50,09	48,85	49,47	1922,09
Valores médios:			8,3%	0,44												

Tabela 76: Teor de Humidade 12% (Referência)

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Largura do Disco 1 (mm)				Largura do Disco 2 (mm)				Largura do Disco 3 (mm)			
	Seco	Húmido			lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área
P1 (21)	1025,47	1151,27	12,3%	0,44	50,19	48,60	49,40	1916,27	49,66	48,52	49,09	1892,67	50,72	48,28	49,50	1924,42
P2 (22)	1032,32	1161,94	12,6%	0,47	50,25	50,07	50,16	1976,08	49,92	48,44	49,18	1899,62	49,93	50,06	50,00	1963,10
Valores médios:			12,4%	0,46												

Tabela 77: Teor de Humidade Saturado

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Largura do Disco 1 (mm)				Largura do Disco 2 (mm)				Largura do Disco 3 (mm)			
	Seco	Húmido			lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área
P1 (SN)	1055,96	1483,61	40,5%	0,44	50,24	49,69	49,97	1960,75	50,13	49,56	49,85	1951,34	50,22	49,58	49,90	1955,65
P2 (25)	1002,61	1435,95	43,2%	0,43	50,08	50,00	50,04	1966,64	50,06	50,02	50,04	1966,64	49,64	49,76	49,70	1940,00
Valores médios:			41,9%	0,43												

Tabela 78: Ciclo de Temperaturas -15/+60°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Largura do Disco 1 (mm)				Largura do Disco 2 (mm)				Largura do Disco 3 (mm)			
	Seco	Húmido			lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área
P1 (10)	1052,40	1160,28	10,3%	0,49	49,66	48,52	49,09	1892,67	49,84	48,64	49,24	1904,26	49,74	48,68	49,21	1901,94
P2 (13)	943,20	1045,68	10,9%	0,44	49,92	48,44	49,18	1899,62	49,80	48,45	49,13	1895,37	49,83	48,54	49,19	1900,01
Valores médios:			10,6%	0,47												

Tabela 79: Ciclo de Temperaturas +10/+50°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Largura do Disco 1 (mm)				Largura do Disco 2 (mm)				Largura do Disco 3 (mm)			
	Seco	Húmido			lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área
P1 (7)	967,90	1082,30	11,8%	0,42	50,27	49,66	49,97	1960,75	49,85	49,43	49,64	1935,32	50,18	49,51	49,85	1951,34
P2 (8)	996,70	1121,00	12,5%	0,44	50,28	49,17	49,73	1941,96	50,25	48,98	49,62	1933,37	49,34	50,21	49,78	1945,86
Valores médios:			12,1%	0,43												

Tabela 80: Ciclo de Gelo-Degelo

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Largura do Disco 1 (mm)				Largura do Disco 2 (mm)				Largura do Disco 3 (mm)			
	Seco	Húmido			lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área
P1 (2)	1011,40	1125,50	11,3%	0,43	49,66	48,52	49,09	1892,67	49,66	48,52	49,09	1892,67	50,18	49,51	49,85	1951,34
P2 (20)	1027,70	1147,10	11,6%	0,43	49,92	48,44	49,18	1899,62	49,92	48,44	49,18	1899,62	49,34	50,21	49,78	1945,86
Valores médios:			11,4%	0,43												

Tabela 81: Temperatura -15°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Largura do Disco 1 (mm)				Largura do Disco 2 (mm)				Largura do Disco 3 (mm)			
	Seco	Húmido			lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área
P1 (15)	2674,26	2929,30	9,5%	0,41	50,25	50,07	50,16	1976,08	50,06	49,96	50,01	1964,28	49,93	50,06	50,00	1963,10
P2 (17)	2548,00	2796,40	9,7%	0,34	50,08	50,00	50,04	1966,64	50,06	50,02	50,04	1966,64	49,64	49,76	49,70	1940,00
Valores médios:			9,6%	0,38												

Tabela 82: Temperatura 40°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Largura do Disco 1 (mm)				Largura do Disco 2 (mm)				Largura do Disco 3 (mm)			
	Seco	Húmido			lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área
P1 (14)	1093,70	1212,00	10,8%	0,48	50,17	49,31	49,74	1943,13	50,01	49,67	49,84	1950,95	50,35	49,50	49,93	1957,61
P2 (1)	1138,80	1266,00	11,2%	0,48	50,24	49,69	49,97	1960,75	50,13	49,56	49,85	1951,34	50,22	49,58	49,90	1955,65
Valores médios:			11,0%	0,48												

Tabela 83: Temperatura 60°C

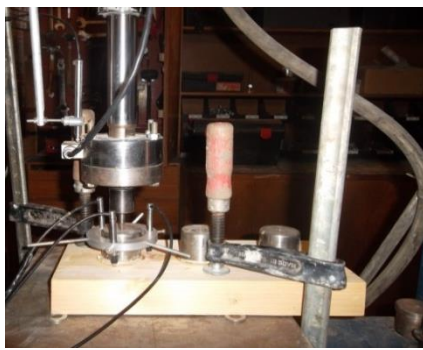
Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Largura do Disco 1 (mm)				Largura do Disco 2 (mm)				Largura do Disco 3 (mm)			
	Seco	Húmido			lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área
P1 (18)	932,60	1018,00	9,2%	0,44	49,88	49,68	49,78	1946,25	50,20	49,79	50,00	1963,10	49,89	49,74	49,82	1948,99
P2 (19)	999,60	1087,90	8,8%	0,45	49,99	49,66	49,83	1949,77	49,78	49,71	49,75	1943,52	49,83	49,70	49,77	1945,08
Valores médios:			9,0%	0,44												

Tabela 84: Temperatura 100°C

Provete	Peso (g)		HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Largura do Disco 1 (mm)				Largura do Disco 2 (mm)				Largura do Disco 3 (mm)			
	Seco	Húmido			lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área	lado 1	lado 2	média	área
P1 (23)	878,97	948,90	8,0%	0,38	50,23	48,58	49,41	1917,04	50,13	48,34	49,24	1903,87	50,34	48,08	49,21	1901,94
P2 (24)	926,54	1002,90	8,2%	0,45	50,19	48,60	49,40	1916,27	50,14	48,61	49,38	1914,71	50,72	48,28	49,50	1924,42
Valores médios:			8,1%	0,41												

iii) Ensaio Experimental

No que respeita ao ensaio de *pull-off*, antes deste se iniciar, os provetes de madeira foram seguros através de grampos (Figura 48 (a)), para impedir que se deslocassem durante o ensaio, enquanto a máquina promove o arrancamento dos cilindros de aço, testando, assim, a resistência da ligação colada. Previamente ao ensaio foram ainda colocados uns anéis ajustáveis em torno de cada um dos cilindros de aço, que servem de suporte a três LVDTs, os quais medirão os deslocamentos decorrentes dos ensaios (Figura 48 (b)).



(a)



(b)

Figura 49 (a) e(b): Ensaio de *pull-off* de arrancamento de discos de cola.

Quando todo este sistema está montado, o aspecto geral é o que se apresenta na Figura 49, e aí dá-se o arrancamento das peças de metal coladas à madeira, com a medição da força necessária para ocorrer a rotura, o tempo decorrido de ensaio e o deslocamento relativo que a peça sofre em relação à face da madeira.



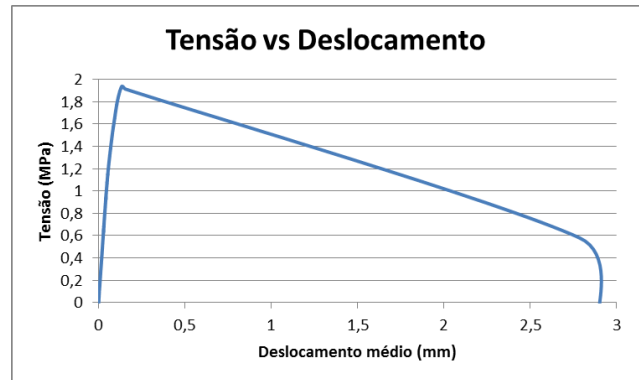
Figura 50: Equipamento utilizado para o ensaio de *pull-off*.

Ensaio de Referência (20°C, 60% HR)

Na Figura 50 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-off* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um dos provetes. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 85.



(a)



(b)

Figura 51: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-off* da condição de referência. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 85: Resultado do ensaio de *pull-off* aos provetes de referência.

Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)			Deslocamento máximo (mm)			Tensão Máxima (MPa)			Modo de Rotura		
			Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3
P1 (21)	12,27%	0,4429	3,7170	4,0520		0,1358	0,1709					Madeira	Madeira	
P2 (22)	12,56%	0,4690	2,8660	2,8560	3,2680	0,1478	0,1260	0,1582	1,4503	1,5035	1,6647	Madeira	Madeira	Madeira
Média:	12,41%	0,4560	3,352			0,148			1,540					
Desvio Padrão:									0,112					
								CV:	7%					

Em todos os casos, para todos os provetes do ensaio de *pull-off*, a rotura aconteceu sempre pela madeira, como se poderá constatar seguidamente.

Teor de Humidade 8%

Na Figura 51 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-off* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 86.

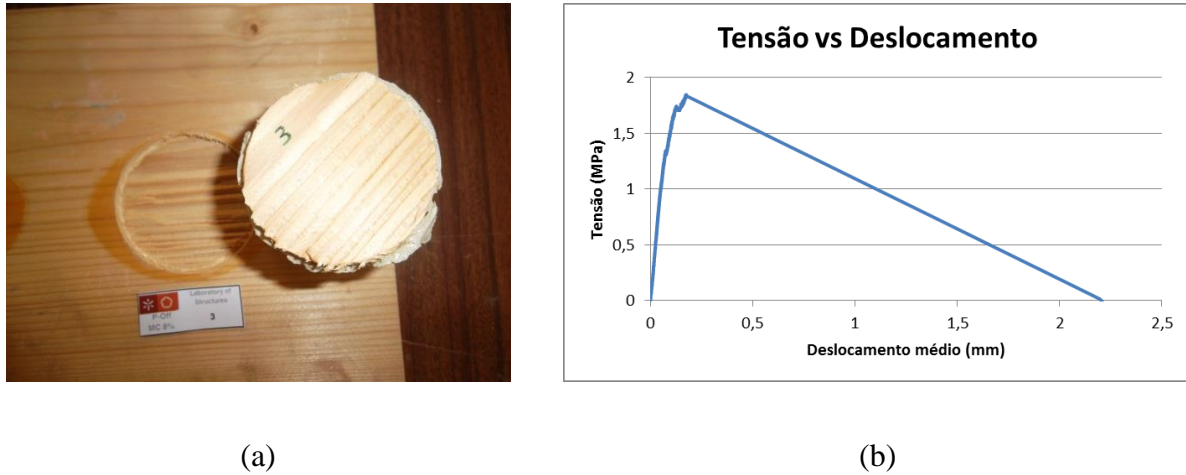


Figura 52: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-off* da condição TH=8%. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 86: Resultado do ensaio de *pull-off* aos provetes da condição TH=8%.

Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)			Deslocamento máximo (mm)			Tensão Máxima (MPa)			Modo de Rotura		
			Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3
P1 (11)	0,0817	0,4666		3,5460	3,5377		0,1710	0,1752		1,8539	1,8454		Madeira	Madeira
P2 (12)	0,0849	0,4147	3,5018	2,7273	4,0356	0,3322	0,1367	0,1493	1,8289		2,0996	Madeira	Madeira	Madeira
Média:	0,0833	0,4406	3,470			0,193			1,907					
Desvio Padrão:										0,129				
									CV:	7%				

Teor de Humidade de Saturação

Na Figura 52 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-off* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 87.

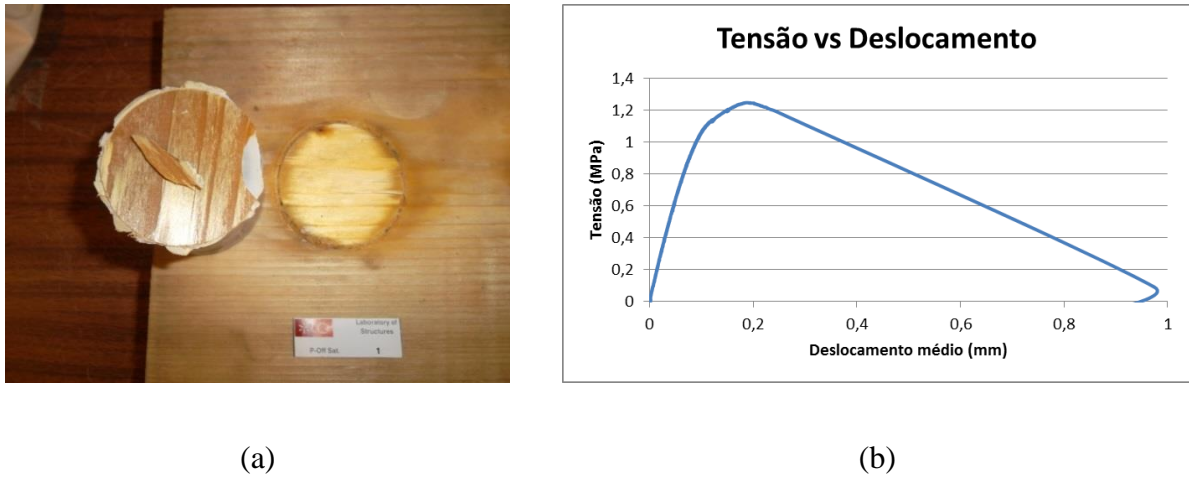


Figura 53: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-off* da condição TH saturado (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 87: Resultado do ensaio de *pull-off* aos provetes da condição TH saturado

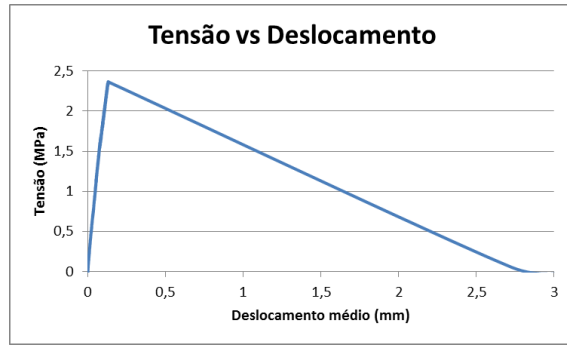
Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)			Deslocamento máximo (mm)			Tensão Máxima (MPa)			Modo de Rotura		
			Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3
P1 (SN)	40,50%	0,4442	2,4480	2,7670	2,1310	0,1875	0,2643	0,2155	1,2485	1,4180		Madeira	Madeira	Madeira
P2 (25)	43,22%	0,4257	2,1650	2,7130	3,0280	0,2043	0,2780	0,1579		1,3795	1,5608	Madeira	Madeira	Madeira
Média:	41,86%	43,49%	2,542			0,218			1,402					
Desvio Padrão:									0,129					
								CV:	9%					

Ciclo de Gelo-Degelo

Na Figura 53 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-off* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 88.



(a)



(b)

Figura 54: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-off* da condição de gelo-degelo. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 88: Resultado do ensaio de *pull-off* aos provetes de gelo-degelo.

Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)			Deslocamento máximo (mm)			Tensão Máxima (MPa)			Modo de Rotura		
			Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3
P1 (2)	11,28%	0,4261	4,4809	4,5501	4,8875	0,1308	0,0983	0,1767	2,3675	2,4040	2,5047	Madeira	Interface	Madeira
P2 (20)	11,62%	0,4332	5,2831	4,7105		0,2103	0,1448		2,7811	2,4797		Interface	Madeira	
Média:	11,45%	0,4297	4,782			0,152			2,507					
Desvio Padrão:									0,163					
								CV:	6%					

No caso dos provetes 2 e 4, estes foram os únicos provetes ensaiados ao arrancamento por *pull-off* que apresentaram rotura pela interface. As imagens abaixo (Figura 54 (a) e (b)) demonstram o modo de rotura para ambos os casos. O facto de os provetes se encontrarem saturados pode ser a explicação para que a rotura se desse pela interface, já que tal não aconteceu com os provetes sujeitos a outros tipos de condições de exposição.



(a)



(b)

Figura 55: Rotura pela interface dos provetes 2 e 4 no ensaio de *pull-off*.

Ciclo de Temperatura +10/+50°C

Na Figura 55 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-off* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 89.

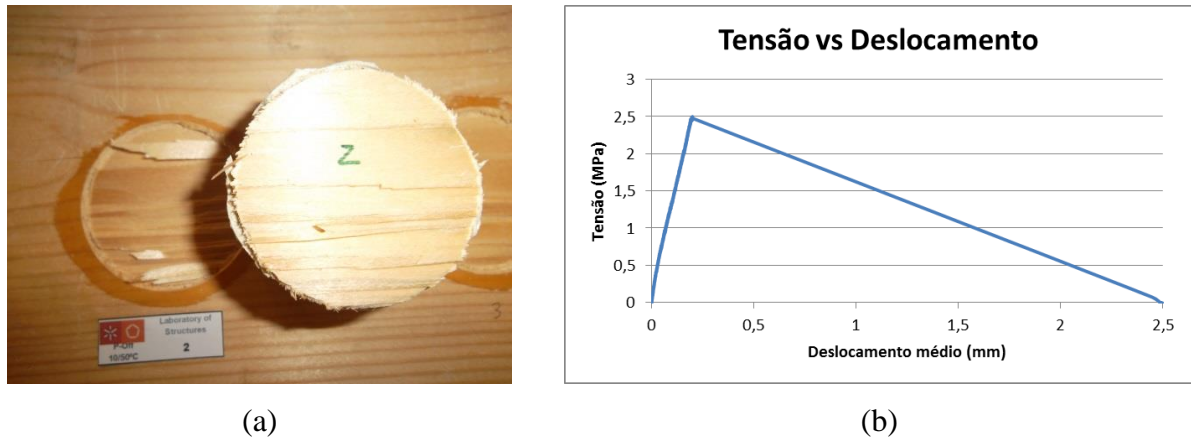


Figura 56: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-off* da condição T= 10/50°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 89: Resultado do ensaio de *pull-off* aos provetes da condição T= 10/50°C.

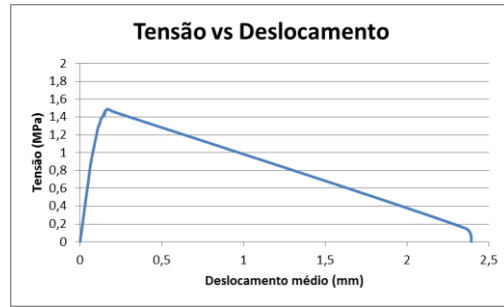
Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)			Deslocamento máximo (mm)			Tensão Máxima (MPa)			Modo de Rotura			
			Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	
P1 (7)	11,82%	0,4231		4,8377			0,2002			2,4997				Madeira	
P2 (8)	12,47%	0,4355		4,3399	4,6773		0,1437	0,2378		2,2447	2,4037			Madeira	Madeira
Média:	12,15%	0,4293		4,6183			0,1939			2,3827					
Desvio Padrão:										0,128791071					
									CV:	5%					

Ciclo de Temperatura -15/+60°C

Na Figura 56 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-off* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 90.



(a)



(b)

Figura 57: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-off* da condição T= -15/+60°C. (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 90: Resultado do ensaio de *pull-off* aos provetes da condição T= -15/+60°C.

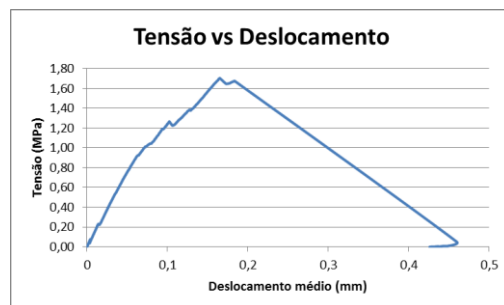
Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)			Deslocamento máximo (mm)			Tensão Máxima (MPa)			Modo de Rotura		
			Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3
P1 (10)	10,25%	0,4876		3,5360	2,6660		0,1600	0,1470			1,4017		Madeira	Madeira
P2 (13)	10,87%	0,4446	2,8280	2,7970	2,8480	0,1717	0,2173	0,1404	1,4887	1,4757	1,4989	Madeira	Madeira	Madeira
Média:	10,56%	0,4661	2,935			0,167			1,466					
Desvio Padrão:											0,044			
								CV:			3%			

Temperatura -15°C

Na Figura 57 pode ver-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-off* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 91.



(a)



(b)

Figura 58: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-off* da condição temperatura -15°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 91: Resultado do ensaio de *pull-off* aos provetes da condição temperatura -15°C

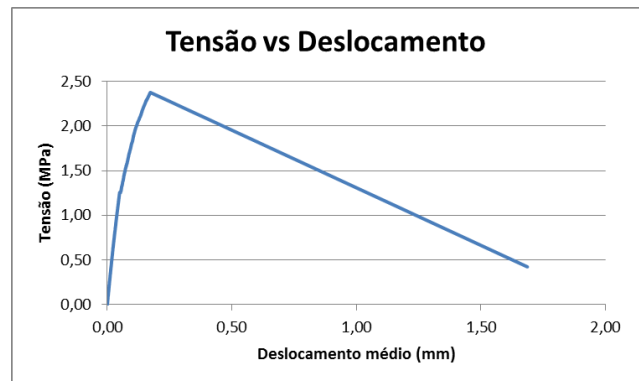
Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)			Deslocamento máximo (mm)			Tensão Máxima (MPa)			Modo de Rotura		
			Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3
P1 (15)	9,54%	0,4128	3,3645	3,3578	3,1310	0,1650	0,2006	0,1472	1,7026	1,7094	1,5949	Madeira	Madeira	Madeira
P2 (17)	9,75%	0,3391			3,9498			0,1201			2,0359			Madeira
Média:	9,64%	0,3760	3,4508			0,1582			1,7607					
Desvio Padrão:									0,190830895					
								CV:	11%					

Temperatura 40°C

Na Figura 58 pode observar-se o modo de rotura típica dos provetes de *pull-off* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 92.



(a)



(b)

Figura 59: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-off* da condição temperatura 40°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 92: Resultado do ensaio de *pull-off* aos provetes da condição temperatura 40°C

Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)			Deslocamento máximo (mm)			Tensão Máxima (MPa)			Modo de Rotura		
			Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3
P1 (21)	10,82%	0,4760	4,6188	4,0613		0,1728	0,1281		2,3770	2,0817		Madeira	Madeira	
P2 (22)	11,17%	0,4792		4,7820			0,1631			2,4506			Madeira	
Média:	10,99%	0,4776	4,487			0,155			2,303					
Desvio Padrão:									0,195					
								CV:	8%					

Temperatura 60°C

Na Figura 59 pode observar-se o modo de rotura tipo dos provetes de *pull-off* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 93.

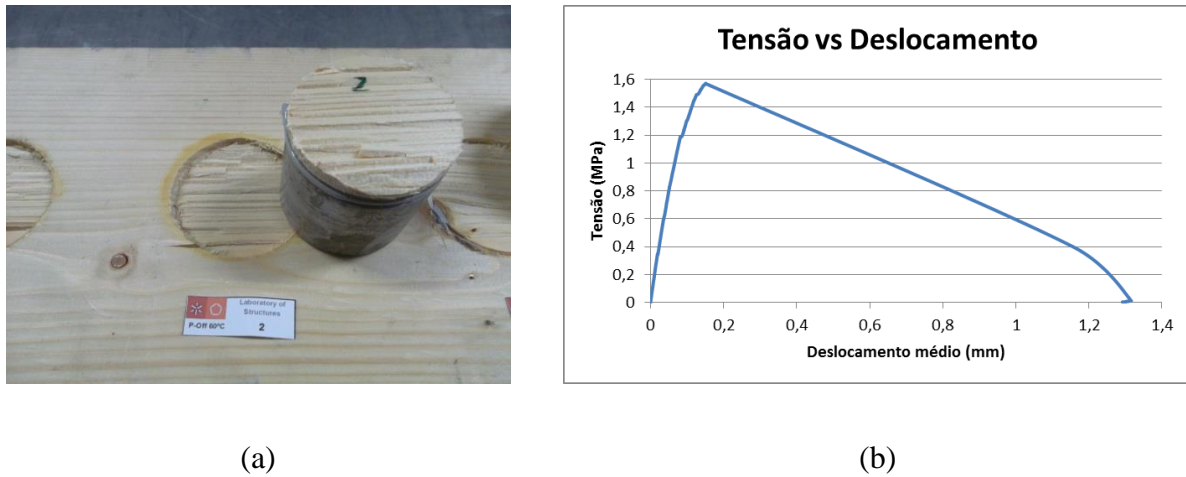


Figura 60: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-off* da condição temperatura 60°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 93: Resultado do ensaio de *pull-off* aos provetes da condição temperatura 60°C

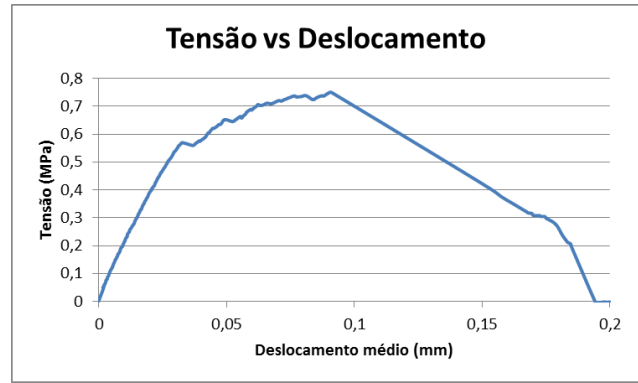
Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)			Deslocamento máximo (mm)			Tensão Máxima (MPa)			Modo de Rotura			
			Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	
P1 (18)	9,16%	0,4386	3,0595	3,0610	3,2983	0,1514	0,1322	0,1634	1,5720	1,5593	1,6923	Madeira	Madeira	Madeira	
P2 (19)	8,83%	0,4487	3,6523	2,5855	2,3285	0,1642	0,1333	0,1419	1,8732			Madeira	Madeira	Madeira	
Média:	9,00%	0,4436	2,998			0,148			1,674						
Desvio Padrão:									0,146						
									CV:	9%					

Temperatura 100°C

Na Figura 60 pode observar-se o modo de rotura típica dos provetes de *pull-off* e o gráfico Tensão vs Deslocamento para um provete. Os restantes resultados são apresentados na Tabela 94.



(a)



(b)

Figura 61: (a) Modo de rotura do ensaio de *pull-off* da condição temperatura 100°C (b) Gráfico Tensão vs Deslocamento.

Tabela 94: Resultado do ensaio de *pull-off* aos provetes da condição temperatura 100°C

Provete	HR (%)	Densidade γ (g/cm ³)	Força máxima (kN)			Deslocamento máximo (mm)			Tensão Máxima (MPa)			Modo de Rotura		
			Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 1	Disco 2	Disco 3
P1 (23)	7,96%	0,3760		1,4283			0,0910			0,7502			Madeira	
P2 (24)	8,24%	0,4532	2,4055	1,8295		0,1002	0,0930			0,9555		Madeira	Madeira	
Média:	8,10%	0,4146	1,888			0,095			0,853					
Desvio Padrão:										0,145				
								CV:		17%				

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Introdução

O capítulo “Apresentação e Discussão de Resultados” tem por objectivo analisar os resultados de todos os ensaios efectuados e apresentados no capítulo anterior, comparando-os e traçando padrões, que justificarão as conclusões do capítulo seguinte.

Em primeiro lugar, foi necessário estudar-se o tempo de cura mínimo a aplicar para provetes de ensaio. Nesse sentido, começou-se por, no capítulo anterior, realizar o ensaio de tração dos provetes de epóxy, explicando como este foi levado a cabo, bem como as características dos provetes ensaiados e as suas tensões e extensões de rotura, para diferentes tempos de cura. As conclusões desse estudo, apresentam-se sistematizadas no sub-capítulo 4.2.

De seguida, outro dos parâmetros iniciais a analisar foi o comprimento de ancoragem mais favorável para a realização dos ensaios de *pull-out*. Mais uma vez, o ensaio de *pull-out* foi descrito no capítulo 5, com a apresentação das características e resultados dos ensaios em provetes com comprimentos de ancoragem variáveis. Esses resultados são, no sub-capítulo 4.3. analisados, de forma a determinar um comprimento a ser utilizado para os restantes ensaios da campanha laboratorial.

No parte 4.4. deste capítulo, já começa a análise dos resultados dos ensaios de tracção dos provetes de cola, quando sujeitos a todos os tipos de condições de exposição, adoptando-se já o tempo de cura dos provetes que foi determinado em 4.2.

O sub-capítulo 4.5. diz respeito aos ensaios de *pull-out*, quando os provetes são sujeitos às diversas condições de exposição, e já adoptando o comprimento de ancoragem definido em 4.3.

Nos sub-capítulos 4.6. e 4.7., faz-se a análise comparativa dos ensaios de corte e de *pull-off*, respectivamente.

Para cada tipo de ensaio acima referido, estabeleceram-se gráficos comparativos que relacionam os valores médios máximos da tensão (e extensão, no caso dos ensaios de tração

da cola) com o tipo de condição de exposição em estudo (humidades, temperaturas ou variações cíclicas).

4.2. Resultados dos ensaios de tração de provetes de cola com diferentes tempos de cura

Nesta secção irá analisar-se os resultados dos ensaios de tração dos provetes de epóxy, através de tabelas-resumo já apresentadas no capítulo anterior, com os valores máximos, tensão e extensão na força máxima atingidos em cada ensaio. Para cada tempo de cura obteve-se uma média de entre esses valores máximos de cada provete, e através da mesma, estabeleceu-se uma comparação entre as várias condições em estudo, tal como pode ser observado nas Figuras 61 e 62.



Figura 62: Gráfico-resumo da extensão máxima média para cada tempo de cura definido

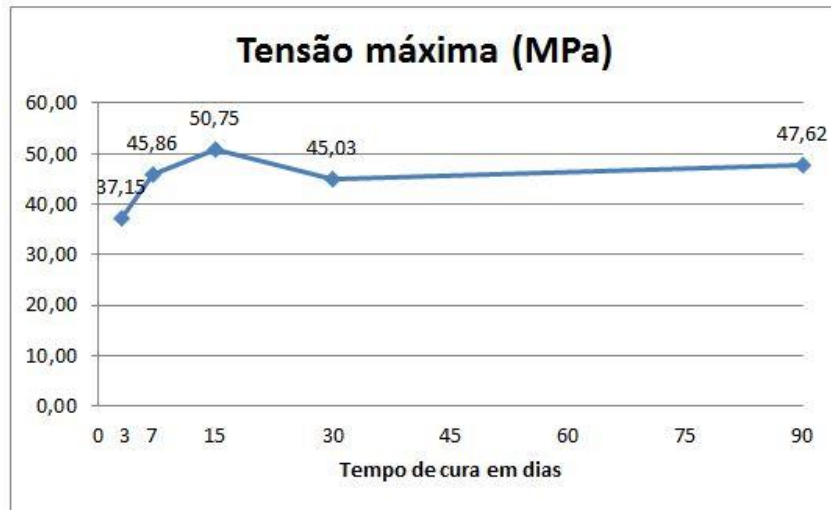


Figura 63: Gráfico-resumo da tensão máxima média para cada tempo de cura definido

Como se pode observar pelos gráficos anteriores, verifica-se que a resina em estudo apresentou um pico de resistência quando ensaiada aos quinze dias de cura. Tal facto é visível sobretudo no gráfico das extensões, onde é possível que a resina apresente um tempo de cura suficiente para resistir a cerca de 50MPa de tensão.

No entanto, não seria ideal adoptar o tempo de cura de quinze dias de cura para a cola utilizada nos provetes a ensaiar nas várias condições, já que estaria a apostar-se num valor demasiado optimista, que poderia conduzir a resultados pouco fiáveis quando comparados com a aplicação em obra deste material. Assim sendo, dado que se observa uma descida da resistência à tensão e à extensão após os quinze dias de cura, com uma ligeira recuperação dos valores após três meses, optou-se por um tempo de cura de um mês para todos os provetes fabricados para os diversos ensaios. Quando possível, adoptou-se um tempo de cura superior, mas dado o grande volume de ensaios realizados ao longo deste trabalho experimental, nem sempre se pôde deixar o processo de cura prolongar-se por três meses. Em todo o caso, os ensaios de corte, *pull-out* e *pull-off* para a condição de referência (Teor de Humidade de 12%) realizaram-se com recurso a provetes com um tempo de cura da cola superior a três meses.

4.3. Resultados dos ensaios de *pull-out* para determinação do comprimento de ancoragem

Antes de se iniciarem os ensaios de *pull-out* de arrancamento de varões em provetes de madeira para as diversas condições de ensaio, foi necessário determinar qual o comprimento de ancoragem dos varões mais favorável. Seria aquele que garantisse uma boa resistência ao arrancamento, tentando ainda utilizar-se o menor comprimento possível, de forma a ter ligações eficientes e económicas.

Para tal, realizaram-se os ensaios de *pull-out* a quatro comprimentos diferentes de ancoragem, tal como anteriormente descrito, e os resultados são os que se apresentam seguidamente. As tabelas baixo mostram a força necessária para o arrancamento de cada varão, bem como a tensão instalada na interface entre a cola e a madeira (Tensão interface c-m) e na interface entre a cola e o varão de aço (Tensão interface c-v), aquando da rotura da ligação.

Para que fosse possível criar-se uma comparação entre os vários casos em estudo, estabeleceu-se uma média dos valores máximos, correspondentes ao momento de rotura do provete, valor esse, objecto de comparação, tal como se mostra na Figura 63.

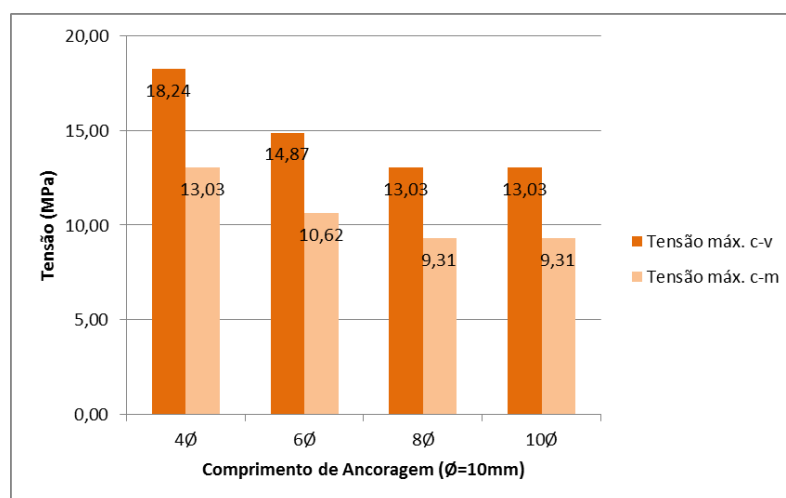


Figura 64: Gráfico-resumo da tensão instalada para cada comprimento de ancoragem.

O gráfico anterior demonstra claramente que as maiores tensões são atingidas quando se utiliza um comprimento de ancoragem de 40 ou 60mm. Optou-se por utilizar um comprimento mínimo de 60mm em todos os ensaios de *pull-out* seguintes, de forma a evitar eventuais escorregamentos do varão por ancoragem insuficiente, no caso de se optar por 40mm.

Fazendo uma ressalva relativamente ao tipo de gráfico utilizado, neste caso, um gráfico de barras, ao contrário dos gráficos de dispersão utilizados para os provetes de epóxy, a diferença no tipo de gráfico utilizado prende-se apenas com a maior facilidade em analisar dados diferentes, de acordo com o tipo de ensaio em estudo.

4.4. Resultados dos ensaios de tração em provete de cola para várias condições de exposição

Para as diferentes condições de exposição a que os provetes foram sujeitos, apresentaram-se no capítulo anterior as tabelas-resumo com os valores máximos da tensão e extensão de cada provete, para a campanha de variação da humidade dos provetes (8%, 12% e Saturação), campanha de ciclos de humidade e temperatura (T=10/50°C e 90% Humidade Relativa; ciclo de Gelo-Degelo e T=-15/60°C, com Humidade Relativa variável), e campanha de variação de temperatura (-15°C, 20°C, 40°C, 60°C, 100°C).

De referir que os nomes atribuídos às campanhas de humidades não significa que os provetes de cola se encontrassem realmente a esse teor de humidade (TH). Os TH foram medidos nos provetes de madeira que estiveram expostos às mesmas condições que os provetes de cola aqui referidos. Assim, quando se fala, por exemplo em TH de saturação (TH Sat.), não significa que as moléculas de resina epóxy estejam saturadas, mas sim que as fibras de madeira dos provetes imersos em água em conjunto com estes provetes de cola se encontravam saturadas. Por uma questão de concordância de nome, optou-se por atribuir a mesma designação a todos os provetes que sofreram o mesmo tipo de exposição.

O mesmo acontece com as condições TH 8% e TH 12%. Apesar de não ter sido determinado o teor de humidade dos provetes de epóxy, estes tomaram a mesma designação dos provetes de madeira sujeitos às mesmas condições.

Os gráficos apresentados em seguida [Figuras 64 a 69] mostram a evolução da Tensão e da Extensão em cada uma das três campanhas levadas a cabo, o que permitirá chegar a conclusões sobre o efeito de cada tipo de exposição na durabilidade das colagens estruturais.

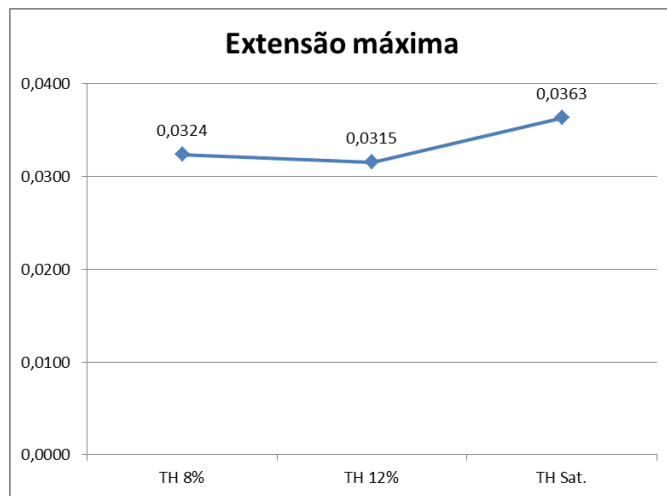


Figura 65: Variação da extensão em provetes de epóxy sujeitos a variações de humidade

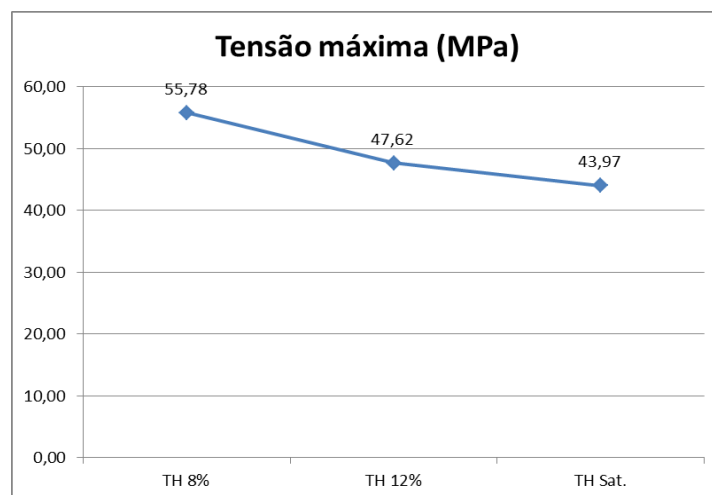


Figura 66: Variação da tensão em provetes de epóxy sujeitos a variações de humidade

A análise dos gráficos anteriores permite concluir que a variação de humidade afecta a resistência da resina epoxídica, no que respeita à sua tensão e extensão máxima. Tal como afirma Cavalli *et al.* [12], a humidade pode afectar a capacidade resistente da resina, e deve ter-se alguma cautela na utilização dos materiais sob condições de serviço, sendo de elevada importância um projecto específico para este tipo de situação.

No que diz respeito à tensão máxima, verifica-se que um teor de humidade de 8%, correspondente a uma humidade relativa do ar de aproximadamente 40% e temperatura de cerca de 15°C, faz aumentar a tensão máxima em cerca de 15%, relativamente ao teor de humidade de referência de 12% (60% de HR e 20°C de temperatura).

Já a imersão dos provetes em água provoca uma diminuição em cerca de 8% da tensão máxima média, relativamente aos valores de referência de 12%.

Seguidamente, apresentam-se os gráficos comparativos das campanhas de ciclos de humidade e temperatura (Gelo-Degelo, T=-15/60°C e HR 90%, e T=-15/60°C) em comparação com a condição de referência, designada por TH 12% (T=20°C e HR 60%).

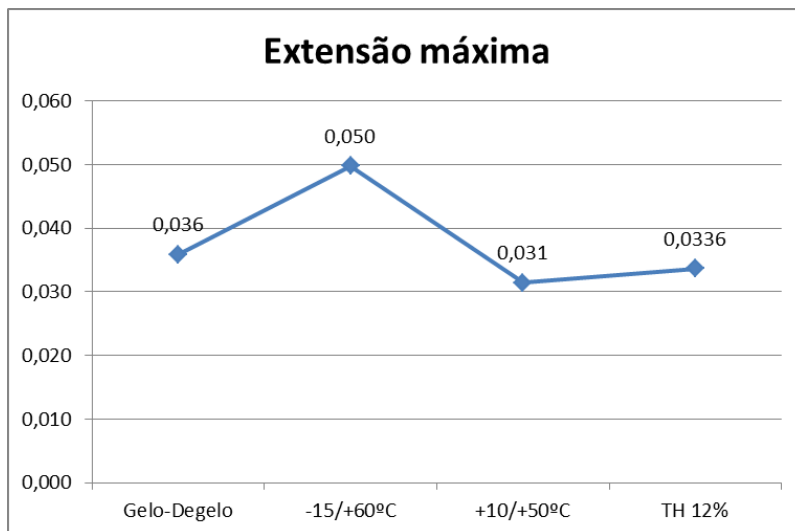


Figura 67: Variação da extensão em provetes de epóxy sujeitos a ciclos de temperatura e humidade

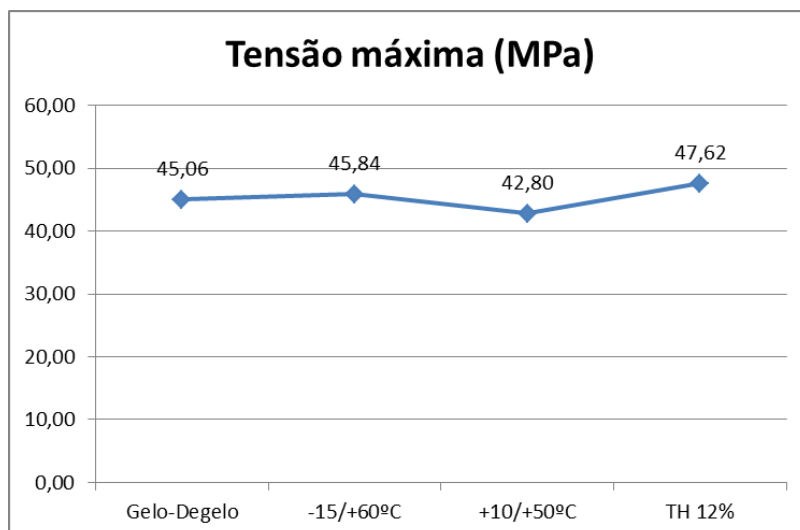


Figura 68: Variação da tensão em provetes de epóxy sujeitos a ciclos de temperatura e humidade

Pela análise dos gráficos 66 e 67, pode verificar-se que as campanhas de ciclos de gelo-degelo e $T=10/50^{\circ}\text{C}$ afectaram a capacidade de extensão dos provetes de resina epoxídica numa escala bastante superior ao verificado no ciclo $T=-15/+60^{\circ}\text{C}$. No que toca à tensão máxima, pode observar-se que a variação de valores entre os ciclos não é suficiente para se poder afirmar qual o tipo de exposição que compromete mais a durabilidade das colagens. Porém, quando se analisam os valores da extensão, onde ocorre um pico na condição $T=-15/+60^{\circ}\text{C}$, este facto pode explicar-se por ser a condição que implica uma menor humidade dos provetes. Com efeito, no ciclo de gelo-degelo, ocorreu a molhagem sucessiva dos provetes, e na condição $T=10/50^{\circ}\text{C}$, estes estavam sujeitos a uma humidade relativa de 90%.

Para se estudar mais detalhadamente o efeito das temperaturas na capacidade resistente da cola, efectuou-se a campanha de exposição dos provetes a diversas temperaturas, cujos resultados são expostos de seguida.

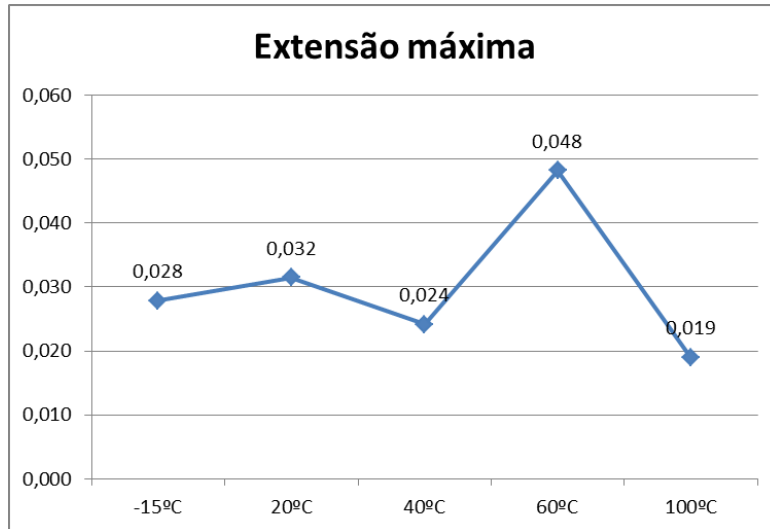


Figura 69: Variação da extensão em provetes de epóxy sujeitos a temperaturas distintas.

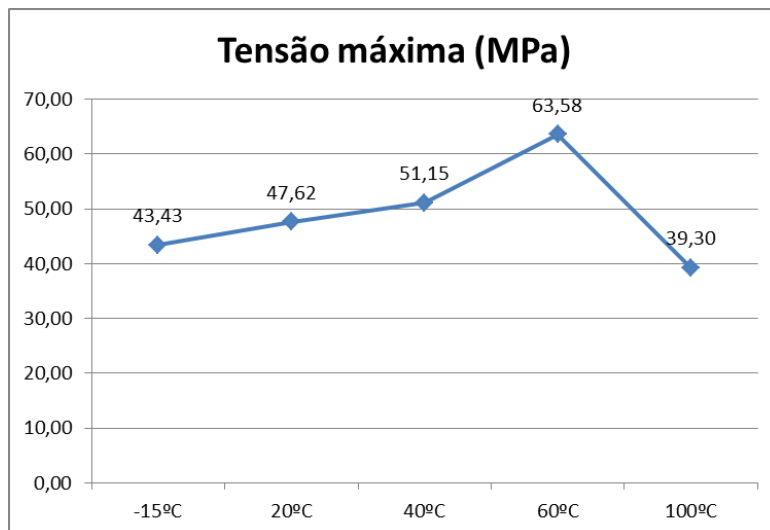


Figura 70: Variação da tensão em provetes de epóxy sujeitos a temperaturas distintas.

Pode afirmar-se claramente, pela observação dos valores de extensão e tensão do material, que existe uma maior resistência da cola quando sujeita a valores de temperatura próximos do ponto de transição vítrea, neste caso, para a condição $T=60^{\circ}\text{C}$. Pela bibliografia consultada, e dado que este trabalho não versou sobre o estudo da transição vítrea (T_g) deste tipo de cola em particular, estima-se que a T_g se situe em valores próximos dos 60°C , ou até superiores. Nesse

sentido, estudou-se ainda uma temperatura de 100°C, numa tentativa de englobar valores de T_g superiores ao referido.

Valores de temperaturas inferiores a 60°C apresentam uma variação pouco significativa em termos de extensão, mas no que toca à tensão máxima, verifica-se que até aos 60°C, quanto maior a temperatura, maior a capacidade resistente à tração dos provetes. Após se ultrapassar o ponto de amolecimento da cola, no caso dos provetes ensaiados a 100°C, há uma diminuição clara dos valores de tensão e extensão, devido à perda de capacidade resistente da resina epóxy pelo calor.

O aumento gradual da resistência até aos 60°C pode explicar-se pelo fenómeno de pós-cura, já anteriormente referido [18], no qual a resina ganha uma capacidade resistente extra, a curto prazo, quando submetida a valores elevados de temperatura sem sofrerem nenhum tipo carregamento, tal como acontece no período de tempo em que os provetes se encontram nas estufas, expostos às condições de 40°C e 60°C de temperatura.

Uma última nota relativamente à análise desta campanha de ensaios diz respeito à temperatura de -15°C. Pode verificar-se que, em termos de tensões e extensões, os valores não diferem muito daqueles tomados como referência (20°C), pelo que não se pode concluir que tenha existido uma degradação efectiva da ligação colada devido às temperaturas negativas.

4.5. Resultados dos ensaios de corte

À semelhança do subcapítulo anterior, e à luz dos dados já anteriormente apresentados, compilaram-se os resultados dos ensaios nos gráficos que a seguir se expõem (Figuras 70 a 72)

Para a condição referente à variação do teor de humidade dos provetes, estabeleceu-se uma comparação entre as três situações estudadas, e apresenta-se abaixo o gráfico que traduz essa relação (Figura 70). Optou-se pela utilização de gráficos de barras apenas para uma maior facilidade de comparação dos valores das tensões máximas médias para cada condição de exposição.

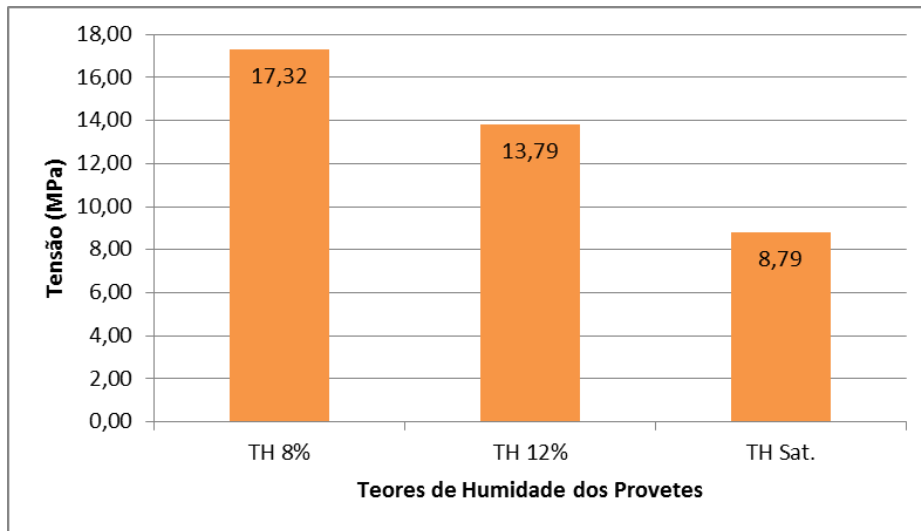


Figura 71: Gráfico de comparação entre a tensão máxima média para a campanha de variação do teor de humidade

Tal como se verificou com os ensaios de tração dos provetes de cola, neste caso, a humidade dos provetes afectou a capacidade resistente das ligações. Assim, pode estimar-se que quanto maior o teor de humidade nos provetes, menor a tensão necessária para a rotura. Esse valor diminui para quase metade quando se comparam os provetes sujeitos à humidade ambiente de 8% e aqueles cujas fibras se encontram saturadas.

De facto, segundo Wilson [25] e Leont'ev [26], a tensão de corte diminui linearmente com o aumento do teor de humidade da madeira, até ao ponto de saturação das fibras.

O gráfico seguinte diz respeito ao efeito das variações cíclicas de temperatura e humidade nos provetes de corte, em comparação com o valor de referência (teor de humidade 12%).

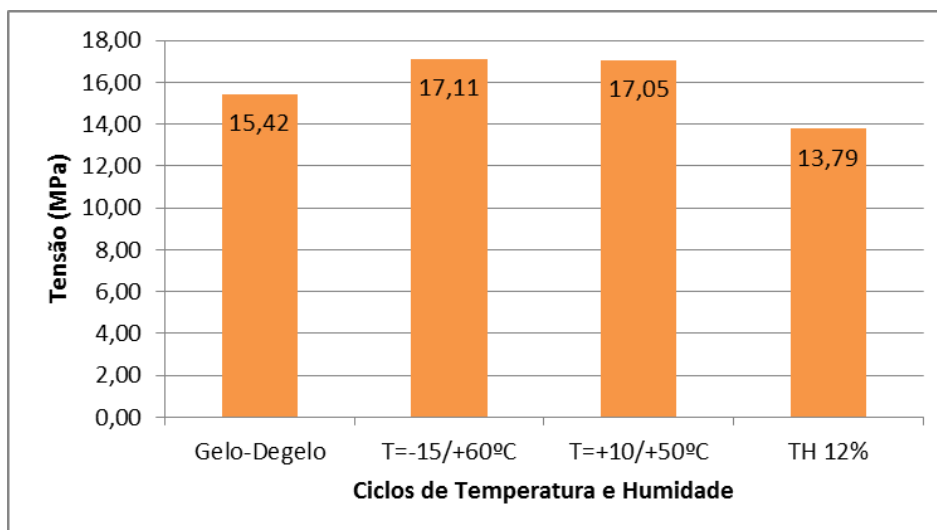


Figura 72: Gráfico de comparação entre a tensão máxima média para a campanha de ciclos de temperatura e humidade

Os valores médios de tensão máxima necessária para o rompimento das ligações, para as três campanhas de ciclos (Figura 71), apresentam valores muito idênticos entre eles. Apesar de se tratarem de valores correspondentes a uma média entre as tensões de cada provete, os valores das três campanhas de ciclos poderiam até apresentar uma maior variabilidade, o que não se verificou, uma vez que os valores máximos médios são bastante próximos.

Ao contrário do que aconteceu no ensaio de tração dos provetes de epóxy, neste caso não se verificou uma maior tensão no caso do ciclo de temperatura -15/60°C. Os modos de rotura dos provetes das três campanhas também foram apresentaram algumas diferenças, não havendo um padrão de rotura uniforme. No entanto, há a notar que os valores máximos médios superam, em todos os casos, o valor de referência de 13,79 MPa (Figura 71).

De seguida é mostrado o gráfico representativo da variação da tensão máxima média com os valores de temperaturas.

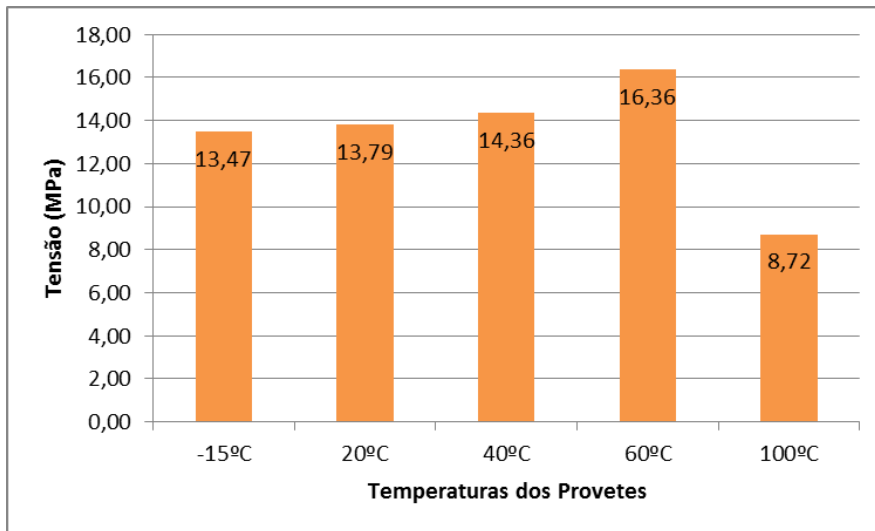


Figura 73: Gráfico de comparação entre a tensão máxima média para a campanha de temperaturas variáveis.

À semelhança do que já se havia verificado através dos ensaios de tração da cola, observa-se um aumento da tensão máxima no caso dos provetes sujeitos à temperatura de 60°C. No caso das temperaturas de -15°C, 20°C e 40°C, os valores máximos médios são muito equivalentes, sofrendo um aumento gradual, o que já não ocorre quando comparando com o valor da tensão a 100°C, como seria de esperar.

O valor da temperatura de transição vítrea da cola situa-se num valor estimado próximo dos 60°C, tal como já foi referido anteriormente neste trabalho, e tal facto faz com que o material perca capacidade resistente quando esse valor é ultrapassado. No entanto, tal como se verificou nos provetes de cola, o fenómeno de pós cura pode ter conduzido a um ganho de resistência ao corte quando os provetes são sujeitos a temperaturas próxima da transição vítrea.

4.6. Resultados dos ensaios de *pull-out*

Para as diferentes condições de exposição a que os provetes foram sujeitos, apresentaram-se no capítulo anterior as tabelas-resumo com os valores máximos da força, tensão na interface entre a cola e a madeira (Tensão c-m) e na interface entre a cola e o varão (Tensão c-v), e ainda o modo de rotura correspondente.

Apresentam-se, de seguida os resultados relativos à campanha de variação da humidade (8%, 12% e Saturação), campanha de ciclos (T=10/50°C, T=-15/60°C e Gelo-Degelo), e campanha de variação de temperatura (-15°C, 20°C, 40°C, 60°C, 100°C), através dos gráfico constantes nas Figuras 73 a 75.

É apenas de referir que foram adoptados comprimentos de ancoragem de 60mm, após o estudo prévio do comprimento mais adequado. No caso da condição Teor de Humidade 12%, optou-se por utilizar os valores correspondentes ao A. L 6Ø, já ensaiados, pois, tanto o comprimentos de ancoragem como a condição de exposição eram coincidentes.

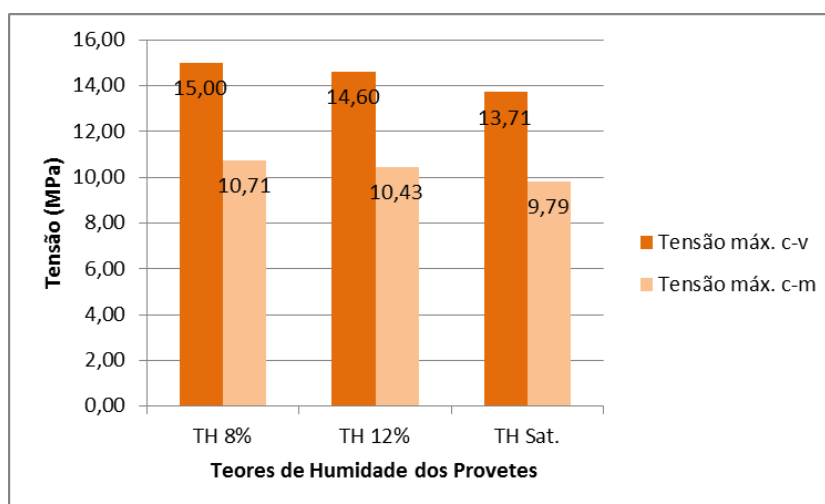


Figura 74: Gráfico de comparação entre os vários Teores de Humidade dos provetes

À semelhança do que já ocorreu nos ensaios de corte, denota-se uma ligeira quebra no valor máximo das tensões com o aumento do teor de humidade dos provetes. Tal resultado era expectável, pois a humidade afecta a madeira, e por conseguinte, a ligação colada entre a madeira e o varão. Em todo o caso, a rotura dos provetes ocorreu sempre pela madeira, ou pela interface entre a cola e a madeira, pelo que não se pode afirmar claramente que exista uma degradação das colagens com o aumento da humidade, no caso específico destes ensaios.

Em seguida apresenta-se o gráfico que relaciona as campanhas de ciclos e os valores de referência.

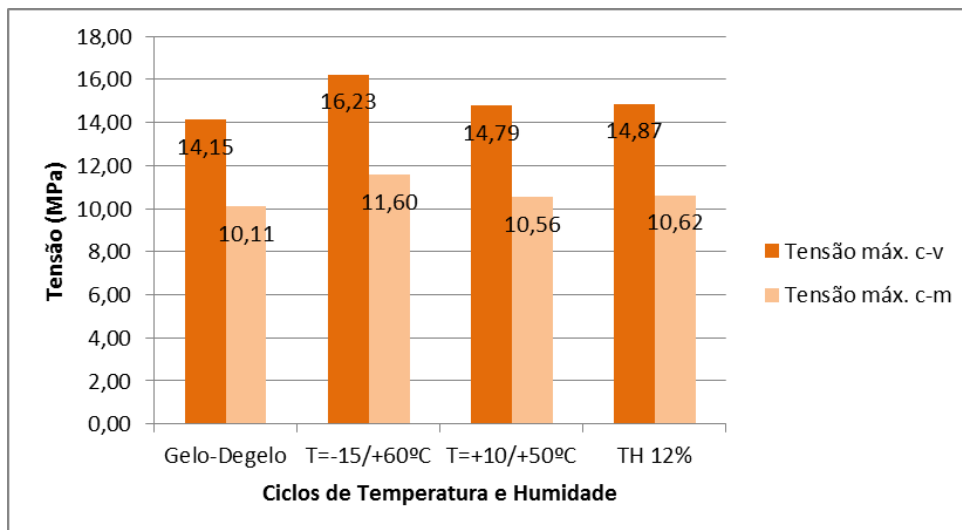


Figura 75: Gráfico de comparação entre os vários Ciclos de temperatura e humidade

Uma análise aos valores das tensões máximas relativas à campanha de ciclos resulta na conclusão de que, à semelhança do que aconteceu com os ensaios de corte, os ciclos de temperatura -15/60°C e 10/50°C apresentam valores mais elevados do que a campanha de gelo-degelo, mas não muito superiores. Em comparação com os valores de referência (Figura 74), não se pode afirmar que seja uma perda muito significativa da resistência ao arrancamento, bem como não se pode concluir que este tipo de exposição através ciclos de

gelo-degelo, ou ciclos de temperaturas, afectem substancialmente a durabilidade das colagens estruturais.

Abaixo encontra-se o gráfico relativo aos diferentes valores de temperatura a que os provetes de ensaio *pull-out* foram sujeitos.

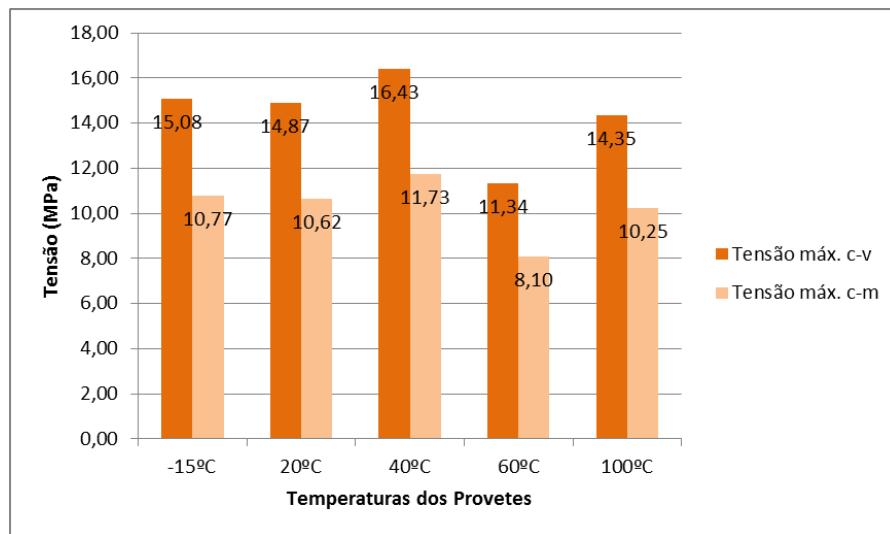


Figura 76. Gráfico de comparação entre as várias temperaturas dos provetes

Ao contrário do que se verificou nos ensaios anteriores, em que a temperatura de 60°C apresentava os valores de tensão mais elevados, neste ensaio de arrancamento de varões, os provetes sujeitos a esta temperatura são os que apresentam os valores mais baixos, observando-se um pico de tensões máximas naqueles sujeitos a 40°C, e um valor também elevado nos provetes expostos a 100°C.

Isto pode ser explicado devido ao tipo de provetes que constituem este ensaio. Dado que os provetes têm um formato aproximadamente cúbico, com grandes dimensões (100x160x150 mm³), e que a resina se encontra no interior do provete de madeira, pode ter ocorrido uma degradação insuficiente da cola, durante o tempo de exposição estabelecido na câmara a 100°C.

Não era expectável o resultado elevado da tensão no caso dos provetes sujeitos à temperatura de 100°C, face aos resultados obtidos nos outros tipos de ensaios já referidos, uma vez que a sua resistência deveria diminuir. No entanto, para além do facto de a grande dimensão dos provetes impedir que a temperatura afecte directamente a resina, tal como referido anteriormente, este valor pode também ser explicado pelo teor de humidade baixo presente nos provetes. O facto de os provetes serem sidos sujeitos a uma temperatura tão elevada durante o período de exposição, fez com que o teor de humidade nunca recuperasse até aos 12% ideais, pelo que estes provetes necessitariam de ficar mais tempo na câmara de humidade e temperatura controladas, após a exposição na estufa a 100°C. A literatura indica que quanto menor o teor de humidade dos provetes, maior a sua capacidade resistente a tensões, daí este valor atípico de resistência apresentado pelos provetes desta condição.

4.7. Resultados dos ensaios de *pull-off*

Para as diferentes condições de exposição a que os provetes foram sujeitos, as campanhas de variação da humidade dos provetes (8%, 12% e Saturação), campanha de ciclos (T=10/50°C, T=-15/60°C e Gelo-Degelo), e campanha de variação de temperatura (-15°C, 20°C, 40°C, 60°C, 100°C), compilados nos gráficos das Figuras 76 a 78.

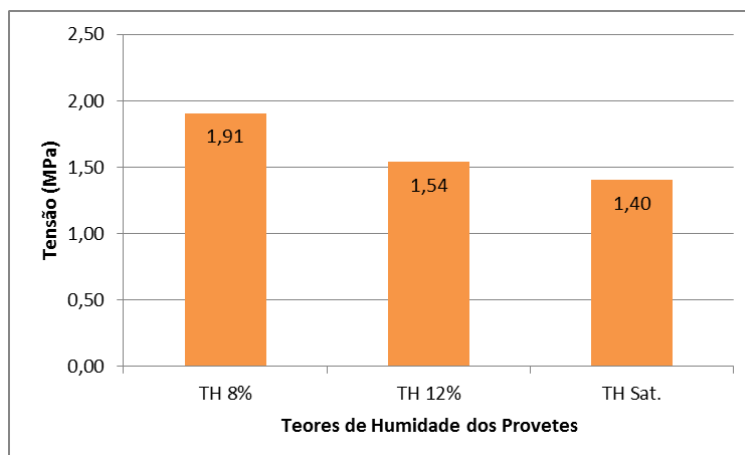


Figura 77: Gráfico de comparação entre as várias humidades relativas dos provetes

Tal como era de esperar, e à semelhança dos ensaios de corte e de *pull-out*, continua a verificar-se que a humidade provoca uma diminuição de resistência, uma vez que o valor da tensão diminui à medida que aumenta a humidade nas fibras da madeira.

Se se estabelecer uma comparação com os ensaios de tração dos provetes compostos apenas por epóxy, onde os teores de humidade não provocavam grande variação na tensão ou extensão dos provetes, poderá pressupor-se que a humidade afecta essencialmente a madeira. No entanto, e uma vez que o objecto deste estudo são as ligações coladas e não apenas a resina epóxy, deve-se prestar atenção à perda de resistência global da ligação, já que afecta a madeira imediatamente à volta do anel de epóxy e do varão de aço. Nesse caso, poderá esperar-se e que a capacidade de carga dos provetes diminuiu globalmente, com o aumento do teor de humidade nos mesmos.

De seguida apresenta-se o gráfico que relaciona os ciclos de humidades e temperaturas e os valores de referência.

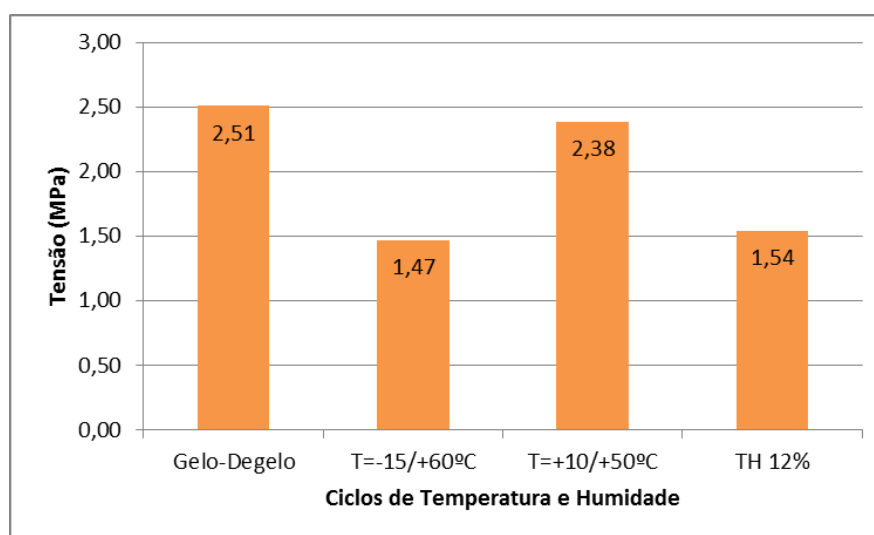


Figura 78: Gráfico de comparação entre os ciclos de temperatura e humidade dos provetes

Dado o presente gráfico comparativo entre os três ciclos de exposição dos provetes, denota-se uma grande semelhança entre os valores da condição gelo-degelo e $T=+10/+50^{\circ}\text{C}$, ao passo que à condição $T=-15/+60^{\circ}\text{C}$ corresponde um valor bastante mais baixo.

Se se fizer uma comparação entre este tipo de ensaio e os referidos anteriormente, observa-se que não é possível traçar uma relação entre os vários tipos de exposição. No ensaio de tração dos provetes de epoxy, a condição $T=-15/+60^{\circ}\text{C}$ apresentava maiores extensões do que a condição gelo-degelo ou a condição $T=+10/+50^{\circ}\text{C}$. Já nos ensaios de corte e de *pull-out*, as três condições apresentavam valores muito próximos, sem grande variação da tensão máxima alcançada pelos provetes.

A principal conclusão que se pode retirar da análise dos gráficos de ciclos de temperaturas, sejam quais forem os tipos de ensaios efectuados é o facto de nenhum dos três ciclos de temperaturas e humidades implicar uma perda muito significativa de resistência relativamente à condição de referência. Em alguns casos, até se verificam valores de tensões mais elevados, o que pode ser explicado pelo facto de os ciclos promoverem uma cura mais eficaz da cola, com a possibilidade de rearranjo das moléculas internas do polímero quando submetido a variações cíclicas de temperatura.

De seguida, o gráfico comparativo das tensões máximas, segundo as várias temperaturas a que os provetes foram sujeitos.

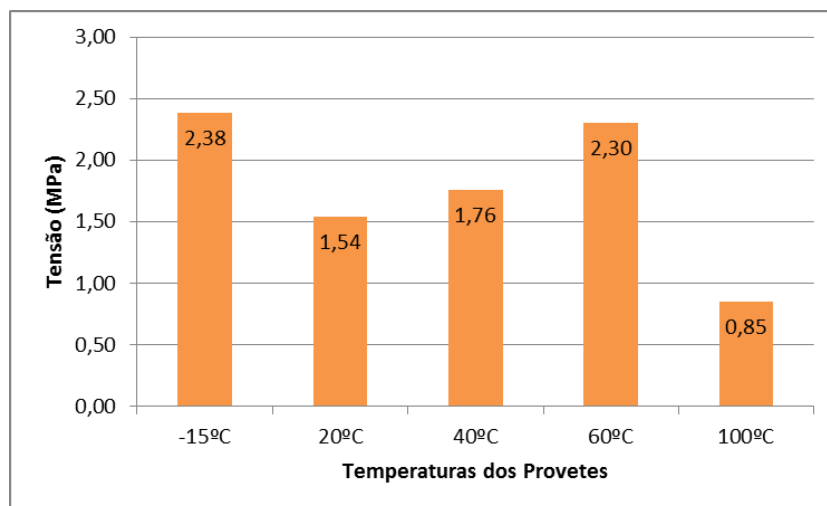


Figura 79: Gráfico de comparação entre as diferentes temperaturas dos provetes

Os valores médios da tensão máxima para as temperaturas positivas (20 a 100°C) estão de acordo com o que seria expectável, de acordo com trabalhos de outros autores, e também de acordo com os resultados obtidos para os outros tipos de ensaios.

O factor surpresa deste ensaio prende-se com a elevada resistência alcançada pelos provetes sujeitos à temperatura negativa de -15°C. Comparativamente aos outros tipos de ensaios, a condição T=-15°C não apresentou uma degradação muito significativa em relação às outras temperaturas estudadas. Deverá futuramente estudar-se mais aprofundadamente o efeito das temperaturas negativas nas colagens estruturais, para poder alcançar-se conclusões sólidas acerca desse efeito.

Em relação à condição 100°C, há uma clara perda de resistência quando os provetes são sujeitos a esta gama de temperaturas, como se pode verificar pelos valores bem mais baixos do que aqueles obtidos nas restantes condições. Este resultado era já esperado, uma vez que a elevada temperatura poderá eventualmente fazer com que a resina ultrapasse o seu ponto de transição vítrea, e perca a sua capacidade de suportar cargas mais elevadas.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A presente Dissertação teve como objectivo estudar quais os factores e de que forma afectavam a durabilidade de colagens estruturais em elementos de madeira, com recurso a uma resina epoxídica. Foram levadas a cabo essencialmente três campanhas de ensaios: a campanha de variação do teor de humidade, a de variação de temperatura, e a de ciclos de exposição a temperaturas e humidades distintos. O estudo da influência da humidade nos provetes contemplou três teores de humidade na madeira: 8%, 12% e saturação. Quanto ao estudo da ação da temperatura, foram submetidos os provetes a -15°C, 20°C, 40°C, 60°C e 100°C. A campanha de ciclos envolveu três tipos de exposição distintos: o efeito do gelo-degelo, a variação entre -15°C e 60°C e ainda variação entre 10°C e 50°C, com uma humidade relativa de 90%. Para cada uma destas condições de exposição dos provetes, foram ainda realizados quatro tipos de ensaios distintos: ensaios de tração a provetes normalizados de epóxy, ensaios de corte por compressão, ensaios de *pull-out* de arrancamento de varões e ensaios de *pull-off* em discos de cola.

O objectivo inicialmente estabelecido para este trabalho foi alcançado, uma vez que foi possível, após um extenso trabalho laboratorial e uma cuidadosa análise dos resultados, traçar uma relação entre os vários teores de humidade e temperatura nas colagens estruturais, percebendo quais aqueles que afectam realmente as ligações, e que devem ser acautelados aquando da aplicação em obra destes materiais e técnicas construtivas. Pôde ainda, com este trabalho, contribuir-se para um estudo mais alargado dos factores que afectam as resinas epoxídicas e a sua aplicação em madeira, como é o caso do estudo dos ciclos de temperaturas, e a inclusão de temperaturas negativas nas hipóteses de ensaio.

Tendo em conta o tipo de resina utilizada (*Mapei Mapewood Gel 120*), estabeleceu-se, adicionalmente uma relação entre os tempos de cura da mesma, para poder prever-se um comportamento estável desta cola quando utilizada a longo prazo. No caso das ligações coladas que incluem varões metálicos, estudou-se, ainda um comprimento de ancoragem que garante ao mesmo tempo uma resistência eficaz ao arrancamento e uma economia do material, ao evitar-se utilizar comprimentos demasiado elevados dos varões.

O que se pode concluir claramente deste estudo é o facto de o teor de humidade dos provetes afectar a durabilidade das ligações entre a cola e a madeira. Quando se ensaiaram provetes padronizados de epóxy à tração, fazendo variar os teores de humidade, verificou-se que a humidade afecta igualmente a resina epoxídica. De facto, segundo Cavalli *et al.* [12], os ensaios de provetes saturados apresentaram valores inferiores aos ensaios de referência, devido aos danos causados pelo efeito da água, tais como o aumento das tensões internas devidas à plastificação e inchaço do adesivo, e a redução da capacidade de carga da madeira, afectada pela humidade.

Tentou estabelecer-se uma comparação entre os três tipos de degradação por ciclos, mas dada a variabilidade das condições, que incluíam gamas de temperatura a variar entre o negativo e o ponto estimado de transição vítrea da cola, humidades relativas de 90% e ciclos de saturação e congelamento dos provetes, não foi possível traçar uma relação conclusiva entre as três campanhas de ciclos. Porém, pode afirmar-se que, globalmente, os provetes sujeitos a ciclos de gelo-degelo ou de temperaturas variáveis não apresentaram resistências médias significativamente inferiores às aquelas tomadas como referência (provetes sujeitos a uma temperatura de 20°C, 60% de humidade relativa e 12% de teor de humidade na madeira).

No que respeita ao estudo alargado da influência da temperatura na capacidade resistente dos provetes, a primeira conclusão a que se pode chegar é o facto de as temperaturas negativas não corresponderem a valores mais baixos de tensão de rotura dos provetes. Isto é, era pretendido inicialmente verificar se temperaturas abaixo de zero iriam afectar a capacidade resistente, quer da resina epoxídica, quer da ligação mista entre cola, madeira e aço, mas o que se atestou foi que os valores das tensões máximas alcançados para temperaturas de -15°C , apesar de ligeiramente inferiores na maioria dos ensaios, não foram muito divergentes daqueles tomados como referência (20°C), apresentando apenas um ligeiro aumento no caso dos ensaios de *pull-off*.

Uma das hipóteses de partida deste trabalho era o facto de a resina epoxídica sofrer uma perda extrema de resistência quando sujeita a temperaturas muito altas, para lá do seu ponto de transição vítrea, tal como apontam estudos de outros autores [3], [5], [11], [14], [15], [17], [18], [27]. Esse facto veio a confirmar-se através dos ensaios de provetes sujeitos à degradação a 100°C , onde se verificou que, tanto em provetes normalizados de cola, como em provetes mistos de epóxy e madeira, ocorreu uma grande redução da tensão máxima em cada provete.

Devido ao facto de este trabalho não se versar sobre a determinação do ponto de transição vítrea exato para a cola em estudo, baseando-se nos estudos de outros autores, é difícil perceber qual o ponto a partir do qual começa realmente a dar-se a degradação acentuada deste tipo de cola por ação da temperatura. Com efeito, a literatura refere valores muito díspares para a T_g , que vão desde os 40°C até aos 70°C . Estima-se, face aos resultados obtidos nos ensaios, que a T_g da cola em estudo se situe perto dos 60°C . À excepção dos ensaios de *pull-out* em varões, em que a tensão máxima verificada ficou abaixo das restantes temperaturas, pôde observar-se neste estudo que existe quase sempre um aumento gradual da resistência das ligações com o aumento da temperatura, tal como explicaram Aicher e Dill-Langer [17], que explicaram que a exposição a uma elevada temperatura sem sofrer carregamentos, resulta num efeito de pós-cura que aumenta a capacidade de carga a curto prazo.

Num comentário final relativo à metodologia experimental levada a cabo, pode afirmar-se que durante uma extensa campanha de ensaios, como aquela que foi realizada no âmbito deste projeto, poderão sempre ocorrer alguns erros que levam a resultados pouco esperados. Dada a

importância do teor de humidade nos provetes, pode afirmar-se que quando estes são ensaiados com um teor de humidade diferente do de referência, como é o caso das campanhas de 60°C ou 100°C, os valores obtidos para a rotura dos provetes podem não ser comparáveis com os restantes. Dá-se como exemplo dos ensaios de *pull-out* de arrancamento de varões em provetes degradados a 100°C. Denota-se uma tensão de rotura nos provetes bastante superior à expectável, uma vez que o teor de humidade presente na madeira era inferior a 12%. Ora, sendo que valores mais baixos de humidade conduzem a valores mais elevados de tensão, e dado o facto de a madeira se encontrar bastante seca devido ao tempo de degradação na estufa a 100°C, os provetes precisariam de mais tempo na câmara climática de temperatura e humidade controladas para atingirem o teor de humidade de referência. Tal não foi possível garantir devido a condicionalismos de tempo.

Como sugestão de outros trabalhos futuros, pode indicar-se um estudo mais aprofundado e mais diversificado em termos de tipos de ensaios no que diz respeito à degradação das colagens estruturais por temperaturas negativas. Sendo que as construções em madeira são amplamente utilizadas em países nórdicos, onde as temperaturas podem atingir muitos graus negativos, seria interessante estudar-se a durabilidade de colagens estruturais em gamas de temperaturas entre os zero e valores mais extremos, como -30°C, ou outra gama de valores mais adequada ao clima verificado nesses países.

Outra via de investigação futura possível passa por estudar ciclos de teores de humidade variáveis nos provetes. O presente trabalho focou-se essencialmente no estudo da degradação por variação da temperatura, mas dado que o teor de humidade na madeira é um factor de influência significativamente a durabilidade das ligações coladas, seria interessante um estudo aprofundado desse tipo de degradação.

6. BIBLIOGRAFIA

-
- [1] M. E. Silva, A. Dias, and J. L. Lousada, *Madeira de Pinho - Características e Utilização*. .
- [2] P. B. Lourenço, J. M. Branco, and H. S. Sousa, *Intervir em Construções Existentes de Madeira*. Guimarães, 2014.
- [3] J. Lartigau, J.-L. Coureau, S. Morel, P. Galimard, and E. Maurin, “Effect of Temperature on the Load Bearing Capacity of Glued-in Rods,” in *World Conference on Timber Engineering*, 2012.
- [4] J. G. Broughton and a. R. Hutchinson, “Effect of timber moisture content on bonded-in rods,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 15, no. 1, pp. 17–25, 2001.
- [5] J. B. Aguiar, A. Camões, and N. F. Vaz, “Effect of temperature on RC elements strengthened with CFRP,” *Mater. Struct.*, vol. 41, no. 6, pp. 1133–1142, Jul. 2008.
- [6] R. Bainbridge, C. Mettem, K. Harvey, and M. Ansell, “Bonded-in rod connections for timber structures - Development of design methods and test observations,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 22, no. 1, pp. 47–59, 2002.
- [7] J. L. Jensen, M. Nakatani, P. Quenneville, and B. Walford, “A simple unified model for withdrawal of lag screws and glued-in rods,” *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 69, no. 4, pp. 537–544, Nov. 2011.
- [8] Silaex Química Ltda., “Silaex Química Ltda.” [Online]. Available: <http://www.silaex.com.br/epoxi.htm>.
- [9] Huntsman, “Sistemas de Resina Epóxi - Guia de Manuseio Seguro.” .
- [10] J. Lousada, M. Noronha, D. Lopes, and I. Auxiliar, “Relações entre Peso , Volume e Densidade para a Madeira de Pinheiro Bravo (Pinus pinaster Ait .) Cultivado em Portugal,” vol. 16, no. 2, pp. 183–196, 2008.
- [11] J. Custódio, J. Broughton, and H. Cruz, “A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 29, no. 2, pp. 173–185, Mar. 2009.
- [12] A. Cavalli, M. Malavolti, A. Morosini, A. Salvini, and M. Togni, “Mechanical performance of full scale steel-timber epoxy joints after exposure to extreme environmental conditions,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 54, pp. 86–92, 2014.
- [13] EN 1995-1-1:2004 (E), “Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings,” *Eurocode 5*. pp. 1–123, 2004.
- [14] K. Richter and R. Steiger, “Thermal Stability of Wood-Wood and Wood-FRP Bonding with Polyurethane and Epoxy Adhesives,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 7, no. 5, pp. 419–426, May 2005.
- [15] J. Lartigau, J.-L. Coureau, S. Morel, P. Galimard, and E. Maurin, “Effect of

- temperature on the mechanical performance of glued-in rods in timber structures,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 57, pp. 79–84, 2015.
- [16] A. H. Buchanan, “Fire resistance of epoxyed steel rods in glulam timber,” in *Proceedings of pacific timber engineering conference*, 1994.
- [17] S. Aicher and G. Dill-Langer, “Influence of moisture, temperature and load duration on performance of glued-in rods,” in *Rilem Symposium 2001 - Joints in Timber Structures*, 2001.
- [18] J. Michels, R. Widmann, C. Czaderski, R. Allahvirdizadeh, and M. Motavalli, “Glass transition evaluation of commercially available epoxy resins used for civil engineering applications,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 77, pp. 484–493, 2015.
- [19] K. Harvey and M. P. Ansell, “Improved Timber Connections Using Bonded-In GFRP Rods,” p. 8, 2003.
- [20] J. Chen, T. Nakamura, K. Aoki, Y. Aoki, and T. Utsunomiya, “Curing of epoxy resin contaminated with water,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 79, no. 2, pp. 214–220, Jan. 2001.
- [21] B. Pizzo, G. Rizzo, P. Lavischi, B. Megna, and S. Berti, “Comparison of thermal expansion of wood and epoxy adhesives,” *Holz als Roh- und Werkst.*, vol. 60, no. 4, pp. 285–290, Aug. 2002.
- [22] “EN 338 Structural timber - Strength classes.” 2003.
- [23] Mapei, “Mapei - Mapewood Gel 120,” vol. 1. pp. 7–10, 2002.
- [24] J. B. Aguiar, *Apontamentos de Materiais de Construção I*. Guimarães, 2007.
- [25] T. Wilson, “Strength-moisture relations for wood. U.S. Dept. of Agriculture.” 1932.
- [26] N. L. Leont’ev, “The strength of wood at varying moisture content. Derev. Prom.” 1960.
- [27] S. Harris, “Fire Resistance of Epoxy-grouted Steel Rod Connections in Laminated Veneer Lumber (LVL) by,” *Fire Eng.*, no. Lvl, 2004.