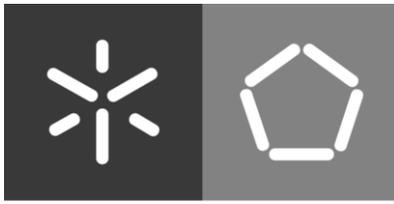


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Barbosa Coutinho da Silva

**Caracterização de painéis sanduíche
compósitos híbridos para a reabilitação
de pisos de edifícios**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Barbosa Coutinho da Silva

**Caracterização de painéis sanduíche
compósitos híbridos para a reabilitação
de pisos de edifícios**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

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

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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

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

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição
CC BY**

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

AGRADECIMENTOS

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

Em primeiro lugar, ao Professor José Sena Cruz, orientador científico da dissertação, gostava de dirigir o meu agradecimento por toda a disponibilidade, pelos ensinamentos transmitidos, pelo apoio motivacional demonstrado ao longo da execução da dissertação e do trabalho experimental realizado no projeto EasyFloor, bem como todo o espírito crítico, rigor e profissionalismos que me incutiu.

Ao Doutor Luís Correia, co-orientador da dissertação, agradeço sinceramente o permanente acompanhamento, bem como a sua disponibilidade, espírito crítico e ensinamentos partilhados. Agradeço ainda todo o tempo dispensado na execução do trabalho experimental realizado ao longo do projeto, bem como a análise do mesmo.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, LEST, em particular ao Engenheiro Marco Peixoto e ao técnico António Matos agradeço a colaboração, o ensinamento e a disponibilidade demonstrada durante a realização dos trabalhos experimentais.

À Agência Nacional de Inovação e ao Fundo Social Europeu pelo financiamento do projeto “EASYFLOOR - Desenvolvimento de painéis sanduíche compósitos para a reabilitação de pisos de edifícios” – SFRH/BSAB/150266/2019 – na qual a presente dissertação se insere.

À empresa ALTO – Perfis Pultrudidos Lda., agradeço pela informação cedida relativa à produção dos painéis EasyFloor, em particular ao Engenheiro Tomé Santos.

À empresa CIVITEST – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda., agradeço pela colaboração na produção do betão reforçado com fibras aplicado no painel sanduíche híbrido, em particular, ao Professor Joaquim Barros, à Doutora Inês Costa, ao Engenheiro Felipe Salomão e ao técnico José Sousa pelo apoio e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, nomeadamente ao Professor João Ramôa Correia, Doutor Mário Garrido e o Engenheiro Miguel Proença, agradeço-lhes toda a disponibilidade manifestada, informações facultadas e a partilha de conhecimentos ao longo da execução do projeto.

À Cátia agradeço de um modo especial por todo o amor, apoio e incentivo, compreensão, dedicação e paciência.

Por último, deixo um agradecimento à minha família, em especial aos meus pais (Guilherme e Maria), à minha irmã Mariana pelo amor e o carinho dedicado, a compreensão que sempre demonstraram e o contínuo apoio demonstrado em toda a minha vida.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

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

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

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição
CC BY**

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

Caracterização de painéis sanduíche compósitos híbridos para a reabilitação de pisos de edifícios

RESUMO

A crescente necessidade de elementos estruturais leves, de elevada rigidez e resistência na construção civil em geral, e em particular na área da reabilitação, têm conduzido ao uso de soluções baseadas em materiais compósitos, pelas suas características intrínsecas. Neste grupo incluem-se os painéis sanduíche compósitos.

A presente dissertação insere-se no projeto de investigação “EasyFloor”, que teve como objetivo o de contribuir para o desenvolvimento de painéis sanduíche inovadores como elemento estrutural na reabilitação de pavimentos de pisos de edifícios existentes ou em construção nova. Neste projeto foram desenvolvidos dois painéis: i) um painel 100% compósito, produzido por pultrusão, composto por faces e nervuras em GFRP (*glass fibre reinforced polymer*) e um núcleo em espuma de poliuretano (PUR), e ii) um segundo painel híbrido, diferente do primeiro pelo facto de possuir uma lâmina na face superior de betão com fibras de aço (FRC).

De modo a estudar o comportamento do painel sanduíche híbrido, numa primeira fase foi necessário proceder à caracterização mecânica das propriedades de todos os materiais envolvidos, nomeadamente o GFRP, o PUR e FRC, sendo este último o único caracterizado no âmbito do presente trabalho.

O estudo mecânico do painel sanduíche híbrido envolveu componentes experimentais, analíticas e numéricas. Desta forma, foram realizados ensaios à flexão a curto e longo prazo, ensaios de ligação entre painéis e ensaios de ligação entre painéis e as paredes de suporte. Paralelamente, realizam-se os estudos numéricos com recurso a elementos finitos de modo a complementar a análise dos ensaios experimentais realizados. Os ensaios à flexão a longo prazo, com uma duração de 6 meses, permitiram estimar o comportamento em serviço do painel híbrido a 50 anos.

O trabalho desenvolvido alcançou os objetivos propostos e veio a contribuir de forma decisiva para o sucesso do projeto EasyFloor.

Palavras-chave: Materiais compósitos; Betão reforçado com fibras; Painel sanduíche híbrido; Ensaio à flexão de painéis híbridos; Simulações numéricas e analíticas.

Characterization of hybrid composite sandwich panels for building floor rehabilitation

ABSTRACT

The growing need for light structural elements, with high stiffness and strength by the construction industry, particularly in the sector of rehabilitation, has led to the use of solutions based on composite materials, due to their intrinsic characteristics. Composite sandwich panels are included in this group.

The present dissertation was developed in the scope of the "EasyFloor" research project, and its main objective was to contribute to the development of innovative sandwich panels as a structural element for the rehabilitation of existing buildings or for new construction. From this project, two panels were developed: i) a 100% composite panel, produced by pultrusion, with faces and ribs of GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer) and a core in polyurethane foam (PUR), and ii) a second hybrid panel, which differs from the first one by the fact that it has a sheet in the upper face of steel-fibre reinforced concrete (FRC).

In order to study the behavior of the hybrid sandwich panel, firstly, it was necessary to proceed to mechanical characterization of all materials involved, namely the GFRP, the PUR and the FRC. The latter being the only one characterized within the scope of this work.

The study of the hybrid sandwich panel involved experimental, analytical and numerical components. Namely it included short- and long-term bending tests, panel-to-wall connection tests and connection tests between panels. This research work also included numerical studies using finite elements to complement the analysis of the experimental tests carried out. With a duration of 6 months, the long-term bending tests allowed the prediction of the service behaviour of the hybrid panel for 50 years.

All the proposed objectives were fulfilled during the development of this work, which has contributed decisively to the success of the EasyFloor project.

Keywords: Composite materials; Fibre reinforced concrete; Hybrid sandwich panel; Bending tests on hybrid panels; Numerical and analytical simulations.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL.....	1
1.2. PROJETO EASYFLOOR.....	3
1.2.1. Enquadramento histórico.....	4
1.2.2. Requisitos.....	7
1.2.3. Conceção, dimensionamento e otimização.....	13
1.2.4. Solução final.....	29
1.3. OBJETIVOS E METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO.....	33
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	33
2. CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	35
2.1. GFRP.....	35
2.2. FRC.....	37
2.2.1. Ensaio de compressão.....	37
2.2.2. Ensaio de flexão.....	42
2.3. PUR.....	48
2.4. SIKADUR 32 EF.....	49
2.5. S&P RESIN 220 HP.....	51
3. ENSAIOS DE FLEXÃO QUÁSI-ESTÁTICOS EM PAINÉIS A CURTO PRAZO.....	53
3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	53
3.1.1. Ensaio de flexão com vão variável.....	53
3.1.2. Ensaio de flexão à rotura.....	56
3.1.3. Produção dos painéis.....	59
3.2. RESULTADOS E ANÁLISE.....	62
3.2.1. Ensaio de flexão com vão variável.....	62
3.2.2. Ensaio de flexão à rotura.....	67
3.3. MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	76
3.4. CONCLUSÕES.....	78
4. ENSAIOS DE LIGAÇÃO: PAINEL – PAINEL E PAINEL – PAREDE.....	80
4.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	80
4.1.1. Ensaio de ligação painel – painel.....	80
4.1.2. Ensaio de ligação painel – parede.....	83
4.2. RESULTADOS E ANÁLISE.....	91
4.2.1. Ensaio de ligação painel – painel.....	91
4.2.2. Ensaio de ligação painel – parede.....	96
4.3. MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	111
4.3.1. Ligação painel – painel.....	111

4.3.2.	Ligação painel – parede	113
4.4.	CONCLUSÕES	117
5.	ENSAIOS DE FLEXÃO EM PAINÉIS A LONGO PRAZO	120
5.1.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	120
5.2.	RESULTADOS E ANÁLISE	123
5.3.	MODELAÇÃO ANALÍTICA	127
5.4.	CONCLUSÕES	133
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	135
6.1.	CONCLUSÕES GERAIS	135
6.2.	TRABALHOS FUTUROS	137
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139
	ANEXO I – FICHAS TÉCNICAS DO MATERIAL CONSTITUINTE DE GFRP	143
	ANEXO II – ENSAIOS DE COMPRESSÃO DO FRC	148
	ANEXO III – ENSAIOS DE FLEXÃO DO FRC	149
	ANEXO IV – ENSAIOS DE FLEXÃO DE VÃO VARIÁVEL	159
	ANEXO V – ENSAIOS DE LIGAÇÃO PAINEL – PAINEL.....	162

LISTA DE ABREVIATURAS

GFRP	– <i>Glass Fibre Reinforced Polymer</i>
PUR	– Espuma de poliuretano
ANI	– Agência de Inovação
IST	– Instituto Superior Técnico
UMinho	– Universidade do Minho
FRC	– <i>Fibre Reinforced Concrete</i>
INE	– Instituto Nacional Estatística
FRP	– <i>Fibre Reinforced Polymer</i>
ULS	– Estados Limite de Utilização
SLS	– Estados Limite de Serviço
CLT	– <i>Classical Lamination Theory</i>
GAs	– <i>Genetic Algorithms</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Economia linear (a) <i>vs.</i> economia circular (b) [2].	1
Figura 2. Número de edifícios antigos para diferentes sistemas estruturais em Portugal (adaptado de [4]).	6
Figura 3. Número de edifícios clássicos muito degradados ou com necessidade de grandes reparações segundo a época de construção do edifício [4].	7
Figura 4. Layout de planta típica para os diferentes tipos de edifícios antigos em Lisboa [3].	8
Figura 5. Seção transversal proposta para o painel sanduiche híbrido [8].	16
Figura 6. Arquitetura dos laminados [8].	16
Figura 7. Equilíbrio de tensões para o painel híbrido em flexão pura [8].	17
Figura 8. Fluxograma do algoritmo genérico (adaptado de [29])	26
Figura 9. Variáveis de entrada para o cromossoma GA (adaptado de [29]).	27
Figura 10. Valores de função objetivo para cada solução (adaptado de [29]).	28
Figura 11. Painel sanduiche compósito. Unidades em [mm].	30
Figura 12. Painel sanduiche híbrido. Unidades em [mm].	31
Figura 13. Arquitetura de fibras.	35
Figura 14. Equipamento de retificação.	38
Figura 15. Ensaio de compressão do FRC.	38
Figura 16. Ensaio cíclico em compressão para a avaliação do módulo de elasticidade do FRC.	39
Figura 17. Apresentação da rotura de um provete da amassadura M1.	40
Figura 18. Realização do entalhe nos provetes prismáticos.	43
Figura 19. Ensaio de flexão em três pontos de carga.	44
Figura 20. Parâmetros obtidos a partir da curva força <i>vs.</i> deslocamento de um ensaio de flexão no FRC [45].	45

Figura 21. Parâmetros mecânicos obtidos a partir da curva força <i>vs.</i> CMOD de um ensaio de flexão no FRC [44].	46
Figura 22. Provede prismáticos após o ensaio de flexão.	46
Figura 23. Força <i>vs.</i> CMOD (amassadura M1).	47
Figura 24. Força <i>vs.</i> deslocamento (amassadura M1).	47
Figura 25. Sikadur 32 EF.	50
Figura 26. S&P Resin 220 HP.	51
Figura 27. Configuração de ensaio de vão variável. Unidades em [mm].	53
Figura 28. Instrumentação utilizada para os ensaios de vão variável. Unidades em [mm].	54
Figura 29. Fotografia da configuração de ensaio de flexão de vão variável.	54
Figura 30. Ciclos de carga/descarga utilizados nos ensaios de vão variável.	55
Figura 31. Fotografia da configuração de ensaio de flexão à rotura dos painéis simples - PR_1.	56
Figura 32. Fotografia da configuração de ensaio de flexão à rotura dos painéis duplos- PPR_2.	56
Figura 33. Configuração de ensaio à flexão à rotura em painéis simples e painéis duplos. Unidades em [mm].	58
Figura 34. Instrumentação utilizada nos ensaios de flexão à rotura de painéis simples. Unidades em [mm].	58
Figura 35. Instrumentação utilizada nos ensaios de flexão à rotura de painéis duplos. Unidades em [mm].	58
Figura 36. Processo de pultrusão do painel EasyFloor.	60
Figura 37. Fabrico painel híbrido compósito: a) aplicação da Sikadur 32 EF; b) betonagem.	61
Figura 38. Processo de colagem dos painéis duplos.	62
Figura 39. Força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão no painel PE_1.	63
Figura 40. Configuração de ensaio utilizada nos ensaios de flexão com vão variável.	63
Figura 41. Resultado gráfico do painel PE_1: $\delta_{\text{máx}} F_{\text{máx}} \cdot L$ <i>vs.</i> L^2 .	65
Figura 42. Secção transversal do painel.	66

Figura 43. Força <i>vs.</i> deslocamento (esquerda) e força <i>vs.</i> extensão (direita) – Painel PR_1.	68
Figura 44. Força <i>vs.</i> deslocamento (esquerda) e força <i>vs.</i> extensão (direita) – Painel PR_2.	68
Figura 45. Representação gráfica da força aplicada <i>vs.</i> o deslocamento a meio vão para os painéis PR_1 e PR_2, tendo por base o deslocamento medido pelo atuador.	68
Figura 46. Deformação do painel PR_1 durante o ensaio (na iminência da rotura).	69
Figura 47. Modo de rotura do Painel PR_1.	70
Figura 48. Modo de rotura do Painel PR_2.	71
Figura 49. Força <i>vs.</i> deslocamento (esquerda) e força <i>vs.</i> extensão (direita) – Painel PPR_1A.	71
Figura 50. Força <i>vs.</i> deslocamento (esquerda) e força <i>vs.</i> extensão (direita) – Painel PPR_1 (ensaio PPR_1B).	72
Figura 51. Deformação do painel PPR_1 durante o ensaio.	72
Figura 52. Força <i>vs.</i> deslocamento (esquerda) e força <i>vs.</i> extensão (direita) – Painel PPR_2.	73
Figura 53. Resultados gráficos da força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão.	73
Figura 54. Modo de rotura do painel PPR_1.	74
Figura 55. Modo de rotura do painel PPR_2.	75
Figura 56. Comparação dos resultados gráficos painel simples <i>vs.</i> painel duplo.	76
Figura 57. Malha de elementos finitos do modelo 3D do painel sanduíche híbrido e representação das condições de apoio.	77
Figura 58. Força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão: a) painel simples; b) painel duplo.	77
Figura 59. Geometria dos provetes da Série 1: vista em planta (lado esquerdo) e vista lateral (lado direito). Unidades em [mm].	80
Figura 60. Geometria dos provetes da Série 2: vista em planta (lado esquerdo) e vista lateral (lado direito). Unidades em [mm].	80
Figura 61. Processo de colagem – Série 1: (a) instalação de espaçadores; (b) aplicação do adesivo nas faces a colar; (c) colagem das faces; (d) remoção do adesivo em excesso; (e) aplicação de pressão lateral.	81
Figura 62. Configuração de ensaio - Série 1. Unidades em [mm].	82

Figura 63. Configuração de ensaio - Série 2. Unidades em [mm].	83
Figura 64. Ligação tipo: a) LT-1L; b) LT-2L.	84
Figura 65. Ligação tipo LT-2LA.	84
Figura 66. Pormenor do sistema de ligação: a) vista lateral; b) vista em planta. Unidades em [mm].	85
Figura 67. Pormenor do sistema de ensaio no estudo da ligação painel-parede.	86
Figura 68. Configuração de ensaio utilizada para a ligação tipo LT-1L. Unidades em [mm].	87
Figura 69. Configuração de ensaio utilizada para as ligações tipo LT-2L e LT-2LA. Unidades em [mm].	87
Figura 70. Ligação tipo LT-2LA - Fases relativas à instalação dos provetes no sistema de apoio: a) preparação da superfície para aplicação do adesivo; b) colocação do painel; c) aplicação do adesivo na face superior do painel; d) colocação da cantoneira superior; e) aplicação do momento de aperto; e f) solução final.	89
Figura 71. Fotografia da configuração da ligação tipo LT-1L.	90
Figura 72. Fotografia da configuração da ligação tipo LT-2L.	90
Figura 73. Fotografia da configuração da ligação tipo LT-2LA.	91
Figura 74. Força vs. deslocamento a meio vão – Série 1.	91
Figura 75. Modo de rotura provete 2PP_01.	93
Figura 76. Modo de rotura provete 2PP_02.	93
Figura 77. Modo de rotura provete 2PP_03.	93
Figura 78. Força vs. deslocamento a meio vão – Série 2.	94
Figura 79. Modo de rotura provete 3PP_01.	95
Figura 80. Modo de rotura provete 3PP_02.	96
Figura 81. Modo de rotura provete 3PP_03.	96
Figura 82. Força vs. deslocamento (esquerda) e força vs. extensão (direita) – painel LT-1L_1.	97
Figura 83. Força vs. deslocamento (esquerda) e força vs. extensão (direita) – painel LT-1L_2.	97

Figura 84. Força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão – LT-1L. Nota: o deslocamento nas curvas a tracejado foi estimadas com recurso ao transdutor de deslocamento interno do atuador.	98
Figura 85. Painel LT-1L_1 – danos observados junto à ligação painel - parede.....	98
Figura 86. Rotação do painel LT-1L_2.....	99
Figura 87. Modo de rotura do painel LT-1L_1.....	100
Figura 88. Modo de rotura do painel LT-1L_2.....	100
Figura 89. Força <i>vs.</i> deslocamento (esquerda) e força <i>vs.</i> extensão (direita) – painel LT-2L_1.....	101
Figura 90. Força <i>vs.</i> deslocamento (esquerda) e força <i>vs.</i> extensão (direita) – painel LT-2L_2.....	101
Figura 91. Força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão – LT-2L. Nota: o deslocamento nas curvas a tracejado foi estimadas com recurso ao transdutor de deslocamento interno do atuador.	102
Figura 92. Painel LT-2L_1 – pormenor de ensaio no apoio.	103
Figura 93. Painel LT-2L_2 – fissuração/destacamento FRC: a) força aplicada de 30 kN; b) força aplicada de 60 kN.	103
Figura 94. Modo de rotura do painel LT-2L_1.....	104
Figura 95. Modo de rotura do painel LT-2L_2.....	104
Figura 96. Força <i>vs.</i> deslocamento (esquerda) e força <i>vs.</i> extensão (direita) – painel LT-2LA_1.....	105
Figura 97. Força <i>vs.</i> deslocamento (esquerda) e força <i>vs.</i> extensão (direita) – painel LT-2LA_2.....	105
Figura 98. Força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão – LT-2LA. Nota: o deslocamento nas curvas a tracejado foi estimadas com recurso ao transdutor de deslocamento interno do atuador.	106
Figura 99. Painel LT-2LA_1 - fissuração do FRC junto da cantoneira.....	107
Figura 100. Painel LT-2LA_2 - fissuração do FRC junto da cantoneira.	107
Figura 101. Modo de rotura do painel LT-2LA_1.	107
Figura 102. Modo de rotura do painel LT-2LA_2.	108
Figura 103. Força <i>vs.</i> deslocamentos horizontais nos apoios.....	108

Figura 104. Força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão para todos os ensaios de ligação painel – parede.	109
Figura 105. Malha do modelo 2D de elementos finitos do painel sanduíche híbrido e representação do sistema de apoio simples: a) Série 1; b) Série 2.	112
Figura 106. Força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão: a) série 1; b) série 2.	112
Figura 107. Malha do modelo 3D de elementos finitos do painel sanduíche híbrido e representação do sistema de ligação tipo: a) LT-1L; b) LT-2L; c) LT-2LA.	114
Figura 108. Força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão: ligação tipo LT-1L.	115
Figura 109. Força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão: ligação tipo LT-2L.	115
Figura 110. Força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão: ligação tipo LT-2LA.	116
Figura 111. Processo de aplicação da carga – Painel P4_F2.	121
Figura 112. Painéis sob o efeito de uma carga constante no tempo.	121
Figura 113. Configuração de ensaio de flexão a longo prazo, incluindo instrumentação. Unidades em [mm].	122
Figura 114. Instrumentação utilizada para os ensaios de flexão a longo prazo. Unidades em [mm].	122
Figura 115. Variação da temperatura ao longo do ensaio.	124
Figura 116. Influência da variação da temperatura nos deslocamentos a meio vão.	124
Figura 117. Comparação entre os deslocamentos obtidos a partir de LVDTs e de comparadores mecânicos.	125
Figura 118. Resultados gráficos painel P4_F1.	125
Figura 119. Resultados gráficos painel P4_F2.	126
Figura 120. Simulação da deformação por fluência com recurso à lei de <i>Findley</i> . a) Painel P4_F1; b) Painel P4_F2.	130
Figura 121. Resultado gráfico da deformação a meio vão (experimental e analítica) ao longo dos ensaios.	132
Figura 122. Representação gráfica Força <i>vs.</i> CMOD – Amassadura M1.	151

Figura 123. Representação gráfica Força <i>vs.</i> Deslocamento – Amassadura M1	151
Figura 124. Estado dos provetes da amassadura M1 após o ensaio	152
Figura 125. Representação gráfica Força <i>vs.</i> CMOD – Amassadura M2	153
Figura 126. Representação gráfica Força <i>vs.</i> Deslocamento – Amassadura M2	153
Figura 127. Estado dos provetes da amassadura M2 após o ensaio	154
Figura 128. Representação gráfica Força <i>vs.</i> CMOD – Amassadura M3	155
Figura 129. Representação gráfica Força <i>vs.</i> Deslocamento – Amassadura M3	155
Figura 130. Estado dos provetes da amassadura M3 após o ensaio	156
Figura 131. Representação gráfica Força <i>vs.</i> CMOD – Amassadura M4	157
Figura 132. Representação gráfica Força <i>vs.</i> Deslocamento – Amassadura M4	157
Figura 133. Estado dos provetes da amassadura M4 após o ensaio	158
Figura 134. Resultado gráfico força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão	159
Figura 135. Resultado gráfico: $\delta_{m\acute{a}x}F_{m\acute{a}x} \cdot L$ <i>vs.</i> L^2	159
Figura 136. Resultado gráfico força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão	160
Figura 137. Resultado gráfico: $\delta_{m\acute{a}x}F_{m\acute{a}x} \cdot L$ <i>vs.</i> L^2	160
Figura 138. Resultado gráfico força <i>vs.</i> deslocamento a meio vão	161
Figura 139. Resultado gráfico: $\delta_{m\acute{a}x}F_{m\acute{a}x} \cdot L$ <i>vs.</i> L^2	161
Figura 140. Resultado gráfico da força <i>vs.</i> deslocamento – Provete 2PP_01	162
Figura 141. Resultado gráfico da força <i>vs.</i> deslocamento – Provete 2PP_02	162
Figura 142. Resultado gráfico da força <i>vs.</i> deslocamento – Provete 2PP_03	162
Figura 143. Resultado gráfico da força <i>vs.</i> deslocamento – Provete 3PP_01	163
Figura 144. Resultado gráfico da força <i>vs.</i> deslocamento – Provete 3PP_02	163
Figura 145. Resultado gráfico da força <i>vs.</i> deslocamento – Provete 3PP_03	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Requisitos térmicos para novas construções e diferentes níveis de reabilitação [18].	10
Tabela 2. Requisitos acústicos projeto EasyFloor.	11
Tabela 3. Resistência mínima ao fogo para elementos estruturais em edifícios [19].	12
Tabela 4. Valores recomendados para os coeficientes parciais de segurança (adaptado de [15]).	14
Tabela 5. Valores recomendados para os coeficientes ψ para edifícios (adaptado de [15]).	15
Tabela 6. Propriedades mecânicas estimadas dos laminados.	17
Tabela 7. Propriedade mecânicas estimadas no núcleo de espuma PUR.	17
Tabela 8. Valores relevantes para o cálculo da resistência térmica dos materiais [8].	23
Tabela 9. Pegada de carbono estimada para os materiais constituintes do painel [8].	24
Tabela 10. Condições limite (adaptado de [29]).	27
Tabela 11. Resultados em termos dos parâmetros físicos e geométricos obtidos [29].	28
Tabela 12. Requisitos acústicos projeto EasyFloor.	32
Tabela 13. Propriedades mecânicas do GFRP [39].	36
Tabela 14. Constituição do FRC	37
Tabela 15. Identificação da idade do FRC	37
Tabela 16. Valores médios dos resultados relativos aos ensaios de compressão e módulo de elasticidade do FRC.	40
Tabela 17. Ensaio de compressão em provetes cúbicos com 3 dias de idade.	41
Tabela 18. Ensaio de compressão em provetes cúbicos com 7 dias de idade.	41
Tabela 19. Ensaio de compressão em provetes cúbicos com 28 dias de idade.	41
Tabela 20. Ensaio de compressão em provetes cúbicos com 90 dias de idade.	41
Tabela 21. Determinação do valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade.	42
Tabela 22. Resultados médios dos ensaios à flexão do FRC.	47

Tabela 23. Propriedade mecânicas do PUR (IST e UMinho) [25][47].....	49
Tabela 24. Dados técnicos Sikadur 32 EF [49].	51
Tabela 25. Dados técnicos S&P Resin 220 HP [50].	52
Tabela 26. Detalhes da instrumentação utilizada durante os ensaios à flexão de vão variável.	55
Tabela 27. Detalhes da instrumentação utilizada durante os ensaios de flexão à rotura.	59
Tabela 28. Parâmetros necessários à determinação das rigidezes.	64
Tabela 29. Rigidez à flexão e da rigidez ao corte para os painéis ensaiados.	66
Tabela 30. Comparação da rigidez à flexão e da rigidez ao corte dos painéis determinadas por via analítica e experimentais.	67
Tabela 31. Principais resultados nos ensaios à rotura por flexão – Painel simples.	70
Tabela 32. Principais resultados nos ensaios à rotura por flexão – Painel duplo.	74
Tabela 33. Comparação entre os resultados obtidos entre as séries PR e PPR.	75
Tabela 34. Características técnicas dos sensores usados na instrumentação dos provetes.	83
Tabela 35. Identificação dos extensómetros	88
Tabela 36. Detalhes da instrumentação utilizada durante os ensaios	88
Tabela 37. Principais resultados da Série 1.	92
Tabela 38. Principais resultados da Série 2.	95
Tabela 39. Registo dos valores máximos de extensão [%].....	109
Tabela 40. Principais resultados obtidos e modos de rotura.....	110
Tabela 41. Rigidez à flexão ligação painel – painel. Unidades [kN/mm].	113
Tabela 42. Rigidez à flexão ligação painel – parede. Unidades [kN/mm].	117
Tabela 43. Detalhes da instrumentação utilizada nos ensaios a longo prazo.....	123
Tabela 44. Resultados experimentais.	126
Tabela 45. Coeficiente de fluência [52][21].	128
Tabela 46. Parâmetros analíticos.	128

Tabela 47. Resultados obtidos da aplicação da CNR – DT 205/2007 e do EUROCOMP UD.	129
Tabela 48. Principais resultados da lei de <i>Findley</i> aplicada ao presente estudo.	131
Tabela 49. Tabela comparativa da flecha a meio vão a 50 anos (combinação quase permanente de ações).....	133
Tabela 50. Resultados obtidos nos ensaios de compressão do FRC.	148
Tabela 51. Dimensões dos provetes prismáticos.....	149
Tabela 52. Dimensões do entalhe dos provetes prismáticos.....	150
Tabela 53. Resultados do ensaio à flexão dos provetes da amassadura M1.....	151
Tabela 54. Resultados do ensaio à flexão dos provetes da amassadura M2.....	153
Tabela 55. Resultados do ensaio à flexão dos provetes da amassadura M3.....	155
Tabela 56. Resultados do ensaio à flexão dos provetes da amassadura M4	157
Tabela 57. Cálculo das coordenadas gráficas – Painel PE_2.....	159
Tabela 58. Cálculo das coordenadas gráficas – Painel PE_3.....	160
Tabela 59. Cálculo das coordenadas gráficas – Painel PE_4.....	161

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

No contexto atual, a economia circular tem vindo a ganhar primazia em detrimento da economia linear. Na economia circular assume-se que todos os produtos e serviços têm origem em fatores da natureza, e que, no final da vida útil, retomam mais uma vez à natureza através da reciclagem e de resíduos ou através de outras formas com menor impacto ambiental (ver Figura 1). Neste contexto, a reabilitação, como forma de reuso de produtos ou extensão da vida útil destes, define-se como o conjunto de operações destinadas a garantir a possibilidade de reutilização plena do edificado existente, adaptando-o às exigências contemporâneas, e estabelecendo um compromisso entre a sua identidade original e a que resulta da própria reabilitação [1]. Este tema reveste-se de grande importância um pouco por todo mundo, tendo vindo a ganhar preponderância na Europa, e também em Portugal [2].

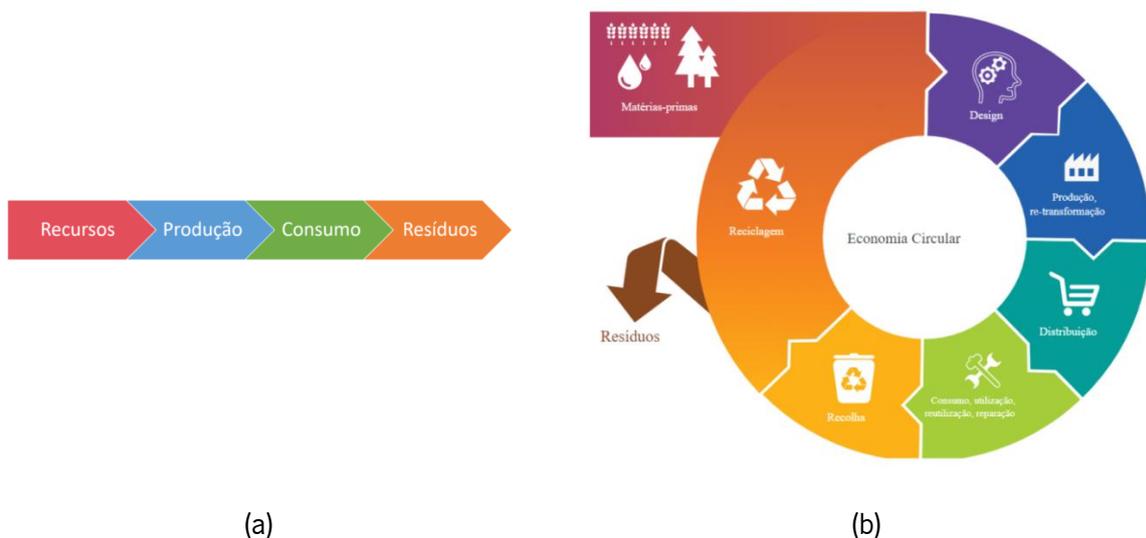


Figura 1. Economia linear (a) vs. economia circular (b) [2].

No contexto nacional, a utilização da madeira ocorreu com maior intensidade até ao início do século XX, especialmente em coberturas e pavimentos de edifícios, sendo os pisos constituídos por barrotes de madeira. A durabilidade limitada da madeira por deficiente manutenção e em resultado dos frequentes ataques biológicos a que pode ser sujeita (fungos, térmitas, caruncho), conduz à degradação prematura dos pisos dos edifícios e à conseqüente necessidade da sua substituição. Complementarmente, importa referir que a generalidade deste tipo de pisos não cumpre as atuais exigências regulamentares em termos estruturais, e também, em termos de desempenho térmico e acústico [3].

Obviamente, a degradação natural dos materiais associada à inexistência de programas de manutenção e/ou reabilitação deste tipo de edificado tem levado à sua degradação. Este facto, verifica-se um pouco por toda a Europa, e é especialmente gravosa em Portugal, onde cerca de 1 milhão de edifícios têm necessidades de reabilitação, onde 41% dos quais necessitam de intervenções médias a grandes [4]. Assim, uma intervenção atempada e correta permitirá prolongar a vida útil da estrutura, devendo-se escolher uma solução que permita reduzir o tempo de aplicação e os custos associadas à mesma.

Atualmente, as soluções de reabilitação mais correntemente utilizadas envolvem a substituição dos pisos de madeira existentes por materiais tradicionais, especialmente por lajes em betão ou lajes mistas de aço-betão. Porém, estas soluções ostentam diversos inconvenientes, destacando-se: i) a introdução de acréscimos significativos de carga nos elementos constitutivos existentes que, por sua vez, podem conduzir à necessidade de reforço destes últimos – é o caso do elevado peso que as lajes que exercem sobre as paredes resistentes em alvenaria; ii) aumento da vulnerabilidade sísmica dos edifícios, em virtude de alterações importantes ao nível da massa, rigidez e comportamento global; e iii) constrangimentos construtivos, frequentemente, em resultado dos difíceis acessos a meios de elevação e betonagem nos próprios edifícios, na medida em que este se situam habitualmente em zonas históricas caracterizadas por ruas estreitas.

No decorrer dos últimos anos, em alternativa às soluções tradicionais anteriormente mencionadas, têm vindo a ser propostas soluções de reabilitação baseadas em materiais compósitos [5], nomeadamente os painéis sanduíche compósitos constituídos por lâminas externas em polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP – do inglês *Glass Fibre Reinforced Polymer*) e núcleo em poliuretano (PUR). Quando comparadas com as soluções tradicionais, as baseadas em painéis sanduíche possuem inúmeras e importantes vantagens, tais como: i) leveza; ii) elevado desempenho mecânico para ações verticais; iii) a não alteração de forma significativa do comportamento do edifício, incluindo ao nível da sua vulnerabilidade sísmica; iv) fácil instalação (tipicamente, os painéis podem ser transportados e aplicados manualmente); v) elevada durabilidade; e vi) competitividade em termos de custo de ciclo de vida do sistema construtivo.

Contudo, apesar das importantes vantagens que as soluções acima referidas baseadas em materiais compósitos apresentam, existem algumas limitações que devem ser referidas, nomeadamente as seguintes: i) geralmente, as soluções que têm sido propostas são produzidas pelas técnicas de infusão e vácuo ou laminação manual, que requerem muita mão-de-obra especializada e tempo de fabrico,

diminuindo a competitividade económica da solução, e não garantem uma elevada qualidade do produto final em termos de precisão geométrica (controlo de qualidade); ii) várias destas soluções retratam um deficiente comportamento em situação de incêndio, necessitando proteções adicionais para garantir o cumprimento das exigências regulamentares, o que importa custo para a solução final; iii) em diversos casos, em virtude do elevado rácio resistência/rigidez destas soluções, os requisitos regulamentares em termos de deformação em serviço condicionam o seu dimensionamento e, conseqüentemente, para valores de vãos ou sobrecargas mais elevados obtêm-se soluções não competitivas; iv) o tipo de ligação entre os painéis é complexo, requerendo mão-de-obra qualificado; e v) por fim, em muitas situações, existem dificuldades em assegurar as exigências regulamentares de desempenho em termos acústicos, dada a reduzida densidade/espessura dos materiais envolvidos [6].

A reabilitação de pisos de edifícios constitui uma oportunidade com potencial muito elevado para a indústria dos compósitos no sector da construção. Estudos prospetivos têm igualmente apontado a necessidade de aumentar o grau de standardização dos produtos compósitos para aplicações do sector da construção, o que implica a utilização de processos de fabricos automatizados, como a pultrusão [7].

Neste contexto, e de modo colmatar deficiências nas soluções de reabilitação existentes no mercado referidas anteriormente, o consórcio do projeto EasyFloor, financiado pela Agência de Inovação (ANI) – Projeto n.º 3480 – aviso 08/SI/2015 – I&DT Empresarial Copromoção – liderado pela empresa ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda., o Instituto Superior Técnico (IST) e a Universidade do Minho (UMinho) propôs-se a desenvolver uma nova geração de painéis sanduíche pultrudidos que, a um custo competitivo, permitam colmatar as deficiências evidenciadas nas soluções anteriormente mencionadas, sejam as que implicam a utilização de materiais tradicionais (betão armado e aço), sejam as que consistem na utilização de materiais compósitos de 1ª geração.

A presente dissertação insere-se no âmbito do projeto EasyFloor, sendo esta direcionada para modelo de painel sanduíche compósito híbrido, que se detalhe de seguida.

1.2. Projeto EasyFloor

O projeto EasyFloor teve como objetivo principal o desenvolvimento de painéis sanduíche inovadores em polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) a utilizar na reabilitação de pisos degradados em madeira de edifícios com necessidades de intervenção. Pretendeu-se assim contribuir, de forma inovadora e comercialmente competitiva, para o cumprimento dos objetivos nacionais para o setor de reabilitação urbana. Além disso, a solução proposta poderá ser exportada e aplicada na

reabilitação de edifícios um pouco por todo o Mundo, nomeadamente nos mercados onde atuam as principais empresas portuguesas da Engenharia Civil (Europa e Norte de África).

Neste projeto, foram desenvolvidos, por pultrusão, dois protótipos de painéis sanduíche, com campos de aplicação distinto em termos de vãos e/ou sobrecargas: i) painéis compósitos de 2ª geração com lâminas em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), desenvolvido pelo IST; e ii) painéis híbridos com lâminas em GFRP na face inferior e betão reforçado com fibras de elevado desempenho (FRC – do inglês *Fibre Reinforced Concrete*) na face superior, garantindo uma maior rigidez de flexão e axial do piso, e melhorando o desempenho acústico e em situação de incêndio, desenvolvido pela UMinho. Em ambas as soluções propostas, as faces laterais dos painéis previam incorporar um sistema de ligação por encaixe, apresentavam abas laterais em GFRP e um núcleo de poliuretano (PUR).

O proponente do projeto EasyFloor foi a empresa ALTO, especialista em soluções à base de perfis de GFRP, em consórcio com o IST e a UMinho, contou com a coloração de 40 recursos humanos e investimento total de 1 846 154.68€, durante o período de abril de 2016 a setembro de 2020.

1.2.1. Enquadramento histórico

Os painéis a desenvolver visam o mercado da reabilitação, nomeadamente pisos em madeira de edifícios antigos. Por isso, houve a necessidade de aclarar a tipologia de edifícios antigos em Portugal, caracterizando o seu sistema estrutural típico. Deste modo, foi realizada uma análise histórica que forneceu informações importantes sobre as geometrias típicas destes edifícios (comprimento de vãos, altura do sistema de piso, etc.). Além desta análise foi também necessário analisar as exigências regulamentares ao nível do comportamento estrutural, térmico, acústico e resistência ao fogo que as soluções de reabilitação são obrigadas a cumprir. Em seguida apresenta-se um resumo do estudo realizado, sendo que mais informações poderão ser encontradas em [8].

De acordo com vários autores [9]–[11], um edifício construído antes dos anos 1930 é considerado um “edifício velho”, geralmente com um sistema estrutural composto por paredes de alvenaria exteriores relativamente largas (cerca de 1 m) e pisos de madeira. Na cidade de Lisboa, estima-se que 28 000 edifícios foram construídos antes de 1930 [11]. Após esse período, a construção em betão armado passou a ser mais frequente e os sistemas estruturais tradicionais anteriores foram gradualmente abandonados. Relativamente aos edifícios construídos anteriormente ao ano 1930, existem três principais tipos de edifícios: i) edifícios anteriores a 1755; ii) edifícios Pombalinos (1755-1880); e iii) edifícios Gaioleiros com paredes de alvenaria (1880-1930).

No que diz respeito aos edifícios contruídos antes de 1755, hoje em dia ainda existem alguns destes tipos de edifícios em serviço. Estes são normalmente conservados por razões históricas e/ou económicas e, tipicamente, são caracterizados por terem dois a três andares com tetos altos, alta densidade de paredes por área total de construção e poucas aberturas externas [12].

A 1 de novembro de 1755, a cidade de Lisboa foi quase completamente destruída devido ao sismo que ocorreu, especialmente na zona da Baixa. No enorme esforço de reconstrução, que se seguiu após este evento catastrófico, foram tomadas medidas para garantir uma maior resistência sísmica nos novos edifícios construídos na época. Neste contexto, surge os edifícios Pombalinos (1755-1880) caracterizados pelo uso da técnica da “gaiola pombalina”, que consiste na introdução de uma estrutura tridimensional em madeira no interior das paredes de alvenaria. A madeira, sendo deformável, ajudou os edifícios a potenciar o seu comportamento sísmico e adquirir uma maior capacidade de resistências às forças de tração e compressão. Estes edifícios têm normalmente até cinco pisos, sendo o rés-do-chão destinado ao comércio e os restantes pisos a habitacionais [11].

No final da década de 1870 e com a natural expansão urbana da cidade de Lisboa, construtores preocupados essencialmente com o lucro e muito pouco com a qualidade da construção levam à decadência da qualidade de construção sentida no período Pombalino. Originam-se assim os edifícios “Gaioleiros” (1880-1930), também designados por “prédios de rendimentos”, uma vez que eram construídos com o intuito de serem vendidos ou alugados [3]. Esta denominação pretende traduzir a simplificação e as enormes alterações a nível estrutural e construtivo que estes edifícios sofreram, na sequência de uma redução de custos nos materiais, processos e técnicas construtivas que caracterizavam os edifícios Pombalinos. Deste modo, os edifícios “Gaioleiros” são conhecidos por terem uma construção de baixa qualidade devido à utilização de materiais e técnicas construtivas de qualidade inferior, que foram requeridas de maneira a reduzir assim os custos de construção e maximizar o rendimento financeiro dessas construções. Hoje em dia, a maior parte deste tipo de edificado apresentam graves deteriorações e, em alguns casos, até verificou-se colapso destas estruturas. No que diz respeito ao seu sistema estrutural são caracterizados pela utilização de paredes estruturais em alvenaria (pedra) e pisos em madeira, estrutura do telhado e paredes divisórias [9].

Por fim, a partir de 1930, com o início da era do betão armado, estes edifícios designados de “Gaioleiros” foram progressivamente substituídos por novas construções, onde as alvenarias e a madeira foram sendo, ao longo do tempo, substituídas pelo betão armado. Essa troca verifica-se primeiramente nos pavimentos marquises e varadas dos edifícios conhecidos por edifícios de placa, entre 1930 e 1940,

ocorrendo depois nas estruturas quase integralmente em betão armado a partir de 1950 até aos dias de hoje [13].

Na Figura 2 ilustra o número de edifícios existentes em Portugal por diferentes sistemas estruturais. O principal âmbito de aplicação dos painéis sanduíche EasyFloor são edifícios com paredes de alvenaria estrutural e pisos de madeira.

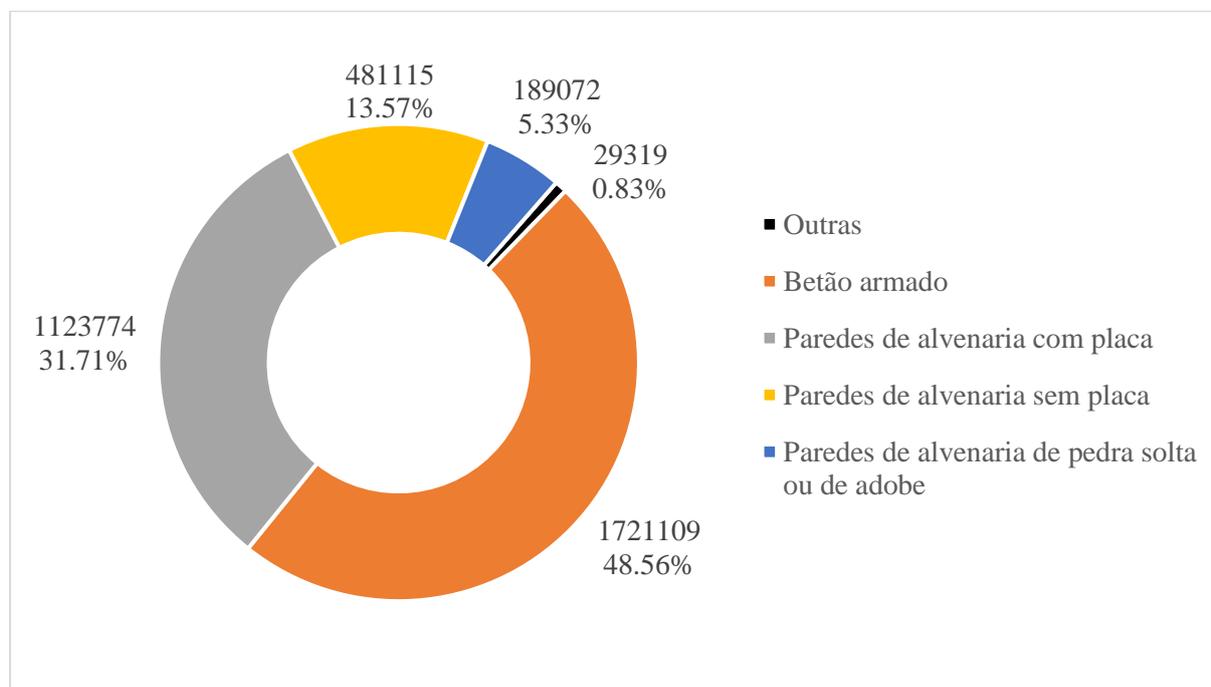


Figura 2. Número de edifícios antigos para diferentes sistemas estruturais em Portugal (adaptado de [4]).

De acordo com os censos de 2011 realizados por o INE (Instituto Nacional de Estatística), o sistema estrutural mais comum para a solução habitacional portuguesa são as estruturas de betão armado, representado 48.6% das habitações portuguesas. Em relação aos edifícios antigos, anteriores a 1930-1945, considerando os três tipos descritos anteriormente, enquadram-se nas seguintes categorias: i) paredes de alvenaria sem placa; ii) paredes de alvenaria de pedra solta ou de adobe; e iii) outros. As duas primeiras categorias representam 18.9% das habitações portuguesas e são suscetíveis de ter pisos em madeira [4].

Neste contexto, outro aspeto que foi avaliado por Proença *et al.* [8] foram as necessidades de reabilitação destes edifícios antigos. A Figura 3 apresenta o número de edifícios a reabilitar para os diferentes anos de construção em Portugal. A maior parte dos edifícios degradados com necessidade de reabilitações (~58%) foram construídos antes de 1945, sendo que os edifícios anteriores as 1919

encontram-se num estado muito degradado. Estes edifícios são tipicamente do período Pombalino e do período “Gaioleiro”, caracterizados pelo um sistema de piso em madeira. A deterioração dos pisos de madeira é uma das patologias mais frequentes neste tipo de edificado, o que os torna potenciais candidatos à aplicação dos sistemas de piso em painel sanduíche EasyFloor.

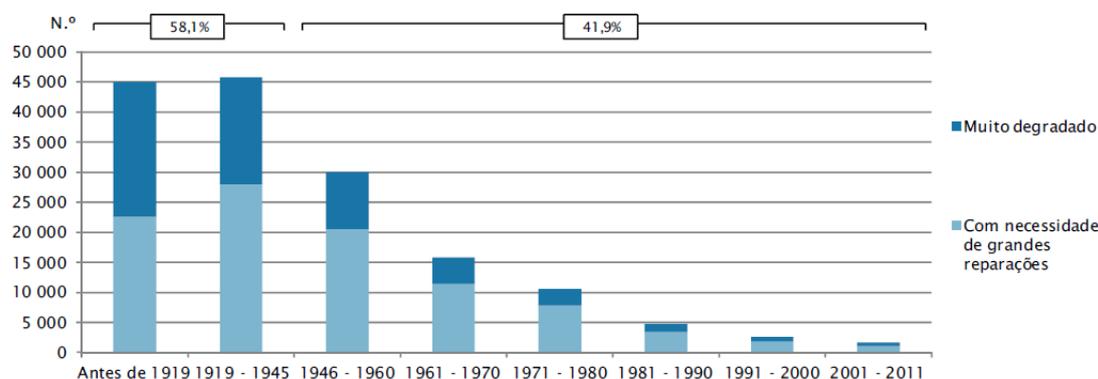


Figura 3. Número de edifícios clássicos muito degradados ou com necessidade de grandes reparações segundo a época de construção do edifício [4].

1.2.2. Requisitos

O desenvolvimento dos painéis do projeto EasyFloor teve em vista vários objetivos e o cumprimento de diversos requisitos. Deste modo, ao longo dos vários parágrafos que se seguem serão apresentados, de uma forma resumida, esses mesmo objetivos e comprovando (do ponto de vista teórico) o cumprimento dos vários requisitos. Toda a informação detalhada sobre estas aspetos poderá ser encontrada no relatório “Preliminary design of the EasyFloor sandwich panels”, Task 1.1 – Report 1.1 [8].

Com a finalidade de solucionar alguns problemas referidos na Secção 1.1, procurou-se a leveza nas duas soluções de painel sanduíche EasyFloor, prevendo-se pesos próprios de apenas 35 kg/m² e 80 kg/m², respetivamente para os painéis compostos e híbridos (que em comparação a uma laje maciça em betão, “estruturalmente” equivalente, é bastante inferior), o que também constitui uma vantagem competitiva muito relevante em termos de segurança dos restantes elementos construtivos, quer para ações verticais, quer sobretudo para a ação dos sismos devido à diferença do peso próprio em comparação com as soluções tradicionais (lajes betão ou mistas).

Face à tipologia de edifícios mencionados na Secção 1.2.1, grande parte deles encontram-se em zonas urbanas caracterizadas por estradas estreitas que dificultam/impossibilitam a utilização de meios transporte e elevação pesados. A solução proposta no projeto EasyFloor pretendia acautelar estas duas

questões de transporte e elevação, dada a leveza de cada painel individual. No âmbito do projeto previa-se que cada painel sanduíche compósito pudesse ser transportado manualmente (por 4 operários) e que o painel híbrido apenas requerendo meios ligeiros de elevação.

Outro aspeto tomado em consideração nos estudos preliminares foi que as soluções propostas fossem de rápida e fácil montagem, conferidas pela leveza dos painéis e pelos sistemas inovadores de ligação por encaixe ou sobreposição, prevendo-se que fosse possível substituir o piso de um compartimento com cerca de 16 m² em 3 dias com o recurso de 4 operários diários.

No que diz respeito aos requisitos geométricos na reabilitação de edifícios antigos, os principais aspetos que foram definidos para o desenvolvimento de um sistema de piso de painel sanduíche foi a faixa típica do vão do piso que podia ser encontrada. Na Figura 4 apresenta o layout típico destes vários tipos de edifícios antigos em Lisboa. Estes pisos de madeira tradicionais são normalmente compostos por diversas vigas de madeira longitudinais com espaçamento compreendido entre os 0.20 e 0.40 metros, apoiadas em paredes de alvenaria [3]. Em particular, para o edificado construído antes de 1930 (principal aplicação para os painéis sanduíche propostos), a altura máxima da secção transversal das vigas de madeira é limitada a 0.20 m ou inferior a este valor. Este fator faz com que os vãos dos pisos sejam limitados a um comprimento entre os 4 e 5 metros.



Figura 4. Layout de planta típica para os diferentes tipos de edifícios antigos em Lisboa [3].

Assim, face as condições geométricas referidas no paragrafo acima definiu-se os vãos-alvo para os painéis EasyFloor compreendidos entre os 4 e 5 metros [8].

Na análise estrutural do projeto teve em conta as orientações e recomendações do CEN WG4 relatório técnico-científico [14] sobre o projeto de estruturas de FRP (do inglês *Fibre Reinforced Polymers*) para aplicações estruturais em engenharia civil, bem como as recomendações de projeto contidas no Eurocódigo 0 (EN 1990, [15]) sobre as bases do projeto estrutural, e do Eurocódigo 1 (EN 1991, [16]) sobre as ações relevantes nas estruturas. Desta forma, o projeto estrutural dos painéis sanduíche EasyFloor contou com: i) verificações dos estados limite últimos (ULS); e ii) verificações dos estados limite de utilização (SLS).

Aos estados limite últimos (ULS), os seguintes modos de rotura, típicos de painéis sanduíche FRP, foram verificados:

- Rotura por tração das lâminas;
- Rotura por instabilidade local das lâminas, devido a esforços de compressão;
- Rotura por corte do núcleo ou do material de aderência entre o núcleo e a lamina;
- Rotura por esmagamento da lâmina e do núcleo junto a um apoio;
- Rotura nas zonas de fixação, por tração, compressão ou corte.

Estes modos de rotura mencionados acima foram estudados no âmbito do projeto para os painéis sanduíche compósitos e para os painéis híbridos, contudo, na presente dissertação apenas serão apresentados os resultados obtidos dos painéis híbridos na Secção 1.2.3.

Conforme a EN1990 [15], os estados limite de utilização dizem respeito a: i) ao funcionamento da estrutura ou dos seus elementos estruturais em condições normais de utilização; ii) ao conforto dos ocupantes; e iii) ao aspeto da construção (deformações ou fissurações). Assim, os dois seguintes requisitos foram considerados no âmbito do projeto:

- Controlo de deformação – onde a deformação permitida em serviço dos pisos deve ser limitada, a fim de evitar danos aos elementos adjacentes (por exemplo, divisórias, portas) e para garantir o conforto dos ocupantes no edifício. Desta forma, adotou-se um limite de deformação igual a vão/500, para um período de fluência de 50 anos sob um carregamento quase-permanente e, ao mesmo tempo, a ocorrência de sobrecargas;
- Controlo de vibração – a frequência natural não amortecida do sistema de piso deve ser compensada da faixa típica de frequências a que o piso pode ser exposto sob uso normal. Deste modo, adotou-se um limite mínimo para a frequência natural não amortecida de 5 Hz.

Ao nível dos requisitos térmicos na reabilitação de edifícios antigos, comparativamente com as novas construções, são menos exigentes. Isso justifica-se principalmente pela possível dificuldade em atender plenamente aos requisitos térmicos atuais em construções mais antigas seja por razões técnicas, funcionais, económicas ou arquitetónicas. No projeto EasyFloor pretendeu-se garantir a melhoria do conforto térmico da solução reabilitada. Por isso, os painéis sanduíche propostos deviam garantir um bom comportamento térmico, oferecendo um isolamento entre pisos, e melhorando o comportamento térmico dos edifícios, tornando-se uma solução económica de energia.

Na Tabela 1 apresenta-se a comparação dos requisitos legais de desempenho térmico de edifícios novos (Portaria n.º 379-a/2015 [17]) e reabilitados com diferentes níveis de intervenção. Os parâmetros que constam nesta tabela são: i) U_{\max} – coeficiente de transmissão térmica máximo dos elementos opacos; ii) g_{\max} – fator solar máximo para vãos não exposto a norte; iii) U_{PTP} – coeficiente de transmissão térmica das pontes térmicas plana; iv) U_{ref} – coeficiente de transmissão térmica de referência dos elementos opacos e envidraçados; v) N_i , N_v , N_t – necessidade nominais de aquecimento, arrefecimento e energia primaria; vi) R_{ph} – taxa mínima de renovação do ar; e vii) η_{equip} – eficiência mínima dos equipamentos de climatização e águas quentes sanitárias.

Tabela 1. Requisitos térmicos para novas construções e diferentes níveis de reabilitação [18].

	U_{\max} g_{\max}	U_{PTP}	U_{ref}	N_i, N_v	R_{ph}	Coletores solares	η_{equip}	N_t
Edifício sujeito a intervenção	✓	✓					✓	
Edifício sujeito a grande intervenção	✓	✓		✓ (≥1960)***	✓	✓...	✓	✓...
Edifício de corpo novo	✓	✓	✓				✓	
Edifício Novo	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓

* Só aplicável se existirem equipamentos;

** Para edifícios com mais de 30 anos é previsto um fator de desagravamento de 1.5;

*** Não aplicável se existirem incompatibilidades de ordem técnica, funcional, de viabilidade económica ou de valor arquitetónico e se não se verificarem intervenções no sistema de AQS.

Conforme ilustrado, para uma reabilitação de um edifício antigo com intervenção mínima na estrutura, apenas o coeficiente de transmissão térmica máximo dos elementos opacos (U_{\max}) e o

coeficiente de transmissão térmica das pontes térmicas plana (U_{PTP}) deve ser verificado para o sistema de painel sanduíche. O valor de U_{max} depende: i) da zona climática; ii) do ambiente exterior da face; iii) da orientação do elemento (horizontal e vertical); e iv) da direção do fluxo de calor (ascendente ou descendente). No presente projeto, o pior cenário considerado sendo adotado um valor de U_{max} de $0.30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Em Portugal, desde 2002, existe um regulamento aplicável aos requisitos acústicos para novas construções, o RRAE (Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios) que estabelece limites para os sons aéreos e de impacto. Estes limites foram estabelecidos pelos seguintes indicadores: i) $D_{nT,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea que quantifica, em escala logarítmica, a redução do som transportado pelo ar fornecido por um determinado elemento de separação (paredes, divisórias, pisos); e ii) $L_{nT,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons de percussão que quantifica a transmissão geral dos sons de impacto. Portanto, o valor de $D_{nT,w}$ deve ser maximizado enquanto o valor de $L_{nT,w}$ deve ser minimizado.

De acordo com os requisitos legais portugueses de desempenho acústicos em construção de novo edifícios (RRAE), os valores limites para os índices acima referidos são os seguintes:

- $D_{nT,w} \geq 650 \text{ dB}$;
- $L_{nT,w} \leq 60 \text{ dB}$.

Em sede de candidatura ao projeto “EasyFloor”, estes regulamentos eram aplicáveis apenas a novas construções, sendo que no caso da reabilitação de edifícios antigos não havia necessidade de obedecer a quaisquer requisitos legais. Porém, na reabilitação de edifícios deve-se ter em mente o objetivo de melhorar o conforto dos habitantes e, nesse sentido, melhorar assim o desempenho acústicos em relação ao estado inicial. No projeto EasyFloor, foi proposto o cumprimento de 65-75% dos requisitos legais para novas construções, considerados os valores necessários para garantir níveis mínimos e conforto para os usuários. Deste modo, apresenta-se a Tabela 2 com os requisitos propostos.

Tabela 2. Requisitos acústicos projeto EasyFloor.

Cumprimento dos requisitos legais	$D_{nT,w}$ [dB]	$L_{nT,w}$ [dB]
65%	≥ 32.5	≤ 92.3
75%	≥ 37.5	≤ 80.0
100%	≥ 50.0	≤ 60.0

Seria expectável um desempenho acústico melhorado no caso dos painéis sanduíche híbridos, conferido pela lâmina superior em FRC, por comparação com os painéis sanduíche compósitos convencionais. Apesar de se prever que os requisitos regulamentares não fossem integralmente cumpridos, dada a reduzida massa das soluções, o desempenho acústico seria melhor por comparação as soluções originais em pisos de madeira. Este desempenho acústico podia ainda melhorado com o recurso à utilização de teto falso, aproveitando-se da caixa de ar e do gesso cartonado possibilitará uma maior redução dos ruídos aerotransportados e uma menor transmitância dos sons de impacto, podendo atingir os 100% do valor legal de requisitos para novas construções.

O comportamento em situação de incêndio foi também objeto de estudo no âmbito deste projeto. Os requisitos legais, impostos pela Portaria n.º135/2020 [19], para o comportamento ao fogo dos edifícios e os seus elementos são expressos em termos de tempo de exposição ao fogo durante o qual o edifício é obrigado a manter a sua integridade estrutural, permitindo a saída em segurança dos seus ocupantes. Dependendo do tipo de edifício (uso, importância, número de ocupantes e nível de risco), existem várias classes diferentes de resistência ao fogo.

Na atual regulamentação, a resistência ao fogo é classificada pelas Euroclasses de resistência, através da conjugação das seguintes letras: i) R – resistência estrutural; ii) E – estanquicidade a chamas e gases quentes; e iii) I – isolamento térmico, garantindo que na face não exposta não se atingem temperaturas críticas. Estas letras podem ser conjugadas de diversas formas caracterizando o elemento em causa, sendo seguidas de um número que reflete o tempo em escalões de minutos que o material consegue garantir os requisitos anteriormente referidos (15, 30, 45, 60, 120, 180).

De seguida apresenta-se a Tabela 3 que ilustra as classes mínimas de resistência ao fogo em para elementos estruturais, dependendo da categoria de uso e risco do edifício ou estrutura, dado pela Portaria n.º 135/2020 [19].

Tabela 3. Resistência mínima ao fogo para elementos estruturais em edifícios [19].

Tipo de uso	Categoria de risco				Função do elemento
	1º	2º	3º	4º	
I, III, IV, V, VI, VII, VII, IX, X	R 30 REI 30	R 60 REI 60	R 90 REI 90	R 120 REI 120	Suporte ou suporte e compartimentação
II, XI, XII	R 60 REI 60	R 90 REI 90	R 120 REI 120	R 180 REI 180	Suporte ou suporte e compartimentação

Nota: o tipo de uso (utilização) de um edifício é definido pelo Artigo 8.º da Portaria n.º 220/2008 [20].

No âmbito do EasyFloor, as classes mínimas de resistência ao fogo que foram consideradas para os painéis sanduíche são: i) REI 30 e REI 60 para os painéis totalmente GFRP; e ii) REI 60 e REI 90 para os painéis híbridos. A solução híbrida foi concebida para períodos de tempo mais longos, bem como um campo de aplicação mais amplo e, portanto, tem requisitos mais exigentes. Os painéis totalmente GFRP foram concebidos para edifícios habitacionais com requisitos de resistência ao fogo menos existentes. A título de exemplo refere-se que para edifícios habitacionais com uma altura máxima de 28 m, o limite mínimo de REI 60.

No EasyFloor procurou-se a elevada durabilidade, intrínseca aos materiais FRP, e a ausência de exigência de manutenção durante a vida útil, sendo uma vantagem competitiva relevantes face às soluções tradicionais, nomeadamente em betão armado, metálicas ou mista.

Por fim, seria expectável que as soluções propostas apresentassem um custo competitivo, conferidas pelo processo de fabrico por pultrusão, significativamente mais económico do que o correspondente a painéis sanduíche produzidos por infusão a vácuo ou laminação manual. No caso particular dos painéis híbridos, a incorporação de uma lâmina superior em FRC permitia manter a competitividade económica da solução construtiva para vãos e níveis de sobrecargas superiores.

1.2.3. Conceção, dimensionamento e otimização

O sistema estrutural adotado dependia da geometria e das condições de suporte. Deve ainda ter-se em consideração aspetos como a distribuição de carga ao longo das direções transversais e longitudinais do piso, a restrição a nível da rotação imposta pelos suportes do piso e o comportamento do painel no que diz respeito às conexões entre painéis. No entanto, no âmbito dos estudos efetuados, considerou-se um modelo estrutural corresponde a um segmento de piso simplesmente apoiado funcionando em flexão cilíndrica, equivalente a um modelo de viga com um comprimento total L e a largura b , tendo sido adotado de uma forma conservadora para uma análise preliminar do projeto. No que se segue resumem-se os cálculos desenvolvidos para a obtenção da geometria final do painel. Todos os detalhes poderão ser encontrados em "Preliminary design of the EasyFloor sandwich panels", Task 1.1 – Report 1.1 [8].

Deste modo, considerando um sistema estrutural de uma viga simplesmente apoiada com um carregamento distribuído uniformemente com um valor de p_{Ed} (carga por unidade área), verifica-se que o esforço transversal máximo, localiza-se na zona dos apoios, e o momento fletor máximo, localiza-se a meio vão, podendo ser calculados de acordo com as equações (1) e (2), respetivamente.

$$V_{Ed} \text{ [kN]} = \frac{p_{Ed} \text{ [kN/m}^2\text{]} \cdot b \text{ [m]} \cdot L \text{ [m]}}{2} \quad (1)$$

$$M_{Ed} \text{ [kN]} = \frac{p_{Ed} \text{ [kN/m}^2\text{]} \cdot b \text{ [m]} \cdot L^2 \text{ [m]}}{8} \quad (2)$$

Após definido o sistema estrutural foi necessário calcular as ações e os coeficientes de combinação das cargas permanentes (ações permanentes) e das sobrecargas (ações variáveis). Neste sentido, no que diz respeito às cargas permanentes consideradas no EasyFloor para a reabilitação dos pisos dos edifícios foram incluídas: i) o peso próprio dos painéis (g_{sw}); e ii) outras cargas permanentes (g_{opi}) (e.g., divisórias, tetos falsos, instalações específicas).

O peso próprio dos painéis foi estimado a partir das dimensões nominais e dos valores característicos das densidades dos materiais. Em relação às outras cargas permanentes, considerou-se um valor característicos global de 1.5 kN/m².

Ao nível das sobrecargas que foram consideradas, estas dependem da categoria de utilização edifício e da zona de carregamento. Segundo o Eurocódigo 1 – Parte 1.1 (EN 1911-1, [16]) o valor característico de sobrecarga que deve ser considerando para o presente caso é de 2.0 kN/m² - valor máximo de sobrecarga destinada a pavimentos de edifícios de categoria A (atividades domésticas e residenciais).

Para além das sobrecargas, é necessário definir os coeficientes parciais de combinações de ações. Deste modo, a determinação destes coeficientes foi realizado de acordo com as disposições do Eurocódigo 0 (EN 1990, [15]) e, também, as recomendações das diretrizes de projeto do EUROCOMP [21] para os fatores parciais de materiais aplicados aos laminados de FRP e aos núcleos de espuma. Os valores adotados encontram-se indicados na Tabela 4 e na Tabela 5.

Tabela 4. Valores recomendados para os coeficientes parciais de segurança (adaptado de [15]).

Fator parcial de segurança	Valor
γ_M	3.16
γ_G	1.35
γ_Q	1.50
γ_{conc}	1.50

onde: i) γ_M é coeficiente parcial relativo a uma propriedade de um material; ii) γ_G é o coeficiente parcial relativo às ações permanente; iii) γ_Q é o coeficiente relativo às ações variáveis; e iv) γ_{conc} é o coeficiente

parcial relativo ao betão. Todos os coeficientes anteriormente apresentados também cobre incertezas de modelação e desvios nas dimensões.

Tabela 5. Valores recomendados para os coeficientes ψ para edifícios (adaptado de [15]).

Categoria	Fator	Valor
Sobrecargas em edifícios de categoria A	ψ_0	0.7
	ψ_1	0.5
	ψ_2	0.3

O valor de calculo (X_d) da propriedade de um material ou de um produto pode ser expresso, em geral, da seguinte forma:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (3)$$

onde: (i) X_k representa o valor característico da propriedade do material ou do produto e (ii) γ_M é o coeficiente parcial relativo à propriedade do material ou do produto que tem em conta: a possibilidade de um desvio desfavorável da propriedade do material ou do produto em relação ao correspondente valor característico.

As propriedades características dos núcleos de espuma foram determinadas a partir de uma revisão da literatura referente ao projeto e de dados de caracterização experimental de materiais anteriormente ensaiados. Para os laminados de FRP, a Teoria Clássica de Laminados (CLT do inglês *Classical Lamination Theory*) [22] foi utilizada para determinar os módulos elásticos relevantes e os coeficientes de *Poisson*, com base nas propriedades das fibras e resinas extraídas dos dados técnicos do promotor deste projeto. Deste modo, definiu-se os valores típicos de propriedades de resistência com base nas informações anteriormente mencionadas. O valor de projeto para as propriedades do FRC, ou seja, a resistência do FRC foram afetadas por um coeficiente parcial de segurança de 1.50 com base no Eurocódigo 2 [23].

As dimensões propostas para a secção transversal do painel híbrido são apresentadas na Figura 5. A secção transversal é caracterizada por possuir 500 mm de largura e 140 mm de altura, sendo o comprimento do painel fixado nos 5 m. A camada inferior de C/GFRP (combinação de fibras de vidro com fibras de carbono) e as nervuras externas têm 5 mm e 4 mm de espessura, respetivamente. No que diz respeito à arquitetura de fibras do laminado foram consideradas diferentes propostas para a camada inferior e para as nervuras externas, estas propostas apresentam-se na Figura 6. Em termos

quantitativos, a fração de volume de fibras foi de aproximadamente de 51%, para todos os laminados projetados. A camada superior foi projetada para ser uma argamassa de cimento de alto desempenho (FRC) com uma espessura de 20 mm, um módulo de elasticidade de pelo menos 23.8 GPa e uma densidade de 2500 kg/m³. Finalmente, o núcleo do painel híbrido era composto por uma espuma de poliuretano (PUR) com uma densidade de 35 kg/m³.

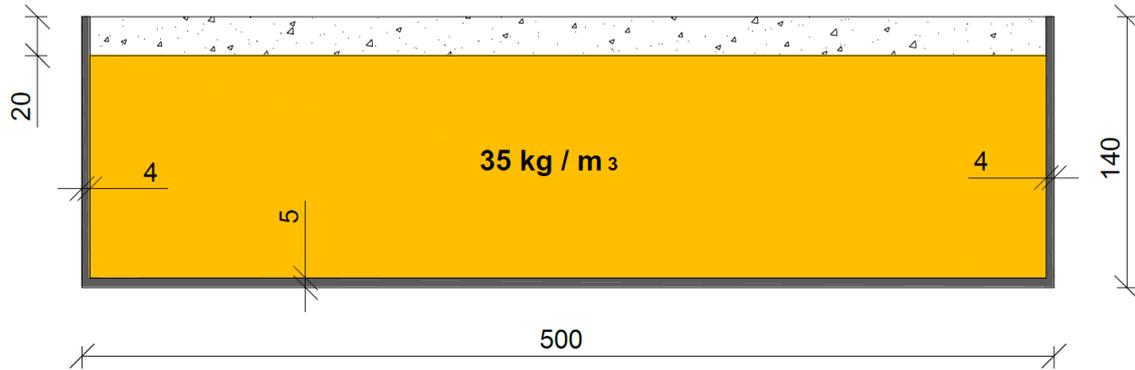


Figura 5. Seção transversal proposta para o painel sanduíche híbrido [8].

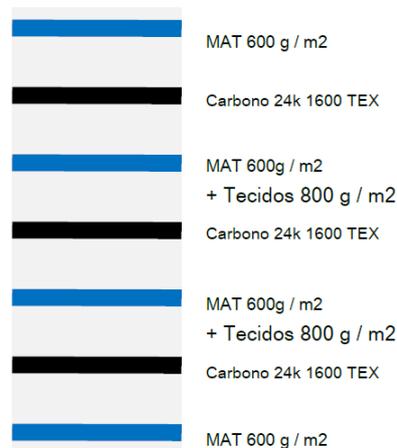


Figura 6. Arquitetura dos laminados [8].

As propriedades mecânicas estimadas dos laminados e do núcleo de espuma de poliuretano são apresentadas na Tabela 6 e na Tabela 7, respetivamente. Além disso, as propriedades dos laminados foram calculadas tendo em conta os 539 fios de *roving* da camada inferior e os 69 fios de *roving* nas nervuras.

Tabela 6. Propriedades mecânicas estimadas dos laminados.

Laminado	E_L [GPa]	E_T [GPa]	G_{LT} [GPa]
Face inferior	57.5	11.8	6.8
Nervuras	45.2	12.0	6.1

Tabela 7. Propriedade mecânicas estimadas no núcleo de espuma PUR.

E_t [MPa]	E_c [MPa]	G [MPa]	$f_{tu,k}$ [MPa]	$f_{cu,k}$ [MPa]	$f_{su,k}$ [MPa]
7.7	7.7	2.6	0.20	0.25	0.15

De acordo com o Eurocódigo 1 [16], a combinação de ações proposta para o projeto aos estados limite últimos é dada pela equação (4). O peso próprio do painel sanduíche híbrido é de $g_{sw} = 0.6$ kN/m², as restantes cargas permanentes que foram consideradas são de $g_{opl} = 1.5$ kN/m² e considerou-se a sobrecarga de $q = 2$ kN/m².

$$p_{Ed} = \gamma_G \cdot (g_{sw} + g_{opl}) + \gamma_Q \cdot q$$

$$\Leftrightarrow p_{Ed} = 1.35 \cdot (0.6 + 1.5) + 1.5 \cdot 2 = 5.84 \text{ kN/m}^2 \quad (4)$$

Da combinação de ações obteve-se uma carga de $p_{Ed} = 5.84$ kN/m². Sendo o comprimento do painel (L) de 5 m e a largura (b) de 0.5 m, resolvendo as equações (1) e (2), resultou um esforço transversal máximo de $V_{Ed} = 7.30$ kN (zona dos apoios) e um momento fletor máximo de $M_{Ed} = 9.13$ kN·m (a meio vão).

Para avaliar a tensão máxima de tração na camada inferior, foram utilizadas as equações de equilíbrio para a secção de meio vão. De modo a simplificar, foi admitido um estado de tensão constante na camada superior de betão, conforme ilustrado na Figura 7.

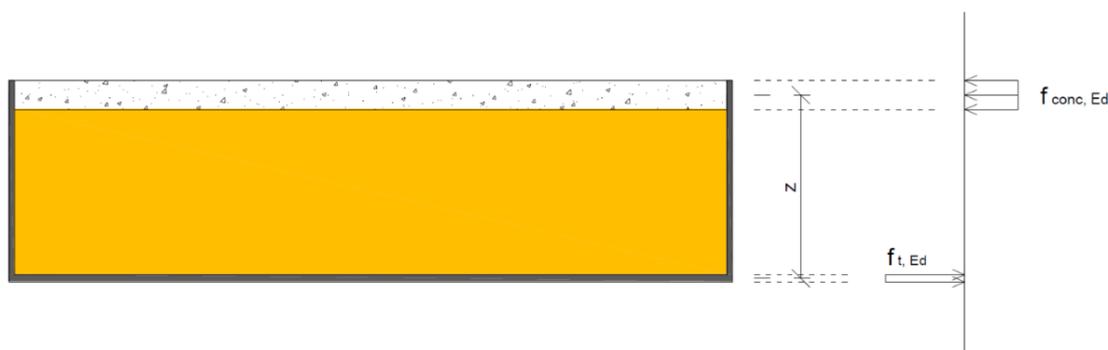


Figura 7. Equilíbrio de tensões para o painel híbrido em flexão pura [8].

Na figura anterior, $f_{\text{conc,Ed}}$ representa o valor da tensão de projeto na camada de betão, $f_{\text{t,Ed}}$ é o valor da tensão de projeto da face inferior C/GFRP híbrida e z é o braço do momento interno, que foi considerado aproximadamente igual a 127.5 mm. Assim, utilizando a equação (5) é possível estimar $f_{\text{t,Ed}}$ utilizando o momento de flexão $M_{\text{Ed}} = 9.13 \text{ kN}\cdot\text{m}$, o braço do momento interno $z = 0.1275 \text{ m}$, a largura do painel sanduíche $b = 0.5 \text{ m}$ e a espessura da camada inferior de C/GFRP $t_f = 0.005 \text{ m}$.

$$f_{\text{t,Ed}} = \frac{M_{\text{Ed}}/z}{b \cdot t_f} \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{t,Ed}} = \frac{9.13/0.1275}{0.5 \cdot 0.005} = 28643.1 \text{ Pa}$$

Da equação anterior, obteve-se uma tensão de projeto na face inferior de $f_{\text{t,Ed}} = 28.6 \text{ MPa}$. A resistência axial característica das faces foi conservadoramente considerada igual a 200 MPa, tanto em tração como em compressão, resultando numa tensão máxima admissível de 63.3 MPa ($f_{\text{t,Rd}}$), com base nos resultados verificados nos estados limite últimos (ULS) ao painel híbrido [8]. Deste modo, verifica-se que cumpre os critérios de verificação ULS previstos pela equação (6).

$$f_{\text{t,Ed}} \leq f_{\text{t,Rd}} \quad (6)$$

Relativamente à tensão de compressão máxima na camada superior de betão $f_{\text{conc,Ed}}$, utilizando a abordagem semelhante para a face de C/GFRP, pôde ser calculada a partir da equação (7), onde b é a largura do painel sanduíche, t_{conc} é a espessura da camada superior de betão igual a 0.02 m e E_{conc} é o módulo de elasticidade do FRC:

$$f_{\text{conc,Ed}} = \frac{M_{\text{Ed}}/z}{b \cdot t_{\text{conc}}} \quad (7)$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{conc,Ed}} = \frac{9.13/0.1275}{0.5 \cdot 0.02} = 7160.8 \text{ Pa}$$

Da equação anterior, resulta uma tensão de compressão máxima na camada superior de betão de $f_{\text{conc,Ed}} = 7.2 \text{ MPa}$. No âmbito do EasyFloor considerou-se a utilização de um betão com uma resistência média à compressão com um valor mínimo ($f_{\text{conc,m}}$) de 30 MPa, o que resulta, segundo o Eurocódigo 2 ([23]), numa resistência à compressão característica ($f_{\text{conc,k}}$) de 22 MPa, levando a uma resistência máxima à compressão de 14.8 MPa e, assim, verifica-se o critério de rotura apresentado na equação (8).

$$f_{\text{conc,Ed}} \leq f_{\text{conc,Rd}} \quad (8)$$

Um dos critérios impostos ao painel híbrido é que a posição do eixo neutro em condições SLS e ULS conduzisse à existência de compressões ao longo da espessura da camada de FRC. O eixo neutro x (estimado a partir da base do painel) foi estimado usando a equação (11), utilizando a deformação ε_f da face inferior C/GFRP (ver equação (9)), a deformação no topo da face de betão $\varepsilon_{\text{conc}}$ (ver equação (10)) e o braço do momento z .

$$\varepsilon_f = \frac{f_{t,Ed}}{E_{L,f}} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\text{conc}} = \frac{f_{\text{conc,Ed}}}{E_{\text{conc}}} \quad (10)$$

$$x = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_f + \varepsilon_{\text{conc}}} \cdot z \quad (11)$$

Com bases nas equações anteriores, foi obtido um valor de 84.5 mm para o eixo neutro. Sabendo que a camada de betão se encontra a 120 mm da base do painel sanduíche, é possível concluir que a camada de betão está completamente comprimida nas condições de carga de projeto.

Para painéis sanduíche com nervuras de reforço, a contribuição do material do núcleo para a resistência ao corte é significativamente menor do que em painéis simples (sem nervuras). De modo a estimar a tensão de corte no núcleo de PUR, a área de corte efetiva α_c foi estimada usando a equação (12), onde G_C e G_R são os módulos de corte do núcleo e das nervuras, respetivamente, enquanto $A_{V,c}$ e $A_{V,r}$ são as áreas de corte do núcleo e das nervuras, respetivamente.

$$\alpha_c = \frac{G_C \cdot A_{V,c}}{G_C \cdot A_{V,c} + G_R \cdot A_{V,r}} \quad (12)$$

Por outro lado, a tensão de corte de projeto ($\tau_{c,Ed}$) no núcleo pode ser calculada a partir da equação (13), onde t_c é a espessura do núcleo e t_r é a espessura das nervuras.

$$\tau_{c,Ed} = \frac{\alpha_c \cdot V_{Ed}}{t_c \cdot (b - 2 \cdot t_r)} \quad (13)$$

A partir das equações anteriores foi possível calcular uma área efetiva de corte de 0.025 (α_c) e a tensão de corte no núcleo de 3.3 kPa ($\tau_{c,Ed}$), que é inferior à tensão de corte máxima do poliuretano ($f_{cV,Rd}$) de 7.9 kPa, verificando assim os critérios de ULS presentes na equação (14).

$$\tau_{c,Ed} \leq f_{cV,Rd} \quad (14)$$

À semelhança da rotura por corte do núcleo, a tensão de corte das nervuras $\tau_{ribs,Ed}$ pode ser calculada usando a área de corte efetivo das nervuras α_r (calculado a partir de $\alpha_r = 1 - \alpha_c$), através da equação (15), onde n_r é o número de nervuras do painel sanduíche ($n_r = 2$), t_r é a espessura da nervura ($t_r = 5$ mm) e h_r é a altura das nervuras (considerado igual a t_c).

$$\tau_{r,Ed} = \frac{\alpha_r \cdot V_{Ed}}{n_r \cdot t_r \cdot h_r} \quad (15)$$

A tensão de corte nas nervuras do painel obteve-se um valor de 7.7 MPa, o que é inferior a uma tensão de corte de projeto em laminados de GFRP ($f_{rV,Rd}$) de 8.5 MPa, cumprindo assim o critério de verificação ULS como se verifica na equação (16).

$$\tau_{r,Ed} \leq f_{rV,Rd} \quad (16)$$

Após verificado o cumprimento dos estados limite últimos (ULS), procedeu-se à verificação aos estados limite de serviço (SLS), nomeadamente: i) o controlo de deformação; e ii) o controlo das vibrações.

A deformação máxima do painel foi calculada utilizando a combinação de ações quase permanente e, com base nas recomendações do *CNR Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements* [24]. Este documento sugere um critério de deformação máxima de $L/500$ para pisos em que as flechas sejam suscetíveis de danificar elementos adjacentes. Considerou-se 50 anos para efeitos do período de fluência. A equação (17) foi utilizada para verifica este critério limite, onde: i) d_{50} é deformação total após os 50 anos de carregamento sobre a combinação de ações quase permanente; ii) d_0 é a deformada instantânea devido ao próprio peso do painel; e iii) d_{opl} é a deformação associada às restantes cargas permanentes.

$$d_{50} - d_0 - d_{opl} \leq \frac{L}{500} \quad (17)$$

O valor de deformação instantânea devido ao peso próprio do painel (d_0) e das restantes cargas permanentes (d_{opl}) foram estimados considerando as componentes de flexão e a deformação por corte, tal como se demonstra nas equações (18) e (19), respetivamente.

$$d_0 = \frac{5}{384} \cdot \frac{p_{sw} \cdot b \cdot L^4}{E \cdot I_{eq}^0} + \frac{1}{8} \cdot \frac{p_{sw} \cdot b \cdot L^2}{\sum_{i=1}^n G_i^0 \cdot A_i^*} \quad (18)$$

$$d_{opl} = \frac{5}{384} \cdot \frac{p_{opl} \cdot b \cdot L^4}{E \cdot I_{eq}^0} + \frac{1}{8} \cdot \frac{p_{opl} \cdot b \cdot L^2}{\sum_{i=1}^n G_i^0 \cdot A_i^*} \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^n G_i^0 \cdot A_i^* = G_r \cdot A_{V,r} + G_c \cdot A_{V,c} \quad (20)$$

onde: i) p_{sw} é o peso próprio do painel sanduíche (0.6 kN/m²); ii) p_{opl} é o peso próprio das restantes cargas permanentes (1.5 kN/m²); iii) b é a largura do painel (0.5 m); iv) L o comprimento do painel (5 m); v) $E \cdot I_{eq}^0$ é a rigidez longitudinal inicial à flexão; e vi) a rigidez ao corte $\sum_{i=1}^{50} G_i^0 \cdot A_i^*$ que pode ser calculada através da equação (20), ignorando os efeitos de fluência.

Para a previsão da deformação a 50 anos, utilizou-se a equação (21), onde p_{pq} é a combinação de ações quase permanente, calculada a partir da equação (22).

$$d_{50} = \frac{5}{384} \cdot \frac{p_{pq} \cdot b_w \cdot L^4}{E \cdot I_{eq}^{50}} + \frac{1}{8} \cdot \frac{p_{opl} \cdot b_w \cdot L^2}{\sum_{i=1}^{50} G_i^{50} \cdot A_i^*} \quad (21)$$

$$p_{pq} = p_{sw} + p_{odl} + 0.3 \cdot q \quad (22)$$

Para calcular a rigidez à flexão equivalente e a rigidez ao corte, utilizaram-se as seguintes equações. A equação (23) e a equação (24) podem ser usadas para homogeneizar a secção das nervuras (m_{21}) e da camada de betão (m_{31}) até à face inferior, respetivamente. Recorrendo à equação (25) é possível então determinar a área de secção equivalente (A_{eq}) dependendo apenas da área da secção transversal de cada material. A equação (26) fornece o centro de rigidez (Y_g) da área da secção transversal do painel sanduíche, dependendo apenas do centro de rigidez de cada material ($Y_{g,i}$). Finalmente, utilizando a equação (27), estima-se a rigidez longitudinal à flexão (EI_{eq}).

$$m_{21} = E_{r,L}/E_L \quad (23)$$

$$m_{31} = E_{\text{conc}}/E_L \quad (24)$$

$$A_{\text{eq}} = A_f + m_{21} \cdot A_{V,r} + m_{31} \cdot A_{\text{conc}} \quad (25)$$

$$Y_g = \frac{A_f \cdot Y_{g,f} + m_{21} \cdot A_{\text{ribs}} \cdot Y_{g,r} + m_{31} \cdot A_{\text{conc}} \cdot Y_{g,\text{conc}}}{A_{\text{eq}}} \quad (26)$$

$$EI_{\text{eq}} = E_L \cdot [I_L + m_{21} \cdot I_{r,L} + m_{31} \cdot I_{\text{conc}}] \quad (27)$$

A com a finalidade de avaliar a rigidez à flexão e ao corte equivalentes para um período de 50 anos, todos os módulos de elasticidade foram afetados pelo coeficiente de fluência, como se demonstra na equação (28) e na equação (29). Realça-se que a contribuição do poliuretano para a rigidez à flexão foi desprezado devido à baixa densidade deste material (35 kg/m² de densidade).

$$E_i^{50} = E_i^0 / \chi_i \quad (28)$$

$$G_i^{50} = G_i^0 / \chi_i \quad (29)$$

Os coeficientes de fluência (χ_i) que afetam os módulos de elasticidade considerou-se 3.0 para o betão (em conformidade com o Eurocódigo 2 [23]) e 1.66 para os FRP e flexão (em conformidade com o CNR [24]). No que diz respeito aos coeficiente de fluência que afetam os módulos elasticidade ao corte considerou-se 3.09 para as nervuras de C/GFRP (em conformidade com o CNR [24]) e 5.07 para a espuma de poliuretano (em conformidade com Garrido [25]).

Tendo por base o descrito, obteve-se para o termo da esquerda da equação (17) o valor de 8.98 mm, abaixo do limite de deformação máxima 10 mm ($L/500$).

Finalmente, para o controlo de vibração procedeu-se ao cálculo da primeira frequência natural do painel sanduíche híbrido. Para o efeito recorreu-se a uma simples abordagem de *Rayleigh*, para um único grau de liberdade avaliado no meio do painel, considerou-se que a energia potencial máxima a velocidade nula é igual à energia cinética máxima a deformação nula, em vibração livre [26]. Assim, a equação (30) que diz respeito à primeira frequência natural à flexão do painel sanduíche híbrido, onde: i) D_{50} é a rigidez à flexão do painel híbrido considerando a redução por um período de 50 anos; e ii) M é a massa total que contribui para o grau de liberdade.

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{D_{50}}{M}} \quad (30)$$

Para efeitos de simplificação, estimou-se a massa M através da equação (31), permitindo assim calcular o valor de D_{50} .

$$M = \frac{L}{2} (p_{sw} + p_{odl}) \quad (31)$$

$$D_{50} = \frac{48EI_{eq}^{50}}{L^3} \quad (32)$$

Tendo em contas as equações anteriores, obteve-se um $D_{50} = 701.9$ kN·m e $M = 0.26$ ton. Assim, resultou uma frequência natural a 50 anos de 8.3 Hz, o que é superior a 5 Hz.

A nível de requisitos térmicos proposto no projeto, a condutividade térmica (U) do painel sanduíche híbrido foi estimado com base na equação (33). O valor (R_{si}) inclui a convecção interior e os feitos da radiação na transmitância térmica, enquanto o valor (R_{se}) inclui os mesmos efeitos exteriores. O $\sum_j R_j$ é a resistência térmica devido à condução dos materiais constituintes do painel, e foram calculados segundo a equação (34), sendo os seus valores relevantes apresentados na Tabela 8.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad (33)$$

$$\sum_j R_j = \sum_j \frac{e_j}{\lambda_j} \quad (34)$$

Tabela 8. Valores relevantes para o cálculo da resistência térmica dos materiais [8].

Material	Espessura [mm]	Condutividade térmica [W/m·K]
GFRP	5	0.350
PUR	130	0.024
FRC	20	0.012

Para o cálculo do valor U , a situação mais exigente foi analisada considerando uma zona climática I3, um ambiente exterior à face e uma direção de fluo de calor ascendente para um elemento horizontal. Neste caso, considerou-se um R_{si} de 0.10 e um R_{se} de 0.04.

O PUR atua como um isolamento térmico que preenche o núcleo, alcançado assim um valor de condutividade térmica global do painel de $0.19 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, o que cumpre os requisitos legais de isolamento térmico em construções para um fluxo de aquecimento menor que $0.30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

No que diz respeito à avaliação do desempenho acústico dos painéis sanduíche híbridos, foram avaliados o seu desempenho nível dos sons aéreos ($D_{nt,w}$) e aos sons de impacto ($L_{nT,w}$). Esta avaliação teve como base uma lei de massa empírica proposta por *Utley* [27] e pela equação empírica para pavimentos em betão proposta pela EN ISO 12354-2 [28], respetivamente.

$$D_{nt,w} = 20 + 14.5 \cdot \log_{10} \left(\frac{m}{4.9} \right) \quad (35)$$

$$L_{nT,w} = 164 - 35 \cdot \log_{10}(m) - \Delta L_w + K + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{0.016 \times V}{T_0} \right) \quad (36)$$

Utilizando as equações (35) e (36), sendo: i) a massa do painel híbrido proposto por superfície (m) de 59.6 kg/m^2 ; ii) um volume de divisão (V) igual a $3.56 \cdot 3.56 \cdot 2.7 \text{ m}^3$; iii) um nível de redução sonora (ΔL_w) de 19 dB devido ao isolamento do núcleo de espuma; iv) admitindo um fator correcional nulo (K); e v) um tempo de reverberação habitual (T_0) de 0.5 segundos. Deste modo, os isolamentos sonoros aos sons aerotransportados e de impacto são, respetivamente, de 35.7 dB e 87.1 dB .

Conclui-se, relativamente aos valores estimados, que cumprem 65% dos requisitos legais portugueses, que estão de acordo com os objetivos definidos para o projeto EasyFloor.

Por último, no que diz respeito ao desempenho ambiental, com base nos valores da pegada de carbono para os materiais constituintes do painel sanduíche híbrido, apresentados na Tabela 9, para a solução proposta pelo painel obteve-se uma pegada global de $132 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$, equivalente a $2.2 \text{ CO}_2/\text{kg}$.

Tabela 9. Pegada de carbono estimada para os materiais constituintes do painel [8].

Material	Pegada de carbono [kg eq. CO ₂ /kg]	Material	Pegada de carbono [kg eq. CO ₂ /kg]
Material do núcleo	4.14	Mantas de fibra de vidro	2.64
Fibra de vidro	2.64	Resina	7.47
Fibra de carbono	31.0	Betão	0.12

Tendo por base a solução inicial encontrada, o projeto EasyFloor incluiu uma etapa de otimização do painel sanduíche híbrido, recorrendo a algoritmos genéticos. O procedimento adotado de otimização

foi baseado em uma estratégia de abordagem global, dividida em duas etapas: i) em primeiro lugar, as características da solução de painel individual foram avaliadas por procedimentos analíticos e foi atribuída uma função de classificação; ii) em segundo lugar, o problema de otimização multiobjecto foi resolvido utilizando um algoritmo genérico, que realiza uma pesquisa aleatória de geração em geração e mantém os “melhores indivíduos”. Critérios de penalidade também foram considerados quando a solução de painel não atendia às restrições e requisitos de projeto. Diferentes soluções foram obtidas impondo diferentes restrições ao dimensionamento do painel, nomeadamente considerando: i) o comprimento; ii) a largura; e iii) a utilização de um ou dois tipos de fibras (vidro e carbono). No âmbito da presente dissertação apresenta-se um resumo dos estudos de otimização efetuados. Todos os detalhes poderão ser encontrados na publicação [29].

Os Algoritmos Genéticos (GAs – do inglês *Genetic Algorithms*) são uma abordagem meta-heurística que pode ser utilizada na resolução de problemas de otimização com base na seleção natural e genética encontrada na natureza [30]. Os GAs foram introduzidos inicialmente por *Holland* [31], e rapidamente se espalharam por diversas áreas de engenharia para solucionar diversos problemas de decisão. Em geral, os GAs mostram-se ferramentas mais confiáveis em problemas de otimização. No EasyFloor, a utilização dos GAs teve como finalidade a otimização do painel sanduíche, procurando a geometria ótima do painel, minimizando o peso próprio, o custo e a pegada ambiental.

Neste problema de otimização, adotou-se um conceito de estado estacionário do GA [30], conforme apresentado na Figura 8. O processo evolutivo na procura da solução do problema começou pela criação de uma população aleatória com alta diversidade, dentro das limitações e restrições do problema. O número de indivíduos (NI) a ser criado dependeu da complexidade do problema, tendo em atenção que: i) um baixo NI pode levar a uma solução falsa; e ii) um grande NI pode aumentar severamente o tempo de computação. Após a criação de uma determinada população, foi utilizada uma função de avaliação da aptidão física para classificar cada indivíduo de acordo com as funções objetivas desejadas e as condições de limite. Em seguida, a lista de população foi organizada por classificação onde, recorrendo a uma seleção elitista, sendo selecionados os melhores indivíduos para criar uma nova descendência de indivíduos, utilizando operadores genéticos, nomeadamente: i) cruzamentos; e ii) mutações. Finalmente, a aptidão da nova descendência foi avaliada e, em seguida, foi testado o critério de paragem. Por defeito, quando a população apresenta alta aptidão e baixa diversidade, o GA está próximo do conjunto solução, caso contrário, deve retornar à seleção elitista de indivíduos e repetir o processo novamente.

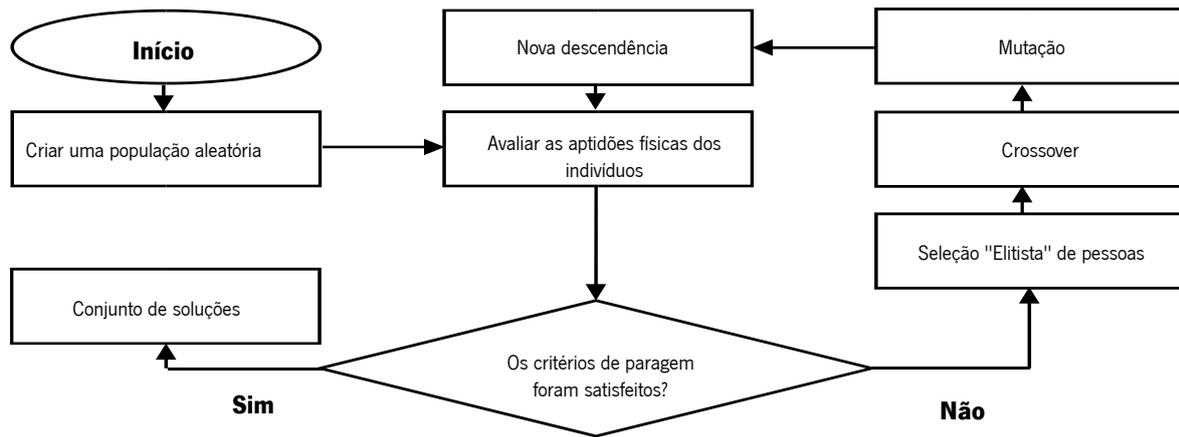


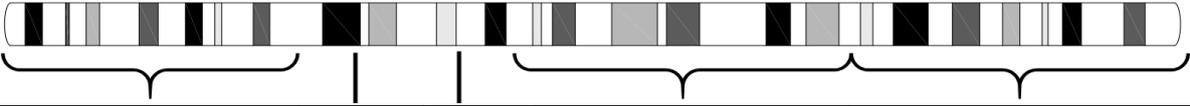
Figura 8. Fluxograma do algoritmo genérico (adaptado de [29])

No painel sanduíche híbrido, o procedimento de otimização contou com 22 variáveis diferentes armazenadas numa matriz bidimensional com comprimento e largura iguais ao número de indivíduos e variáveis de entrada, respetivamente. Além disso, as variáveis de entrada foram armazenadas com diferentes tipos de dados. As variáveis de entrada formaram uma estrutura do tipo cromossoma com 5 genes, como mostra a Figura 9, onde cada gene define uma propriedade principal do painel híbrido.

Tal como referido, o procedimento de otimização tinha como objetivo encontrar soluções de projeto para o painel com o peso próprio minimizado, preço competitivo e uma pegada ambiental minimizada. Assim, adotou-se uma função de otimização multiobjectivo, tal como apresentada na equação (37). Além disto, estabeleceu-se um número máximo de indivíduos igual a 100.

$$\min \left[\begin{array}{l} \text{peso}(x_1, x_2, \dots, x_{22}), \text{custo}(x_1, x_2, \dots, x_{22}), \\ \text{pegada ambiental}(x_1, x_2, \dots, x_{22}) \end{array} \right] \quad (37)$$

Com a finalidade da criação da população aleatória e de excluir continuamente os indivíduos fora dos limites da descrição do problema, inicialmente, foi estabelecido um conjunto de condições limite para evitar soluções incompatíveis. Algumas destas condições limites foram estabelecidas de acordo com os requisitos do fabricante, enquanto outras foram estabelecidas a fim de garantir o cumprimento das normas europeias, Eurocódigo 1 [16] e a recomendação italiana CNR DT 205 [24]. Na Tabela 10 são apresentados todos as condições limites considerados para a otimização deste problema. Além disso, foram avaliadas diferentes soluções através da alteração das condições limites do problema, nomeadamente: i) utilização apenas de GFRP na arquitetura das fibras dos laminados; e ii) utilização de mechas de fibras de carbono e de vidro. No total, foram avaliada quatros soluções.



Geometria	Betão	PUR	Arquitetura dos laminados da base	Arquitetura dos laminados das nervuras
[1] Comprimento de vão [2] Largura [3] Espessura do laminado inferior [4] Espessura da camada de betão [5] Espessura do PUR [6] Espessura das nervuras [7] Números de nervuras	[8] Módulo de elasticidade	[9] Densidade	[10] N° de camadas de fibra [11] Fração de volume de fibras [13] Mantas de tecido com fios externos cortados [14] Mantas de fios cortados das camadas de esteira combinada [15] Tecidos de fios 0/90 da esteira combinada [16] Tecidos de <i>Roving</i>	[17] N° de camadas de fibra [18] Fração de volume de fibras [19] Mantas de tecido com fios externos cortados [20] Mantas de fios cortados das camadas de esteira combinada [21] Tecidos de fios 0/90 da esteira combinada [22] Tecidos de <i>Roving</i>

Figura 9. Variáveis de entrada para o cromossoma GA (adaptado de [29]).

Tabela 10. Condições limite (adaptado de [29]).

Variável	Unidades	Símbolo	Mínimo	Máximo
Peso próprio	kg/m ²	ω	-	75
Altura do painel	mm	h	-	140
Espessura camada de betão	mm	t_{conc}	18.5	-
Espessura da camada inferior de GFRP	mm	t_{bot}	3	6
Espessura das nervuras de GFRP	mm	t_{ribs}	3	6
Densidade do PUR	kg/m ³	ρ_{pur}	35	120
Deformação máxima a 50 anos (SLS)	mm	δ_{50}	-	10
Tensão de corte no PUR	MPa	τ_{pur}	-	0.3
Tensão de corte nas nervuras de GFRP	MPa	τ_{ribs}	-	27.5
Tensão de compressão no betão	MPa	σ_{conc}	-	30
Tensão de tração na camada inferior de GFRP	MPa	σ_{bot}	-	200
Fração de volume de fibras nos laminados	%	v_f	-	50
Conductividade térmica	W/m ²	U	-	0.3
Rigidez axial longitudinal	MN/m	EA_L	550	-
Rigidez axial transversal	MN/m	EA_T	110	-
Isolamento acústico para sons aéreos	dB	D_{nwt}	35	-
Isolamento acústico para sons de impacto	dB	L_{nwt}	95	-

Os resultados obtidos da otimização encontram-se na Figura 10 e na Tabela 11, onde são apresentados os indivíduos que obtiveram o maior peso na verificação dos critérios de paragem. Nestas soluções (S1 a S4), a deformação máxima a 50 anos para o estado limite de serviço foi sempre igual a 10 mm, o que significa que este critério é condicionante. Além disso, as soluções S1 e S2 apresentam altura do painel que excediam a limitação imposta de 140 mm. Este resultado pode ser explicado pela natureza de estado estável dos algoritmos genéricos (GA) utilizados, que mantém constante o número de indivíduos de geração para geração. Este conceito permite que o GA continue a procurar os melhores indivíduos, mesmo que a população seja “defeituosa”. Em termos de aptidão física, a melhor solução foi a S1, mas esta solução não cumpre o critério de altura máxima do painel sanduíche. Além disso, todas as soluções apresentaram resultados semelhantes de peso próprio e preço, com exceção da pegada ambiental, devido ao elevado impacto ambiental provocados pela utilização de fibras de carbono.

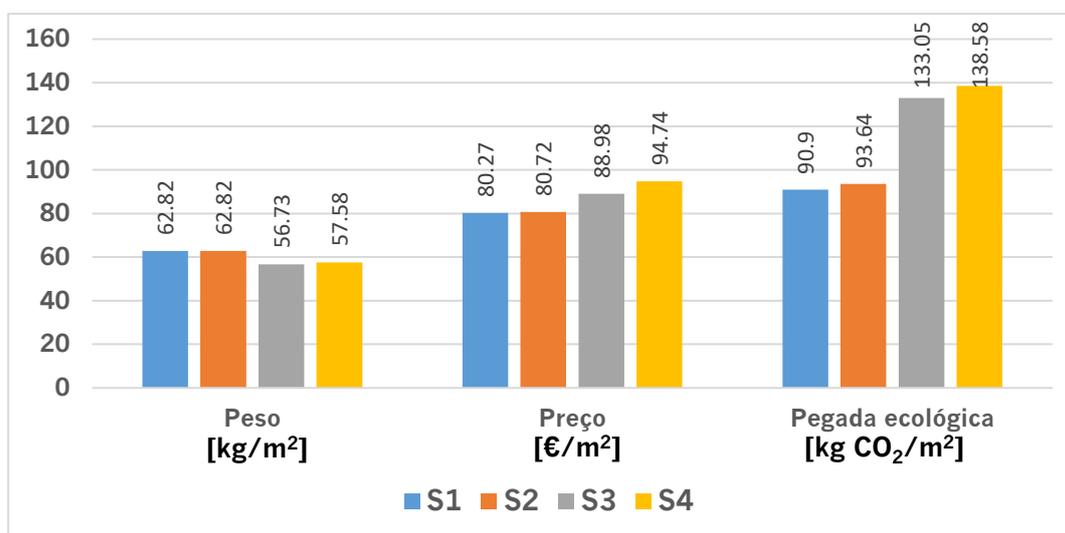


Figura 10. Valores de função objetivo para cada solução (adaptado de [29]).

Tabela 11. Resultados em termos dos parâmetros físicos e geométricos obtidos [29].

Solução	L [m]	b [m]	h [mm]	t_{conc} [mm]	t_{bot} [mm]	t_{ribs} [mm]	ρ_{pur} [kg/m ³]	D_{nwt} [dB]	L_{nwt} [dB]	U [W/m ²]
S1	5	0.5	191.6	18.8	5.0	4.9	35.0	36.1	87.0	0.13
S2	5	0.5	187.0	18.9	4.9	3.9	35.0	36.1	86.8	0.14
S3	5	0.5	128.0	20.0	4.0	4.0	35.0	35.4	88.5	0.21
S4	5	0.5	126.7	20.0	4.0	4.0	35.0	35.5	88.3	0.22

Por fim, a solução S3 apresentou o melhor desempenho físico e, ao mesmo tempo, cumpria todas as restrições impostas. Portanto, esta solução foi a escolhida para a geometria/arquitetura do painel sanduíche híbrido, no âmbito do projeto EasyFloor.

1.2.4. Solução final

Ao longo do desenvolvimento do projeto EasyFloor surgiram algumas dificuldades que originaram uma solução de painel sanduíche híbrido final diferente da solução obtida pelo processo de otimização, apresentada na secção anterior.

A primeira grande dificuldade sentida pela ALTO na produção do painel está relacionada com os sistemas de guiamento face à quantidade e densidade muito elevada de fibras. A produção de painéis com sistema de encaixe (não descrito nesta dissertação) também se revelou problemática devido também à quantidade e densidade muito elevada de fibras. Apesar de se terem produzidos vários painéis com este sistema de encaixe, face aos diversos defeitos críticos obtidos, esta solução foi colocada de parte e foram desenvolvidos painéis sem encaixes com sistema de ligação adesiva. Outra dificuldade sentida durante a produção dos painéis estava relacionada com os problemas de impregnação das mantas de reforço; contudo, este desafio foi ultrapassado com o recurso a um sistema de bobagem de resina com caudal superior. Outra decisão que foi tomada no projeto para superar a dificuldade sentida nos sistemas de guiamento (face à quantidade e densidade de fibras) foi a redução da largura do painel de 500 mm para 300 mm. Esta decisão originou uma redução do peso próprio de cada painel, em contrapartida, originou na redução da produtividade do mesmo.

Um segundo aspeto que importa destacar está relacionado com o comportamento do painel em situação de incêndio. Na fase de candidatura tinham sido previstas duas hipóteses para dar cumprimento às exigências, não só de reação ao fogo, mas também da resistência ao fogo dos painéis. Uma dessas soluções passava pela incorporação de mantas intumescentes durante o processo de pultrusão. Contudo, esta solução conduziu a duas dificuldades: um nível prático e outro em termos de desempenho. Em relação à questão prática, a empresa ALTO percebeu-se da dificuldade em impregnar este tipo de mantas no processo de pultrusão. Por outro lado, o nível de melhoria de desempenho em termos de reação ao fogo destas mantas não foi extraordinariamente elevado. Em face destes dois aspetos, optou-se por uma outra solução que tinha sido prevista na candidatura do projeto, que foi adotar um sistema de proteção ao fogo em placa na forma de teto falso que também serviu outros dois propósitos, melhorias no desempenho acústico e possibilidade de usar essa caixa de ar para instalações técnicas.

Outra dificuldade sentida durante a produção do painel sanduíche híbrido foi a incorporação de fibras de carbono durante o processo de pultrusão. Por um lado, no processo de fabrico observaram-se algumas incompatibilidades da matriz com os dois tipos de fibras (vidro e carbono) e, também, não foi fácil garantir a distribuição uniforme destas duas fibras ao longo da secção transversal. Em paralelo, percebeu-se que apenas a utilização das fibras de vidro, para o vão de projeto definido (5 m), era suficiente a utilização das fibras de vidro, tornando assim uma solução mais económica e com uma pegada ecológica menor.

Finalmente, uma outra dificuldade sentida na produção dos painéis de natureza económica estava relacionada com a necessidade da existência de duas feiras: uma para produzir o painel sanduíche composto e outra para produzir o painel sanduíche híbrido. Devido a esta questão, foi apenas adotada uma única feira que resultou do painel composto otimizado (secção transversal ilustrada na Figura 11). A produção do painel híbrido teve como base a solução do painel composto, sendo adicionada a camada de FRC posteriormente à produção deste, aumentando a altura da secção total para 160 mm.

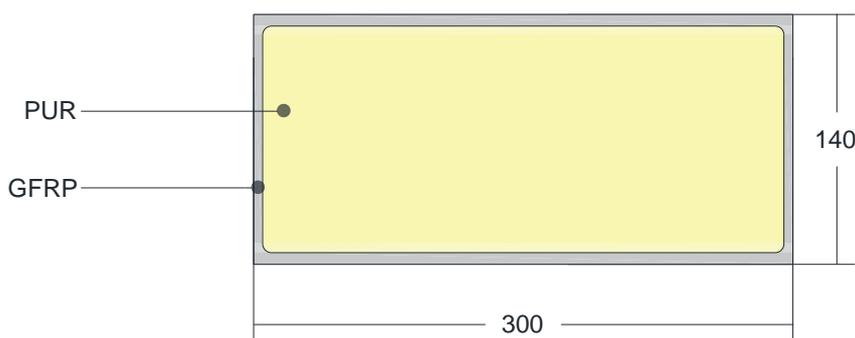


Figura 11. Painel sanduíche composto. Unidades em [mm].

A Figura 12 apresenta a solução final do painel sanduíche híbrido. A solução final dos painéis é caracterizada por uma lâmina inferior em GFRP, duas almas laterais também em GFRP, uma lâmina superior de GFRP à qual, posteriormente, é adicionada uma lâmina em betão reforçado com fibras de aço (FRC) e um núcleo em poliuretano (PUR). Esta solução construtiva possui, transversalmente, uma altura de 160 mm (dos quais 20 mm corresponde à camada superior de FRC; 5 mm à camada superior de GFRP; 130 mm ao núcleo de PUR; e 5 mm à camada inferior de GFRP) e uma largura de 300 mm (5 mm alma de GFRP; 290 mm ao núcleo de PUR; e 5 mm à outra alma de GFRP). A nível de comprimento, foram produzidos painéis com 5000 mm como solução construtiva; adicionalmente foram também produzidos com 4700 mm, 1500 mm e 300 mm para efeitos de vários ensaios experimentais.

O processo de produção da componente de GFRP/PUR dos painéis seria por pultrusão, enquanto a camada de FRC seria posteriormente adicionada sobre a componente de GFRP.

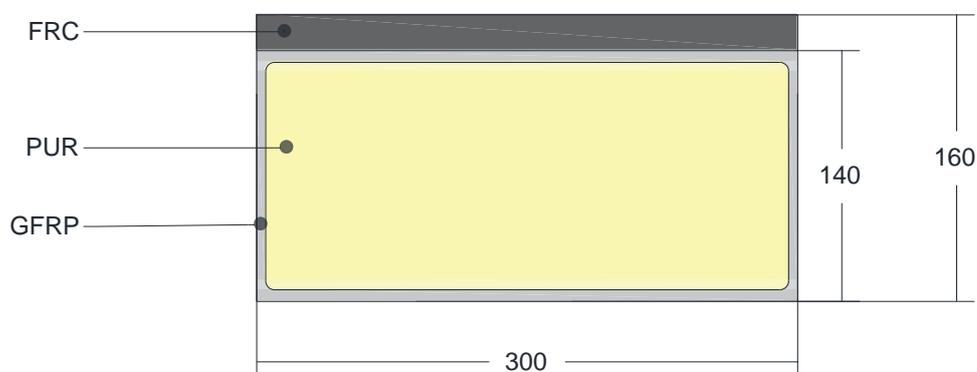


Figura 12. Painel sanduíche híbrido. Unidades em [mm].

O comportamento térmico, acústico e de resistência ao fogo dos painéis produzidos não foram alvo de estudo no âmbito da presente dissertação. Contudo, face à sua importância como resultado final dos painéis desenvolvidos, apresenta-se aqui nesta secção um resumo dos resultados obtidos.

O estudo do comportamento térmico foi realizado por Proença *et. al.* e todos os detalhes poderão ser encontrados “Thermal behavior of pultruded composite sandwich panels for applications in building floors”, Task 4.6 – Report 4.6 [32]. O estudo térmico compreendeu ensaios de caracterização dos diferentes materiais (GFRP, FRC, PUR) segundo o método estacionário e o método transiente de modo obter as propriedades termofísicas dos materiais. A partir desses resultados e com base em modelos numéricos e cálculos analíticos foram determinados o valor do coeficiente de transmissão térmica e do coeficiente de transmissão térmica linear. Note-se que este cálculo foi efetuado para a situação de verão e de inverno. Proença *et al.* verificaram que os resultados obtidos cumpriram os requisitos definidos na regulamentação nacional.

O comportamento acústico dos painéis foi avaliado por Proença *et. al.* [33] na qual inclui uma vertente via numérica, modelos desenvolvidos para a redução sonora a sons aéreos com vista a comparar com os resultados obtidos experimentalmente, e outra via experimental, ensaios de redução sonora a sons aéreos (ISO 10140-2:2010) e a sons por percussão (ISO 10140-3:2010). Todos os detalhes podem ser encontrados “Acoustic behavior of the EasyFloor composite sandwich panels”, Task 4.5 – Report 4.5.1 [33]. Na Tabela 12 encontram-se os principais resultados obtidos ao nível do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{nT,w}$) e do índice de isolamento sonoro a sons de percussão ($L_{nT,w}$).

Atualmente, segundo a Portaria n.º 305/2019 [34] na qual prevê os requisitos acústicos para a reabilitação os quais são uma redução de 5 dB na fase às construções novas ($D_{nT,w} \geq 45$ dB e $L_{nT,w} \leq 65$ dB) verificou-se que os resultados obtidos experimental não cumpre estes requisitos. Face a este resultado Proença et. al. adaptou medidas de mitigação para cumprimento dos requisitos regulamentares sendo que a solução construtiva adotada para estas medidas foi: i) teto falso: com uma espessura de caixa de ar de 20 a 40 cm, camada de lã mineral com 4 cm de espessura e placa de gesso cartonado com 2 cm de espessura; e ii) revestimento de piso com camada resiliente: pavimento flutuante e camada resiliente. Na Tabela 12 encontram-se os resultados obtidos em face às medidas de mitigação tomadas, verificando que o painel composto com teto falso e pavimento cumpre o $D_{nT,w}$ e o valor de $L_{nT,w}$ fica muito próximo de cumprir o limite e, no caso do painel híbrido os dois índices regulamentares são cumpridos.

Tabela 12. Requisitos acústicos projeto EasyFloor.

Parâmetro	$D_{nT,w}$ [dB]		$L_{nT,w}$ [dB]	
	Painel simples	Painel com pavimento	Painel simples	Painel com pavimento
Requisitos na reabilitação	≥ 45		≤ 65	
Painel composto	38	-	81	72
Painel híbrido	41	-	85	69
Painel composto com teto falso	53	55	74	67
Painel híbrido com teto falso	56	58	80	60

A reação ao fogo dos materiais constituintes do painel composto foi alvo de avaliação por Proença et. al. e todos os detalhes poderão ser encontrados “Fire reaction properties of the EASYFLOOR sandwich panels’ constituents”, Task 4.7 – Report 4.7.1 [35] e em “Single burning item (SBI) tests of the EasyFloor composite sandwich panel floor system” Task 4.7 – Report 4.7.3 [36]. Realizou-se sendo efetuados ensaios em calorímetro de cone e ensaios de SBI (do inglês *Single Burning Item*). Dos ensaios em calorímetro de cone conclui-se que as lâminas de GFRP sem proteção insere-se numa Euroclass D, lâminas de GFRP com placa de silicato de cálcio resultou num melhor desempenho que a anterior apresentada resultando numa Euroclass A2/B, por último o núcleo PUR verificou-se uma Euroclass E, o que é um aspeto negativo, contudo, o núcleo PUR encontra-se confinado pelas lâminas de GFRP na solução final dos painéis. Numa segunda fase, após a verificação do comportamento dos vários materiais foram realizados ensaios de SBI no LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil). Neste ensaio

confirmou-se a previsão que havia do primeiro ensaio, a aplicação de uma placa de silicato de cálcio no painel composto originou uma melhoria do comportamento ao fogo, sendo que no caso dos painéis sem proteção obteve-se uma Euroclass D e os painéis com aplicação deste silicato de cálcio uma Euroclass A2.

O estudo do comportamento ao fogo foi realizado por Proença et. al. e todos os detalhes poderão ser encontrados “Fire behaviour of GFRP composite sandwich panels”, Task 4.7 – Report 4.7.2 [37] e em “Fire behaviour of the final EasyFloor composite sandwich panels”, Task 4.7 – Report 4.7.4 [38]. No estudo desta resistência ao fogo foram realizados: i) ensaios de caracterização dos materiais a temperatura elevada; e ii) ensaios de resistência ao fogo. Além da avaliação experimental também foi realizado o estudo numérico: i) modelo térmico para previsão da distribuição de temperaturas; e ii) modelo termomecânico para previsão da resposta mecânica. Dos resultados experimentais conclui-se que as duas soluções de painéis (100% composto e híbrido) sem qualquer tipo de proteção adicional obteve-se um REI30 e com a proteção adicional de teto falso com caixa de ar o resultado obtido melhorou significativamente obtendo-se um REI90.

1.3. Objetivos e metodologia da dissertação

O principal objetivo da presente dissertação é o de contribuir para o desenvolvimento de um painel sanduíche híbrido para a reabilitação de edifícios e caracterizar mecanicamente o comportamento do painel a curto e longo prazo e suas ligações painel – painel e painel – parede. Para além disso, definiram-se objetivos específicos que têm como finalidade chegar ao objetivo final, nomeadamente:

- Estudar o comportamento à flexão de um painel sanduíche híbrido a curto prazo, bem como a sua capacidade de carga, por via experimental e via numérica;
- Estudar o comportamento à flexão de um painel sanduíche híbrido a longo prazo, bem como estimar do seu comportamento em serviço a 50 anos, por via experimental e via analítica;
- Caracterização comportamento da ligação adesiva entre painel – painel, por via experimental e via numérica;
- Caracterização comportamento da ligação painel – parede, por via experimental e via numérica.

1.4. Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos essenciais para responder ao tema em estudo. Assim, o Capítulo 1 apresenta o enquadramento temático da dissertação, o projeto EasyFloor no

qual a presente dissertação se insere, bem como os objetivos deste trabalho, assim como a organização da dissertação.

No Capítulo 2 são descritos os materiais utilizados no fabrico dos painéis, bem como das ligações adesivas. Adicionalmente, apresentam-se os resultados da caracterização mecânica destes materiais constituintes, bem como informações técnicas dos produtos comerciais adotados na realização das ligações adesivas.

No Capítulo 3 descrevem-se os ensaios de flexão quási-estáticos em fase elástica e à rotura realizados nos painéis a curto prazo. Numa primeira fase é apresentado o programa experimental dos diferentes ensaios, seguindo-se os resultados obtidos e análise dos mesmos. A modelação numérica realizada a estes ensaios antecede a apresentação das principais conclusões obtidas.

O Capítulo 4 é relativo aos ensaios de ligação, nomeadamente da ligação painel – painel e painel – parede. De forma idêntica ao capítulo anterior, o programa experimental dos diferentes ensaios, seguindo-se os resultados obtidos e análise dos mesmos. A modelação numérica realizada a estes ensaios antecede a apresentação das principais conclusões obtidas.

O Capítulo 5 diz respeito aos ensaios de flexão quási-estáticos a longo prazo. Em primeiro lugar é apresentado o programa experimental, seguido da apresentação de resultados e respetiva análise. A modelação analítica, com vista à previsão do comportamento em serviço a 50 anos, é detalhada.

Finalmente, no Capítulo 6 apresentam-se as considerações finais, incluindo as conclusões retiradas do trabalho desenvolvido que respondem aos seus objetivos propostos, e também se sugere a realização de um conjunto de trabalhos futuros.

2. CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Neste capítulo faz-se uma breve descrição dos materiais utilizados na produção dos painéis sanduíche híbridos, bem como apresentam-se os resultados da sua caracterização mecânica, nomeadamente o GFRP, o FRC, o PUR e as resinas.

2.1. GFRP

Os painéis sanduíche híbridos são constituídos por uma face inferior e nervuras laterais em GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*). Adicionalmente, existe uma face em GFRP entre a espuma de PUR e a camada de FRC (ver Figura 5). A componente em GFRP foi produzida por pultrusão (ver Secção 3.1.3). Do processo de otimização resultou a arquitetura de fibras apresentada na Figura 13 constituída por: i) *mat 600*; ii) *roving 9600*; e iii) *combimat 450/800*. As fichas técnicas destes materiais encontram-se no ANEXO I.



Figura 13. Arquitetura de fibras.

Por razões de falta tempo, não foi possível realizar a caracterização do GRFP. Neste contexto, apresentam-se os resultados da caracterização efetuada pela equipa do Instituto Superior Técnico de Lisboa (parceira no projeto EasyFloor) [39]. Refira-se que ambos os painéis (100% compósito e híbrido) partilharam o mesmo tipo de faces e nervuras em GFRP.

A Tabela 13 apresenta um resumo das propriedades mecânicas do GFRP. Para o efeito foram usados provetes (laminados) extraídos de painéis, tendo estes laminados apresentado uma espessura média de 6.1 mm, com um mínimo de 5.8 mm e um máximo de 6.6 mm. Nesta tabela constam os seguintes parâmetros:

- $\sigma_{tu,F}$ é a resistência à tração nas faces;
- $E_{t,F}$ é o módulo de elasticidade de tração nas faces;
- $\sigma_{tu,R}$ é a resistência à tração nas nervuras;
- $E_{t,R}$ é o módulo de elasticidade à tração nas nervuras;
- $\sigma_{cu,F}$ é a resistência à compressão nas faces;
- $E_{c,F}$ é o módulo de elasticidade à compressão nas faces
- $\sigma_{cu,R}$ é a resistência à compressão nas nervuras;
- $E_{c,R}$ é o módulo de elasticidade à compressão nas nervuras;
- $\tau_{u,F}$ é a tensão ao corte última nas faces;
- $G_{u,F}$ é o módulo de distorção nas faces;
- $\tau_{u,R}$ é a tensão ao corte última nas nervuras;
- $G_{u,R}$ é o módulo de distorção nas nervuras.

Tabela 13. Propriedades mecânicas do GFRP [39].

Ensaio	Propriedade	Resultados
Tração (Norma EN ISO 527)	$\sigma_{tu,F}$ [MPa]	423.0 (4.06%)
	$E_{t,L}$ [GPa]	28.8 (4.60%)
	$\sigma_{tu,R}$ [MPa]	347.8 (14.34%)
	$E_{t,R}$ [GPa]	26.38 (26.27%)
Compressão (Norma ASTM D6641/D6641M)	$\sigma_{cu,F}$ [MPa]	333.6 (5.34%)
	$E_{c,F}$ [GPa]	26.6 (6.58%)
	$\sigma_{cu,R}$ [MPa]	272.3 (18.29%)
	$E_{c,R}$ [GPa]	21.4
Corte (Norma ASTM D 5379)	$\tau_{u,F}$ [MPa]	59.6 (3.99%)
	$G_{u,F}$ [GPa]	3.4 (10.05%)
	$\tau_{u,R}$ [MPa]	50.23 (2.81%)
	$G_{u,R}$ [GPa]	3.6 (7.80%)

Nota: Os valores apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação.

2.2. FRC

Na avaliação das propriedades mecânicas do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (FRC – *Fibre Reinforced Concrete*) foram realizados dois tipos de ensaios: i) ensaios de compressão e ii) ensaios de flexão. A caracterização do FRC compreendeu ensaios de compressão e flexão aos 3, 7, 28 e 90 dias de idade. Outros ensaios foram realizados com mais de 90 dias de idade.

O desenvolvimento e produção do FRC foi realizada pela empresa Civitest, especializada no estudo e produção de betão reforçado com fibras. A composição utilizada de FRC em termos de peso por metro cúbico é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14. Constituição do FRC

Constituinte	kg/m ³	Constituinte	kg/m ³
Cimento CEM I 42.5 Secil	376	Aditivo SK-617	12
Água	196	Fibras de aço FS 7-MACCFERRI	60
Areia Fina	156	Fibras de polipropileno 1EST-12 mm	2
Brita 12.5 mm	626	w/c	0.5
Cinza volantes	200		

Para o fabrico dos painéis sanduíche híbridos realizaram-se quatro betonagens. A Tabela 15 apresenta detalhes sobre as diferentes amassaduras em termos de datas de betonagens e respetiva caracterização.

Tabela 15. Identificação da idade do FRC

Série	Data da Betonagem	Ensaio à compressão		Ensaio à flexão	
		Data do ensaio	Idade (dias)	Data do ensaio	Idade (dias)
M1	14/02/2020	23/06/2020	130	07/07/2020	144
M2	21/02/2020	23/06/2020	123	07/07/2020	137
M3	06/03/2020	25/06/2020	111	07/07/2020	123
M4	12/05/2020	25/06/2020	44	07/07/2020	56

2.2.1. Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão do FRC seguem as recomendações da NP EN 12390-3 (2011) [40]. Previamente à realização dos ensaios é necessário proceder ao nivelamento das faces inferior e superior dos provetes. Para o efeito foi utilizado a retificadora que se ilustra na Figura 14. Em seguida, os provetes são submetidos ao ensaio de compressão, através da aplicação de uma carga contínua até à rotura por

compressão numa prensa, em conformidade com a NP EN 12390-4 (2003) [41]. As dimensões do provete estão de acordo com a NP EN 12390-1 (2012) [42] e encontram-se no ANEXO II. Os ensaios foram realizados num equipamento de ensaio universal com uma célula de carga de 2000 kN (± 2 kN) sob controlo de deslocamento uma velocidade de 1.00 mm/min (ver Figura 15).



Figura 14. Equipamento de retificação.



Figura 15. Ensaio de compressão do FRC.

Através deste ensaio de compressão obteve-se a força máxima (rotura) de cada provete. O valor da tensão de rotura do betão à compressão é calculado através da equação (38):

$$f_{cm} \text{ [MPa]} = \frac{F_{\max} \text{ [N]}}{A \text{ [mm}^2\text{]}} \quad (38)$$

onde: i) f_{cm} é a tensão de rotura do betão à compressão; ii) F_{\max} é a força máxima a qual origina a rotura do provete; e iii) A é a área de superfície da base do provete.

O módulo de elasticidade longitudinal (E) (módulo de Young) foi obtido por intermédio de um conjunto de ensaios cíclicos em compressão, de acordo com a EN 12390-13 (2013) [43]. A configuração de ensaio é a mesma da do ensaio de compressão. Contudo, neste caso instalam-se 3 LVDTs na zona central do provete, distanciados entre de si de 120° , conforme se ilustra na Figura 16. Para avaliar o módulo de elasticidade é necessário a aplicação de três ciclos de carga/descarga com uma velocidade média de 0.5 MPa/s e com o valor máximo de força aplicada igual a um terço da força máxima da

resistência à compressão obtida num primeiro provete. O módulo de elasticidade é determinado através da aplicação da equação (39):

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (39)$$

onde: i) E é o módulo de elasticidade longitudinal; ii) $\Delta\sigma$ é variação da tensão; e ii) $\Delta\varepsilon$ é a variação da extensão.

Por série (amassadura) foram usados 4 cilindros na caracterização da resistência à compressão, enquanto a avaliação do módulo de elasticidade foi feita através 3 cilindros.



Figura 16. Ensaio cíclico em compressão para a avaliação do módulo de elasticidade do FRC.

Na Tabela 16 apresenta-se os valores médios obtidos nos ensaios de compressão e módulo de elasticidade realizados. Os resultados individualizados encontram-se no ANEXO II. Em termos gerais pode dizer-se que, apesar de terem sido usadas 4 amassaduras distintas, não se observaram diferenças relevantes em relação às características mecânicas do FRC, tendo-se obtido uma variação máxima de ~13%.

Tabela 16. Valores médios dos resultados relativos aos ensaios de compressão e módulo de elasticidade do FRC.

Amassadura	$F_{\text{máx}}$ [kN]	f_{cm} [MPa]	E [GPa]
M1	870.34 (4.36%)	49.61 (4.64%)	26.91 (6.87%)
M2	836.18 (2.96%)	48.07 (3.29%)	27.05 (2.18%)
M3	803.38 (3.19%)	46.02 (2.67%)	26.65 (2.86%)
M4	760.30 (3.08%)	43.26 (2.94%)	24.47 (4.66%)
Média	817.55 (4.97%)	46.74 (5.09%)	26.27 (4.00%)

Nota: Os valores apresentados dentro de parênteses representam o respetivo coeficiente de variação.

Na Figura 17 apresenta-se o modo de rotura típico que se observou nos ensaios de compressão.



Figura 17. Apresentação da rotura de um provete da amassadura M1.

Apresentam-se também os resultados dos ensaios realizados em provetes cúbicos pela empresa Civitest (ver Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20), segundo a norma NP EN 206-1. Estes ensaios foram realizados no âmbito do controlo interno da empresa a 3, 7, 28 e 90 dias de idade dos provetes cúbicos de FRC.

Tabela 17. Ensaio de compressão em provetes cúbicos com 3 dias de idade.

Amassadura	Número de provetes ensaios	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$f_{cm,cube}$ [MPa]
M1	2	516.6	22.9
M2	2	470.8	20.8
M3	2	445.9	19.5
M4	2	537.2	23.7

Tabela 18. Ensaio de compressão em provetes cúbicos com 7 dias de idade.

Amassadura	Número de provetes ensaios	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$f_{cm,cube}$ [MPa]
M1	1	772.7	34.1
M2	1	751.7	33.4
M3	1	718.0	31.9
M4	2	786.5	35.1

Tabela 19. Ensaio de compressão em provetes cúbicos com 28 dias de idade.

Amassadura	Número de provetes ensaios	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$f_{cm,cube}$ [MPa]
M1	2	516.6	47.0
M2	2	470.8	45.6
M3	2	985.9	43.8
M4	1	1195.7	46.3

Tabela 20. Ensaio de compressão em provetes cúbicos com 90 dias de idade.

Amassadura	Número de provetes ensaios	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$f_{cm,cube}$ [MPa]
M1	1	1169.2	52.0
M2	1	1149.7	50.5
M3	1	1193.1	53.3
M4	1	1195.7	53.1

Segundo o Eurocódigo EN 1992-1-1 (2010)[23], para provetes cilíndricos, o valor médio da tensão de rotura à compressão do betão (f_{cm}) pode ser relacionado com o valor característico de tensão de rotura à compressão aos 28 dias (f_{ck}) de idade a partir da equação (40).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ [MPa]} \Leftrightarrow f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ [MPa]} \quad (40)$$

Uma vez que aos 28 dias de idade de betão apenas foram ensaiados provetes cúbicos, a equação (41) permite relacionar os resultados obtidos nos ensaios de provetes cúbicos da tensão de rotura do betão à compressão para provetes cilíndricos.

$$f_{ck} \approx 0.8 \cdot f_{ck,cube} \quad (41)$$

Tendo por base as equações anteriores foi possível determinar o valor característico de tensão de rotura à compressão aos 28 dias do betão. Na Tabela 21 apresentam-se os valores obtidos para as diferentes amassaduras. Segundo a EN 1992-1-1 (2010) [23], o FRC em estudo tem a classe de resistência C30/37.

Tabela 21. Determinação do valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade.

Amassadura	$f_{cm,cube}$ [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
M1	47.0	39.0	31.2
M2	45.6	37.6	30.1
M3	43.8	35.8	28.6
M4	46.3	38.3	30.6
Média	45.7	37.7	30.1

2.2.2. Ensaio de flexão

Os ensaios à flexão do FRC seguiram as recomendações da EN 14651 (2005) [44] e da RILEM TC 162-TDF (2000) [45]. Este ensaio permite quantificar a resistência à tração em flexão do betão reforçado com fibras. Para isso realiza-se um entalhe a meio vão que força a abertura da fissura a iniciar-se precisamente nesta zona. A norma requer que seja monitorizada a abertura de fenda (CMOD – do inglês *Crack Mouth Opening Displacement*). Por fim, através dos dados recolhidos ao longo do ensaio,

isto é, força aplicada, deslocamento a meio vão e abertura de fenda, é possível avaliar diferentes parâmetros da resistência à tração em flexão do FRC.

Numa primeira fase é necessário preparar os provetes prismáticos com 150 mm de altura e largura e com 600 mm de comprimento. Tal como referido, de modo a induzir a fissura na secção de meio vão realiza-se um entalhe ao longo da largura do provete com 3 mm de espessura e 25 mm de altura (ver Figura 18).



Figura 18. Realização do entalhe nos provetes prismáticos.

O ensaio é realizado num sistema de configuração de três pontos de carga, com vão livre entre apoios de 500 mm. Os ensaios foram realizados através de sistema de ensaio equipado com atuador hidráulico de 100 kN capacidade máxima, tendo o ensaio sido realizado sob controle de deslocamento a uma velocidade média de 0.25 mm/min. No que diz respeito ao registo de deslocamento, foram utilizados dois LVDTs: (i) um para medir os deslocamentos a meio e (ii) outro, na zona inferior do provete, para registar o CMOD. O sistema anteriormente descrito encontra-se ilustrado na Figura 19. Em cada série foram usados 4 provetes prismáticos.



Figura 19. Ensaio de flexão em três pontos de carga.

Na Figura 20 ilustram-se os parâmetros de resistência mecânica usualmente obtidos a partir de curva força *vs.* deslocamento. O primeiro parâmetro a ser destacado é a tensão de tração f_{ct} em $\delta = \delta_L = 0.05$ mm. As tensões f podem ser calculadas a partir dos valores de força F usando a seguinte expressão:

$$f = \frac{3FL_s}{2bh_{sp}^2} \quad (42)$$

onde: i) L_s é o vão (igual a 500 mm); ii) b é a largura do provete (igual a 150 mm); e iii) h_{sp} é a distância entre o entalhe e o topo da secção transversal (igual a 125 mm).

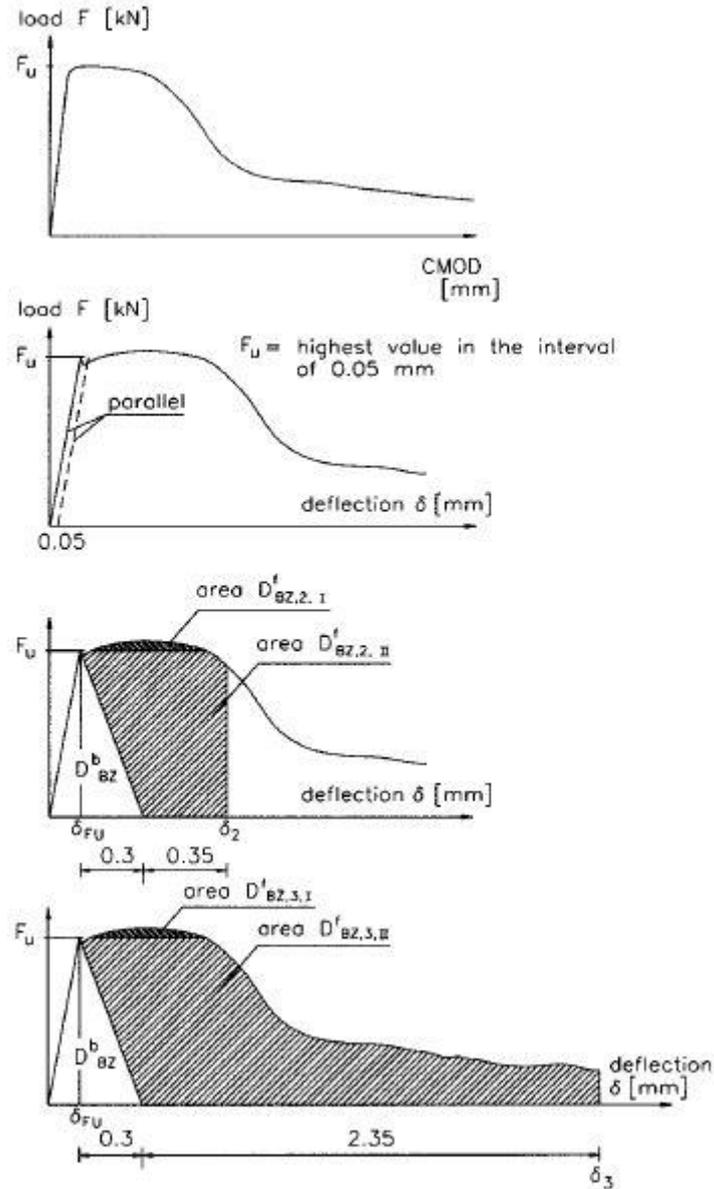


Figura 20. Parâmetros obtidos a partir da curva força vs. deslocamento de um ensaio de flexão no FRC [45].

Outros dois parâmetros considerados como propriedades mecânicas relevantes são as forças equivalentes $F_{eq,2}$ e $F_{eq,3}$ que também fornecem informações sobre a ductilidade do FRC. Os valores de $F_{eq,2}$ e $F_{eq,3}$ dependem das áreas $D'_{BZ,2,I}$, $D'_{BZ,2,II}$, $D'_{BZ,3,I}$ e $D'_{BZ,3,II}$ que são representadas na Figura 20 de modo que:

$$F_{eq,2} = \frac{D'_{BZ,2,I}}{0.65} + \frac{D'_{BZ,2,II}}{0.50} \quad (43)$$

$$F_{eq,3} = \frac{D'_{BZ,3,I}}{2.65} + \frac{D'_{BZ,3,II}}{2.50} = \frac{3FL_s}{2bh_{sp}^2} \quad (44)$$

Por outro lado, relativamente aos parâmetros apresentados nas equações (43) e (44) propostos pelo RILEM TC 162-TDF (2000) [45], a norma EN 14651 (2005) [44] contém uma abordagem semelhante para contabilizar a resistência e ductilidade do betão. O procedimento é simples e consiste em adquirir quatro valores de força F_1 , F_2 , F_3 e F_4 na curva força *versus* CMOD para os valores de CMOD iguais a 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm, respetivamente. A Figura 21 mostra um exemplo da aplicação deste procedimento numa curva força *versus*. CMOD genérica.

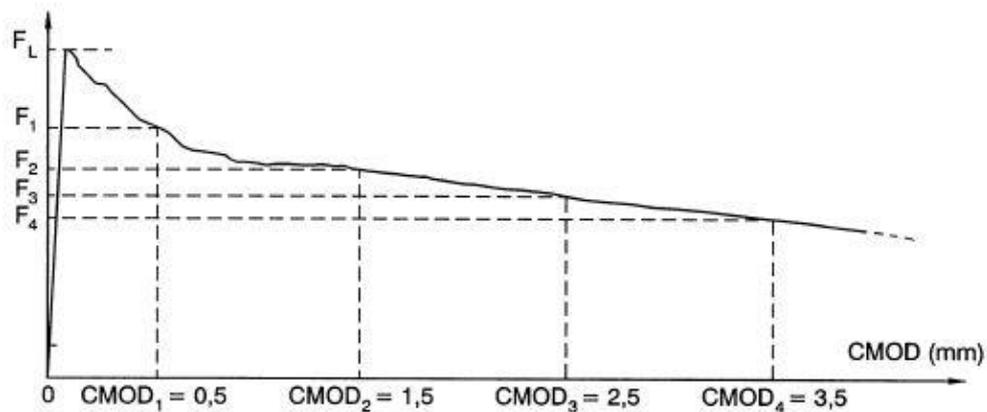


Figura 21. Parâmetros mecânicos obtidos a partir da curva força *vs.* CMOD de um ensaio de flexão no FRC [44].

Na Figura 22 mostra-se um dos provetes ensaiados onde é possível observar claramente a formação de uma fenda na secção a meio vão, zona esta onde foi realizado o entalhe para este mesmo fim.



Figura 22. Proвете prismáticos após o ensaio de flexão.

Na Tabela 22 apresentam-se os resultados obtidos nas quatro amassaduras, assim como a título ilustrativo os resultados força *versus* deslocamento a meio vão e força *versus* CMOD para a amassadura M1 (ver Figura 23 e Figura 24).

Tabela 22. Resultados médios dos ensaios à flexão do FRC.

Amassadura	f_{ctL} [MPa]	d_L [mm]	f_{eq2} [MPa]	f_{eq3} [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
M1	6.13 (15.30%)	0.05 (1.15%)	12.51 (9.47%)	11.78 (12.02%)	12.22 (9.27%)	12.07 (10.99%)	10.92 (10.42%)	9.37 (12.48%)
M2	3.34 (29.10%)	0.05 (1.25%)	10.03 (20.65%)	8.96 (25.26%)	9.66 (22.23%)	9.70 (24.15%)	7.82 (25.69%)	6.32 (30.36%)
M3	2.98 (29.05%)	0.05 (2.61%)	8.82 (19.08%)	8.12 (19.91%)	13.60 (70.79%)	7.95 (19.94%)	7.32 (19.39%)	6.31 (20.11%)
M4	3.54 (30.15%)	0.05 (1.43%)	7.52 (27.98%)	7.18 (27.29%)	7.30 (31.51%)	7.60 (22.88%)	6.60 (26.69%)	5.69 (28.31%)

Nota: Os valores apresentados dentro de parenteses representam o respetivo coeficiente de variação

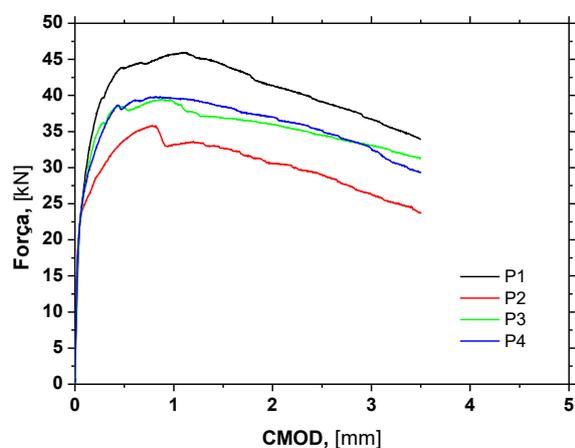


Figura 23. Força *vs.* CMOD (amassadura M1).

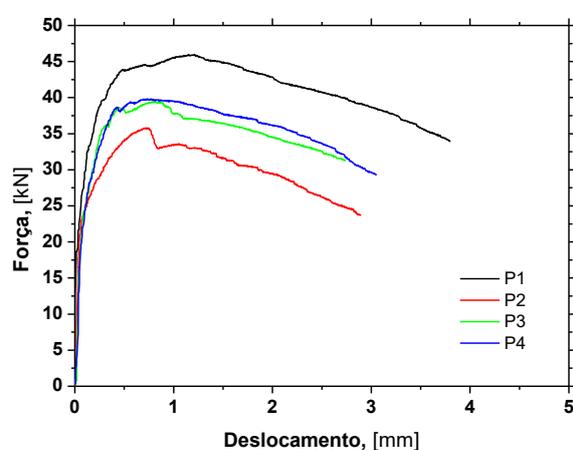


Figura 24. Força *vs.* deslocamento (amassadura M1).

No ANEXO III apresentam-se a geometria dos provetes prismáticos, bem como os resultados experimentais obtidos e o registo fotográfico de todos os provetes ensaiados.

2.3. PUR

A espuma de poliuretano (PUR) é um polímero termoendurecível composto por uma cadeia de unidades orgânicas unidas por ligações uretânicas. Os principais componentes são o *polyol* e o isocianato. Face à panóplia de formas, densidades e características possíveis, as espumas de poliuretano fazem parte dos núcleos homogênicos mais utilizados na constituição do núcleo dos painéis sanduíche [46].

Como principais vantagens destacam-se o baixo peso específico, o bom isolamento térmico e acústico, a resistência à compressão e a memória elástica. No entanto, são sensíveis à temperatura e humidade relativa, sobretudo para carregamentos permanentes devido à fluência. Geralmente as características mecânicas e a condutibilidade térmica variam consoante a formulação da espuma e o seu processo de fabrico, aumentado com a densidade [46].

No âmbito do Projeto EasyFloor, foi estabelecido que o painel sanduíche híbrido a desenvolver é constituído por um núcleo em espuma de poliuretano (PUR). Neste contexto face ao pouco conhecimento que existe sobre este material, tornou-se fundamental proceder à sua caracterização do ponto de vista mecânico. A densidade da espuma geralmente depende da configuração do painel e do número de nervuras que fornecem resistência ao corte. No projeto estrutural do painel, a adoção de nervuras e espumas de baixa densidade é muitas vezes preferida, ao contrário da solução em que apenas espumas de alta densidade são adotadas e as nervuras estão ausentes.

As principais funções do núcleo consistem em estabilizar ambas as faces de GFRP e transportar a maior parte das cargas de corte. Dado que um dos modos de rotura mais frequentes está relacionado com a resistência ao corte do núcleo é, portanto, fundamental caracterizar o material ao corte para que seja possível avaliar o comportamento do painel sanduíche quando solicitado ao esforço transversal. No âmbito da presente dissertação os resultados apresentados de seguida são referentes aos ensaios realizados pelos vários intervenientes no projeto, com intuito de definir a densidade de espuma a utilizar no fabrico de painéis. Recordar-se que na fase inicial do projeto a densidade da espuma PUR definida era 35 kg/m^3 (ver Secção 1.2.3).

Na Tabela 23 apresenta-se os resultados obtidos da caracterização do PUR realizados pelo: i) Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa, no âmbito da tese de doutoramento de Garrido [25], e ii) docentes e investigadores da Universidade do Minho (UMinho), publicados em [47].

No IST procedeu-se à caracterização do PUR utilizado no fabrico de painéis sanduíche através de ensaios de corte de tensão diagonal em espumas com uma densidade nominal de 40 e 80 kg/m^3 . Numa

primeira fase foi estimado o valor de densidade de cada provete e comparado com o valor de densidade fornecido pelo fabricante e, de seguida, procedeu-se à realização do ensaio de corte de tensão diagonal [25].

Na UMinho realizou-se a caracterização experimental do comportamento ao corte de uma espuma de PUR, com densidade nominal de 70 kg/m³. O procedimento experimental foi baseado nas normas ISO 1922 e ASTM C273, bem como em outras publicações existentes, considerando que esta PUR se destinava a ser utilizado como material de núcleo estrutural em painéis sanduíche [47].

Tabela 23. Propriedade mecânicas do PUR (IST e UMinho) [25][47].

Ensaio desenvolvido por	Densidade nominal [kg/m³]	Densidade estimada [kg/m³] <i>(diferença para a nominal)</i>	Resistência ao corte τ_u [MPa]	Módulo de distorção G [MPa]
IST	40	36.4 <i>(-9.0%)</i>	0.13 ± 0.01	2.8 ± 0.4
UMinho	70	67.2 <i>(-4.0%)</i>	0.32 ± 0.01	5.6 ± 0.19
IST	80	78.5 <i>(-1.9%)</i>	0.39 ± 0.08	10.8 ± 1.1

Dos ensaios de caracterização da espuma PUR com uma densidade de 70 kg/m³, realizados na UMinho [47], obteve-se uma resistência à tração de 0.32 MPa (CoV: 4%) e uma resistência à compressão de 0.33 MPa (CoV: 11%), enquanto que o módulo de elasticidade de Young em tração e compressão atingiu os valores de 10.9 MPa (CoV: 12%) e 6.0 MPa (CoV: 8%), respetivamente.

Por fim, no âmbito deste projeto a decisão dos vários intervenientes resultou na utilização da espuma PUR com uma densidade nominal de 60 kg/m³.

2.4. Sikadur 32 EF

Com o objetivo de garantir a aderência da camada fresca de FRC ao GFRP foi usado o adesivo Sikadur 32 EF (Figura 25). O suporte técnico-científico para esta opção pode ser encontrado na publicação [48].



Figura 25. Sikadur 32 EF.

Sikadur 32 EF é um adesivo estrutural em dois componentes, tolerante à humidade, baseado numa combinação de resinas epóxi e cargas especiais. Produto de aderência estrutural para a colagem de betão ou argamassa. Caracteriza-se por ser um produto com propriedades de excelente aderência à maioria dos materiais de construção, sendo um adesivo de alta resistência (mecânicas e químicas) e de endurecimento sem retração [49].

Na aplicação deste produto devem ter-se alguns cuidados. A superfície de aplicação deve estar limpa, seca e livre de contaminantes, como sujidade, óleo, gordura, tratamentos ou revestimentos existentes, entre outros. O substrato de aplicação deve estar sólido e livre de partículas soltas que devem ser removidas.

Na aplicação do produto, inicialmente realiza-se a mistura dos dois componentes durante pelo menos 3 minutos, aconselha-se o uso de um misturador elétrico de baixa rotação, até o material se apresentar com uma consistência cremosa e uma cor uniforme. A aplicação deste sobre a superfície de suporte, previamente preparada, pode ser feita através da utilização de uma trincha.

Na Tabela 24 apresentam-se os principais dados técnicos fornecidos pelo fabricante, obtidos para um tempo de cura de 14 dias com uma temperatura de cura de + 23 °C [49].

Tabela 24. Dados técnicos Sikadur 32 EF [49].

Sikadur 32 EF	Método de ensaio	Unidades	Desempenho
Resistência à compressão	ASTM D 695-95	N/mm ²	~52
Módulo de elasticidade à compressão	ASTM D 695-95	N/mm ²	~3300
Resistência à flexão	DIN EN ISO 178	N/mm ²	~42
Módulo de flexão	DIN EN ISO 178	N/mm ²	~3700
Resistência à tração	ISO 527	N/mm ²	~35
Módulo de elasticidade	ISO 527	N/mm ²	~3800
Alongamento à rotura	ISO 527	%	1.3 ± 0.1
Proporção da mistura		Em peso	1:2 (A:B)
Temperatura de serviço		°C	+10°C a +30°C

2.5. S&P Resin 220 HP

A resina S&P Resin 220 HP (Figura 26) foi usada para a colagem estrutural entre painéis. Esta opção teve por base estudos anteriores da equipa que desenvolveu o projeto EasyFloor.

**Figura 26.** S&P Resin 220 HP.

A S&P Resin 220 HP é uma resina epóxi bi-componente, sem adição de solventes, tixotrópica, de cor cinzenta, especialmente desenvolvida para colagem estrutural de laminados de fibra de carbono. A utilização deste produto permite a aplicação imediata, tendo um tempo de trabalho adequado. Este apresenta uma elevada tensão de aderência o que permite a permanência consistente em superfícies verticais e horizontais, como tetos. Características como a sua elevada resistência mecânica e o endurecimento sem retração foram propriedades fundamentais na escolha deste produto.

Segundo o fabricante, a aplicação deste produto recomenda-se que o substrato onde é aplicado o produto tenha uma capacidade resistente mínima de 1.5 N/mm², e quando aplicado em betões e argamassas “jovens” recomenda-se que devem ter pelo menos 3 a 6 semanas de cura e endurecimento.

Este produto é produzido e comercializado por dois componentes. O componente A diz respeito à solução de resina epóxi, possuído uma cor cinza-clara. O componente B corresponde ao endurecedor de resina epóxi. A preparação da mistura segue algumas recomendações, inicialmente, é necessário mexer os componentes individuais separadamente. De seguida adicionar o componente A ao componente B e mexer continuamente até que a cor seja cinzento uniforme e a mistura isenta de vestígios.

Antes da aplicação deste produto, é necessário que a superfície de aplicação esteja isenta de substâncias que possam prejudicar a aderência, e isento de pó. A superfície deve estar limpa, coesa e seca.

Na Tabela 25 apresentam-se alguns dados técnicos deste adesivo fornecido pelo fabricante.

Tabela 25. Dados técnicos S&P Resin 220 HP [50].

S&P Resin 220HP	Método de ensaio	Unidades	Desempenho		
Módulo de elasticidade	EN 13412:2008	N/mm ²	≥ 7100		
Trabalhabilidade (pot-life 23 °C)	Inhouse-Test	Minutos	90		
Resistência à compressão	SN EN 196-1	N/mm ²	≥ 83		
Coeficiente de expansão térmica	EN 1770:1999	µm/m °C	≥ 40		
Temperatura de transição vítrea (Tg)	EN 12614:2006	°C	58.2		
Retração línea	EN 12617-1:2006	%	0.01		
Aderência aço/aço (corte)	EN 12188:2000	N/mm ²	50° ≥70	60° ≥80	70° ≥90
Aderência aço/aço (resistência à tração)	EN 12188:2000	N/mm ²	≥15		
Relação de mistura		Em peso	2:1 (A:B)		
Temperatura de aplicação		°C	+8°C a +35°C		
Seco ao tato após		Horas	4		
Tempo de endurecimento		Dias	7		

3. ENSAIOS DE FLEXÃO QUÁSI-ESTÁTICOS EM PAINÉIS A CURTO PRAZO

3.1. Programa experimental

3.1.1. Ensaios de flexão com vão variável

Os ensaios de flexão com vão variável tem por objetivo a determinação das propriedades elásticas dos painéis. Assim, estes ensaios foram realizados em quatro painéis, designados por: PE_1, PE_2, PE_3 e PE_4. Estes ensaios de flexão realizaram-se segundo uma configuração de três pontos de carga, para os seguintes três vãos livres: 3.7 m, 4.0 m e 4.5 m. A configuração de ensaio adotada está ilustrada na Figura 27 e instrumentação utilizada na Figura 28. Os painéis foram testados numa estrutura de ensaio de aço onde, ambos os suportes, permitiam a rotação do painel e, apenas um deles, permitia o deslizamento longitudinal. Uma camada de betume de enchimento de poliéster (massa de ferro) foi aplicada entre os painéis e o sistema de suporte, de modo a uniformizar todas as eventuais irregularidades das superfícies. Para minimizar a concentração de tensões nos pontos de carregamento, foram utilizadas chapas de aço com 50 mm de largura e 1.5 mm de espessura.

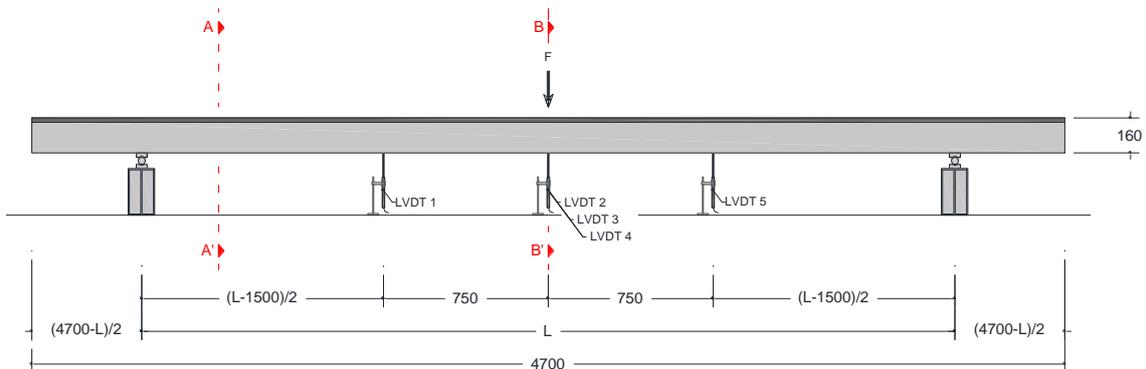


Figura 27. Configuração de ensaio de vão variável. Unidades em [mm].

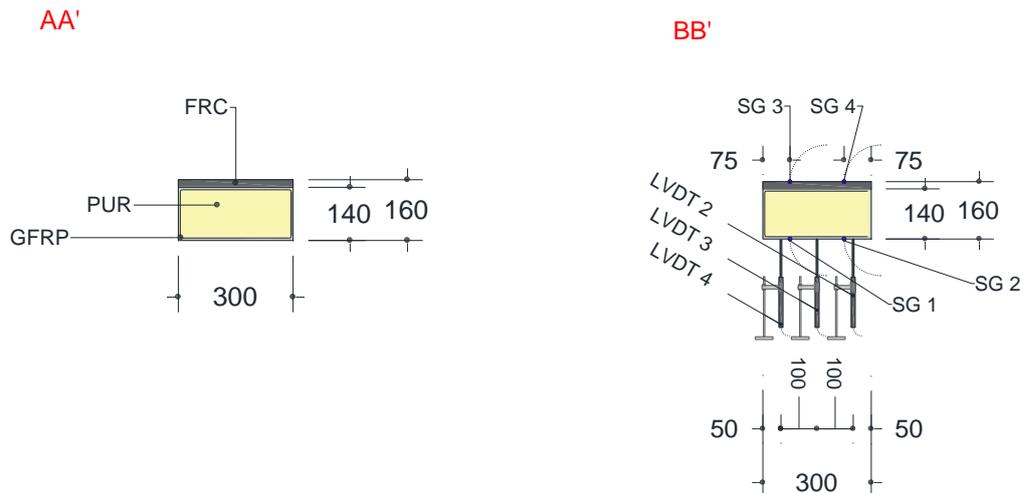


Figura 28. Instrumentação utilizada para os ensaios de vão variável. Unidades em [mm].

A carga foi aplicada no meio do vão usando um atuador hidráulico (ver Figura 29) com uma velocidade média de 10 kN/min, sendo ao longo do ensaio registados (i) os valores de carga aplicada, através de uma célula de carga de 200 kN (erro de linearidade de $\pm 0.05\%$); (ii) os deslocamentos verticais, através de um conjunto de cinco transdutores de medição de deslocamento; e (iii) as extensões, através dos vários extensómetros colocados nas diferentes partes do painel. A instrumentação usada durante o ensaio é possível ser observada na Figura 27 e Figura 28, sendo os detalhes da mesma detalhados na Tabela 26.

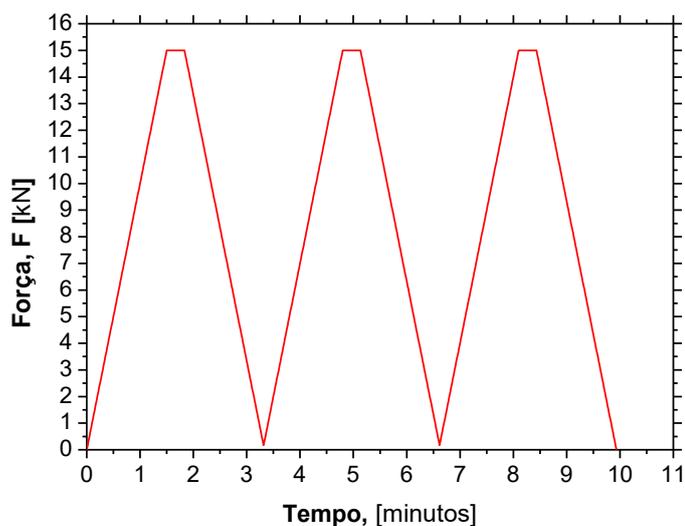


Figura 29. Fotografia da configuração de ensaio de flexão de vão variável.

Tabela 26. Detalhes da instrumentação utilizada durante os ensaios à flexão de vão variável.

Sensor ID	Grandeza medida	Marca/modelo do Sensor	Campo de medida do sensor
Célula de Carga	Força	CIL.200kN.110.70.200	200 kN
LVDT 1	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
LVDT 2	Deslocamento	RDPE ACT3000A	± 50 mm
LVDT 3	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
LVDT 4	Deslocamento	RDPE ACT3000A	± 50 mm
LVDT 5	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
SG 1	Extensão	TML BFLA-5-3	3 %
SG 2	Extensão	TML BFLA-5-3	3 %
SG 3	Extensão	TML PFL-30-11-3L	2 %
SG 4	Extensão	TML PFL-30-11-3L	2 %

O ensaio é constituído por três ciclos de carga e descarga. Inicialmente, o painel é submetido a uma carga monotonicamente crescente à velocidade 10 kN/min até atingir o valor de 15 kN. Esta carga é mantida constante durante um período de 20 segundos. Após este período procede-se à descarga do painel até ser atingindo a carga de 0.1 kN. Imediatamente a seguir inicia-se o processo de carregamento igual ao referido anteriormente. O ensaio termina após estes três ciclos de carga e descarga terem sido completados. Este ensaio é repetido em cada painel para os diferentes vãos entre apoios (3.7 m; 4.0 m e 4.5 m). Na Figura 30 representam-se os ciclos de carga/descarga anteriormente descritos.

**Figura 30.** Ciclos de carga/descarga utilizados nos ensaios de vão variável.

3.1.2. Ensaios de flexão à rotura

Com vista a avaliar a resposta mecânica até à rotura dos painéis híbridos, realizaram-se ensaios de flexão à rotura em quatro protótipos: i) dois painéis simples designados como: PR_1 e PR_2 (ver Figura 31); e ii) dois painéis duplos, em resultado da ligação de dois painéis simples unidos por uma resina epóxi (S&P Resin 220 PH, ver Secção 2.5), sendo os painéis duplos designados por PPR_1 e PPR_2 (ver Figura 32).

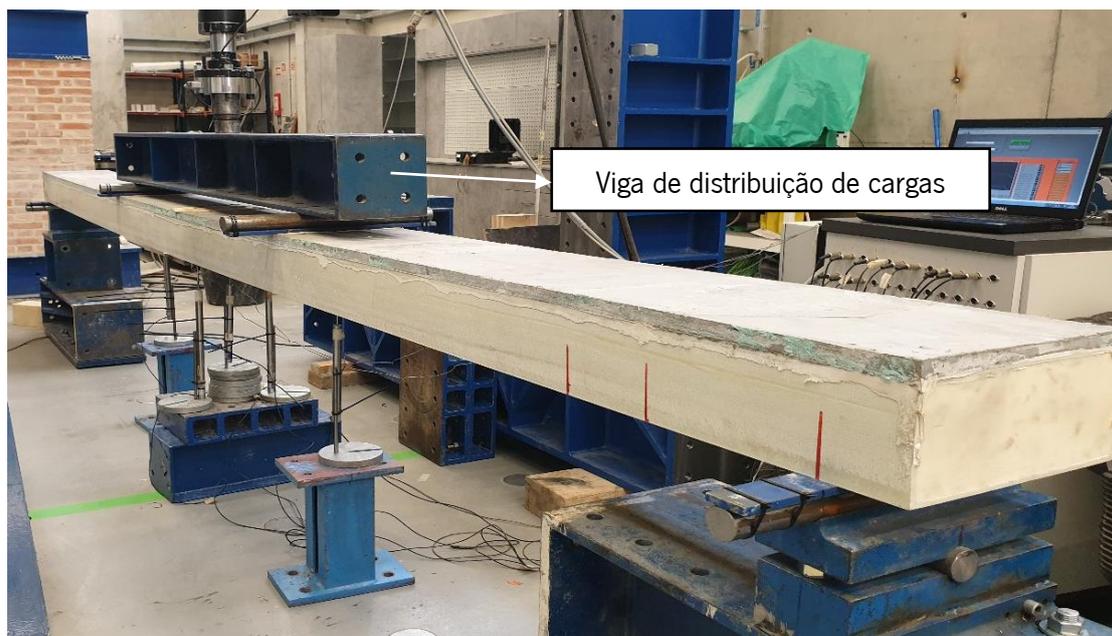


Figura 31. Fotografia da configuração de ensaio de flexão à rotura dos painéis simples - PR_1.

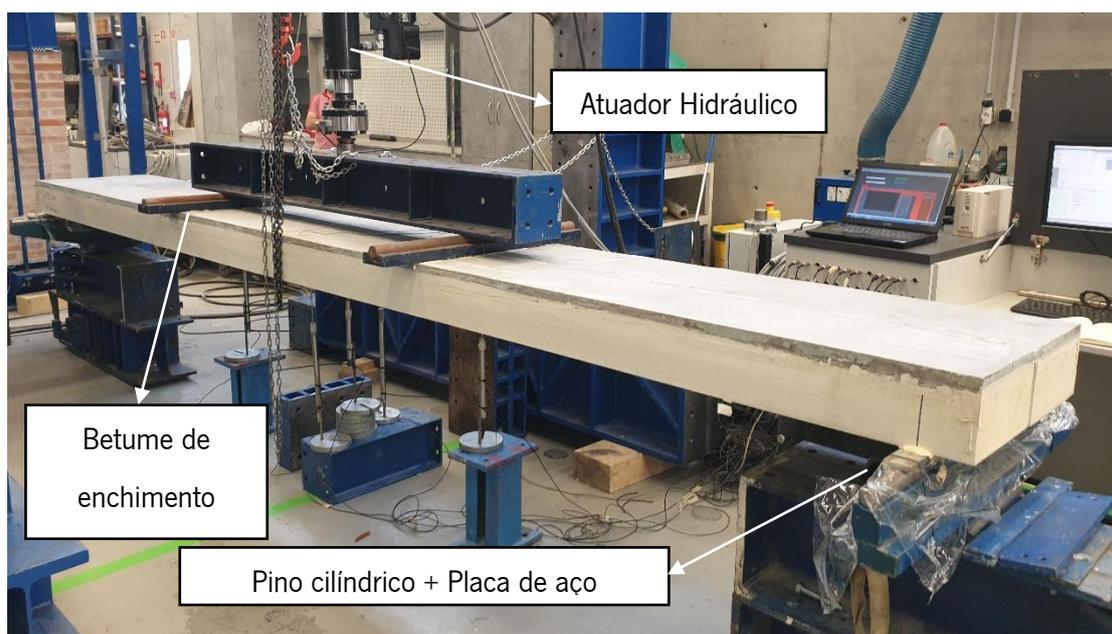


Figura 32. Fotografia da configuração de ensaio de flexão à rotura dos painéis duplos- PPR_2.

A carga foi aplicada através do mesmo atuador utilizado no ensaio à flexão de vão variável (Secção 3.1.1). O ensaio realizou-se em quatro pontos de carga com um comprimento de vão livre de 4.5 m, sendo a distância entre pontos de aplicação de carga igual um terço do vão (igual ao vão de corte). Tal como no ensaio à flexão de vão variável, aplicou-se uma camada de betume de enchimento entre os painéis e os pontos de carga de modo a uniformizar as irregularidades das superfícies em contacto. Utilizou-se uma viga de distribuição de cargas e dois pinos cilíndricos (cada um com 40 mm de diâmetro), entre os painéis e o atuador hidráulico, de forma a obter a configuração de ensaio pretendida. Para minimizar a concentração de tensões nos pontos de carregamento e nos suportes, foram utilizadas chapas de aço com 50 mm de largura e 1.5 mm de espessura. É possível observar estes elementos na Figura 31 e Figura 32.

Na Figura 33 observa-se a configuração de ensaio utilizada. A carga foi aplicada no meio do vão usando um atuador hidráulico com uma velocidade média de 14 mm/min, sendo ao longo do ensaio registados os valores de carga aplicada, através de uma célula de carga de 200 kN (erro de linearidade de $\pm 0.05\%$) e os deslocamentos verticais, através de um conjunto de cinco transdutores de medição de deslocamento colocados: i) três a meio vão, sendo que um foi colocado ao centro geométrico (LVDT 3) e os outros dois (LVDT 2 e LVDT 4), a 50 mm das faces do painel ou do conjunto de painéis; ii) e, dois nas secções de aplicação de carga, nas suas posições centrais (LVDT 1 e LVDT 5). As extensões nas faces dos painéis foram monitorizadas através de extensómetros resistivos do tipo TML BFLA-5-3 e TML PFL-30-11-3L. No caso dos painéis simples (PR_1 e PR_2), utilizaram-se quatro extensómetros, dois na parte superior do painel – camada superior FRC, a 75 mm da extremidade (SG3 e SG4) – e dois instalados na parte inferior do painel – camada inferior de GFRP, a igual distância da extremidade que os superiores (SG1 e SG2) –, conforme é ilustrado na Figura 34. No caso dos painéis unidos por epóxi (PPR_1 e PPR_2), instalou-se a meio vão de um dos painéis dois extensómetros entre a camada inferior de FRC e a camada superior de GFRP, a 75 mm das extremidades (SG1 e SG2), conforme é ilustrado na Figura 35. É de realçar que, para preservar os transdutores de deslocamento, os mesmos foram removidos a partir de um certo nível de deformação do painel. A instrumentação utilizada no ensaio de flexão à rotura dos painéis isolados pode ser observada na Figura 34, enquanto que a instrumentação utilizada nos ensaios à rotura do conjunto de painéis está esquematizada na Figura 35, sendo os detalhes adicionais sobre a instrumentação incluem-se na Tabela 27.

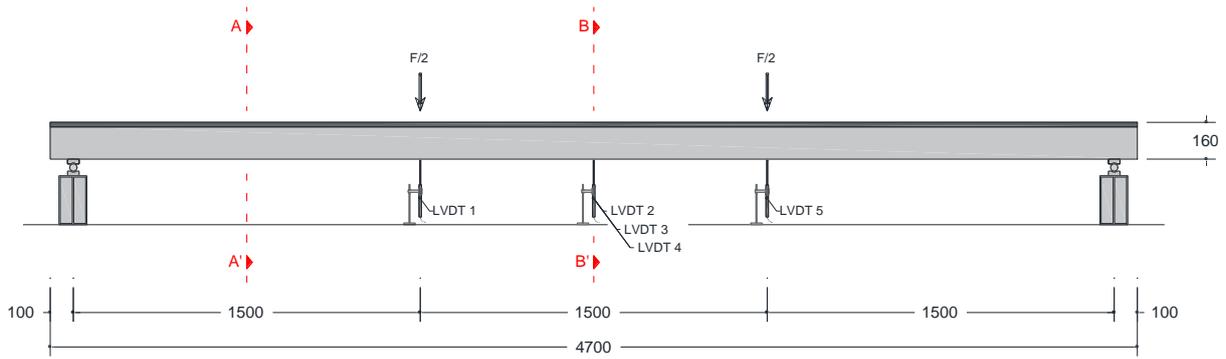


Figura 33. Configuração de ensaio à flexão à rotura em painéis simples e painéis duplos. Unidades em [mm].

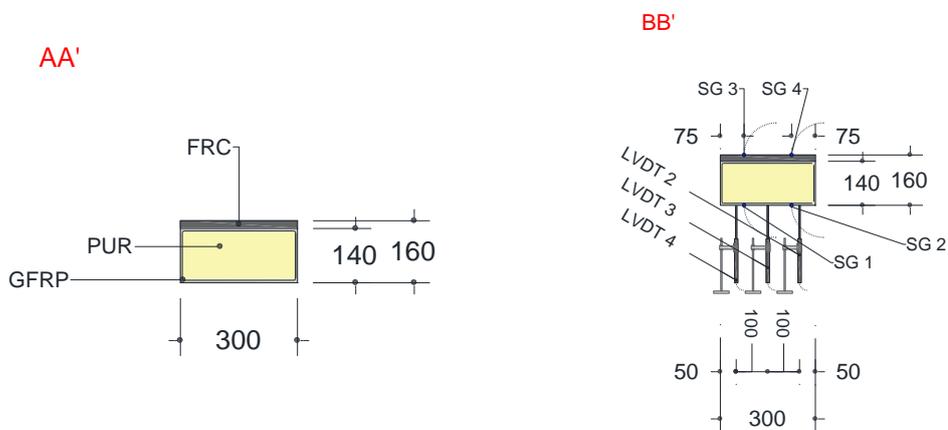


Figura 34. Instrumentação utilizada nos ensaios de flexão à rotura de painéis simples. Unidades em [mm].

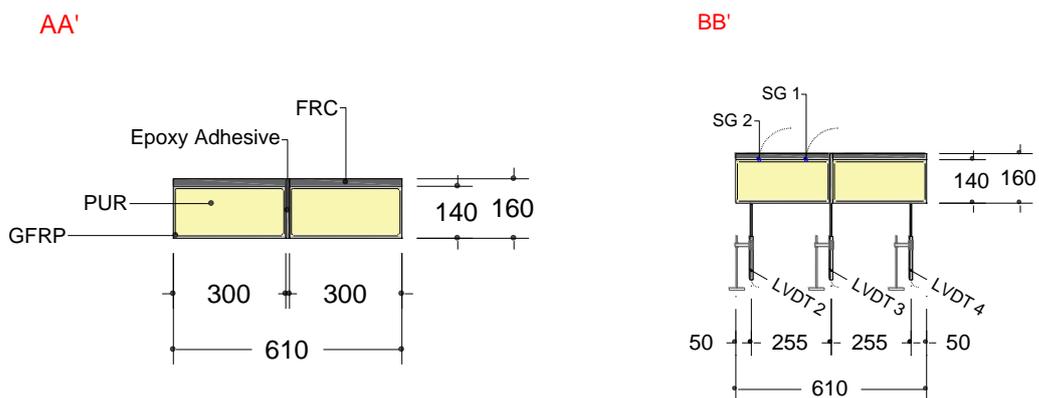


Figura 35. Instrumentação utilizada nos ensaios de flexão à rotura de painéis duplos. Unidades em [mm].

Tabela 27. Detalhes da instrumentação utilizada durante os ensaios de flexão à rotura.

Sensor ID	Grandeza medida	Marca/modelo do Sensor	Campo de medida do sensor
Célula de Carga	Força	CIL.200kN.110.70.200	200 kN
LVDT 1	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
LVDT 2	Deslocamento	RDPE ACT3000A	± 50 mm
LVDT 3	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
LVDT 4	Deslocamento	RDPE ACT3000A	± 50 mm
LVDT 5	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
SG 1 (1 painel)	Extensão	TML BFLA-5-3	3 %
SG 2 (1 painel)	Extensão	TML BFLA-5-3	3 %
SG 3 (1 painel)	Extensão	TML PFL-30-11-3L	2 %
SG 4 (1 painel)	Extensão	TML PFL-30-11-3L	2 %
SG 1 (2 painéis)	Extensão	TML PFL-30-11-3L	2 %
SG 2 (2 painéis)	Extensão	TML PFL-30-11-3L	2 %

3.1.3. Produção dos painéis

O fabrico dos painéis de GFRP foi realizada pela empresa promotora do projeto EasyFloor, i.e., ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda. A produção destes painéis foi através do processo de pultrusão. A pultrusão é um processo automatizado de produção de peças com secção transversal constante que permite transformar as fibras de reforço (fibra de vidro, carbono ou aramida) e a matriz polimérica (resina poliéster, epóxi vinil éster ou fenólica) num produto final, com uma relação produtividade/custo bastante elevada. É um processo exclusivamente aplicado aos materiais compósitos que permite a produção de, por exemplo, perfis. Este processo permite ainda construir painéis de sanduíche compósitos. Nestes últimos adicionalmente é colocado o núcleo aquando do processo de produção.

Na ALTO, o processo de fabrico destes painéis sanduíche (ver Figura 36) é muito semelhante à extrusão convencional, diferindo apenas na aplicação da pressão: enquanto na extrusão convencional a força para obrigar o material a passar pela feira é aplicada antes da feira, na pultrusão essa mesma pressão é aplicada após a feira através de um sistema de tração que agarra o perfil.



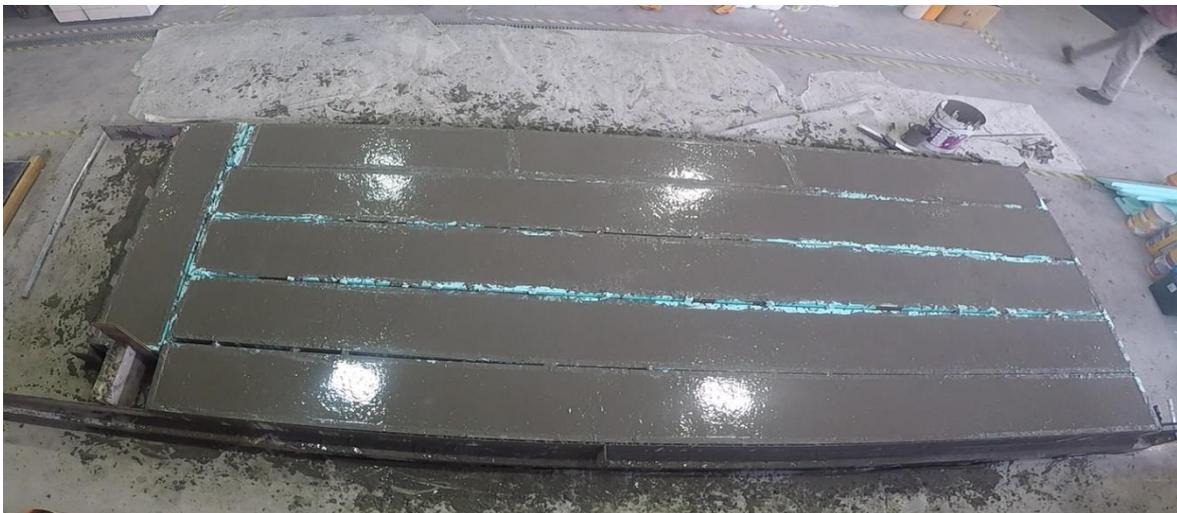
Figura 36. Processo de pultrusão do painel EasyFloor.

Durante o processo de pultrusão, blocos de espuma PUR com densidade de 60 kg/m^3 , previamente cortados à medida do núcleo do painel, isto é, com uma secção transversal de 290 mm por 130 mm, são inseridos na fase inicial deste processo. Foi usada uma matriz poliéster no fabrico das faces em GFRP dos painéis. Esta mesma matriz permitiu criar a ligação entre estes dois materiais GFRP e os blocos de PUR.

Após a produção do painel sanduíche composto realizou-se a betonagem da camada superior em FRC. Esta betonagem decorreu na empresa CIVITEST. Antes da aplicação da camada de FRC nos painéis foi necessário aplicar um elemento que melhorasse a ligação entre os dois materiais, i.e., entre o FRC fresco e camada superior de GFRP do painel. Para esse efeito utilizou-se o Sikadur 32 EF (ver Secção 2.4). A aplicação do Sikadur 32 EF foi precedida pelo tratamento da superfície, abrasivo através de lixa, e da sua limpeza, através de ar comprimido, seguido da aplicação de uma solução desengordurante (acetona) [48]. Na Figura 37a é possível visualizar a aplicação da resina Sikadur 32 EF nos painéis de GFRP antes de receberem a camada fresca de FRC. Após a aplicação deste produto realizou-se a betonagem dos painéis (Figura 37b).



a)



b)

Figura 37. Fabrico painel híbrido composto: a) aplicação da Sikadur 32 EF; b) betonagem.

Por último, após a descofragem dos painéis procedeu-se à limpeza dos mesmos, isto é, limpeza dos escorrimentos de FRC nas almas do painel e a remoção dos excessos de FRC nas zonas limites do painel.

A produção dos provetes compostos por conjuntos de dois painéis implicou a realização de uma etapa adicional. Esta última etapa iniciou-se com o tratamento das superfícies adjacentes dos dois painéis, nomeadamente através de um método abrasivo (lixa) para promover a aderência, seguido da limpeza das mesmas superfícies com ar comprimido e com uma solução desengordurante (acetona). De modo a garantir uma camada uniforme de resina, foram colocadas espaçadores com 2 mm de espessura (anilhas metálicas) nas superfícies de colagem. Deste modo garantiu-se que após a aplicação da resina,

a zona de ligação tivesse uma espessura entre 2 e 3 mm, garantido assim valores dentro dos recomendados (valor mínimo: 1 mm; valor máximo: 4 mm). Em seguida, procedeu-se à mistura dos dois componentes do epóxi conforme as recomendações do fabricante e sua posterior aplicação nas faces dos painéis adjacentes. Seguiu-se a aplicação de uma pressão nas superfícies em contacto, através da utilização de duas cintas de nylon (ver Figura 38). Por fim, ainda dentro do período trabalhável do material, o excedente de epóxi proveniente da aplicação da atrás referida pressão, foi removido. Na Figura 38 apresentam-se algumas fotografias relativas ao processo de colagem aqui referido.



Figura 38. Processo de colagem dos painéis duplos.

3.2. Resultados e análise

3.2.1. Ensaio de flexão com vão variável

A título de exemplo, na Figura 39 apresenta-se a resposta do painel PE_1 em termos de relação entre a força aplicada e o deslocamento a meio vão para os três vãos estudados. De uma forma geral pode afirmar-se que o painel apresenta um comportamento elástico, traduzido pela ausência de flechas residuais após remoção da carga. Por outro lado, a resposta pode considerar-se praticamente linear.

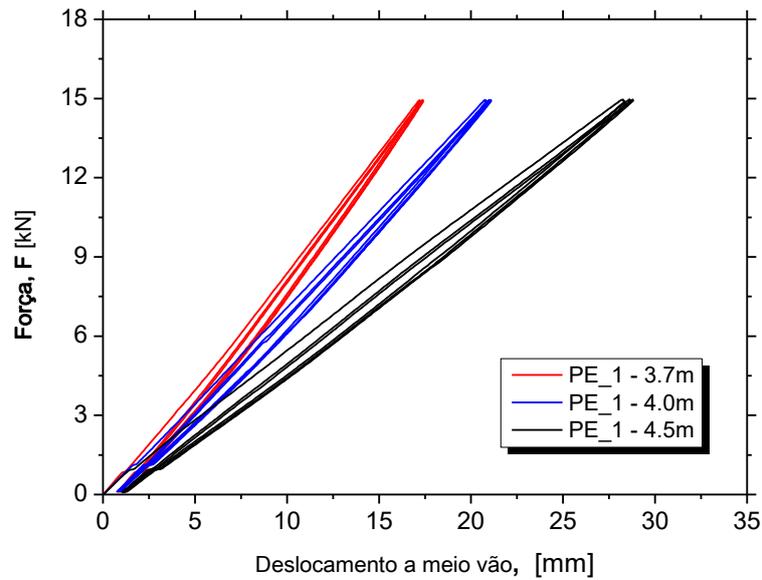


Figura 39. Força vs. deslocamento a meio vão no painel PE_1.

Uma vez que o ensaio apresenta uma resposta essencialmente linear para os diferentes vãos livres estudados, no que se segue apresenta-se o procedimento utilizado para a determinação da rigidez à flexão e da rigidez ao corte dos painéis. Na Figura 40 apresenta-se o modelo de configuração de ensaio utilizada nos ensaios de flexão com vão variável.

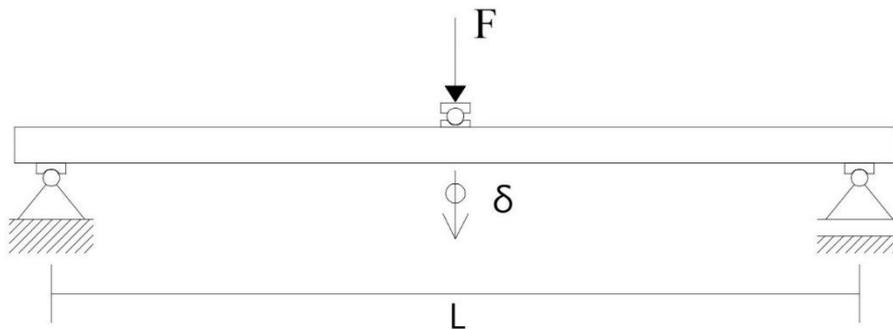


Figura 40. Configuração de ensaio utilizada nos ensaios de flexão com vão variável.

O deslocamento a meio vão (δ) de uma viga simplesmente apoiada com três pontos de carga pode ser calculada a partir da equação (45), com base no modelo de viga de *Timoshenko*, em que: i) F é força aplicada; ii) L é o vão; iii) D a rigidez à flexão; e iv) U rigidez de corte.

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot D} + \frac{F \cdot L}{4 \cdot U} \quad (45)$$

A equação (46) pode ser obtida através da divisão da equação (45) dividindo ambos os membros por $F \cdot L$.

$$\frac{\delta}{F \cdot L} = \frac{L^2}{48 \cdot D} + \frac{1}{4 \cdot U} \quad (46)$$

Para cada ensaio e painel é necessário registar o valor da força máxima ($F_{\text{máx}}$) atingida com o correspondente deslocamento a meio vão ($\delta_{\text{máx}}$) ao longo dos três picos de carga. Com o registo destes valores, por painel obtém-se no total nove pontos, i.e., três pontos para cada vão livre ensaiado. Na Tabela 28 apresentam-se os pontos em causa para o painel PE_1 (ver Figura 39).

Tabela 28. Parâmetros necessários à determinação das rigidezes.

L [m]	$F_{\text{máx}}$ [kN]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	Eixo das ordenadas L^2 [m ²]	Eixo das abcissas $\delta_{\text{máx}}/F_{\text{máx}} \cdot L$ [1/kN]
3.7	14.91	17.25	13.69	3.13E-04
3.7	14.91	17.35	13.69	3.14E-04
3.7	14.91	17.40	13.69	3.15E-04
4.0	14.95	20.77	16.00	3.47E-04
4.0	14.95	20.98	16.00	3.51E-04
4.0	14.95	21.08	16.00	3.53E-04
4.5	14.96	28.26	20.25	4.20E-04
4.5	14.97	28.62	20.25	4.25E-04
4.5	14.96	28.80	20.25	4.28E-04

Tendo por base os pontos acima referidos, é possível defini-los num gráfico com o eixo das ordenadas igual a $\delta_{\text{máx}}/F_{\text{máx}} \cdot L$ e o eixo das abcissas igual a L^2 . Procedendo-se à regressão linear destes pontos neste sistema de eixos (ver Figura 41), obtém-se a respetiva equação. No caso do painel PE_1, obteve-se a equação (47), onde o declive desta reta é $1/48 \cdot D$ e o valor da interseção da reta com o eixo das ordenadas é $1/4 \cdot U$. Deste modo, é possível determinar os valores de rigidez à flexão e a rigidez ao corte.

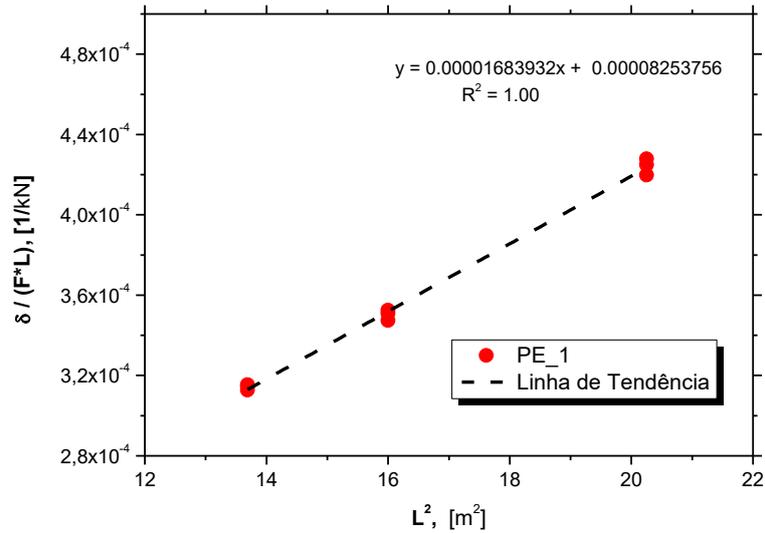


Figura 41. Resultado gráfico do painel PE_1: $\delta_{\text{máx}}/F_{\text{máx}} \cdot L$ vs. L^2 .

$$y = 0.000016839232 \cdot x + 0.00008253756 \quad (47)$$

As equações (48) e (49) apresentam, respetivamente, os valores da rigidez à flexão (D) e ao corte (U) para o painel PE_1.

$$0.000016839232 = \frac{1}{48 \cdot D} \leftrightarrow D = 1237.18 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \quad (48)$$

$$0.00008253756 = \frac{1}{4 \cdot U} \leftrightarrow U = 3028.92 \text{ kN} \quad (49)$$

No ANEXO IV encontra-se todas informações relativas aos restantes painéis ensaiados. Na Tabela 29 apresentam-se os resultados obtidos da rigidez à flexão (D) e ao corte (U) para todos os painéis ensaiados, aplicando a metodologia de cálculo anteriormente detalhada.

Os quatro painéis ensaiados apresentaram resultados muito semelhantes em termos de rigidez à flexão, enquanto a rigidez ao corte apresenta uma dispersão considerável.

Tabela 29. Rigidez à flexão e da rigidez ao corte para os painéis ensaiados.

Painel	$\frac{1}{48} \cdot D$	$\frac{1}{4} \cdot U$	D [kN · m ²]	U [kN]
PE_1	0.000016839232	0.00008253756	1237.18	3028.92
PE_2	0.000017148559	0.00010609690	1214.87	2356.34
PE_3	0.000020057290	0.00002423701	1038.69	10314.80
PE_4	0.000019629560	0.00003457500	1061.32	7230.66
Valor médio			1138.02	5732.68
Coefficiente de variação			7.80 %	56.49 %

O valor da rigidez à flexão (D) e a rigidez ao corte (U) pode também ser estimado analiticamente a partir das equações (50) e (51), respetivamente, desde que conhecidas as características geométricas e mecânicas nos materiais envolvidos (ver Figura 42).

$$D = E \cdot I \quad (50)$$

$$U = G \cdot A' \quad (51)$$

Os resultados referidos na Secção 2.1 apontam para um módulo de elasticidade do GFRP (faces e nervuras) da ordem dos 26 a 28 GPa e um módulo de distorção (G) de 3.6 GPa (nervuras). Por outro lado, o módulo de elasticidade (E) do FRC (valor médio das quatro amassaduras de betão) obtido foi de 26.21 GPa. Considerando-se uma secção equivalente homogeneizada em FRC, é possível determinar a respetiva da inércia (I) área de corte (A') do painel homogeneizado em FRC, a partir do qual é possível obter a rigidez à flexão e ao corte do painel (equações (50) e (51)).



Figura 42. Secção transversal do painel.

$$D = 26.3 \cdot 10^6 \cdot 3.61787 \times 10^{-5} = 951.48 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (52)$$

$$U = 3.6 \cdot 10^6 \cdot \left(2 \cdot \frac{5}{6} \cdot 0.16 \cdot 0.006\right) = 5760.0 \text{ kN} \quad (53)$$

A Tabela 30 apresenta a comparação da rigidez à flexão e da rigidez ao corte dos painéis determinadas por via analítica e experimentais. Verificou-se que os valores calculados analiticamente são próximos dos resultados obtidos experimentalmente. Experimentalmente obteve-se uma rigidez média à flexão de 1138 kN.m², superior à analítica em 17.35%, e uma rigidez média ao corte de 5732.7 kN muito semelhante à obtida por meio analítico (apenas 0.48% inferior).

Tabela 30. Comparação da rigidez à flexão e da rigidez ao corte dos painéis determinadas por via analítica e experimentais.

Método	D [kN × m²]	U [kN]
Analítico	951.5	5760.0
Experimental	1138.0	5732.7
Diferença	+16.39%	-0.48%

3.2.2. Ensaios de flexão à rotura

Na Figura 43 e Figura 44 apresentam-se, respetivamente, a resposta para o painel PR_1 e PR_2, em termos da relação entre a força aplicada e os deslocamentos verticais em diferentes pontos do painel (ver Figura 33), bem como a relação entre a força aplicada e os valores de extensões registados nos pontos medidos (ver Figura 34). Tal como referido na Secção 3.1.2, a partir de um certo nível de deformação (aproximadamente 100 mm a meio vão) foi necessário remover os transdutores de deslocamento devido ao facto de terem atingido o limite do campo de leitura e de forma a evitar danos nos mesmos. A partir desse momento deixou-se de ter o registo do deslocamento vertical nos diferentes pontos do painel. Contudo, através de uma correlação entre os valores registados do deslocamento vertical a meio vão (LVDT 3) e o deslocamento registado no atuador (localizado o meio vão), foi possível estimar o deslocamento vertical a meio vão até à rotura do painel. Assim, a linha a tracejado que se apresentação nos gráficos força *vs.* deslocamento representa o deslocamento a meio vão, calculado com a correlação anteriormente desenvolvida. A Figura 45 apresenta a comparação dos deslocamentos a meio vão dos dois painéis ensaiados.

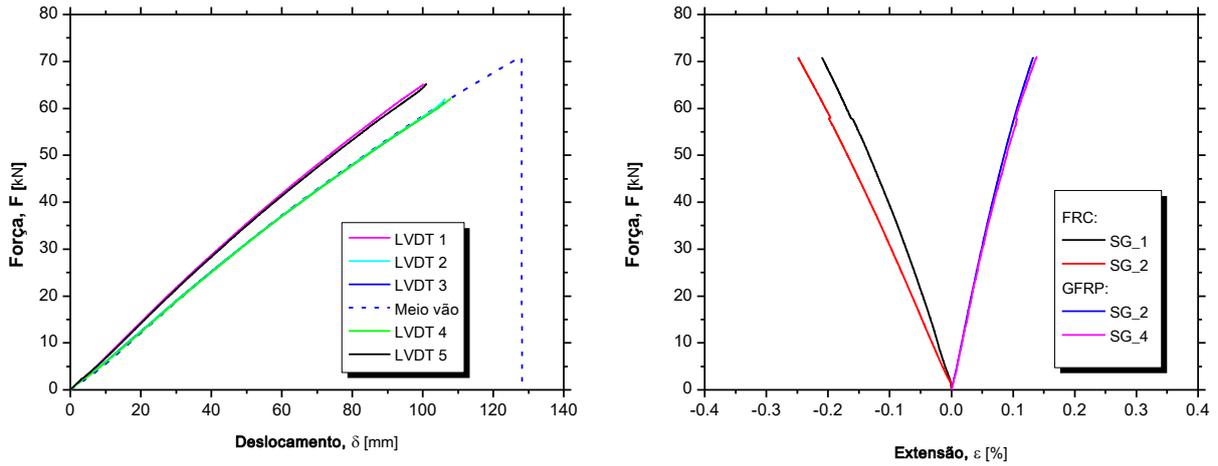


Figura 43. Força vs. deslocamento (esquerda) e força vs. extensão (direita) – Painel PR_1.

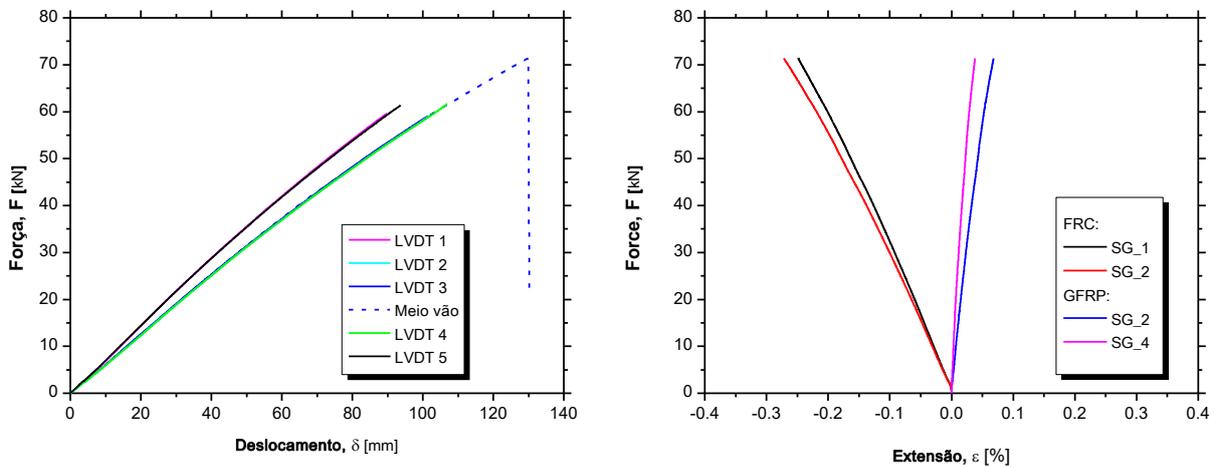


Figura 44. Força vs. deslocamento (esquerda) e força vs. extensão (direita) – Painel PR_2.

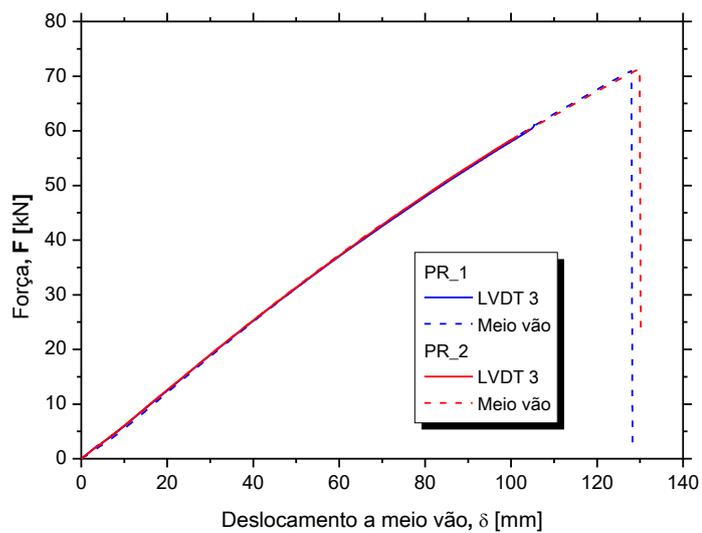


Figura 45. Representação gráfica da força aplicada vs. o deslocamento a meio vão para os painéis PR_1 e PR_2, tendo por base o deslocamento medido pelo atuador.

Na Figura 46 é apresentada uma fotografia do ensaio à rotura do painel PR_1. É possível observar o comportamento à flexão do painel, com elevada deformação e sem danos externos aparentes, momentos antes da rotura. Como se pode observar, no momento em que a fotografia foi tirada os transdutores já tinham sido retirados pelas razões apresentadas anteriormente.



Figura 46. Deformação do painel PR_1 durante o ensaio (na iminência da rotura).

Analisando os resultados dos gráficos da Figura 43, Figura 44 e Figura 45, conclui-se que o comportamento dos painéis ensaiados é muito similar, com uma resposta sensivelmente linear até à rotura, quer em termos da relação força deslocamento, quer nas respostas obtidas através do registo da extensões.

Na Tabela 31 apresentam-se os principais parâmetros quantificados, i.e., i) força máxima (F_u); ii) deslocamento a máximo a meio vão para força máxima (δ_u); iii) momento fletor máximo (M_u); iv) rigidez à flexão calculada no intervalo de força entre os 5 kN e os 15 kN (K_{eff}); e v) a extensão para a força última (ϵ_{Fu}), no FRC e no GFRP. Nesta tabela também se inclui uma breve descrição do modo de rotura observado.

Tabela 31. Principais resultados nos ensaios à rotura por flexão – Paineis simples.

Painel	F_u [kN]	δ_u [mm]	M_u [kN·m]	K_{eff} [kN/mm]	FRC ε_{Fu} [%]	GFRP ε_{Fu} [%]	Modo de rotura
PR_1	70.94	127.89	53.21	0.650	-0.249	0.138	Rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC
PR_2	71.35	129.91	53.51	0.657	-0.272	0.068	Rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC
Média	71.15	128.9	53.36	0.654	-0.261	0.103	

Constata-se que a força máxima dos painéis, em média, é de 71 kN associada a uma deformação a meio vão de 129 mm ($\sim L/35$), uma extensão média associada à força última de -0.26 % e 0.10 % para a camada de FRC e GFRP, respetivamente. Por intermédio de cálculo analítico no qual se admite que os materiais que compõem o painel têm comportamento linear, consta-se que para o valor do momento último (53.36 kN·m) a extensão obtida na camada superior do FRC por esta via numérica coincide com a obtida experimentalmente. Contudo, quando se compara o valor da extensão na face inferior do GFRP obtido analiticamente (0.69%) com o valor experimental (0.10%), constata-se que existe uma diferença significativa, para a qual não é possível apontar um conjunto de razões que a suportem.

Ambos os painéis apresentam o mesmo modo de rotura, como se pode observar na Figura 47 e na Figura 48. Este consistiu na rotura da alma dos painéis (nervuras), no ponto de aplicação de carga, zona onde se localiza o esforço transversal e momento fletores máximos. Em primeira instância observou-se a rotura da nervura de GFRP, seguida da rotura da camada de FRC.

**Figura 47.** Modo de rotura do Painel PR_1.



Figura 48. Modo de rotura do Pannel PR_2.

No que se segue apresentam-se os resultados da série “PPR”. No que respeita ao painel PPR_1 teve referir-se que este foi ensaiado em duas fases: i) Fase 1 – PPR1_1A e Fase 2 – PPR_1B. Devido a uma falha técnica (software de controlo do ensaio) este ensaio teve de ser interrompido para um nível de deformação no atuador de 120 mm. Assim, o ensaio teve de ser interrompido, tendo-se de seguida, procedido à remoção da carga no painel. Após a resolução dos problemas, realizou-se um novo o ensaio à flexão até rotura do mesmo painel.

Na Figura 49, Figura 50 e Figura 52 apresentam-se as curvas força *versus* deslocamento e força *versus* extensão dos painéis ensaiados, enquanto que a Figura 51 ilustra o provete PRR_1 durante o ensaio.

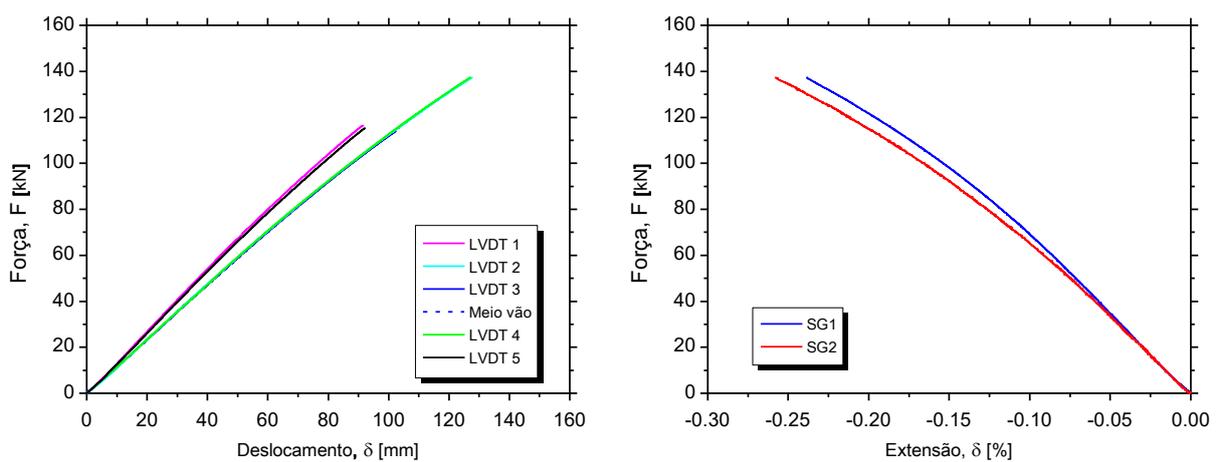


Figura 49. Força *vs.* deslocamento (esquerda) e força *vs.* extensão (direita) – Pannel PPR_1A.

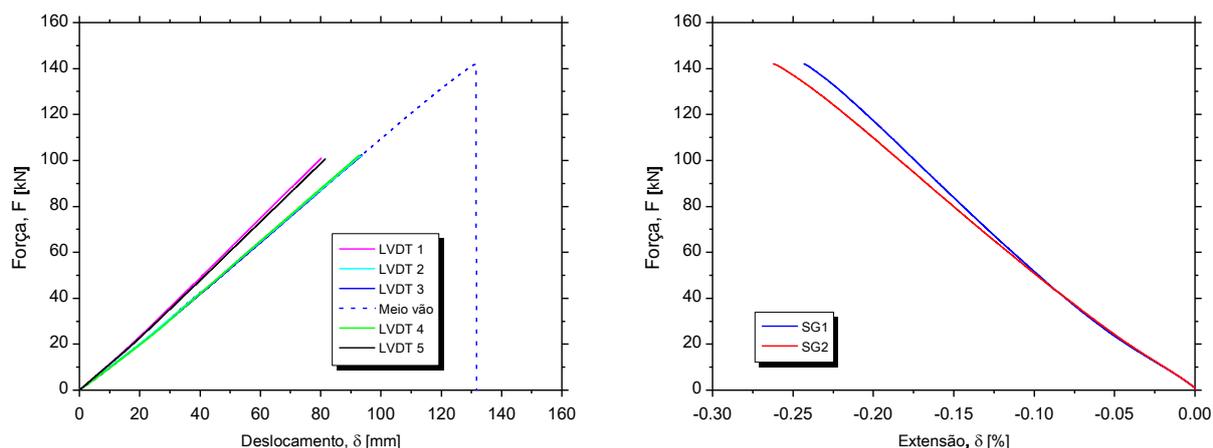


Figura 50. Força *vs.* deslocamento (esquerda) e força *vs.* extensão (direita) – Painel PPR_1 (ensaio PPR_1B).

A rotura dos painéis PPR_1 e PPR_2 foi atingida para uma carga máxima de 141.9 kN e 144.9 kN, respetivamente, para um deslocamento a um deslocamento máximo no atuador superior a 130 mm ($> L/35$) e uma extensão média associada à força última de -0.27 % para a camada de FRC. Tal como nos casos anteriores, o comportamento dos painéis foi essencialmente linear. Salienta-se que nas curvas força *versus* deslocamento, tal como nos ensaios anteriores, durante o decorrer dos ensaios após a remoção dos LVDTs, os deslocamentos a meio vão foram estimados com base no deslocamento registado no atuador.



Figura 51. Deformação do painel PPR_1 durante o ensaio.

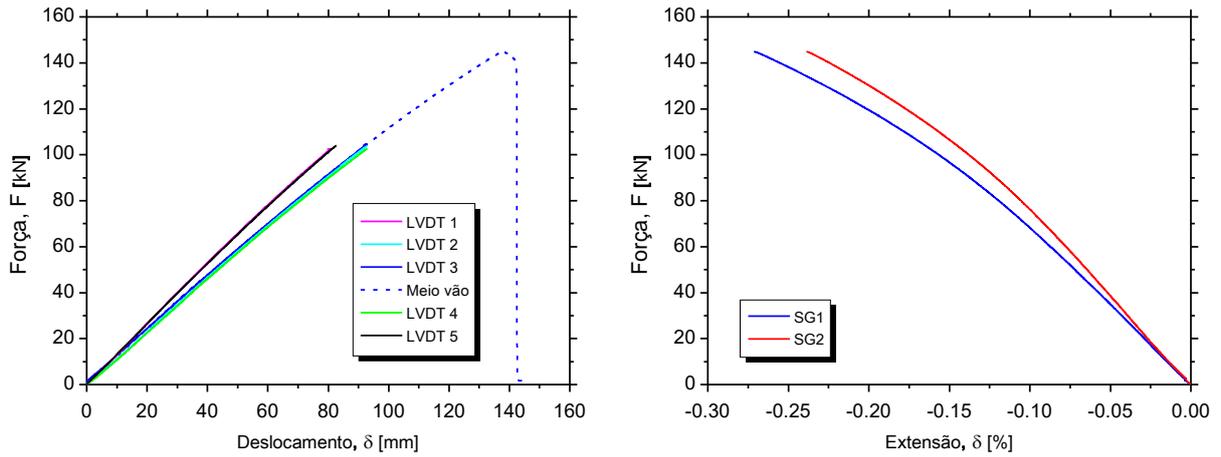


Figura 52. Força *vs.* deslocamento (esquerda) e força *vs.* extensão (direita) – Painel PPR_2.

A Figura 53 apresenta os resultados em termos de força *versus* deslocamento a meio vão para todos os ensaios realizados. O comportamento dos painéis ao longo do ensaio é muito semelhante realçando-se que o painel PPR_2 obteve uma capacidade de carga ligeiramente superior o que, conseqüentemente, levou a um maior deslocamento a meio vão na rotura.

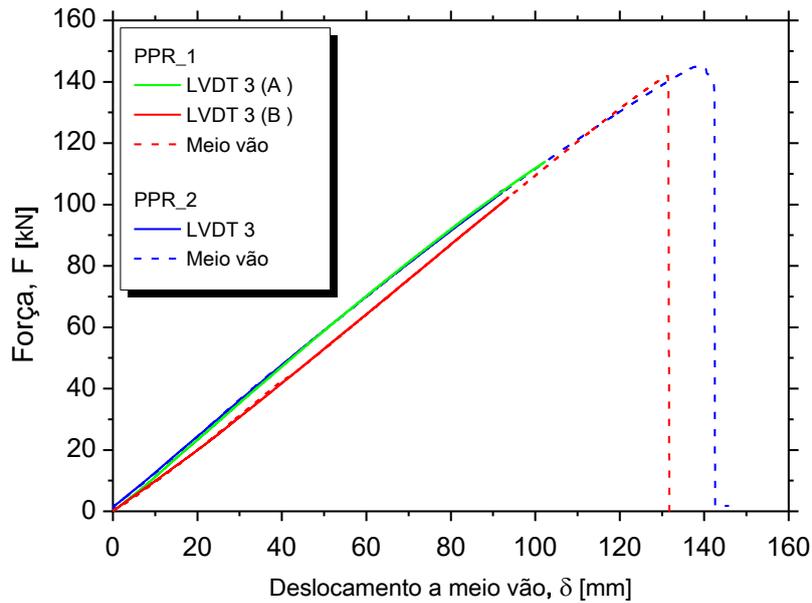


Figura 53. Resultados gráficos da força *vs.* deslocamento a meio vão.

Na Tabela 32 apresenta-se os principais resultados extraídos dos ensaios. Os parâmetros aqui apresentados têm o mesmo significado dos da Tabela 31.

Tabela 32. Principais resultados nos ensaios à rotura por flexão – Painel duplo.

Painel	F_u [kN]	δ_u [mm]	M_u [kN·m]	K_{eff} [kN/mm]	FRC ϵ_{Fu} [%]	Modo de rotura
PPR_1A	137.43	127.33	103.07	1.2175	-0.26	-
PPR_1B	141.94	131.38	106.45	1.0028	-0.26	Rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC
PPR_2	144.89	137.88	108.67	1.1747	-0.27	Rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC
Média	143.42	134.63	107.56	1.0888	-0.265	

Os painéis na rotura apresentaram resultados muito similares em termos de força máxima e respetivo deslocamento. No que respeita à rigidez, esta também foi relativamente próxima quando se comparam os valores de PPR_1A e PPR_2.

À semelhança dos painéis simples, a rotura ocorreu na zona da aplicação da carga. Assim, o modo de rotura caracterizou-se pela rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC. No que diz respeito à resina epóxi utilizada na ligação entre os painéis verificou-se que ao longo do ensaio a ligação entre ambas as superfícies se manteve intacta, não apresentando sinais de deterioração ou descolamento e, conseqüentemente, esta permitiu uma boa transferência de tensões entre painéis. Contudo, no caso do painel PPR_2, após a rotura na alma do painel, observou-se a rotura da interface entre o FRP e o GFRP. Os modos de rotura do painel PPR_1 e PPR_2 são apresentados na Figura 54 e na Figura 55, respetivamente.

**Figura 54.** Modo de rotura do painel PPR_1.



Figura 55. Modo de rotura do painel PPR_2.

De modo a comparar os resultados obtidos nos ensaios dos painéis simples com os dos painéis duplos, apresentam-se na Tabela 33 os resultados médios obtidos nos referidos ensaios e na Figura 56 a relação entre a força aplicada e o deslocamento a meio vão.

Tabela 33. Comparação entre os resultados obtidos entre as séries PR e PPR.

Painel	F_u [kN]	δ_u [mm]	M_u [kN·m]	K_{eff} [kN/mm]	FRC ϵ_{Fu} [%]	Modo de rotura
PR_1 e PR_2	71.15	128.9	53.36	0.6535	-0.261	Rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC
PPR_1 e PPR_2	143.42	134.63	107.56	1.0888	-0.265	Rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC

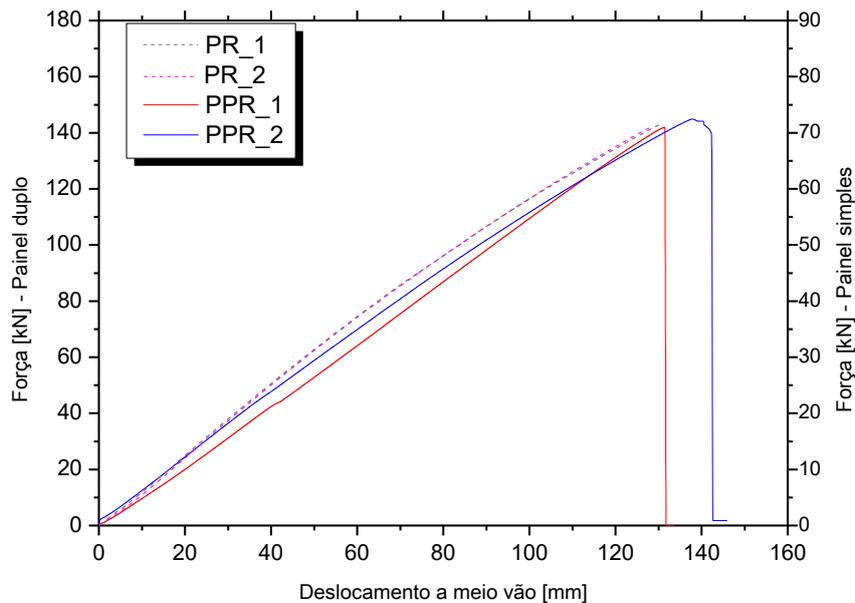


Figura 56. Comparação dos resultados gráficos painel simples vs. painel duplo.

A partir desta tabela e gráfico, conclui-se que o painel duplo apresenta o dobro da capacidade do painel simples quer em termos de rigidez, quer em termos de resistência. Por outro lado, os modos de rotura foram muito similares. Assim, é possível dizer que a ligação colocada entre painéis não conduziu a efeitos sinérgicos positivos dignos de registo.

3.3. Modelação numérica

Com o objetivo de se estender a análise dos resultados obtidos nos ensaios de flexão, procedeu-se à simulação numérica dos painéis ensaiados, através da modelação tridimensional destes segundo o método dos elementos finitos. Para o efeito, foi utilizado o software DIANA (versão 10.3) [51]. A Figura 57 apresenta a malha de elementos finitos adotada para simular o painel sanduíche híbrido. Devido às condições de simetria, foi apenas modelado metade do painel. Todos os constituintes do painel (FRC, GFRP, PUR) foram modelados com elementos sólidos de vinte nós (elementos CHX60 de acordo com DIANA 10.3). As condições de apoio foram simuladas em conformidade para as condições de apoio reais, i.e., foi imposta uma restrição de deslocamento vertical (eixo z) no centro da placa de suporte de 50 mm (a vermelho), permitindo assim a rotação e o deslocamento horizontal (segundo o eixo x). Foi assumido um comportamento elástico linear para todos os materiais, tendo sido adotados os valores médios dos módulos de elasticidade obtidos a partir da caracterização experimental dos materiais (ver Secção 2). Foi também assumida a ligação perfeita entre os diferentes componentes do painel sanduíche (GFRP/PUR e GFRP/FRC).

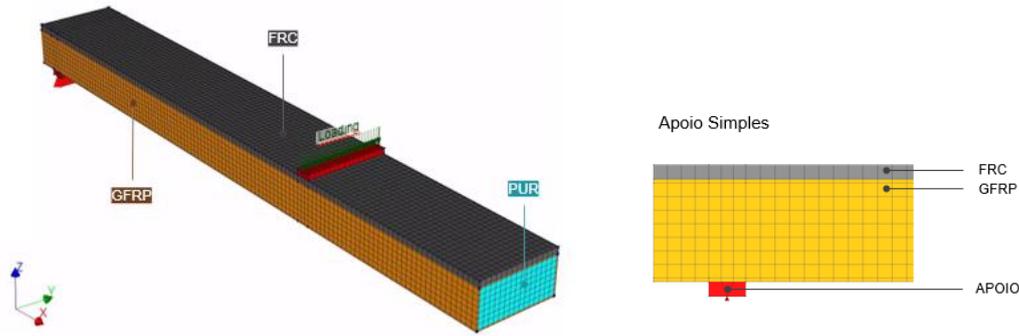


Figura 57. Malha de elementos finitos do modelo 3D do painel sanduíche híbrido e representação das condições de apoio.

Na Figura 58 apresentam-se os resultados obtidos para i) o painel simples (FEM_PS) e para ii) o painel duplo (FEM_PD).

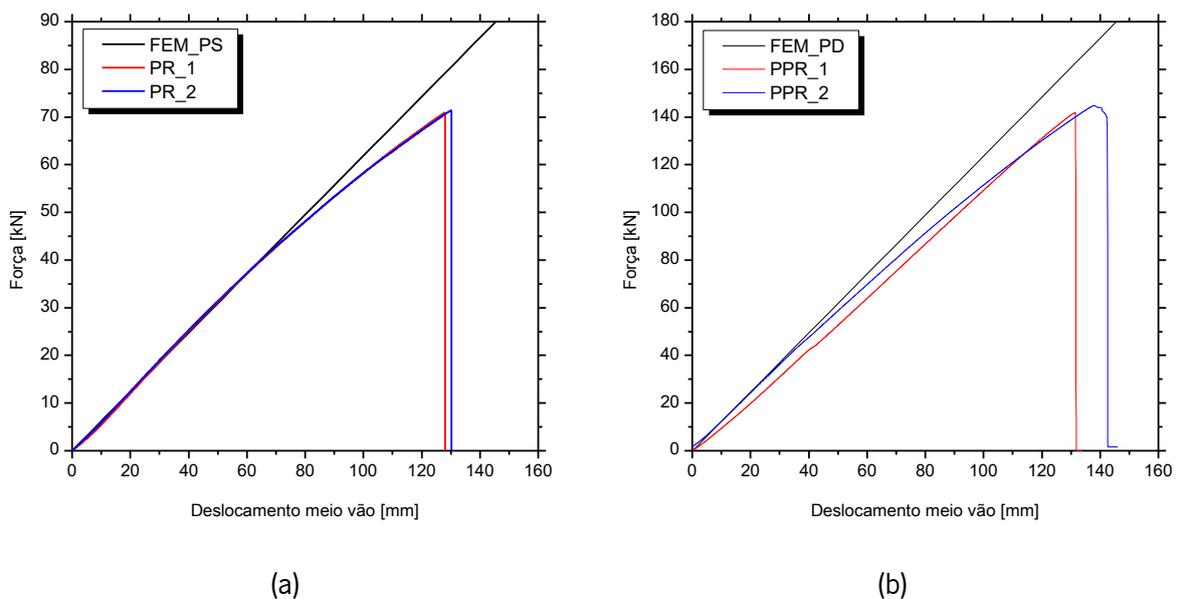


Figura 58. Força vs. deslocamento a meio vão: a) painel simples; b) painel duplo.

Comparando as simulações numéricas do painel simples com os resultados experimentais obtidos (PR_1 e PR_2) verifica-se que até cerca de ~60% da carga última atingida estes painéis apresentam o comportamento linear. O comportamento não linear do painel que ocorre a partir deste nível de carga até à rotura pode ser atribuído ao comportamento não linear do FRC em compressão. Verificou-se que o modelo numérico conduziu a uma rigidez à flexão de 0.62 kN/mm – este valor é próximo da rigidez à flexão experimental 0.65 kN/mm (+5%). No caso dos painéis duplos, os resultados obtidos também foram consistentes, i.e., numericamente uma rigidez à flexão obtida foi de 1.24 kN/mm, que compara

com a rigidez à flexão experimental de 1.08 kN/mm (-15%). Para esta maior diferença, poderá ser contribuído o comportamento não linear da ligação adesiva.

Tal como seria de esperar, o comportamento linear adotado nos modelos numéricos desenvolvidos, não permitiu estimar a capacidade de carga última dos painéis. Maior rigor nas simulações poderá ser atingida através da simulação do comportamento não linear material do FRC e a consideração do comportamento não linear geométrico.

3.4. Conclusões

O presente capítulo descreveram-se os ensaios de flexão (de curto prazo) nos painéis sanduíche em estudo, que incluíram componentes experimentais, numéricas e analíticas. Os ensaios à flexão cíclicos, com vão variável, permitiram a determinação das propriedades elásticas dos painéis, enquanto os ensaios à flexão à rotura em painéis simples e duplos permitiram caracterizar o comportamento destes até à sua capacidade máxima.

A partir dos ensaios de flexão com vão variável foi possível concluir que existe uniformidade na produção dos painéis, uma vez que o comportamento dos diferentes painéis foi muito semelhante. Durante a execução destes ensaios, na qual a força máxima aplicada foi de 15 kN (cerca de 21% da capacidade última dos painéis), obteve-se uma resposta linear. Os resultados destes ensaios permitiram concluir que a rigidez média à flexão é igual a 1138 kN·m², enquanto a rigidez média ao corte é igual a 5732.7 kN. Tendo por base a caracterização mecânica dos materiais dos painéis foi possível estimar de forma analítica estes valores de rigidez, tendo obtido uma diferença (experimental *versus* analítica) de cerca de 16% e ~0% para a rigidez à flexão e ao corte, respetivamente.

No caso dos ensaios de flexão à rotura dos painéis simples constatou-se que a capacidade máxima é de 71 kN, ao qual está associado uma deformação média a meio vão de 129 mm. A rotura do painel ocorreu na zona de aplicação da carga, sendo o modo de rotura caracterizado pela rotura da alma do painel (nervura de GFRP) seguida da rotura da camada de FRC por compressão.

Os ensaios de flexão à rotura dos painéis duplos (solidarizados por ligação adesiva) tiveram o um modo de rotura similar aos dos painéis simples, i.e., rotura da alma do painel (nervura de GFRP) seguida da rotura da camada de FRC por compressão. Estes ensaios permitiram ainda verificar que a resposta da ligação adesiva entre ambas as superfícies dos painéis, manteve-se intacta ao longo do ensaio. Em termos comparativos, os painéis duplos apresentaram uma capacidade resistente dupla da dos painéis.

No que diz respeito ao deslocamento máximo a meio vão verifica-se que em ambos os casos o deslocamento obtido é bastante próximo, assim como as extensões obtidas na camada de FRC.

Os modelos numéricos de elementos finitos permitiram validar os resultados obtidos experimentalmente dos ensaios de flexão à rotura. Verificou-se no caso do painel simples uma rigidez à flexão de 0.62 kN/mm em comparação com a rigidez à flexão experimental de 0.65 kN/mm. No caso do painel duplo obteve-se numericamente uma rigidez à flexão de 1.24 kN/mm e experimentalmente de 1.08 kN/mm. Neste último caso verificou-se uma maior diferença entre o resultado numérico e experimental, que pode ser justificado possivelmente pelo comportamento não linear da ligação adesiva. Apesar de não ter sido considerado o comportamento não linear nas simulações numéricas, os resultados obtidos foram consistentes com os resultados experimentais principalmente até aproximadamente 60% da carga máxima.

4. ENSAIOS DE LIGAÇÃO: PAINEL – PAINEL E PAINEL – PAREDE

4.1. Programa experimental

4.1.1. Ensaio de ligação painel – painel

Os ensaios de ligação painel – painel tiveram como objetivo o estudo das ligações entre painéis. Para isto, utilizaram-se seis provetes, produzidos segundo duas tipologias distintas, sendo: (i) três provetes (2PP_01; 2PP_02; 2PP_03) constituídos por dois painéis cada, com uma ligação adesiva de 2 mm entre as interfaces (ver Figura 59) – Série 1; e, (ii) três provetes (3PP_01; 3PP_02; 3PP_03) constituídos por três painéis cada, na qual cada provete apresenta duas ligações adesivas de 2 mm cada (ver Figura 60) – Série 2. Cada painel utilizado no fabrico destes provetes apresenta 300 mm de comprimento, 300 mm de largura e altura de 160 mm. Estes painéis foram produzidos com um FRC produzido na amassadura 1 (ver Secção 2.2).

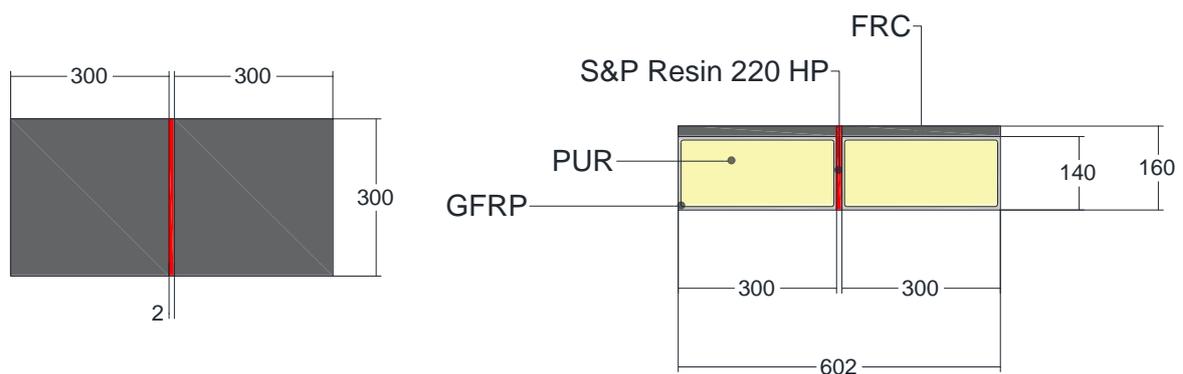


Figura 59. Geometria dos provetes da Série 1: vista em planta (lado esquerdo) e vista lateral (lado direito). Unidades em [mm].

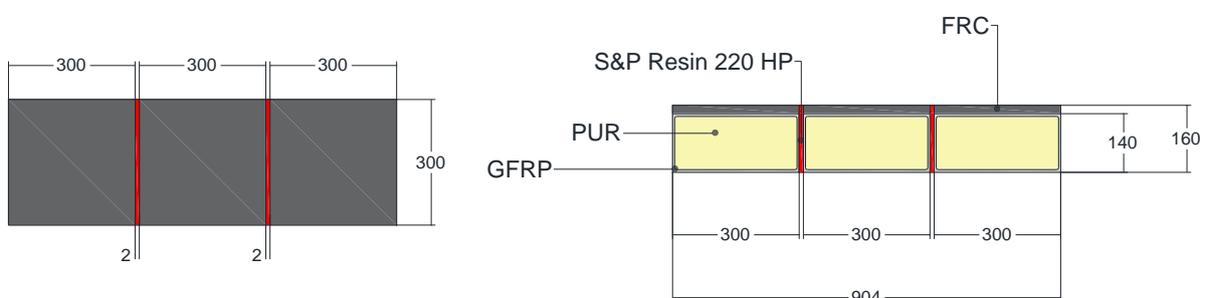


Figura 60. Geometria dos provetes da Série 2: vista em planta (lado esquerdo) e vista lateral (lado direito). Unidades em [mm].

O adesivo utilizado para a realização das ligações adesivas foi o S&P Resin 220 HP (ver Secção 2.5). Na Figura 61 apresentam-se algumas fotografias relativas ao processo de colagem dos provetes da Série 1.

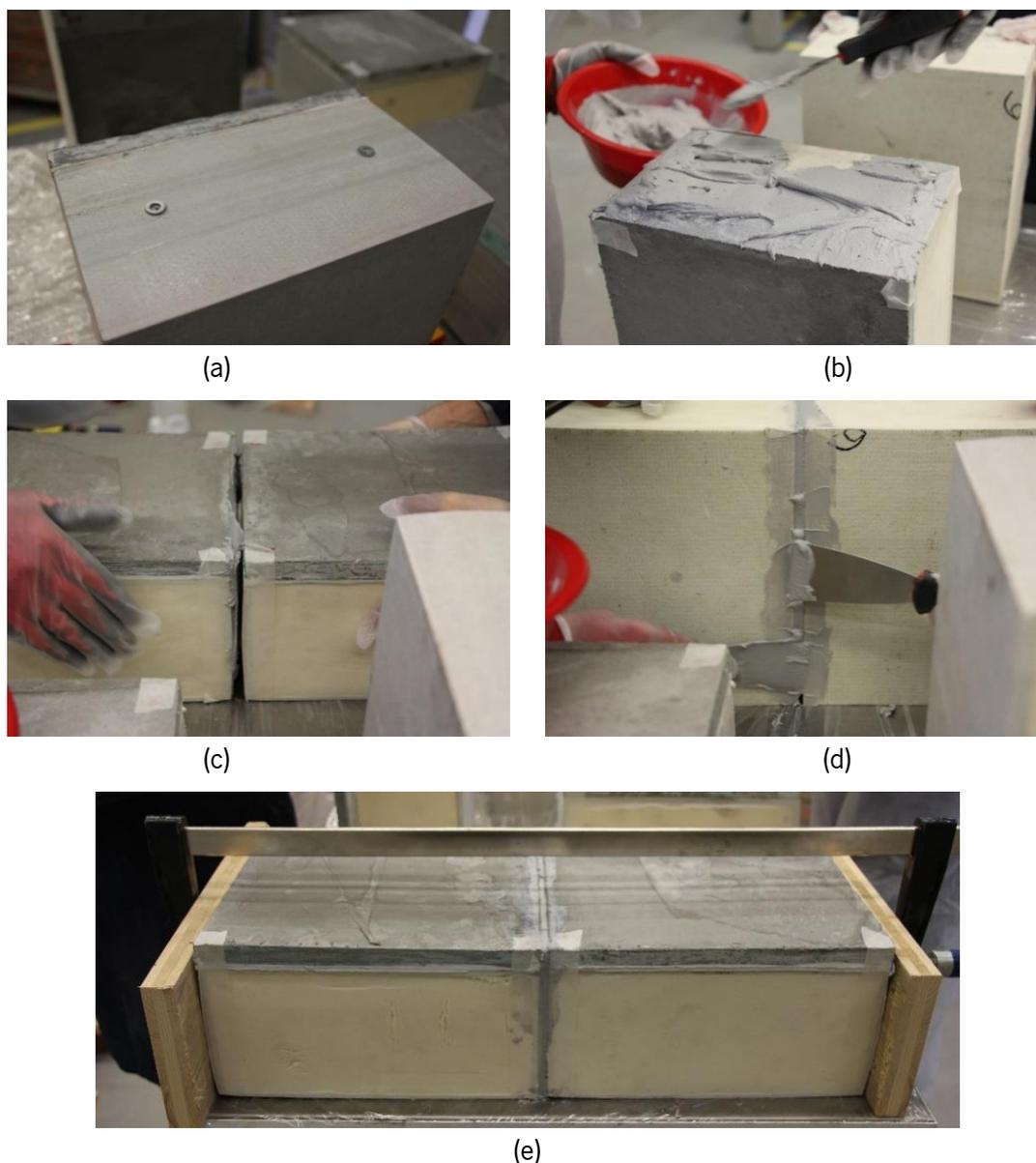


Figura 61. Processo de colagem – Série 1: (a) instalação de espaçadores; (b) aplicação do adesivo nas faces a colar; (c) colagem das faces; (d) remoção do adesivo em excesso; (e) aplicação de pressão lateral.

De modo a garantir uma camada uniforme de resina nas ligações efetuadas, foram colocados espaçadores com 2 mm de espessura (anilhas metálicas) na superfície de contacto entre painéis (Figura 61a). Após a mistura das duas componentes do adesivo segundo as recomendações do fabricante, procedeu-se à colocação da resina nas superfícies de colagem (Figura 61b) – refira-se que previamente a esta fase as faces a colar foram lixadas com uma lixa fina, seguida de limpeza com um solvente. Seguiu-se a aplicação de pressão entre os painéis de modo a obter uma boa ligação (Figura 61c e Figura

61e). Ainda dentro do período trabalhável do material, uniformizaram-se todas as zonas expostas da ligação removendo o adesivo em excesso (Figura 61d).

Na Figura 62 apresenta-se a configuração de ensaio utilizada na Série 1. Os suportes adotados permitiam a rotação e, apenas um deles, permitia o deslocamento na direção longitudinal. Uma camada de betume de enchimento em poliéster (massa de ferro) foi aplicada entre os painéis e o sistema de suporte, de modo a uniformizar todas as irregularidades da superfície. A carga foi aplicada em dois pontos de carga, estes localizados a 201 mm do eixo do apoio ao ponto de aplicação de carga (distância entre forças correspondente a 150 mm). O ensaio foi controlado sob deslocamento, através de um atuador hidráulico com uma velocidade média de 5 mm/min. Ao longo do ensaio foram registados os valores da carga aplicada através de uma célula de carga de 200 kN (erro de linearidade de $\pm 0.05\%$), e os deslocamentos verticais, através de um conjunto de três transdutores de deslocamento colocados nos pontos de aplicação de carga, bem como a meio vão. Na Tabela 34 apresentam-se as características técnicas dos sensores usados na instrumentação dos provetes.

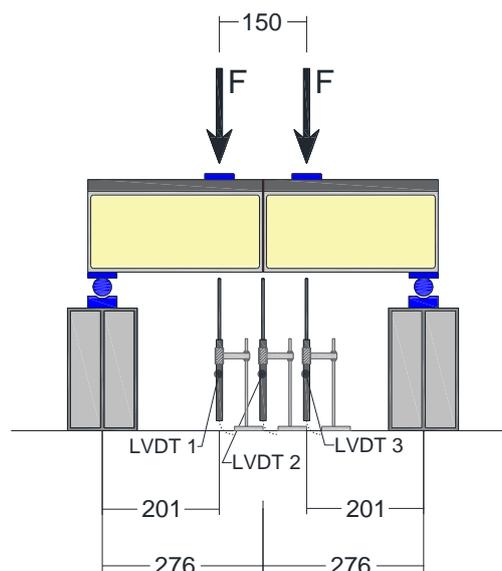


Figura 62. Configuração de ensaio - Série 1. Unidades em [mm].

Na Figura 63 apresenta-se a configuração de ensaio utilizada na Série 2. A estrutura de ensaio e a instrumentação utilizada é mesma descrita na Série 1. Nesta série procedeu-se à uniformização das superfícies de contacto entre o painel e estrutura de ensaio com recurso às mesmas medidas de uniformização anteriormente descritas. Nesta série a aplicação da carga foi num único ponto, a meio vão do provete, distanciada de 427 mm em relação os eixos dos apoios (vão de corte). O ensaio foi controlado sob deslocamento, através de um atuador hidráulico com uma velocidade média de 5 mm/min. Ao longo

do ensaio foram registados os valores da carga aplicada através de uma célula de carga de 200 kN (erro de linearidade de $\pm 0.05\%$), e os deslocamentos verticais, através de um conjunto de três transdutores de deslocamento colocados no ponto de aplicação de carga, bem como na zona de interface entre painéis.

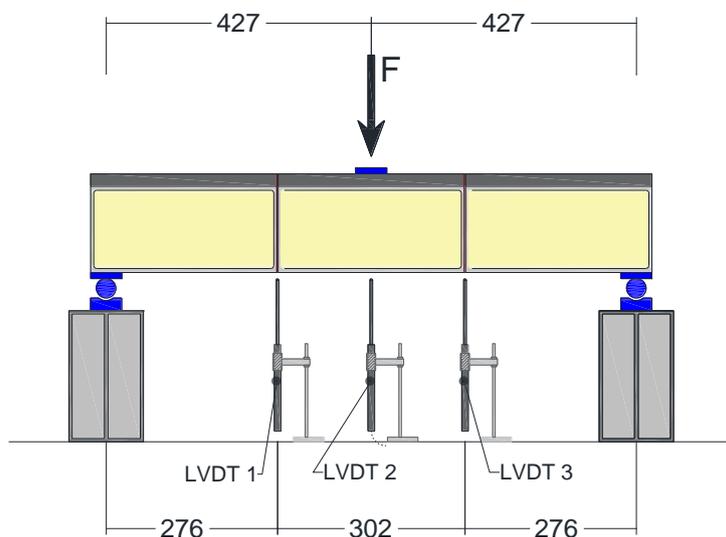


Figura 63. Configuração de ensaio - Série 2. Unidades em [mm].

Tabela 34. Características técnicas dos sensores usados na instrumentação dos provetes.

Sensor ID	Grandeza medida	Marca/modelo do Sensor	Campo de medida do sensor
Célula de carga	Força	CIL.200kN.110.70.200	200 kN
LVDT 1	Deslocamento	RDPE ACT3000A	± 50 mm
LVDT 2	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
LVDT 3	Deslocamento	RDPE ACT3000A	± 50 mm

4.1.2. Ensaio de ligação painel – parede

Os ensaios de ligação painel – parede tiveram como objetivo a análise do comportamento de três ligações tipo utilizadas para fixar os painéis a uma estrutura existente. As três ligações estudadas, propostas no âmbito do projeto EasyFloor, foram denominadas de LT-1L, LT-2L e LT-2LA.

A ligação tipo LT-1L é caracterizada pela aplicação de uma cantoneira L 150x12 na parte inferior do painel, sendo que, a ligação entre painel e a cantoneira foi materializada através de dois parafusos

M10x210 classe 8.8 com um momento de aperto de 10 N·m e duas anilhas A4 200 HV M10 (ver Figura 64a).

A segunda ligação tipo LT-2L (ver Figura 64b) é semelhante à primeira, mas em vez de uma cantoneira foram colocadas duas cantoneiras, uma superior ao painel e outra inferior. O sistema de ligação entre o painel e a cantoneira é exatamente o mesmo da ligação LT-1L, isto é, dois parafusos M10x210 classe 8.8 com um momento de aperto de 10 N·m e duas anilhas A4 200 HV M10.

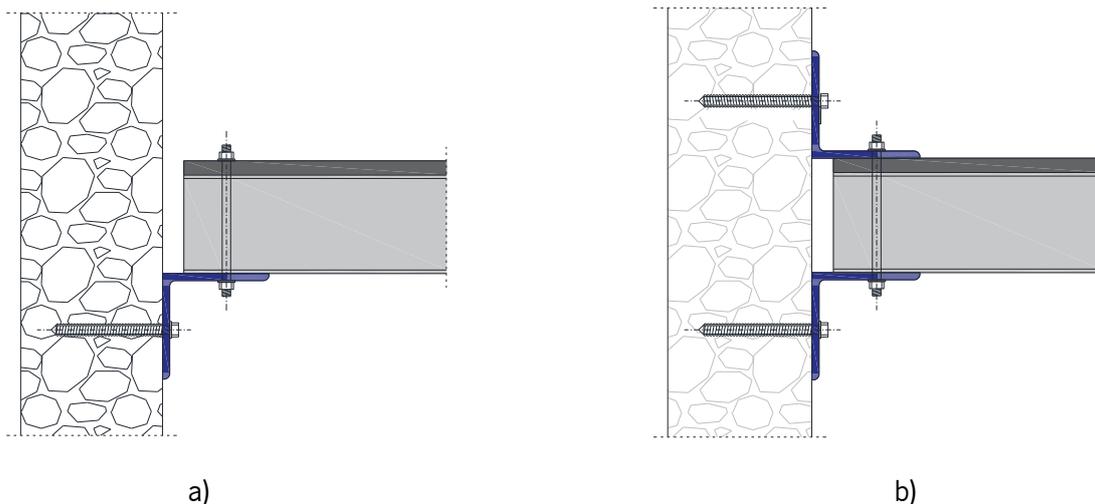


Figura 64. Ligação tipo: a) LT-1L; b) LT-2L.

A terceira ligação tipo LT-2LA (ver Figura 65) é idêntica à LT-2L, apenas difere na ligação entre o painel e a cantoneira, isto é, adicionalmente aos dois parafusos M10 foi adicionado uma camada de adesivo (S&P Resin 220 HP) entre as cantoneiras e o painel. Este adesivo epóxi encontra-se caracterizado na Secção 2.5.

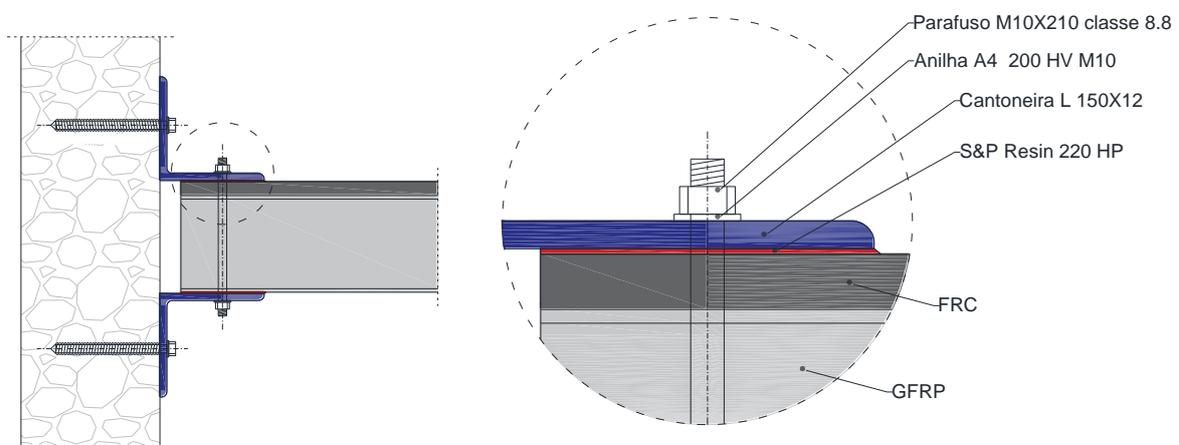


Figura 65. Ligação tipo LT-2LA.

Em todas as ligações tipo, utilizam-se cantoneiras com 50 cm de comprimento (igual à largura do painel) e o painel foi colocado a 30 mm de distância da extremidade, conforme é ilustrado na Figura 66. Esta distância foi adotada de modo a representa uma situação real, onde em muitos casos as paredes de suporte não têm geometria regular. Relativamente à posição dos dois parafusos M10, estes situam-se, longitudinalmente, a 60 mm de distância da extremidade do painel e, transversalmente, a 75 mm de cada lateral do painel. Para aplicação dos parafusos M10 realizou-se a furação manual dos vários painéis. Na Figura 66 é possível observar estas distâncias anteriormente descritas aplicadas no caso da ligação tipo LT-1L.

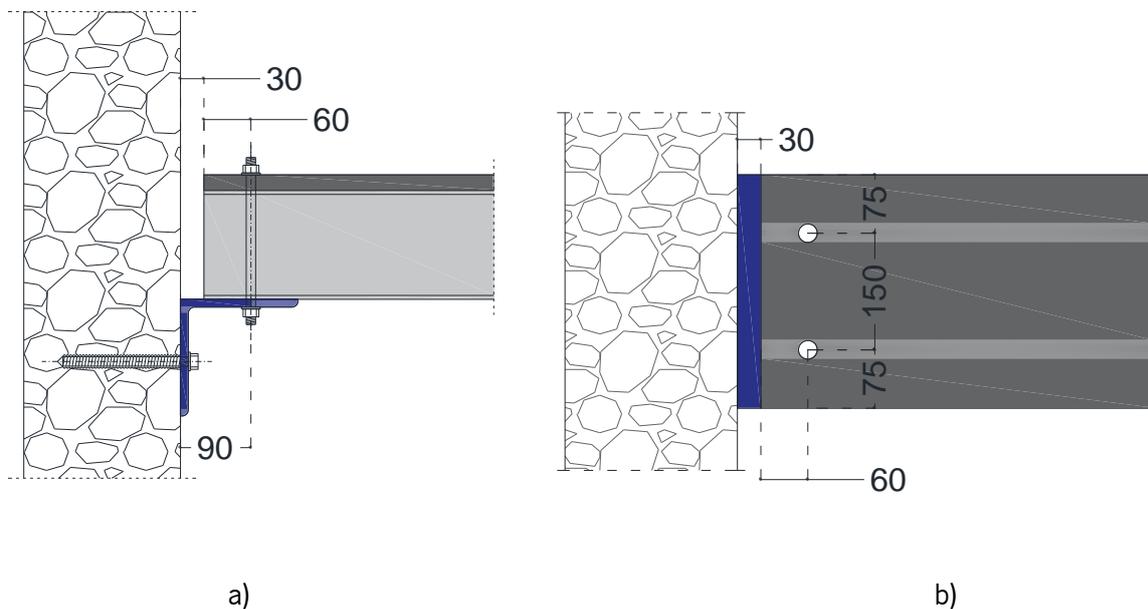


Figura 66. Pormenor do sistema de ligação: a) vista lateral; b) vista em planta. Unidades em [mm].

De modo a poder estudar-se o comportamento dos painéis e as ligações de apoio para os diferentes tipos de ligação apresentados anteriormente, executaram-se ensaios à flexão à rotura. Por cada ligação tipo foram ensaiados dois painéis. Estes ensaios realizaram-se segundo uma configuração de quatro pontos de carga, sendo a distância entre os pontos de carga igual a um terço do vão, e o vão igual a 4.5 m. Este ensaio é semelhante ao descrito na Secção 3.1.2, tendo sido utilizada a mesma a célula de carga, apenas diferindo os sistemas de apoios para as diferentes ligações tipo. Em todos os painéis ensaiados aplicou-se uma camada de betume de enchimento de poliéster (massa de ferro) entre os painéis e os pontos de aplicação da carga, de modo a uniformizar as irregularidades das superfícies. De forma a garantir a transmissão da carga do atuador à viga intercalou-se uma viga de distribuição de cargas e dois pinos cilíndricos, com 40 mm de diâmetro, nos pontos de aplicação da carga. Para

minimizar a concentração de tensões nos pontos de aplicação de carga, foram utilizadas chapas de aço com 50 mm de largura. Estes detalhes anteriormente descritos ilustram-se na Figura 67.

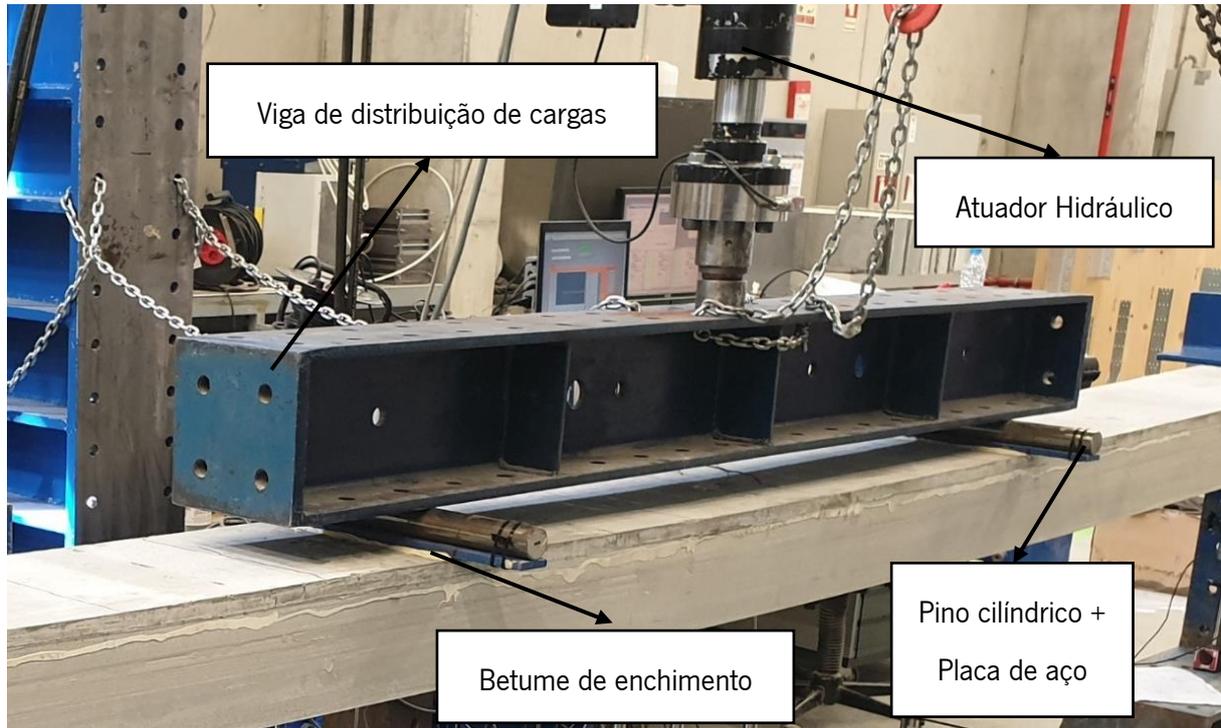


Figura 67. Pormenor do sistema de ensaio no estudo da ligação painel-parede.

A Figura 68 apresenta a configuração de ensaio e a localização da instrumentação utilizada no ensaio da série LT-1L. Utilizaram-se transdutores de deslocamento para medir a deformação vertical ao longo do painel. Em cada apoio foi colocado um transdutor de modo a avaliar a eventual rotação deste (LVDT 1A e LVDT 2A). Adicionalmente, ao longo do painel foram colocados setes transdutores com objetivo de registar os deslocamentos verticais do painel: i) três a meio vão, sendo um colocado ao centro (LVDT 6), e dois a 50 mm das laterais do painel (LVDT 5 e LVDT 7); ii) dois junto aos pontos de aplicação da carga (LVDT 4 e LVDT 5); e iii) os restantes dois, a 170 mm da extremidade do painel (LVDT 3 e LVDT 9). A instrumentação incluiu também a medição de extensões no painel a meio vão, no ponto de aplicação de carga e junto ao apoio, variando a localização e a quantidade de extensómetros utilizados de painel para painel (ver Tabela 35). A Tabela 36 incluem-se os detalhes da instrumentação utilizada.

Nos painéis ensaiados, por ligação tipo, foi ensaiado um painel proveniente da amassadura 2 (LT-1L_1; LT-2L_1; LT-2LA_1) e um painel proveniente da amassadura 3 (LT-1L_2; LT-2L_2; LT-2LA_2).

No caso da segunda e terceira ligação tipo (LT-2L e LT-2LA) a configuração de ensaio encontra-se ilustrada na Figura 69. Detalhes adicionais sobre o FRC disponíveis na Secção 2.2.

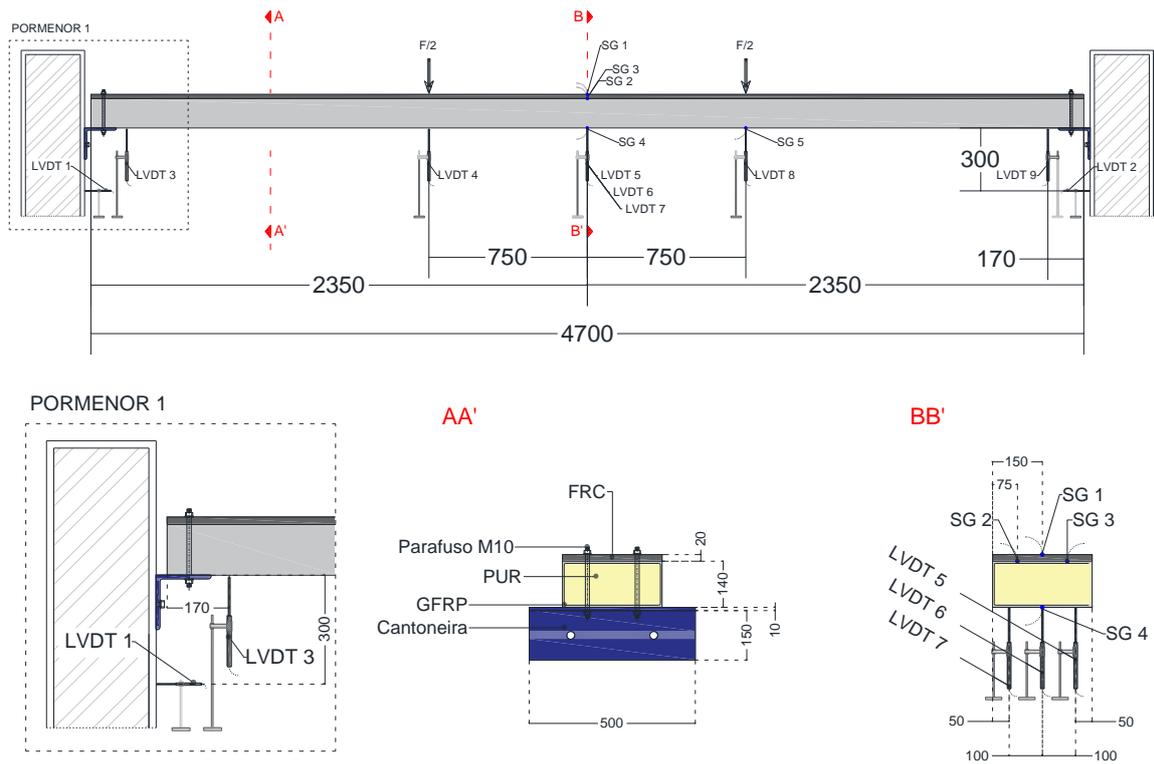


Figura 68. Configuração de ensaio utilizada para a ligação tipo LT-1L. Unidades em [mm].

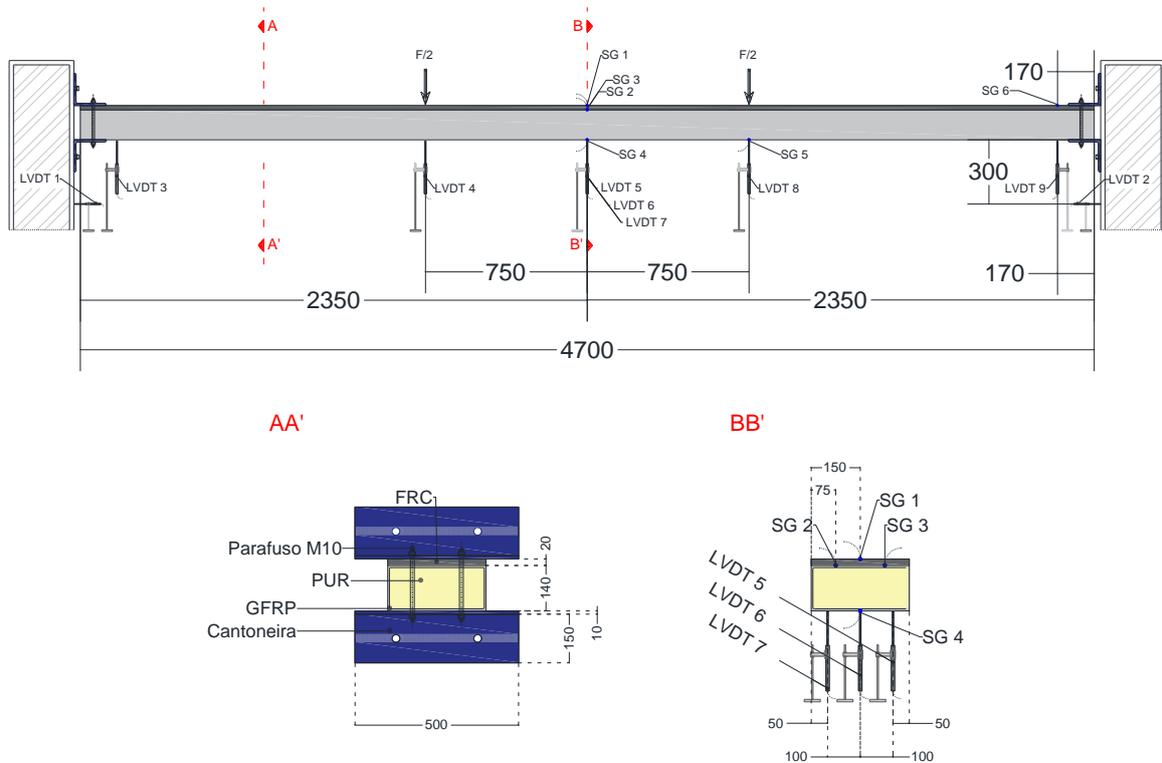


Figura 69. Configuração de ensaio utilizada para as ligações tipo LT-2L e LT-2LA. Unidades em [mm].

Tabela 35. Identificação dos extensómetros

Tipo de Ligação	Painel	SG 1	SG 2	SG 3	SG 4	SG 5	SG 6
Localização		Meio vão				Ponto de carga	Junto do apoio
Material		FRC	GFRP superior		GFRP inferior		FRC
LT-1L	LT-1L_1	X			X	X	
	LT-1L_2	X	X	X	X	X	
LT-2L	LT-2L_1	X			X	X	X
	LT-2L_2	X	X	X	X	X	X
LT-2LA	LT-2LA_1	X			X	X	X
	LT-2LA_2	X	X	X	X	X	

Tabela 36. Detalhes da instrumentação utilizada durante os ensaios

Sensor ID	Grandeza medida	Marca/modelo do Sensor	Campo de medida do sensor
Célula de Carga	Força	CIL.200kN.110.70.200	200 kN
LVDT 1A	Deslocamento	DG 02500ARA	± 2.5 mm
LVDT 2A	Deslocamento	GT 25005A	± 2.5 mm
LVDT 3	Deslocamento	RDPE ACT1000A	± 10 mm
LVDT 4	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
LVDT 5	Deslocamento	RDPE ACT3000A	± 50 mm
LVDT 6	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
LVDT 7	Deslocamento	RDPE ACT3000A	± 50 mm
LVDT 8	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
LVDT 9	Deslocamento	RDPE ACT1000A	± 10 mm
SG 1	Extensão	TML PFL-30-11-3L	2 %
SG 2	Extensão	TML BFLA-5-3	3 %
SG 3	Extensão	TML BFLA-5-3	3 %
SG 4	Extensão	TML BFLA-5-3	3 %
SG 5	Extensão	TML BFLA-5-3	3 %
SG 6	Extensão	TML PFL-30-11-3L	2 %

No que diz respeito à ligação tipo LT-2LA, a sua materialização envolveu duas fases principais apresentadas na Figura 70.

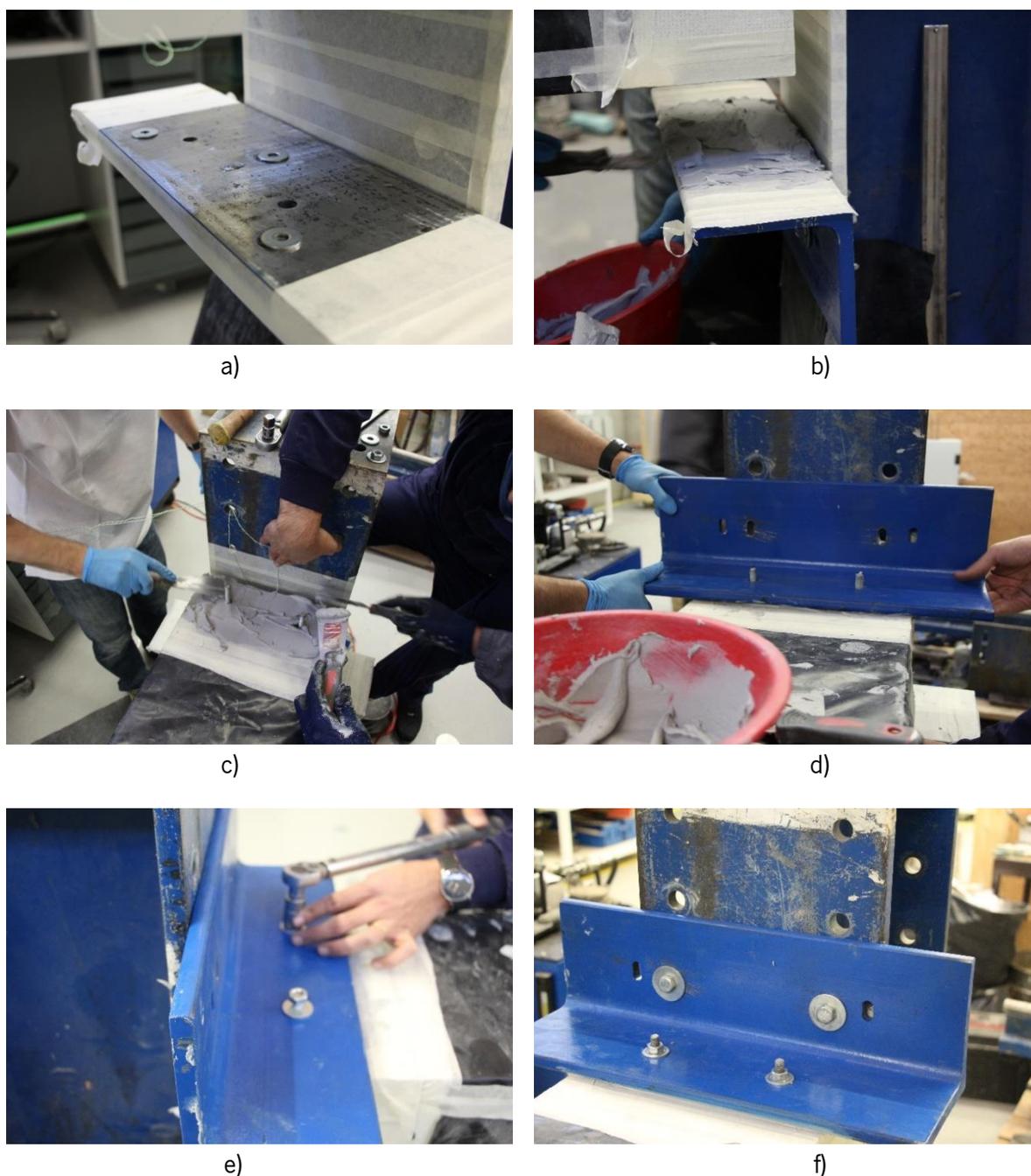


Figura 70. Ligação tipo LT-2LA - Fases relativas à instalação dos provetes no sistema de apoio: a) preparação da superfície para aplicação do adesivo; b) colocação do painel; c) aplicação do adesivo na face superior do painel; d) colocação da cantoneira superior; e) aplicação do momento de aperto; e f) solução final.

A primeira fase consistiu na aplicação da resina na cantoneira inferior (ver Figura 70a), seguindo-se a colocação do painel sobre o sistema de apoios (ver Figura 70b); a segunda fase consistiu na aplicação da resina sobre a camada superior de FRC (ver Figura 70c) seguida da colocação da cantoneira superior (ver Figura 70d). Deve ser referido que ambas as fases de aplicação da resina, foram precedidas pela preparação das superfícies com tratamento abrasivo seguido da sua limpeza (ar comprimido e solução desengordurante) e colocação de espaçadores com 2 mm de espessura (anilhas metálicas). A aplicação do momento de aperto nos parafusos foi realizado ainda durante o período de trabalhabilidade do adesivo (ver Figura 70e). Por fim, na Figura 70f encontra-se a solução final deste tipo de ligação antes da realização do ensaio.

Por último, na Figura 71, Figura 72 e Figura 73 apresentam-se as configurações de ensaios descritas anteriormente, materializadas para os diferentes tipos de ligação, i.e. LT-1L, LT-2L e LT-2LA, respetivamente.



Figura 71. Fotografia da configuração da ligação tipo LT-1L.



Figura 72. Fotografia da configuração da ligação tipo LT-2L.

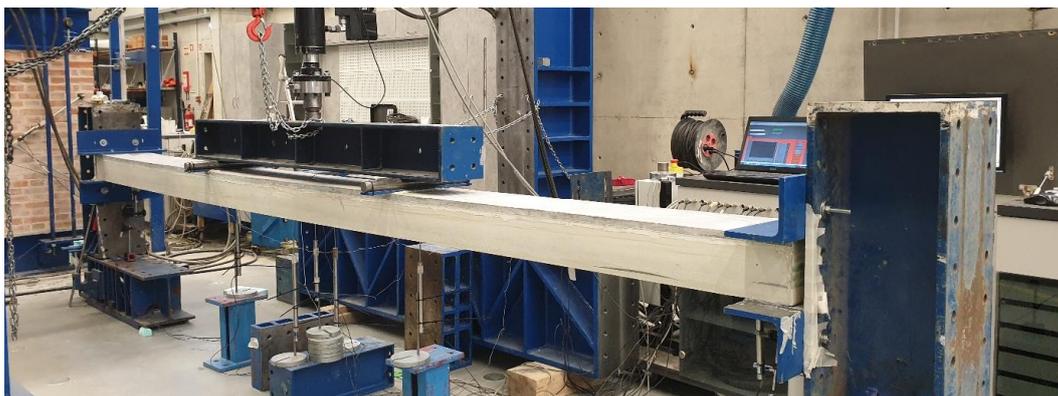


Figura 73. Fotografia da configuração da ligação tipo LT-2LA.

4.2. Resultados e análise

4.2.1. Ensaios de ligação painel – painel

Nesta secção são apresentados os principais resultados dos ensaios de ligação painel – painel, sendo que no ANEXO V inclui-se informação complementar.

A Figura 74 apresenta a relação entre a força aplicada e o deslocamento a meio vão dos três provetes da 2PP.

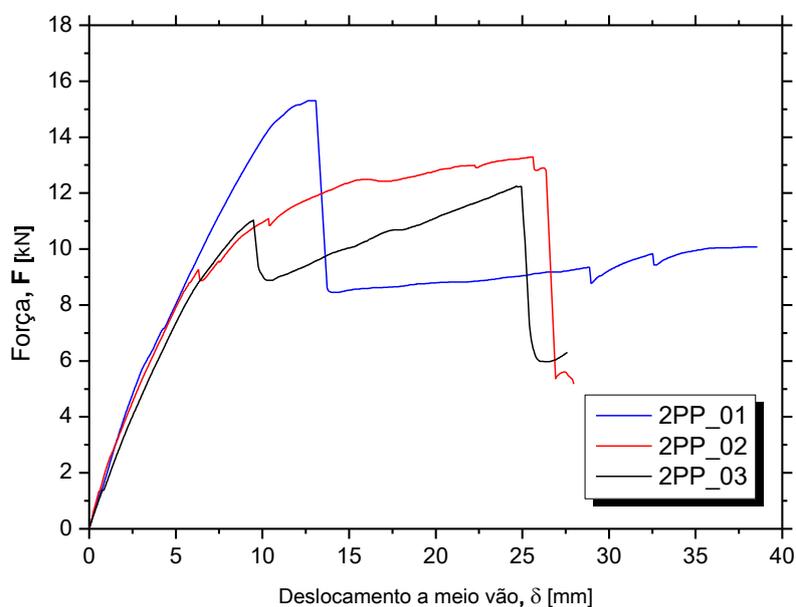


Figura 74. Força vs. deslocamento a meio vão – Série 1.

Numa fase inicial, verifica-se comportamento linear dos provetes e uma resposta semelhante entre eles até um nível de carga de 8 kN. A partir deste instante o provete 2PP_01 destaca-se dos outros,

apresentando maior rigidez. Verifica-se que foi para o este nível de carga (~8 kN) que os provetes 2PP_02 e 2PP_03 apresentaram o destacamento do PUR em relação ao GFRP, que levou à perda de rigidez. Por outro lado, no provete 2PP_01 não se verificou esse destacamento, o que permitiu mobilizar maior nível de tensões de corte no PUR e, conseqüentemente, uma maior capacidade de carga. Este fenómeno reflete-se no deslocamento a meio vão, visto que nos provetes 2PP_02 e 2PP_03 verifica-se uma maior deformação antes de atingirem a sua força máxima.

A Tabela 37 resume os principais resultados obtidos: i) força última (F_u); ii) deslocamento correspondente à força última (δ_u); iii) momento fletor máximo para a força última (M_u); e iv) rigidez (K_{eff}), calculada para o intervalo de força de 0 e 8 kN. Nesta tabela apresenta-se ainda uma breve descrição do modo de rotura.

Tabela 37. Principais resultados da Série 1.

Provete	F_u [kN]	δ_u [mm]	M_u [kN·m]	K_{eff} [kN/mm]	Modo de rotura
2PP_01	15.3	12.63	0.92	1.78	Corte no PUR seguido da rotura da ligação
2PP_02	13.3	25.47	0.80	1.50	Destacamento do PUR em relação à alma de GFRP seguido da rotura da ligação
3PP_03	12.2	24.62	0.73	1.44	Destacamento do PUR em relação à alma de GFRP seguido da rotura da ligação
Média	13.6	20.91	0.82	1.57	
Coefficiente de variação	9.44 %	28.04 %	9.61 %	9.42 %	

Para a Série 1 de ligação painel – painel, em termos médios obteve-se uma capacidade de carga de 13.6 kN e um deslocamento a meio vão de 20.91 mm.

No que diz respeito aos modos de rotura obtidos nos provetes da Série 1, o provete 2PP_01 obteve um modo de rotura diferente dos restantes, o que justifica o valor mais elevado de força máxima. A rotura do provete 2PP_01 é caracterizado por uma fenda de corte no PUR seguido da rotura da ligação (ver Figura 75). A rotura do provete 2PP_02 e 2PP_03 ocorre por flexão caracterizado pelo destacamento do PUR em relação à alma de GFRP na zona de momentos máximos, devido às tensões tração existentes nessa zona, seguido da rotura da ligação entre painéis (ver Figura 76 e Figura 77).



Figura 75. Modo de rotura provete 2PP_01.

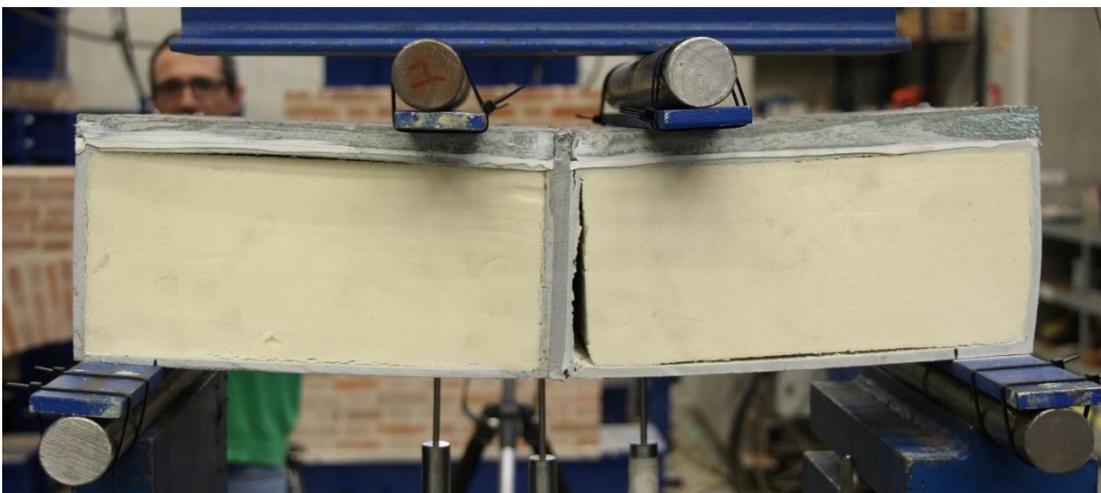


Figura 76. Modo de rotura provete 2PP_02.



Figura 77. Modo de rotura provete 2PP_03.

Estes ensaios permitiram também concluir que o tipo de ligação adesiva utilizada, apresentou um comportamento adequado ao longo do ensaio, visto não ter ocorrido rotura prematura nesta ligação.

No caso da Série 2 de ligação painel – painel, à semelhança a série anterior, apenas são apresentados nesta secção os principais resultados obtidos, sendo que no ANEXO V é fornecida informação adicional.

A Figura 78 apresenta a relação entre a força aplicada ao longo do ensaio e os deslocamentos verticais a meio vão dos provetes da Série 2.

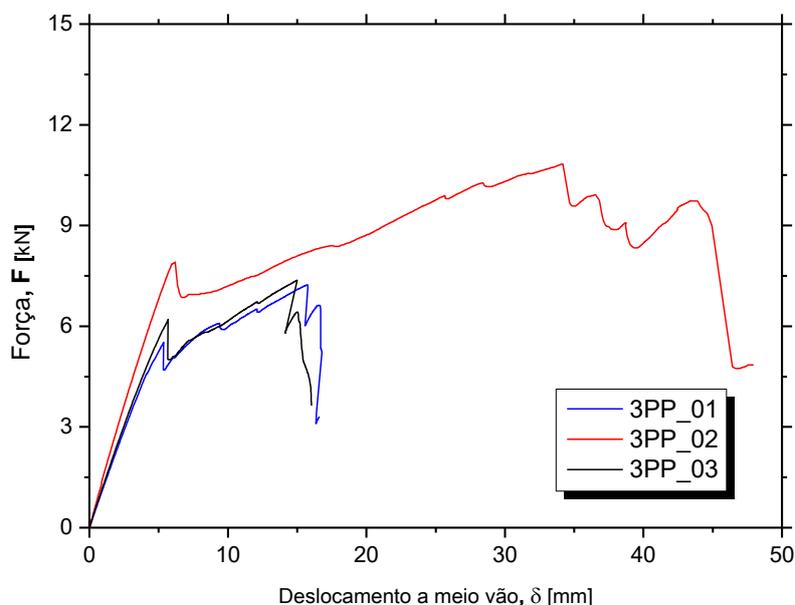


Figura 78. Força vs. deslocamento a meio vão – Série 2.

À semelhança da Série 1, os provetes da Série 2 apresentam numa fase inicial um comportamento linear e semelhante entre eles até ao nível de carga de 5 kN. A partir deste nível de carga, o provete 3PP_01 destaca-se dos restantes com uma maior capacidade de carga e deformação a meio vão. A Tabela 38 apresenta os principais resultados obtidos. O significado das variáveis é o mesmo que foi atribuído na Tabela 37. Contudo, no caso da rigidez (K_{eff}), esta foi calculada entre o intervalo de forças de 1 a 7 kN. Em termos médios, para a Série 2 de ligação painel – painel obteve-se uma capacidade de carga de 8.5 kN e um deslocamento a meio vão de 22.33 mm.

Tabela 38. Principais resultados da Série 2.

Provete	F_u [kN]	δ_u [mm]	M_u [kN·m]	K_{eff} [kN/mm]	Modo de rotura
3PP_01	7.2	20.17	3.08	0.96	Interlaminar – alma e banzo do GFRP
3PP_02	10.8	27.70	4.60	1.42	Interlaminar – alma e banzo do GFRP
3PP_03	7.4	19.13	3.13	1.09	Interface painel – adesivo
Média	8.5	22.33	3.60	1.16	
Coefficiente de variação	19.5 %	17.10 %	19.57 %	16.74%	

Relativamente aos modos de rotura, no caso do provete 3PP_01, como se pode observar na Figura 79, o modo de rotura é interlaminar, acompanhado do destacamento do PUR na zona da nervura de GFRP. O provete 3PP_02, que apresenta a maior capacidade de carga, apresentou um comportamento semelhante ao dos provetes 3PP_01 e 3PP03, i.e., apresenta, numa primeira fase, uma resposta linear, até ao início da fissuração interlaminar e consequente diminuição da carga aplicada. Porém, o provete 3PP_02, após este início de fissuração, ainda consegue suportar níveis de carga adicionais até um valor de 10.8 kN. Neste provete o modo de rotura interlaminar ocorreu na zona de transição entre o banzo e a alma do GFRP como se constata na Figura 80. Por último, o modo de rotura presente no provete 3PP_03 foi diferente dos restantes provetes desta série. Neste caso, como se observa na Figura 81, rotura ocorreu na interface dos painéis, mais concretamente entre a face de um painel e a camada de adesivo. Em todos os provetes ensaiados nesta série também se verificou um destacamento do PUR na zona das nervuras do GFRP.

**Figura 79.** Modo de rotura provete 3PP_01.



Figura 80. Modo de rotura provete 3PP_02.



Figura 81. Modo de rotura provete 3PP_03.

Conclui-se que a nível da ligação painel – painel, mais uma vez, o adesivo utilizado apresenta um comportamento adequado ao longo do ensaio. A nível dos provetes ensaiados verificou-se que até cerca dos 5 kN de força aplicada os provetes tiveram um comportamento linear, a partir dessa força aplicada ocorre o início do fissuração do GFRP no caso dos provetes 3PP_01 e 3PP_02. Por outro lado, o provete 3PP_03 não se verificou esta fissuração, o que permitiu mobilizar maiores tensões na interface painel – adesivo que levou à sua rotura.

4.2.2. Ensaio de ligação painel – parede

No caso da ligação tipo 1L, na Figura 82 apresentam-se os resultados obtidos para o painel LT-1L_1 em termos das relações força aplicada *versus* deslocamentos e força aplicada *versus* extensões.

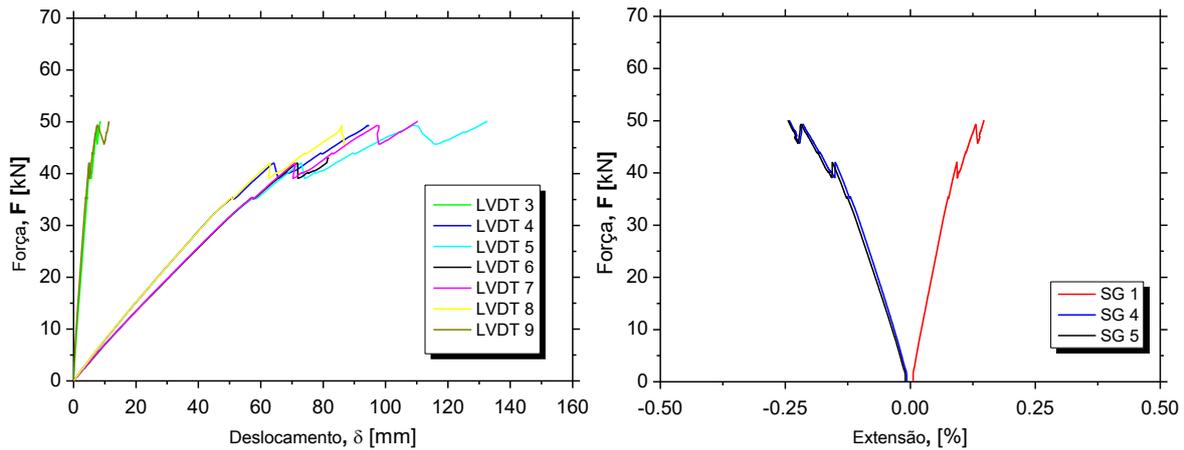


Figura 82. Força vs. deslocamento (esquerda) e força vs. extensão (direita) – painel LT-1L_1.

Verificou-se um comportamento quase linear até à rotura, com perda de rigidez ao longo do ensaio. Esta perda de rigidez está associada a diversos danos que foram ocorrendo no painel com o aumento da carga, em particular na zona de ligação painel – parede. A capacidade máxima do painel foi de 50.1 kN associado a um deslocamento a meio vão de 121.8 mm. Ao nível das extensões, em termos médios a meio vão obteve-se uma extensão de 0.15 % na camada superior de FRC e 0.24 % na camada inferior de GFRP.

Na Figura 83 apresentam-se os resultados obtidos do painel LT-1L_2 em termos de deslocamentos e extensões registadas à medida que a força aplicada no painel aumentou.

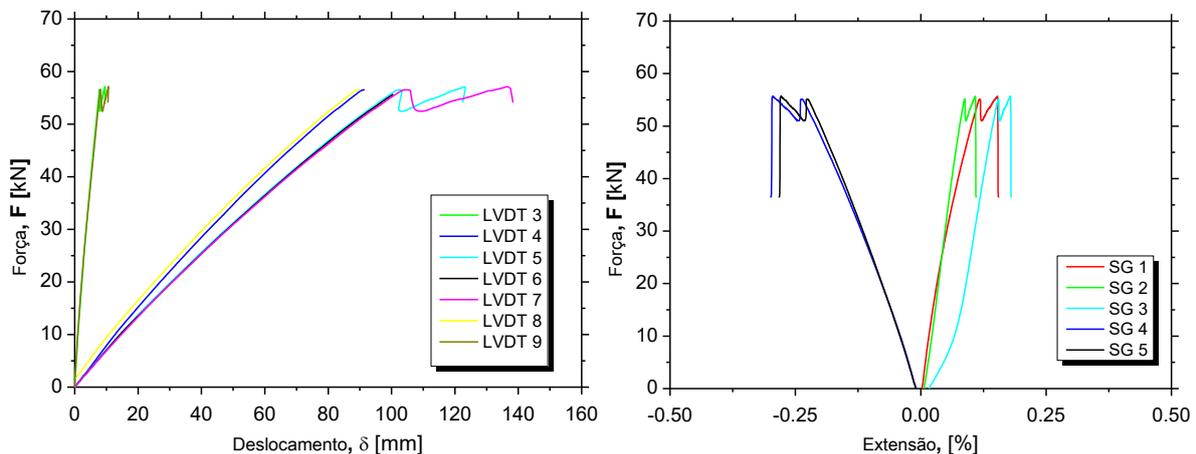


Figura 83. Força vs. deslocamento (esquerda) e força vs. extensão (direita) – painel LT-1L_2.

À semelhança do painel LT-1L_1 também se verificou um comportamento quase linear até à rotura. No caso do painel LT-1L_2, a capacidade de carga máxima foi de 57.1 kN, associada a uma deformação de meio vão de 133.1 mm. Em termos de extensões, a meio vão em termos médios obteve-

se uma extensão de 0.16 % na camada superior de FRC, 0.15 % na zona transição de FRC para GFRP e 0.29 % na camada inferior de GFRP

Apresenta-se na Figura 84 a relação entre a força aplicada e o deslocamento a meio vão para ambos os provetes ensaiados com a ligação LT-1L (LT-1L_1 e LT-1L_2).

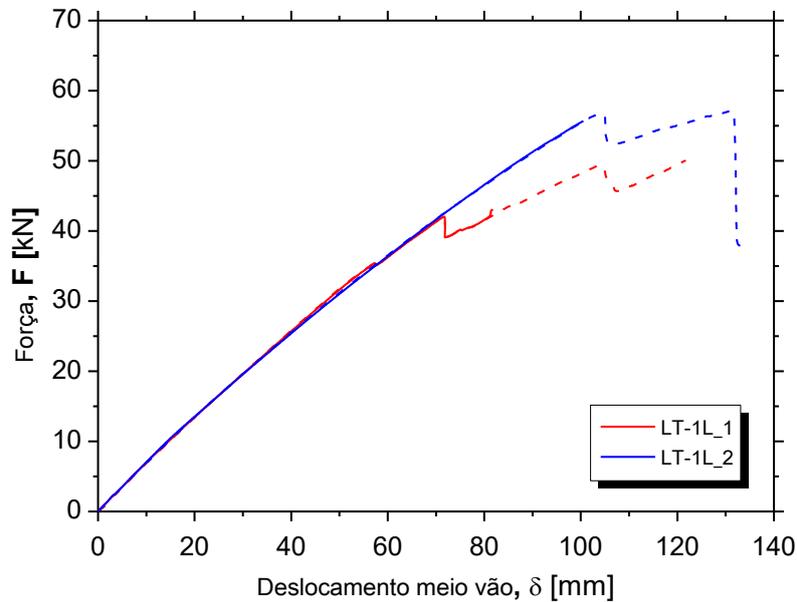


Figura 84. Força *vs.* deslocamento a meio vão – LT-1L. Nota: o deslocamento nas curvas a tracejado foi estimadas com recurso ao transdutor de deslocamento interno do atuador.

Como é possível identificar, ambos os ensaios apresentam repostas muito semelhantes, com valores praticamente coincidentes do deslocamento a meio vão para os diferentes níveis de carga. Os provetes apresentam modos de rotura diferentes, razão pela qual na fase final dos ensaios, a relação força *vs.* deslocamento é diferente.

A Figura 85 ilustra o estado da ligação painel – parede na iminência da rotura do painel LT-1L_1.



Figura 85. Painel LT-1L_1 – danos observados junto à ligação painel - parede.

Como é possível observar o painel sofre rotação; contudo devido ao facto de a cantoneira não acompanhar a rotação deste, acaba por aumentar a concentração de tensões no apoio conduzindo ao esmagamento do painel nesta zona.

Durante o ensaio do painel LT-1L_2, à medida que a força aplicada se aproximava do seu valor máximo verificou-se que o painel sofreu uma rotação segundo o eixo longitudinal (torção), conforme se ilustra na Figura 86.



Figura 86. Rotação do painel LT-1L_2.

A rotação do painel LT-1L_2 ocorreu devido imperfeições geométricas do mesmo. Face à reduzida largura do painel (30 cm), qualquer pequena imperfeição geométrica pode conduzir a este efeito. Contudo, será de referir que na materialização de uma laje (vários painéis justapostos colados), este fenómeno deixa de ser possível de ocorrer.

Como é possível observar na Figura 87 a rotura do painel LT-1L_1 ocorreu na alma do painel (camada de GFRP) junto à zona de apoio, seguida do destacamento da camada de FRC nessa mesma zona.



Figura 87. Modo de rotura do painel LT-1L_1.

No caso do painel LT-1L_2 a rotura ocorreu na alma do GFRP numa zona situada no primeiro terço do painel, i.e., na zona entre um dos pontos de aplicação de carga e o apoio como se pode observar na Figura 88.



Figura 88. Modo de rotura do painel LT-1L_2.

De seguida, encontram-se os resultados obtidos da ligação tipo 2L, na Figura 89 apresentam-se os resultados obtidos do painel LT-2L_1 ao nível dos deslocamentos e das extensões observadas com o aumento da força aplicada.

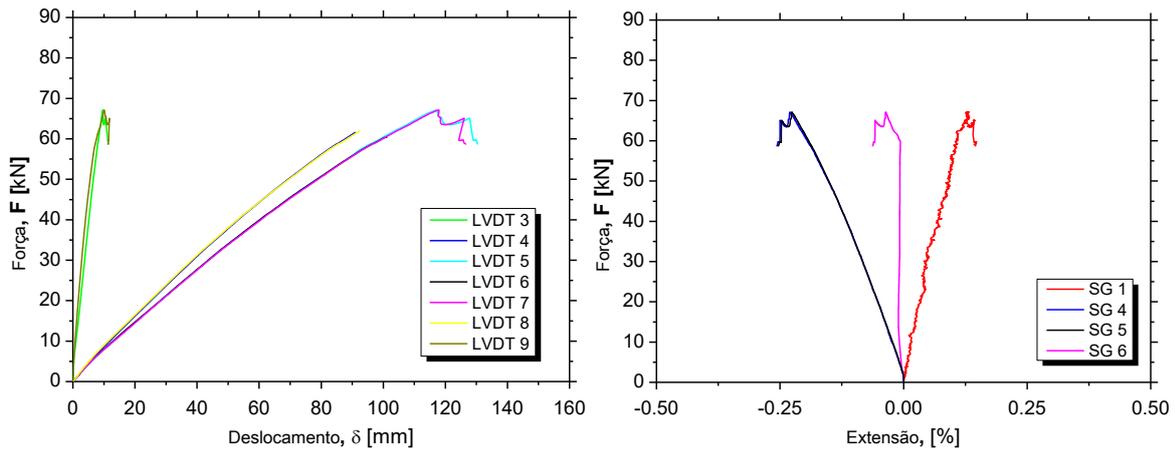


Figura 89. Força *vs.* deslocamento (esquerda) e força *vs.* extensão (direita) – painel LT-2L_1.

Obteve-se uma força última de 67.1 kN associado a uma deformação de meio vão de 133.3 mm. Por outro lado, em termos de extensões, obteve-se uma extensão média de 0.15 % na camada superior de FRC e de 0.26% na camada inferior de GFRP.

Na Figura 90 encontram-se os resultados obtidos do painel LT-2L_2, no que diz respeito aos deslocamentos e às extensões medidas ao longo do ensaio para valores crescentes da força aplicada no painel aumenta.

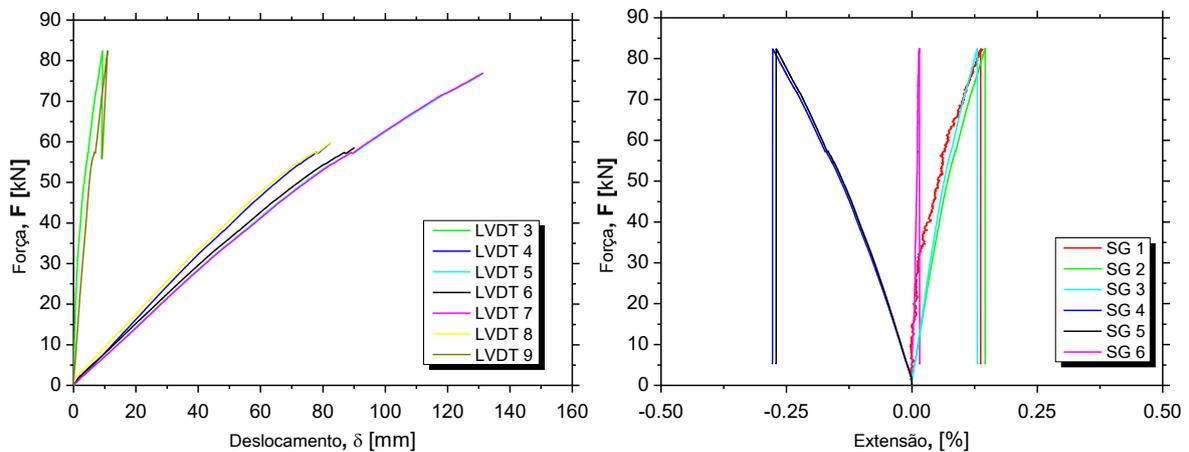


Figura 90. Força *vs.* deslocamento (esquerda) e força *vs.* extensão (direita) – painel LT-2L_2.

Obteve-se uma força última de 82.4 kN associado a uma deformação de meio vão de 142.5 mm. A nível de extensometria em termos médios a meio vão, obteve-se uma extensão de 0.14 % na camada superior de FRC, de 0.14 % na zona transição de FRC para GFRP, e de 0.28 % na camada inferior de GFRP.

Na ligação tipo LT-2L painel – parede verificou-se que os dois modos de rotura são semelhantes, mas, em localizações do painel diferente. Na Figura 91 apresenta-se a relação entre a força e o deslocamento a meio vão para ambos os provetes ensaiados com a ligação LT-2L (LT-2L_1e LT-2L_2).

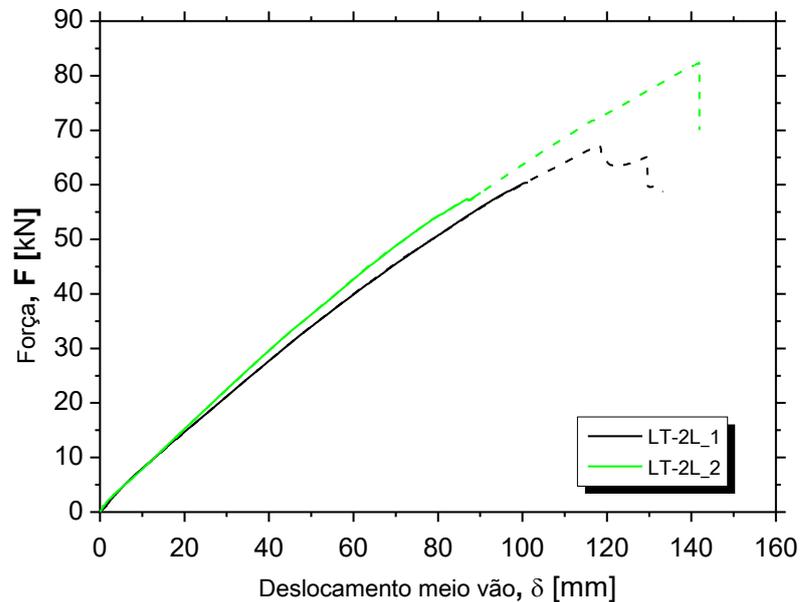


Figura 91. Força vs. deslocamento a meio vão – LT-2L. Nota: o deslocamento nas curvas a tracejado foi estimadas com recurso ao transdutor de deslocamento interno do atuador.

Numa fase inicial, possuem um comportamento idêntico até cerca dos 20 kN de carga, a partir daí o painel LT-2L_2 apresenta uma menor perda de rigidez com o aumento da carga aplicada. Por último, o painel LT-2L_2 atingiu uma força máxima e um deslocamento a meio vão superiores quando comparados com o painel LT-2L_1. Estas constatações estão diretamente relacionadas com os modos de rotura observados.

Na segunda ligação tipo (LT-2L), à semelhança da primeira (LT-1L), à medida que a força aplicada no painel aumentava e consequentemente a deformação do painel, constatou-se que na zona de apoio ocorreu o esmagamento da camada inferior de GFRP e a fissuração da camada de FRC (ver Figura 92).



Figura 92. Painel LT-2L_1 – pormenor de ensaio no apoio.

O painel LT-2L_2, à semelhança painel LT-2L_1, também apresentou, na zona de apoio, um pequeno esmagamento na camada inferior do painel (no GFRP) e, ao mesmo tempo, fissuração/destacamento da camada superior do FRC como se comprova na Figura 93.

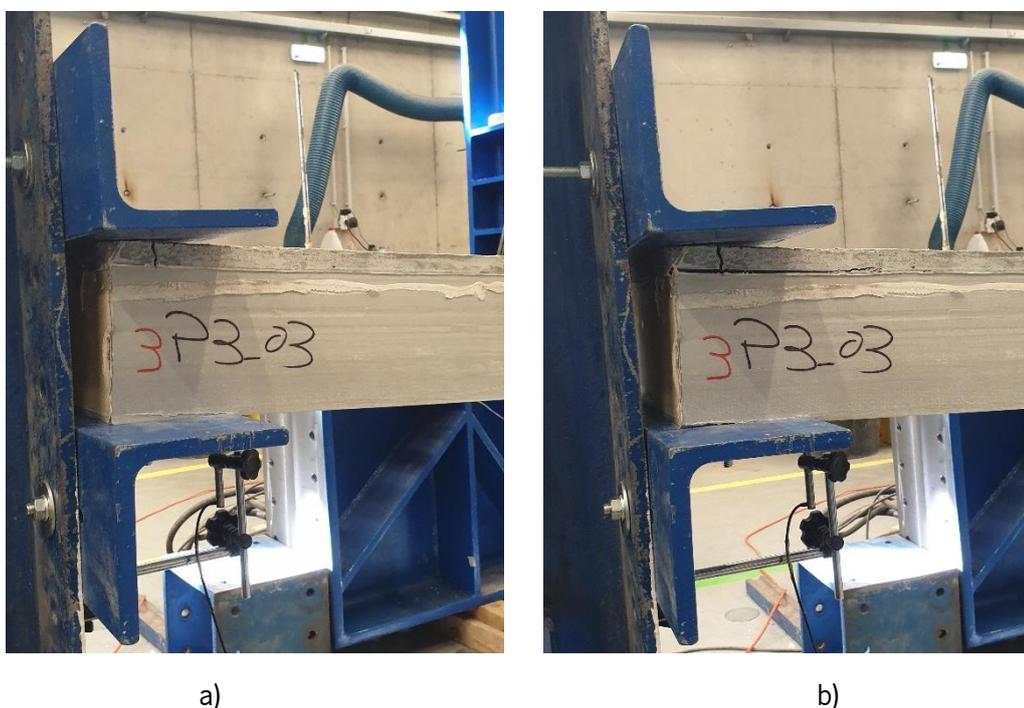


Figura 93. Painel LT-2L_2 – fissuração/destacamento FRC: a) força aplicada de 30 kN; b) força aplicada de 60 kN.

O modo de rotura do painel LT-2L_1, correspondeu à rotura da alma de GFRP do painel seguido da rotura por corte da camada de FRC, junto ao ponto de aplicação da carga. Este modo de rotura é relativamente semelhante aos dos modos de rotura obtidos nos ensaios de flexão à rotura, descritos na Secção 3.2.2.



Figura 94. Modo de rotura do painel LT-2L_1.

O painel LT-2L_2 apresentou um modo de rotura idêntico ao observado com o painel LT-2L_1, com a rotura da alma do perfil seguida da rotura da camada superior de FRC. A localização da rotura no painel LT-2L_2 ocorreu a meio vão, como se pode observar na Figura 95.



Figura 95. Modo de rotura do painel LT-2L_2.

Por último, apresentam-se os resultados obtidos da ligação tipo 2LA, na Figura 96 apresentam-se os resultados obtidos do painel LT-2LA_1 em termos das relações força aplicada *versus* deslocamentos e *versus* extensões.

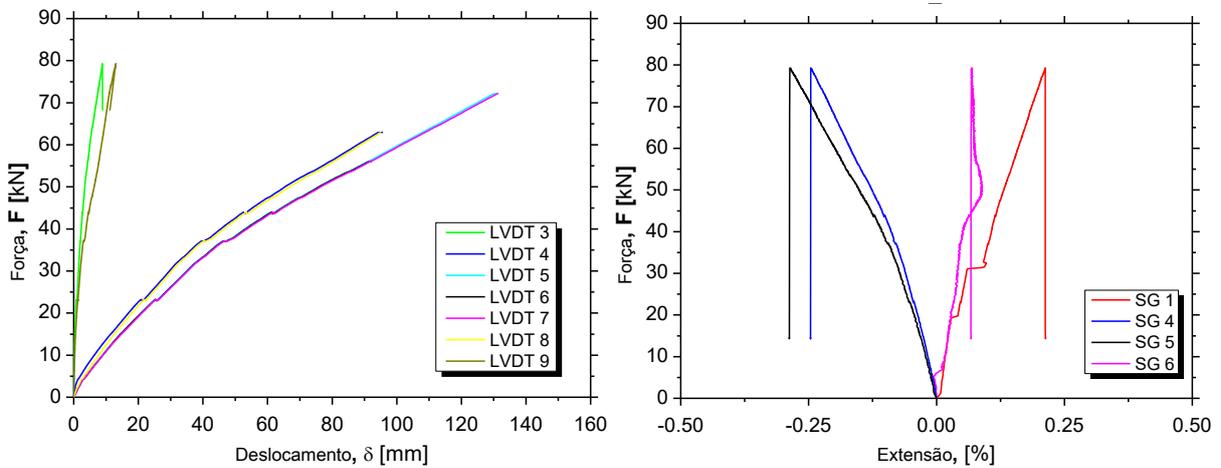


Figura 96. Força *vs.* deslocamento (esquerda) e força *vs.* extensão (direita) – painel LT-2LA_1.

A resposta é composta por aproximadamente duas curvas bilineares. Obteve-se uma força última de 79.3 kN associado a uma deformação a meio vão de 151.0 mm. A nível de extensometria em termos médios a meio vão, obteve-se uma extensão de 0.21 % na camada superior de FRC e de 0.27 % na camada inferior de GFRP.

Na Figura 97 apresentam-se os resultados obtidos para o painel LT-2LA_2 no que diz respeito aos deslocamentos e as extensões medidas ao longo que a força aplicada no painel aumentava.

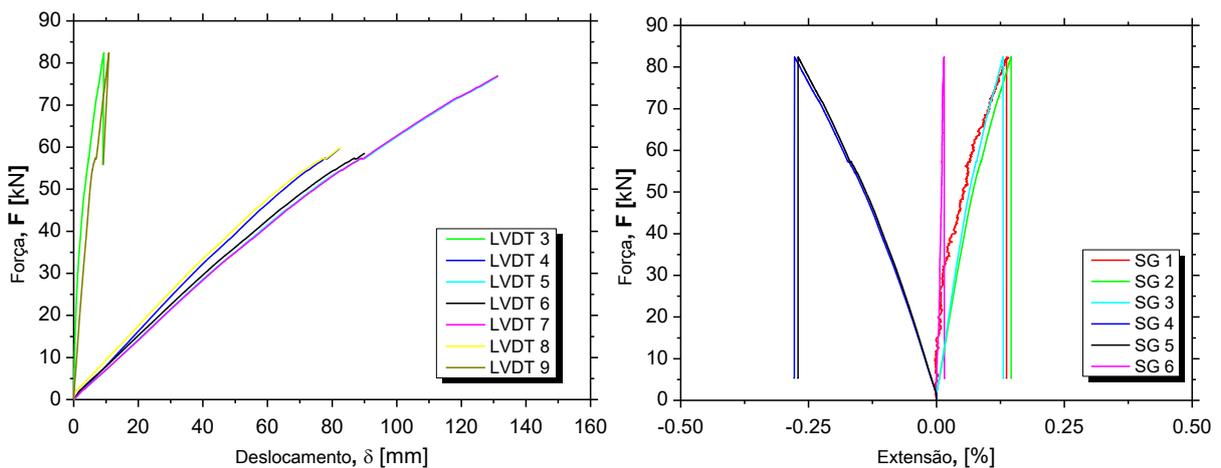


Figura 97. Força *vs.* deslocamento (esquerda) e força *vs.* extensão (direita) – painel LT-2LA_2.

O comportamento do painel foi semelhante ao painel LT-2LA_1. Obteve-se uma força última de 62.7 kN associado a uma deformação de meio vão de 165.0 mm. A nível de extensometria em termos

médios a meio vão, obteve-se uma extensão de 0.21 % na camada superior de FRC, 0.13 % na zona transição de FRC para GFRP e 0.34 % na camada inferior de GFRP.

Na Figura 98 apresenta-se a comparação de respostas obtidas para os painéis ensaiados com a ligação tipo LT-2LA (LT-2LA_1 e LT-2LA_2).

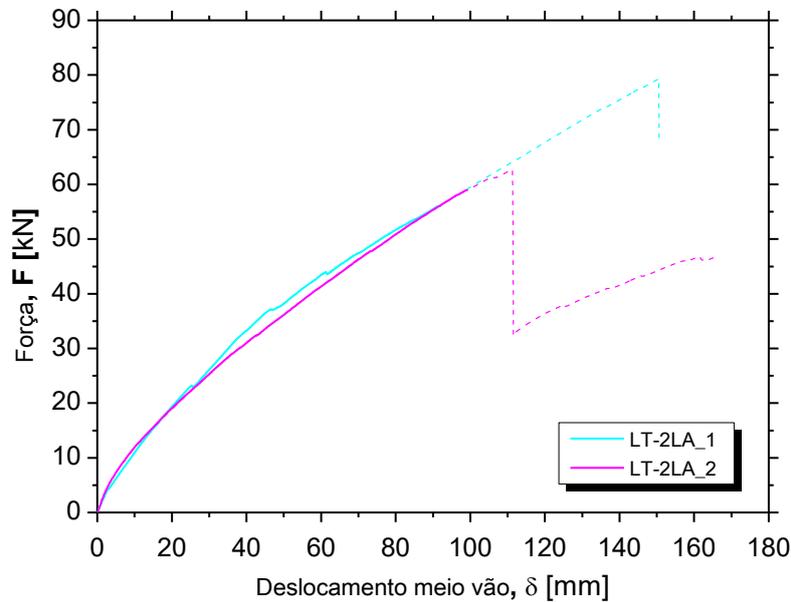


Figura 98. Força vs. deslocamento a meio vão – LT-2LA. Nota: o deslocamento nas curvas a tracejado foi estimado com recurso ao transdutor de deslocamento interno do atuador.

Como é possível verificar, o comportamento dos painéis é muito semelhante até uma força aplicada de cerca de 60 kN. A partir desta, o painel LT-2LA_2 apresentou uma força última menor, em resultado da rotura prematura anteriormente descrita.

Em contraste com a segunda ligação tipo (LT-2L), a ligação tipo LT-2LA não apresentou, numa primeira fase, esmagamento da camada inferior de GFRP do painel nem fissuração da camada superior do FRC. Não obstante, quando a força se aproxima do seu valor máximo, verificou-se a existência de uma fenda transversal ao painel na camada de FRC, imediatamente a seguir à cantoneira superior, como se pode observar na Figura 99.



Figura 99. Painel LT-2LA_1 - fissuração do FRC junto da cantoneira

Tal como com o painel LT-2LA_1, o painel LT-2LA_2 apresentou a formação de uma fenda na camada de FRC transversal ao painel, localizada junto à cantoneira superior como se pode verificar na Figura 100. Esta fenda é resultado da qualidade da ligação entre a camada de FRC e a cantoneira e as tensões de tração que ocorrem nesta zona.



Figura 100. Painel LT-2LA_2 - fissuração do FRC junto da cantoneira.

A rotura do painel LT-2LA_1 ocorreu junto ao ponto de aplicação de carga como se constata na Figura 101 . A rotura ocorreu na alma do painel no GFRP seguida da rotura da camada de FRC.



Figura 101. Modo de rotura do painel LT-2LA_1.

O modo de rotura do painel LT-2LA_2 foi particularmente diferente dos outros casos em estudo. Como se pode observar na Figura 102, a rotura ocorreu com a abertura de uma fenda longitudinal, na alma de GFRP do painel, desde a zona do apoio até ao meio vão. Esta fenda conduziu à rotura prematura do painel, materializada numa capacidade de carga última inferior à do painel LT-2LA_1.

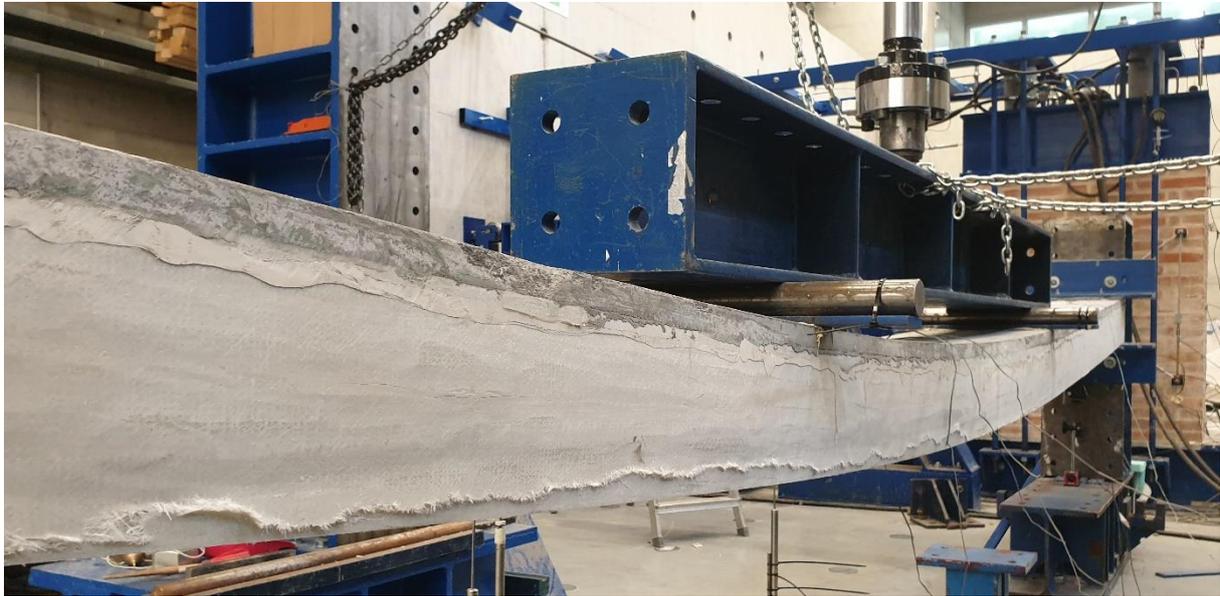


Figura 102. Modo de rotura do painel LT-2LA_2.

Tal como referido na Secção 4.1.2, foi medida a rotação de sistema que simulou a existência de paredes no estudo da lição painel – parede. Esta rotação foi avaliada com recurso aos LVDTs 1 e 2 (ver Figura 68 e Figura 69). Na Figura 103 apresentam-se as curvas da relação entre estes deslocamentos e a força aplicada ao painel.

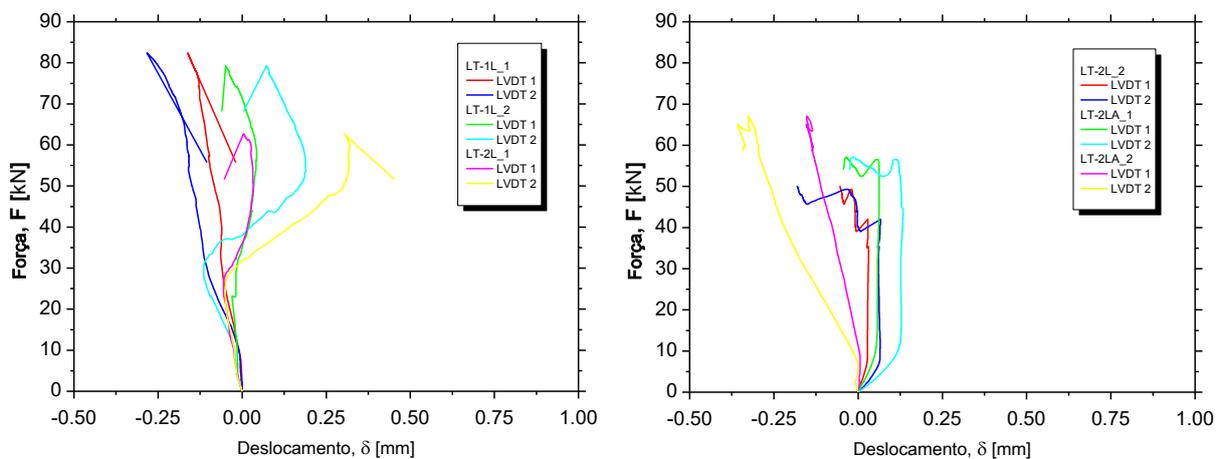


Figura 103. Força vs. deslocamentos horizontais nos apoios.

Verificou-se que este deslocamento horizontal máximo foi da ordem dos 0.25 mm, o que corresponde a uma rotação de cerca de 0.03 graus, num cenário que se admite que a base da estrutura de suporte não sofreu qualquer movimento horizontal.

De modo a facilitar a comparação entre os ensaios realizados para o estudo da ligação painel – parede, apresentam-se de seguida algumas relações comparativas. Assim, na Tabela 39 apresentam-se valores máximos de extensões, na Figura 104 apresenta a relação entre a força aplicada com os deslocamentos a meio vão de todos os painéis ensaiado, e na Tabela 40 apresentam-se os principais resultados em termos de força máxima, correspondente deslocamento, rigidez e modos de rotura.

Tabela 39. Registo dos valores máximos de extensão [%].

Ligação Tipo	Painel	SG 1	SG 2	SG 3	SG 4	SG 5	SG 6
Localização		Meio vão				Ponto de carga	Junto do apoio
Material		FRC	GFRP superior		GFRP inferior		FRC
LT-1L	LT-1L_1	0.15	-	-	-0.24	-0.25	-
	LT-1L_2	0.16	0.11	0.18	-0.30	-0.28	-
LT-2L	LT-2L_1	0.15	-	-	-0.26	-0.25	-0.06
	LT-2L_2	0.14	0.15	0.13	-0.28	-0.27	0.02
LT-2LA	LT-2LA_1	0.21	-	-	-0.25	-0.29	0.09
	LT-2LA_2	0.21	0.14	0.13	-0.34	-0.33	-

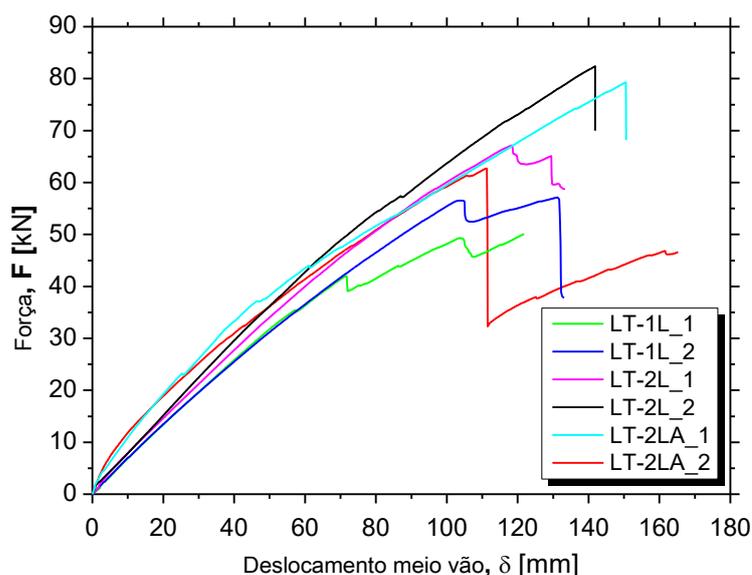


Figura 104. Força vs. deslocamento a meio vão para todos os ensaios de ligação painel – parede.

Tabela 40. Principais resultados obtidos e modos de rotura.

Ligação Tipo	Painel	Força última (F_u) [kN]	Deslocamento último a meio vão (δ_u) [mm]	Rigidez (K_{eff}) [kN/mm]	Modo de rotura
LT-1L	LT-1L_1	50.1	121.8	0.65	Rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC na zona de ligação
	LT-1L_2	57.1	133.1	0.65	Rotura da alma do painel na zona entre o apoio e o ponto de carregamento
	Média	53.6	127.4	0.65	
LT-2L	LT-2L_1	67.1	133.3	0.68	Rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC na zona de ponto de carga
	LT-2L_2	82.4	142.5	0.73	Rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC na zona a meio vão
	Média	74.8	137.9	0.71	
LT-2LA	LT-2LA_1	79.3	151.0	0.94	Rotura da alma do painel seguida da rotura da camada de FRC na zona de meio vão
	LT-2LA_2	62.7	165.2	0.88	Rotura longitudinalmente da alma de GFRP do painel
	Média	71.0	158.1	0.91	

Nota: a rigidez do painel (K_{eff}) foi avaliada intervalo para valores de força entre os 5 kN e os 15 kN.

A partir destes resultados é possível extrair as seguintes principais conclusões:

- Verifica-se a existência de uma relação entre a rigidez do painel e a capacidade de carga do mesmo, sendo observado que painéis com menor rigidez apresentam menor capacidade de carga;
- Verifica-se, à medida que ocorre o aumento da rigidez nas ligações, um aumento da rigidez do sistema painel/ligação. A ligação LT-1L, constituída por apenas uma cantoneira, e consequentemente menor rigidez que as ligações LT-2L (duas cantoneiras) e LT-2LA (duas cantoneiras + ligação adesiva) é a solução que levou ao maior valor de rigidez nos ensaios à rotura.
- Constatou-se que existe um efeito favorável da utilização de 2 cantoneiras na materialização do sistema de apoio, por comparação com o uso de uma cantoneira. Assim, a força última aumentou cerca de 40% e 32% nas séries LT-2L e LT-2LA por comparação com LT-1L;

- Face aos resultados médios da capacidade de carga de cada ligação tipo a solução que apresenta melhor desempenho é a ligação LT-2L. Contudo, em serviço, a solução mais adequada aparenta ser a LT-2LA visto que as restantes soluções apresentaram, ainda em fases iniciais do ensaio, esmagamento do GFRP e fendilhação da camada de FRP junto aos apoios;
- Os provetes com a ligação LT-2LA apresentaram uma fenda transversal na camada superior de FRC, junto aos apoios, em fases posteriores do ensaio (perto da força última), devido à concentração de tensões desenvolvidas, e na camada inferior de GFRP não ocorreu o esmagamento na zona de transição cantoneira/painel face à aplicação da resina S&P Resin 220 HP, contrariamente ao verificada na ligação LT-1L e LT-2L.

4.3. Modelação numérica

4.3.1. Ligação painel – painel

No contexto dos ensaios de ligação painel – painel, procedeu-se à simulação numérica destes ensaios através do método dos elementos finitos. Com a finalidade de simular os resultados obtidos experimentalmente e, dessa forma, adquirir compreensão adicional sobre os mesmos, procedeu-se à criação de um modelo 2D utilizando o software DIANA (versão 10.3) [51]. Os ensaios de ligação painel – painel foram simulados como um problema em estado plano de tensão. A Figura 105 apresenta a malha de elementos finitos e condições de suporte adotadas para simular os provetes da Série 1 (constituído por dois painéis) e da Série 2 (constituído por três painéis). Note-se que na Série 1, devido às condições de simetria, apenas metade do provete foi modelado (ver Figura 105a), ao contrário da Série 2 (ver Figura 105b).

Definiu-se um tamanho de elemento de 5 mm e, todos os constituintes do provete (FRC, GFRP, PUR) foram modelados por elementos planos quadriláteros de oito nós (elementos CQ16M) com um esquema de integração de Gauss 2x2. As condições de apoio simuladas procuraram reproduzir as condições reais de apoio, i.e., no caso de apoio simples, onde apenas foi imposta uma restrição de deslocamento vertical (eixo z) no centro da placa de suporte de 50 mm, permitindo assim a rotação e o deslocamento horizontal (eixo x).

Foi assumido um comportamento elástico linear para todos os materiais, tendo sido adotados os valores médios do módulo de elasticidade obtidos a partir da caracterização experimental dos materiais (ver Secção 2). Para efeitos da presente análise, foi assumida a aderência perfeita entre os diferentes

componentes do provete, isto é, entre os materiais que compõem o painel composto (FRC – GFRP e GFRP – PUR) e entre painéis (quando aplicável).

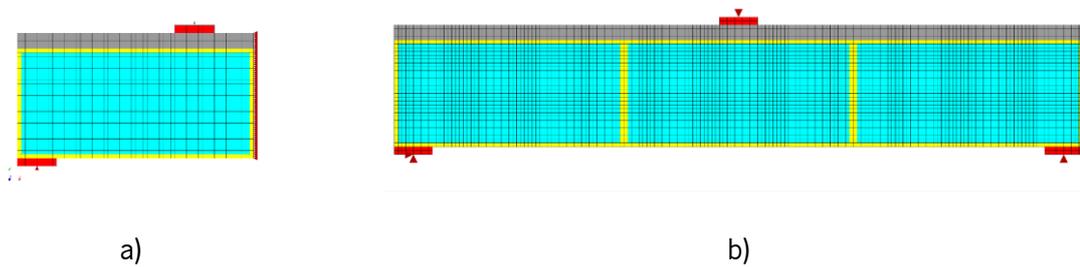


Figura 105. Malha do modelo 2D de elementos finitos do painel sanduíche híbrido e representação do sistema de apoio simples: a) Série 1; b) Série 2.

Nesta análise numérica foi também realizada uma análise de sensibilidade tendo como variável a espessura da camada de GFRP. Verificou-se, através do levantamento geométrico dos painéis ensaiados, que a espessura da componente em GFRP estava compreendida entre os 5 mm e os 7 mm, predominando uma espessura próxima dos 6 mm. Assim, para cada série, foi considerados três cenários para diferentes espessuras de GFRP: i) 5 mm (FEM_(5mm)); ii) 6 mm (FEM_(6mm)); e iii) 7 mm (FEM_(7mm)). Na Figura 106 apresenta os resultados obtidos numericamente. Adicionalmente, nesta figura também se incluem os correspondentes resultados experimentais.

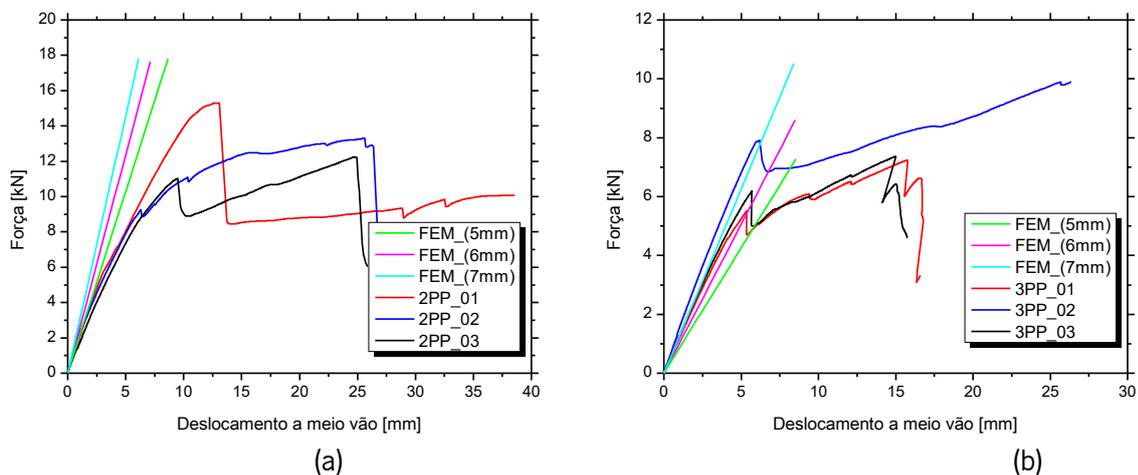


Figura 106. Força vs. deslocamento a meio vão: a) série 1; b) série 2.

Na Tabela 41 é apresentado o valor da rigidez obtida através dos modelos numéricos e das curvas experimentais (note que na Série 1 o intervalo de forças foi 0 e 8 kN e na Série 2 foi de 1 e 7 kN). Verifica-se que com o aumento da espessura de GFRP existe um aumento da rigidez de flexão (aproximadamente em 20%, por cada milímetro adicional). A simulação numérica dos provetes da Série 1 apresenta uma maior rigidez que a observada experimentalmente, o que se traduz num menor deslocamento a meio

vão para os diferentes níveis de carga (ver Figura 106a). Verificou-se que a Série 1 apresentou uma perda de rigidez continua ao longo do ensaio experimental, devido a danos locais (e.g. destacamento do núcleo PUR, fissuração da camada de FRC) que não é contemplada no modelo numérico. Em contraste, a simulação numérica da Série 2 (ver Figura 106b) descreve de forma mais adequada os ensaios experimentais, sendo verificada uma rigidez semelhante à experimental para o modelo em que os painéis possuem 6 mm de espessura de GFRP. Não obstante, o modelo numérico não contempla o comportamento não-linear dos materiais, razão pela qual para níveis de carga elevados é verificada uma divergência entre as curvas experimental e numérica.

Em suma, verifica-se que a espessura da componente em GFRP do painel apresenta elevada influência no comportamento dos provetes, e que, através do método dos elementos finitos, os ensaios painel – painel podem ser simulados com sucesso.

Tabela 41. Rigidez à flexão ligação painel – painel. Unidades [kN/mm].

Análise	Série 1	Série 2
Experimental (média)	1.57	1.16
FEM 5mm	2.06	0.85
FEM 6mm	2.45	1.01
FEM 7mm	2.91	1.25

4.3.2. Ligação painel – parede

No caso da ligação painel – parede utilizou-se um modelo numérico semelhante ao descrito na Secção 3.3, para aprofundar a análise dos resultados obtidos experimentalmente. A Figura 107 apresenta a malha de elementos finitos adotada para simular o painel sanduíche híbrido, com particular enfoque nos três sistemas de apoios para as diferentes ligações tipo: i) para a ligação tipo LT-1L foi simulado um apoio fixo unilateral de 120 mm (apenas permitindo tensões de compressão) e os dois parafusos M10 (ver Figura 2); ii) para a ligação tipo LT-2L foram simulados os dois apoios unilaterais de 120 mm (apenas permitindo tensões de compressão) e os dois parafusos M10; e iii) para a ligação tipo LT-2LA, idêntica à ligação tipo LT-2L, foi também adicionada a restrição horizontal adicional, que resulta no encastramento. Deve ser referido que, devido às condições de simetria, apenas um quarto do painel foi modelado com vista a redução do tempo de computação. Definiu-se um tamanho de elemento de 20 mm e, todos os constituintes do painel (FRC, GFRP, PUR) foram modelados por elementos sólidos de vinte nós (elementos CHX60). Foi também assumido um comportamento elástico linear para todos os

materiais, tendo sido adotados os valores médios do módulo de elasticidade obtidos a partir da caracterização experimental dos materiais (ver Secção 2). Para efeitos da presente análise, admitiu-se aderência perfeita entre os diferentes elementos do painel sanduíche.

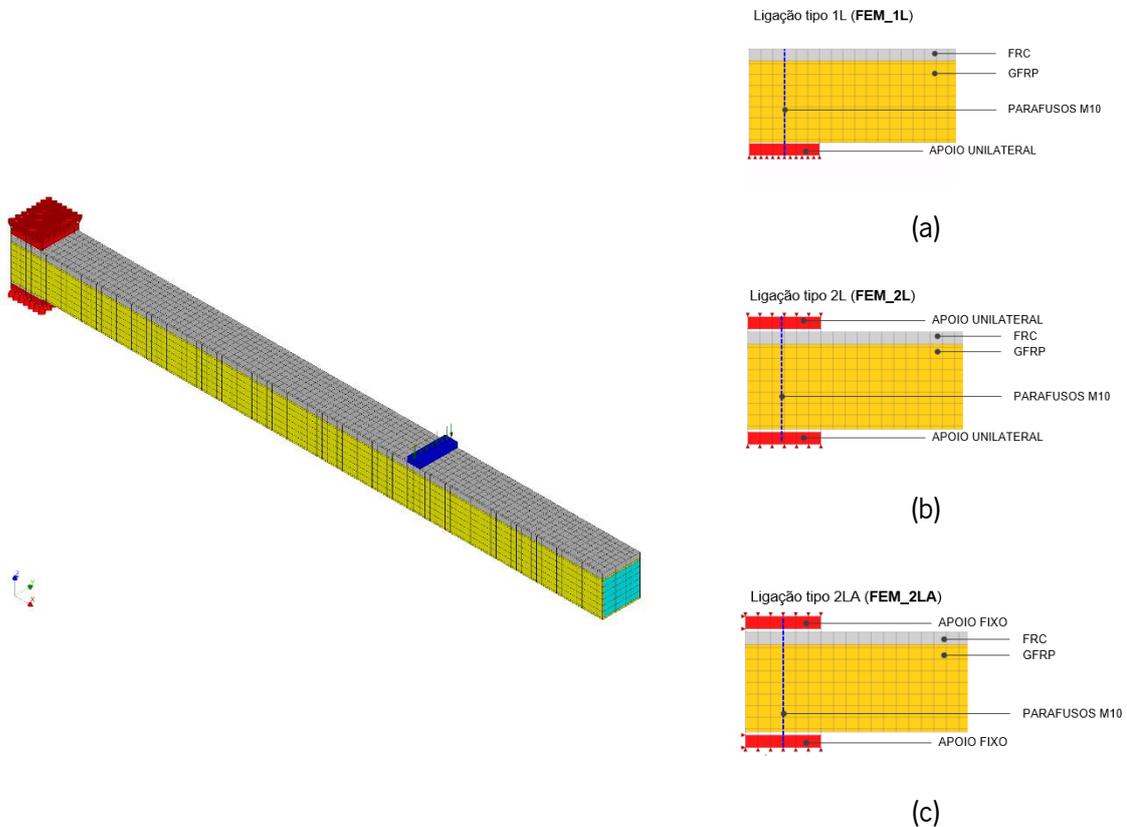


Figura 107. Malha do modelo 3D de elementos finitos do painel sanduíche híbrido e representação do sistema de ligação tipo: a) LT-1L; b) LT-2L; c) LT-2LA.

Na Figura 108 apresenta-se a relação entre a força e o deslocamento para os provetes com a ligação tipo LT-1L. Os resultados apresentam uma semelhante rigidez na fase inicial do ensaio, até o deslocamento a meio vão de 20 mm. Depois, verifica-se que existe uma perda de rigidez nos ensaios experimentais, que não é acompanhada na simulação numérica. A divergência entre o modelo numérico e o ensaio experimental deve-se a diversos fatores, nomeadamente a não linearidade de comportamento dos materiais e não linearidade geométrica do painel.

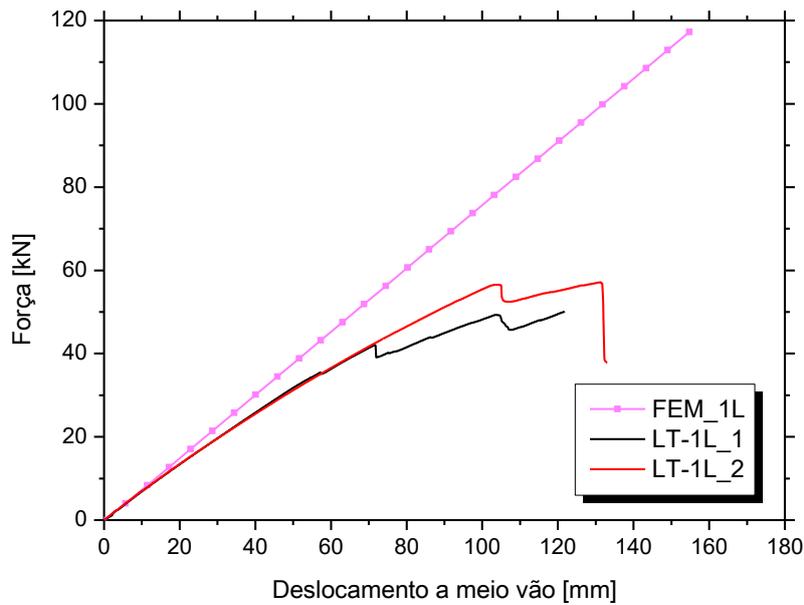


Figura 108. Força vs. deslocamento a meio vão: ligação tipo LT-1L.

É apresentada na Figura 109 as curvas força-deslocamento experimentais e numérica para os provetes com a ligação tipo LT-2L. O modelo numérico FEM_2L apresenta um aumento da rigidez face à ligação tipo LT-1L. Tal como com a ligação LT-1L, verifica-se discrepância de resultados entre as curvas experimentais e numérica, sendo esta observada desde os 5 mm de deslocamento a meio vão. Este afastamento justifica-se também pela não linearidade do comportamento dos materiais e não linearidade geométrica, que, comparativamente à ligação LT-1L, acontece para valores de carga mais baixos.

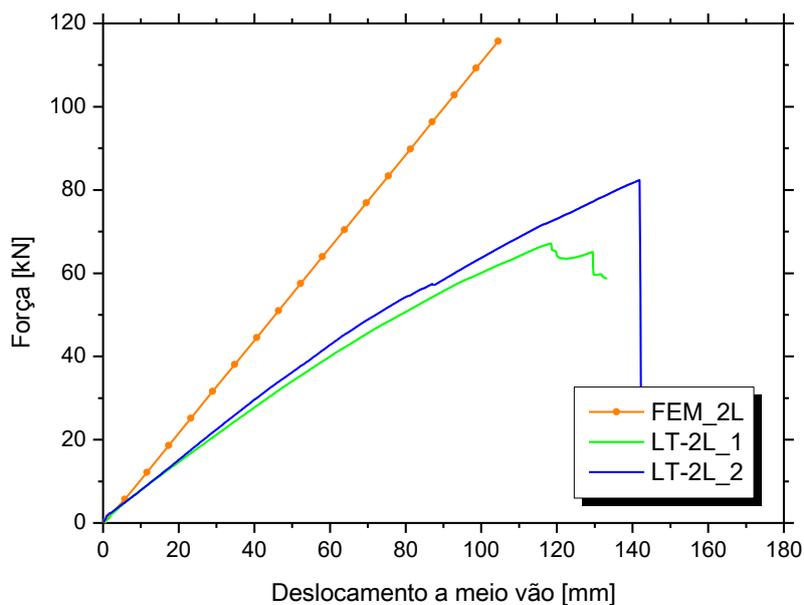


Figura 109. Força vs. deslocamento a meio vão: ligação tipo LT-2L.

A Figura 110 apresenta as curvas força-deslocamento experimentais e numérica para os provetes com a ligação tipo LT-2LA. Face à ligação tipo anterior (LT-2L) este modelo apresenta maior nível de restrições nos apoios, não permite deslocamentos horizontais, o que justifica o aumento da rigidez em aproximadamente 90%. Assim, como com os anteriores dois modelos numéricos, verifica-se um desvio entre as curvas experimentais e numérica, sendo esta observada para valores inferiores a 5 mm de deslocamento a meio vão. A razão pela qual se observa a perda de rigidez nas curvas força-deslocamento LT-2LA_1 e LT-2LA_2 é justificada pelo facto do modelo numérico não contemplar a não linearidade dos materiais e não linearidade geométrica.

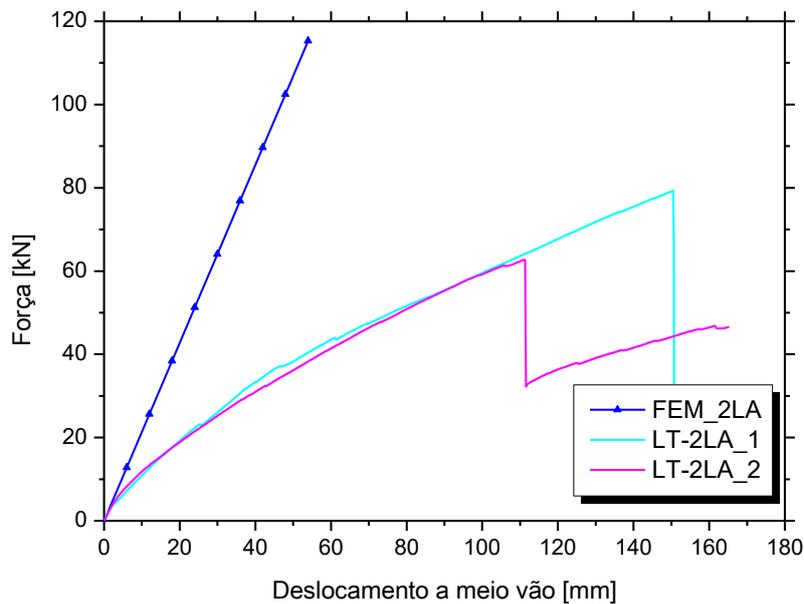


Figura 110. Força vs. deslocamento a meio vão: ligação tipo LT-2LA.

Na Tabela 42 é apresentada o valor da rigidez obtida através dos modelos numéricos e das curvas experimentais. Verifica-se, tanto nos resultados experimentais como nos numéricos, que a rigidez aumenta quando se aumenta o nível de restrição da ligação ($LT-1L < LT-2L < LT-2LA$). Os resultados experimentais apresentam uma maior semelhança ao nível da rigidez, do que os resultados numéricos.

Tabela 42. Rigidez à flexão ligação painel – parede. Unidades [kN/mm].

Ligação Tipo	Experimental	Numérica
LT-1L	0.65	0.76
LT-2L	0.71	1.12
LT-2LA	0.91	2.14

Em suma, constata-se que apesar de os modelos numéricos preverem corretamente a rigidez inicial das respostas (ver Figura 108, Figura 109 e Figura 110), estes não se mostram capazes de simular corretamente as fases subsequentes. A principal razão para esta limitação reside na natureza das leis constitutivas adotadas para os materiais que, no âmbito deste estudo, se limitaram à consideração de comportamento linear, não sendo desta forma suficientemente detalhadas para atender ao comportamento não linear do painel composto nas zonas de apoio e na zona de meio vão.

4.4. Conclusões

Neste capítulo apresentaram-se os ensaios realizados de modo a caracterizar: i) as ligações entre painéis, ligações painel – painel (Série 1 e Série 2), e ii) as ligações do painel e o sistema de apoio, ligações painel – parede (ligações tipo). Estes ensaios incluíram componentes experimentais e componentes numéricas.

No que diz respeito aos ensaios de ligação painel – painel, tanto na Série 1 constituída por dois painéis, como na Série 2 constituída por 3 painéis, o adesivo de origem epoxídica usado demonstrou ser uma solução adequada para se obter uma boa ligação entre painéis, visto que não comprometeu os ensaios realizados, nem levou à rotura prematura dos mesmos através desta ligação adesiva.

Na Série 1 dos ensaios à flexão da ligação painel – painel sob quatro pontos de carga, os provetes apresentaram um comportamento linear até aos 8 kN de carga aplicada. A partir desse momento observou-se o destacamento do PUR em relação ao GFRP no caso dos provetes 2PP_02 e 2PP_03, seguido do decréscimo da rigidez, culminando na rotura destes dois provetes. Por outro lado, o provete 2PP_01 não apresentou o destacamento atrás mencionado, o que lhe permite mobilizar maiores tensões de corte no PUR e suportar maior nível de carga. Nesta série, em termos médios, obteve-se uma força máxima de 13.6 kN e um deslocamento a meio vão de 20.91 mm.

Em relação à Série 2 dos ensaios de flexão de ligação painel – painel com três pontos de carga, verificou-se também um comportamento linear até cerca dos 5 kN de força aplicada. De seguida, no

caso dos provetes 3PP_01 e 3PP_02 foi observado a fissuração do GFRP sendo este o modo de rotura destes dois provetes. No entanto, não se verificou esta fissuração no provete 3PP_03, o que permitiu mobilizar maiores tensões na interface painel – adesivo até à rotura. Relativamente aos resultados obtidos, em termos médios, verificou-se uma capacidade de carga de 8.5 kN e um deslocamento a meio vão de 22.33 mm.

Dos ensaios de flexão realizados das diferentes ligações tipo painel – parede verificou-se a existência de uma relação entre a rigidez do painel e a capacidade de carga do mesmo, sendo observado que painéis com menor rigidez apresentam menor capacidade de carga. Obviamente, as diferentes ligações tipo painel – parede influenciam a rigidez do sistema, sendo que se verificou um aumento da rigidez da ligação tipo LT-1L para a LT-2LA, como esperado, e este aumento no sistema de ligação conduziu ao aumento do sistema painel/ligação. Assim, a ligação LT-1L, constituída por apenas uma cantoneira, e conseqüentemente menor rigidez que as ligações LT-2L (duas cantoneiras) e LT-2LA (duas cantoneiras + ligação adesiva) é a solução que levou ao menor valor de rigidez nos ensaios à rotura.

Em face da análise dos resultados, em serviço, a solução mais adequada aparenta ser a LT-2LA visto que as restantes soluções apresentaram, ainda em fases iniciais do ensaio, esmagamento do GFRP e fendilhação da camada de FRP junto aos apoios.

No que diz respeito às simulações numéricas realizadas na análise da ligação painel – painel, da análise de sensibilidade da espessura (de 5 mm, 6 mm e 7 mm) do painel verificou-se um aumento da rigidez de flexão de aproximadamente de 20%, por cada milímetro adicional. Da simulação realizada, os provetes da Série 1 apresentam uma maior rigidez que a observada experimentalmente, eventualmente explicada pelo facto de o modelo apenas ter um comportamento linear elástico, não complementado os danos locais que se verificaram durante os ensaios experimentais. No caso da simulação numérica realizada nos provetes da Série 2, os resultados descrevem melhor os resultados experimentais, sendo verificado uma rigidez semelhante à experimental para o modelo em que os painéis possuem 6 mm de espessura de GFRP. Por fim, pode-se concluir que a espessura da componente em GFRP do painel apresenta elevada influência no comportamento dos provetes.

No caso das simulações numéricas das diferentes ligações tipo painel – parede verificou-se que os modelos numéricos apenas conseguiram prever corretamente a rigidez inicial, não sendo capazes de simular corretamente as fases subsequentes. A principal razão para esta limitação reside na natureza das leis constitutivas adotadas para os materiais que, no âmbito deste estudo, se limitaram á

consideração do comportamento linear, não sendo desta forma suficientemente detalhadas para simular o comportamento não linear do painel compósito nas zonas de apoio e na zona a meio vão.

No caso da utilização de duas cantoneiras (ligação 2L e 2LA), a carga final apresentou uma variação marginal de ~2.2% quando comparada com os painéis ensaiados em condições de suporte simplesmente apoiados apresentados na secção 3.2.2.

Por último, a análise geral dos resultados obtidos permitiu aferir o comportamento das ligações entre painéis e verificar a transmissão de esforços/tensões entre eles e, no caso das ligações painel – parede, permitiu concluir qual a solução mais vantajosa em termos de capacidade de carga.

5. ENSAIOS DE FLEXÃO EM PAINÉIS A LONGO PRAZO

5.1. Programa experimental

Os ensaios de flexão em painéis a longo prazo tiveram como objetivo principal avaliar experimentalmente o seu comportamento diferido atendendo aos efeitos viscoelásticos do GFRP e FRC. Trata-se de um aspeto crítico devido ao facto das deformações a longo prazo (estado limite de utilização - deformação) em painéis compostos condicionarem, muitas das vezes, o dimensionamento destes.

Os ensaios de flexão a longo prazo foram realizados em dois painéis provenientes da amassadura 4 de FRC (Painel P4_F1 e P4_F2) – ver Tabela 16 e Tabela 22. Estes ensaios tiveram uma duração de 6 meses, nos quais os 3 meses iniciais corresponderam à fase em que os painéis estiveram submetidos a uma carga constante no tempo (Fase 1) e os restantes 3 meses, corresponderam à fase da remoção “instantânea” da carga e recuperação das deformações devidas à fase anterior (Fase 2).

Como critério para a definição da carga aplicar durante os ensaios, procurou-se que o momento fletor máximo a meio vão provocado por esta correspondesse a cerca de 20% do momento fletor máximo correspondente à carga última. Esta carga última foi definida conforme a Secção 3.2.2. Assim, a carga total aplicada por painel foi de 1610 kg, à qual correspondente a uma carga uniformemente distribuída de 11.93 kN/m², tendo esta sido materializada através de sacos de cal e areia. Por painel, foram distribuídos uniformemente 54 sacos de 25 kg, 4 sacos de 20 kg e 18 sacos de 10 kg ao longo da zona de carregamento, i.e., numa extensão de 4.20 m (ver Figura 111 e Figura 112). O carregamento de cada painel foi realizado no mais curto espaço de tempo possível de modo a minimizar os efeitos viscoelásticos nesta fase, contado, para o efeito com o recurso a quatro pessoas para a aplicação de carga em cada painel, tal como ilustrado na Figura 111.



Figura 111. Processo de aplicação da carga – Painel P4_F2.



Figura 112. Painéis sob o efeito de uma carga constante no tempo.

Durante os ensaios foram monitorizadas deslocamentos verticais e extensões. Paralelamente a estes registos, também se fez o registo da temperatura e humidade do ambiente onde os painéis se encontravam. Por painel, foram utilizados: i) três transdutores de deslocamento (LVDT 1, LVDT 2 e LVDT 3); ii) dois comparados mecânicos (DG 1 e DG 2); e iii) quatro extensómetros, dois na camada superior de FRC (SG 1 e SG2) e dois na camada inferior de GFRP (SG 3 e SG 4). Conforme se ilustra na Figura 113 e Figura 114, os transdutores de deslocamento LVDT 1 e LVDT 3 localizam-se junto às extremidades

do painel (a 150 mm dos apoios), enquanto que o LVDT 2 localiza-se no eixo de simetria da secção transversal a meio vão do painel. Os comparadores mecânicos encontram-se igualmente localizados a meio vão do painel, sendo que cada um se encontra a 50 mm da extremidade da secção transversal; os extensómetros, também localizados a meio vão do painel, encontram-se a 50 mm de cada extremidade da secção do painel, na face inferior em GFRP (SG 1 e SG2), na face superior da camada de FRC (SG 3 e SG 4). A Tabela 43 inclui características técnicas dos sensores utilizados. A aquisição do sinal proveniente dos diversos LVDTs e dos extensómetros foi realizada através de um sistema NI SCXI© e software em NI LabVIEW© especificamente desenvolvido para os ensaios de carga, tendo sido adotada uma frequência de aquisição de 1 Hz. Finalmente, será de referir que foi usado sensor de temperatura e humidade USB Data Logger com uma amplitude de temperaturas de -35 a +80 °C e humidade relativa de 0 a 100%. Foi adotada uma frequência de aquisição de 1 leitura a cada 5 minutos.

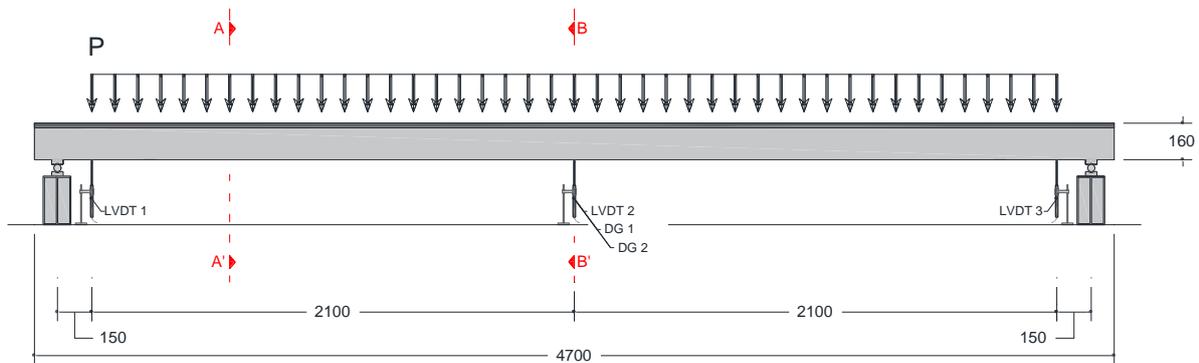


Figura 113. Configuração de ensaio de flexão a longo prazo, incluindo instrumentação. Unidades em [mm].

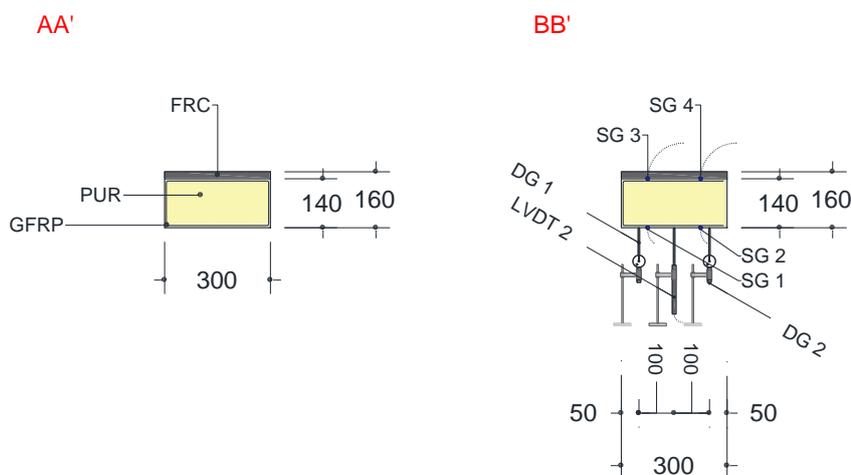


Figura 114. Instrumentação utilizada para os ensaios de flexão a longo prazo. Unidades em [mm].

Tabela 43. Detalhes da instrumentação utilizada nos ensaios a longo prazo.

Painel	Sensor ID	Grandeza medida	Marca/modelo do Sensor	Capacidade do Sensor
P4_F1	LVDT 1	Deslocamento	MD5/1000AGRA	± 10 mm
	LVDT 2	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
	LVDT 3	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
P4_F2	LVDT 1	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
	LVDT 2	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
	LVDT 3	Deslocamento	RDPE ACT2000A	± 25 mm
P4_F1 e P4_F2	DG 1, DG2	Deslocamento	MarCator 810 SV	± 20 mm
	SG 1, SG 2	Extensão	TML PFL-30-11-3L	2 %
	SG 3 e SG 4	Extensão	TML BFLA-5-3	3 %

5.2. Resultados e análise

Na Figura 115 apresentam-se os resultados obtidos em termos de deslocamento a meio vão ao longo do tempo. Neste gráfico inclui-se também a evolução da temperatura durante os ensaios. De uma forma geral, pode dizer-se que os painéis apresentaram o comportamento que seria espectável, i.e., a deformação instantânea devido à aplicação da carga, seguida de fluência primária nas primeiras cerca de 300 horas e de fluência secundária no restante tempo em que os painéis estiveram sob o efeito de carga constante no tempo. Após a remoção da carga (Fase 2), os painéis experimentaram a recuperação de uma parte significativa da deformação (deformação instantânea), seguindo uma progressiva e lenta recuperação da restante deformação. Em termos médios, em relação à deformação máxima total e para o período em análise, observou-se uma flecha residual final de 12%.

Devido a problemas técnicos, não foi possível realizar a aquisição da temperatura ao longo de todo o ensaio. Nos primeiros 47 dias de ensaio (Fase 1) verificou-se que a temperatura em média foi próxima dos 26 °C (CoV: 6 %). Na Fase 2 do ensaio com os painéis sem carga, os últimos 20 dias do decorrer do ensaio verificou-se que a temperatura em média foi próxima dos 10 °C (CoV: 23 %). Na Figura 116 apresenta-se o efeito da variação temperatura diária nos deslocamentos registados. Os deslocamentos provocados pelas variações da temperatura diárias têm pouca relevância quando comparados com os deslocamentos devidos ao efeito da carga aplicada.

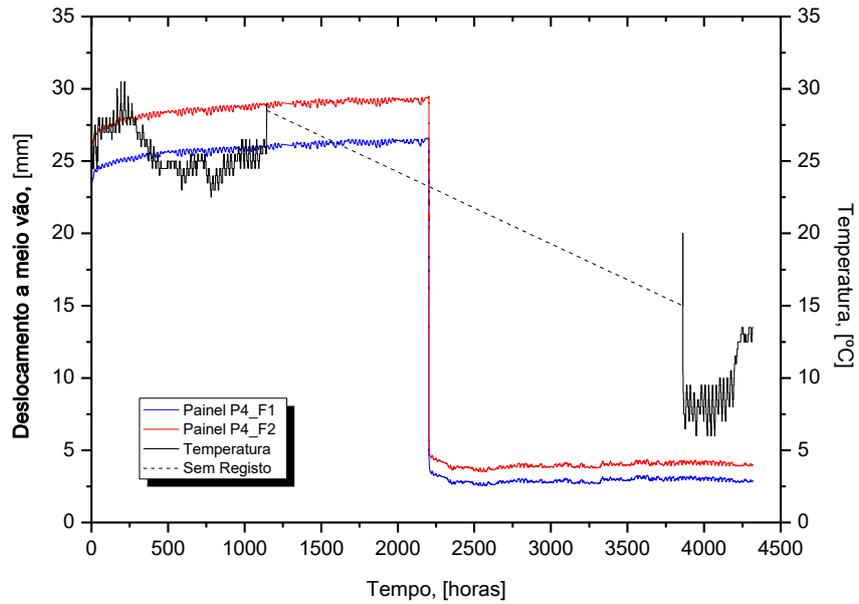


Figura 115. Variação da temperatura ao longo do ensaio.

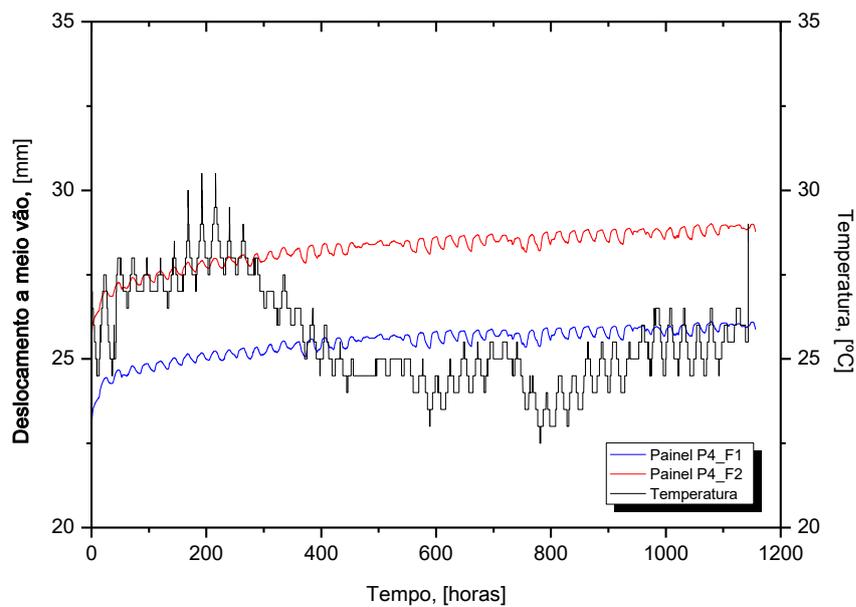


Figura 116. Influência da variação da temperatura nos deslocamentos a meio vão.

Tal como mencionado anteriormente, foram também utilizados dois comparadores mecânicos por painel como sistema redundante de aquisição. Na Figura 117 apresentam-se os deslocamentos a meio vão obtidos a partir dos LVDTs e dos comparadores mecânicos. A partir destes resultados é possível concluir que ambos os sistemas de medição conduzem a valores muito próximos.

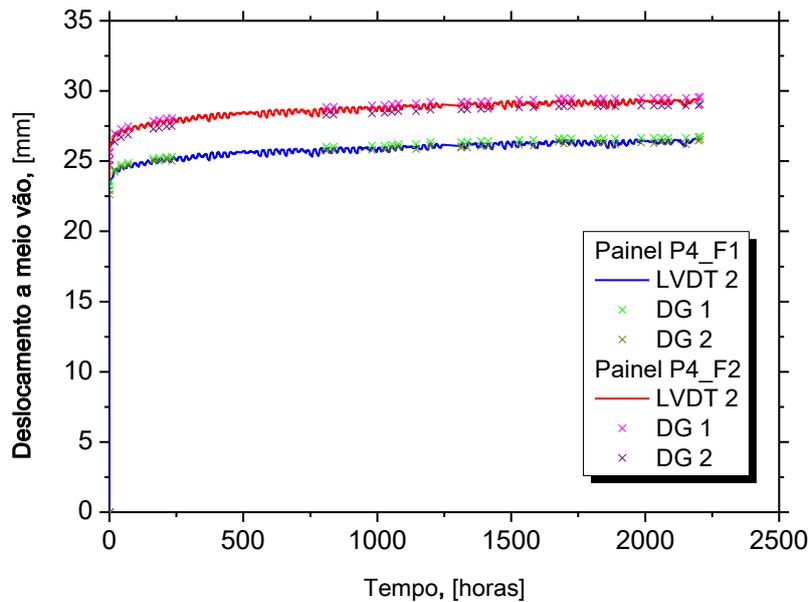


Figura 117. Comparação entre os deslocamentos obtidos a partir de LVDTs e de comparadores mecânicos.

Na Figura 118 e na Figura 119 apresentam-se os resultados dos painéis P4_F1 e P4_F2, respetivamente, em termos de todos os registos relativos a deslocamentos e a extensões. Assim, em cada figura são apresentados dois gráficos: à esquerda o registo dos deslocamentos verificados nos LVDTs 1, 2 e 3 (ver Figura 113) e, à direita, o registo dos extensómetros SG 1 a SG 4. No que diz respeito aos resultados da extensometria, as linhas a tracejado apresentadas nos gráficos representam a extensão no GFRP e no FRC estimadas analiticamente para o nível de carregamento do ensaio de fluência (3.58 kN/m), admitindo comportamento linear dos materiais e de acordo com os resultados obtidos na caracterização dos materiais (ver Capítulo 2).

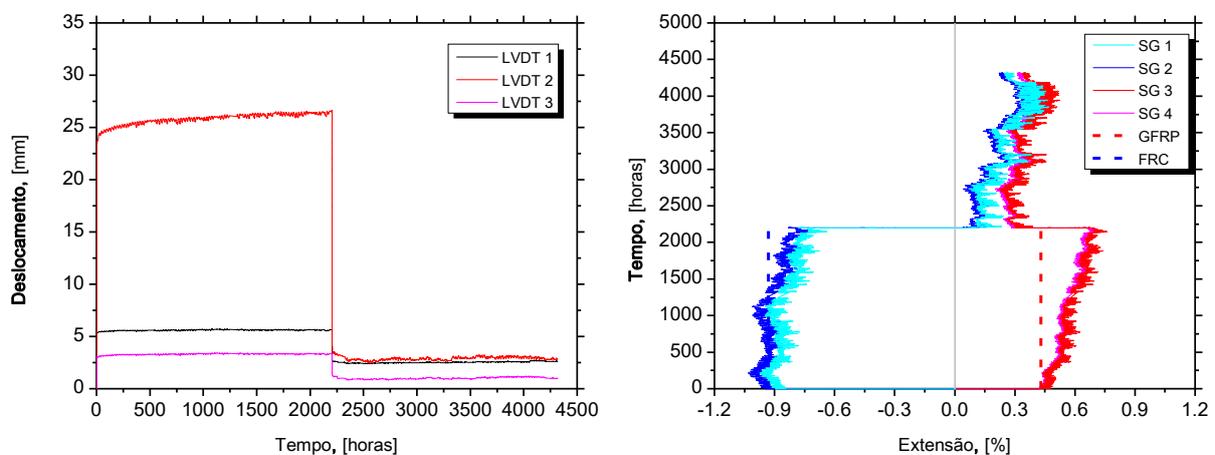


Figura 118. Resultados gráficos painel P4_F1.

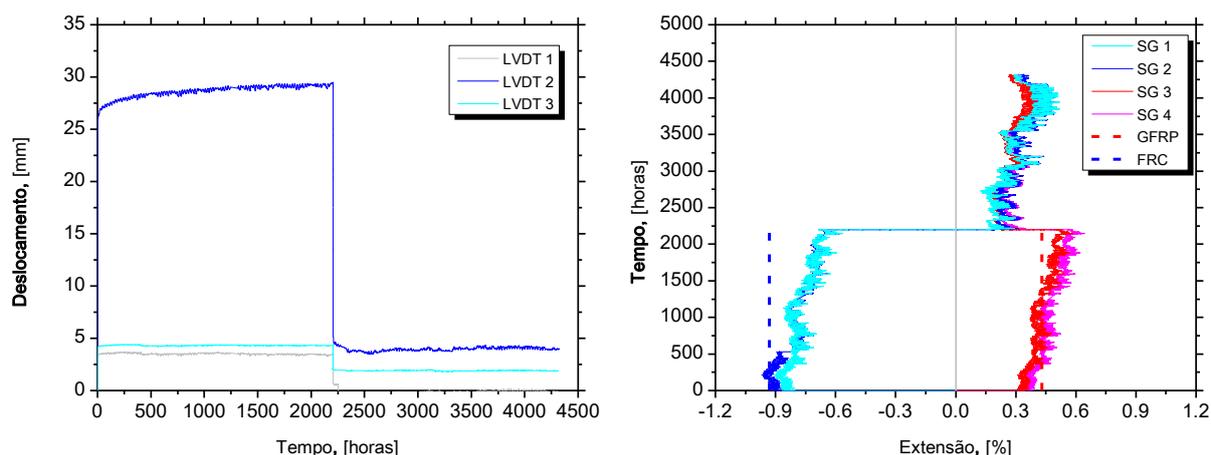


Figura 119. Resultados gráficos painel P4_F2.

A Tabela 44 apresenta os resultados experimentais obtidos durante a Fase 1 (com carregamento) e da Fase 2 (sem carregamento) dos painéis ensaiados, bem como a média dos resultados. Nesta tabela $d_{elástica}$ é flecha instantânea, d_{creep} é a flecha de fluência e ϕ_{creep} é o coeficiente de fluência (quociente entre a flecha de fluência e a flecha instantânea).

Tabela 44. Resultados experimentais.

Fase	Painel	$d_{elástica}$ [mm]	d_{creep} [mm]	ϕ_{creep}
Fase 1	P4_F1	21.12	5.51	0.26
	P4_F2	23.29	6.19	0.27
	Média	22.21	5.85	0.27
Fase 2	P4_F1	20.82	2.93	0.14
	P4_F2	22.52	2.97	0.13
	Média	21.67	2.95	0.14

No painel P4_F1 após a aplicação da carga verificou-se uma flecha instantânea de 21.12 mm, enquanto no painel P4_F2 foi de 23.29 mm (Fase 1). Após a remoção da carga verificou-se uma flecha instantânea de 20.82 mm e 22.52 mm nos painéis P4_F1 e P4_F2, respetivamente (Fase 2). Conclui-se assim, que as flechas nas fases de aplicação da carga e remoção desta são muito similares. Em termos médios verificou-se uma flecha por fluência de 5.85 mm na Fase 1 e, na Fase 2, uma recuperação por fluência de 2.95 mm. No que respeita resultados ao nível da extensometria, verifica-se que tanto face inferior em GFRP como a superior de FRC, as extensões obtidas na aplicação da carga são bastante semelhantes às estimativas analíticas. Devido à diminuição da temperatura observou-se que o efeito um efeito de “retração” não negligenciável nos materiais verificando-se que, por exemplo, na camada de

GFRP após a remoção da carga as extensões sofreram alteração do sinal. Isto também poderá ter contribuído para a diferença de flechas por fluência entre ambas as fases.

Dos resultados experimentais resultou um coeficiente de fluência médio de 0.27 na Fase 1 e de 0.14 na Fase 2. Estes valores estão em linha com os coeficientes de fluência obtidos em materiais compósitos que são inferiores ao que são observados p.e. em estruturas de betão.

5.3. Modelação analítica

Tendo em conta a configuração de ensaio adotada, o deslocamento máximo a meio vão pode ser estimado a partir da equação (54):

$$d(t) = \frac{5}{384} \cdot \frac{p \cdot L^4}{E(t) \cdot I} + \frac{1}{8} \cdot \frac{p \cdot L^2}{G(t) \cdot A'} \quad (54)$$

onde: i) p é carga aplicada uniformemente por unidade de comprimento; ii) L é o comprimento de vão; iii) $E(t)$ é o módulo de elasticidade considerando os efeitos da fluência ao longo do tempo (t); iv) I é o momento de inércia; v) $G(t)$ é módulo de distorção considerando os efeitos da fluência ao longo do tempo (t); e vi) A' é área reduzida de corte.

De acordo com a CNR DT205/2007 [52] e EUROCOMP *Design Code and Handbook* [21], o valor de $E(t)$ e $G(t)$ podem ser calculados segundo as equações (55) e (56), respetivamente, sendo que $\phi_E(t)$ e $\phi_G(t)$ são os coeficientes de fluência devido às deformações longitudinais e deformações de corte, respetivamente. Os valores sugeridos pelo CNR DT 205/2007 e EUROCOMP *Design Code and Handbook* pelo são apresentados na Tabela 45.

$$E(t) = \frac{E(0)}{1 + \phi_E(t)} \quad (55)$$

$$G(t) = \frac{G(0)}{1 + \phi_G(t)} \quad (56)$$

Tabela 45. Coeficiente de fluência [52][21].

t (anos)	CNR – DT 205/2007		EUROCOMP UD	
	ϕ_E	ϕ_G	ϕ_E	ϕ_G
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.26	0.57	0.07	1.13
5	0.42	0.98	0.08	1.55
10	0.50	1.23	0.08	1.78
30	0.60	1.76	0.09	2.25
50	0.66	2.09	0.09	2.52

Os vários parâmetros utilizados para a resolução da equação (54) encontra-se na Tabela 46 e foram calculados tendo por base a informação que consta na Secção 3.2.1.

Tabela 46. Parâmetros analíticos.

Parâmetro	Valor	Unidade
p	3.58	kN/m
L	4.50	m
I	3.61787×10^{-4}	m ⁴
A'	0.0016	m ²
$E(t = 0)$	26.40	GPa
$G(t = 0)$	3.60	GPa

Assim, a partir da aplicação da equação (54) obteve-se um deslocamento a meio vão de 21.57 mm, que compara com os valores observados experimentalmente nos ensaios de fluência – 21.12 mm (-2%) e 23.29 mm (+8%) para os painéis P4_F1 e P4_F2, respetivamente.

Com o objetivo de se estimar a flecha por fluência a 50 anos dos painéis em análise, realizou-se o conjunto de procedimentos que se detalham de seguida. Numa primeira fase foi necessário proceder à quantificação as ações para o estado limite de utilização em apreço. Desta forma, quantificou-se a combinação de ações quase permanente (p_{pq}) (ver também Secção 1.2.3). Assim, consideraram-se as seguintes ações: i) peso próprio do painel ($g_{sw} = 0.6$ kN/m²); ii) restantes cargas permanentes ($g_{opl} = 1.5$ kN/m²); e iii) sobrecarga de ($q = 2$ kN/m²). Desta forma obteve-se o seguinte valor:

$$p_{pq} = p_{sw} + p_{odl} + 0.3 \cdot q = 2.7 \text{ kN/m}^2 \quad (57)$$

Dado que largura do painel ensaiado é de 0.3 m origina, a respetiva carga será de 0.81 kN/m. De acordo com a CNR DT205/2007 [52] e EUROCOMP *Design Code and Handbook* [21], o valor de $E(t = 50 \text{ anos})$ e $G(t = 50 \text{ anos})$ podem ser calculados segundo as equações (55) e (56), respetivamente, recorrendo aos respetivos coeficientes de fluência. Utilizando a equação (54) determinou-se o deslocamento previsto a 50 anos para a combinação de ações quase permanente ($p_{pq} = 0.81 \text{ kN/m}$) e um vão de 4.5 m. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 47. Note-se que para a combinação de ações quase permanente a flecha a meio vão instantânea $d(t = 0)$ é igual a 4.88 mm. Deste modo, o deslocamento por fluência obtido segundo estas duas normas ($d_{creep}(t = 50 \text{ anos})$) é dado pela diferença da entre o deslocamento total a 50 anos ($d_{total}(t = 50 \text{ anos})$) e o deslocamento instantâneo ($d(t = 0)$). De salientar ainda que, nesta estimativa admitiu-se que o FRC apresentava as mesmas propriedades mecânicas e viscoelásticas do GFRP, pelo que estes resultados poderão conduzir a uma subestimação das flechas finais.

Tabela 47. Resultados obtidos da aplicação da CNR – DT 205/2007 e do EUROCOMP UD.

Parâmetro	CNR – DT 205/2007	EUROCOMP UD	Unidades
$\phi_E(t = 50 \text{ anos})$	0.66	0.09	-
$\phi_G(t = 50 \text{ anos})$	2.09	2.52	-
$E(t = 50 \text{ anos})$	15.90	24.22	GPa
$G(t = 50 \text{ anos})$	1.17	1.02	GPa
$d(t = 0)$	4.88		mm
$d_{total}(t = 50 \text{ anos})$	8.62	6.19	mm
$d_{creep}(t = 50 \text{ anos})$	3.74	1.31	mm

A lei de *Findley* é normalmente usada para simular o comportamento viscoelástico dos materiais poliméricos, baseada nos seguintes pressupostos: a deformação total (d_{total}) que ocorre num material sob uma carga constante e contínua pode ser dividida em duas componentes (ver equação (58)): i) a deformação elástica ($d_{elástica}$), que é função da carga; e ii) a deformação viscoelástica (por fluência, d_{creep}), que é função da carga, do tempo decorrido e da temperatura. Para este estudo, o efeito da temperatura foi desprezado no comportamento viscoelástico do material. Neste caso, a deformação viscoelástica pode ser dada pela lei de *Findley* (equação (59)) da seguinte forma:

$$d_{\text{total}} = d_{\text{elástica}} + d_{\text{creep}} \quad (58)$$

$$d_{\text{creep}} = m \cdot t^n \quad (59)$$

onde: i) m é a amplitude de fluência; ii) t é o tempo decorrido em horas (neste estudo); e iii) n é o expoente de fluência.

Numa primeira fase, os parâmetros que compõem a lei de *Findley* foram calibrados individualmente para cada painel. A calibração dos parâmetros (m e n) desta lei foram realizados com base nos resultados experimentais obtidos de cada painel através de algoritmo de otimização. A implementação automática deste algoritmo está incluída na ferramenta Microsoft Excel Solver, onde foi definida como função objetivo a minimização de S através da variação dos parâmetros m e n :

$$S = \sum_{i=1}^t |d_{i,\text{exp}} - d_{i,\text{num}}| \quad (60)$$

onde: i) $d_{i,\text{exp}}$ é a deformação por fluência medida nos ensaios experimentais; e ii) $d_{i,\text{num}}$ é a deformação por fluência dada pela lei de *Findley*.

Após calibração, obteve-se para o parâmetro m o valor de 2.078 e 2.413, para o parâmetro n o valor de 0.123 e 0.119 para o painel P4_F1 e P4_F2, respetivamente. Na Figura 120 apresentam-se o resultado da simulação da deformação por fluência com recurso à lei de *Findley* para ambos os painéis.

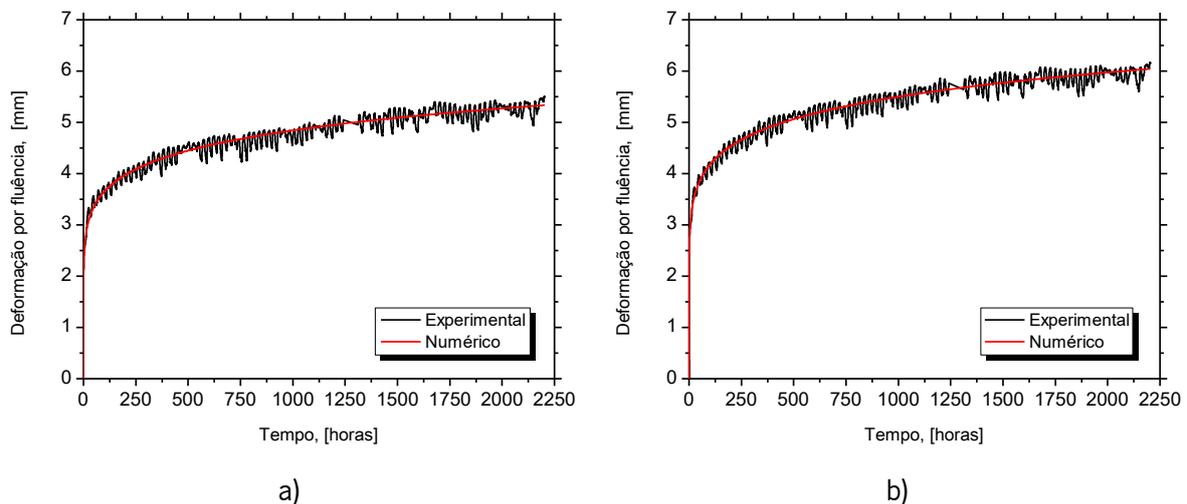


Figura 120. Simulação da deformação por fluência com recurso à lei de *Findley*: a) Painel P4_F1; b) Painel P4_F2.

Desta forma, em termos médios resultou numa amplitude de fluência (m) de 2.245 e um expoente de fluência (n) de 0.121. Na Fase 2 dos ensaios (após remoção de carga), o cálculo da recuperação por fluência é dado pela equação (61):

$$d_{\text{creep,un}} = m_{\text{un}} \cdot (t - t_{\text{un}})^n \quad (61)$$

onde: i) m_{un} é amplitude de fluência, valor simétrico a m ($m_{\text{un}} = -2.245$); e ii) t_{un} é a duração de tempo que a estrutura teve em fase de carga, isto é, o instante de tempo que ocorre a descarga do painel. Uma vez que durante a descarga verificou-se que a deformação instantânea originada (d_{un}) é ligeiramente diferente da deformação instantânea originada pela aplicação da carga, a deformação total d_{total} é dada pela equação (62) – ver também Tabela 48:

$$\begin{aligned} d_{\text{total}} &= d_{\text{elástica}} + d_{\text{creep}} - d_{\text{un}} + d_{\text{creep,un}} \\ \Leftrightarrow d_{\text{total}} &= d_{\text{elástica}} + m \cdot t^n - d_{\text{un}} + m_{\text{un}} \cdot (t - t_{\text{un}})^n \end{aligned} \quad (62)$$

Tabela 48. Principais resultados da lei de *Findley* aplicada ao presente estudo.

Parâmetro	Painel P4_F1	Painel P4_F2	Valor médio	Unidades
$d_{\text{elástica}}$	21.12	23.29	22.21	mm
d_{un}	20.82	22.52	21.67	mm
m	2.078	2.413	2.245	-
n	0.123	0.119	0.121	-
m_{un}	-2.078	-2.413	-2.245	-
t_{un}	2203.798	2203.778	-	horas

Na Figura 121 apresentam-se os resultados obtidos em termos da evolução da flecha a meio vão dos painéis estimada por intermédio da lei de *Findley*. Nesta figura apresentam-se também os resultados obtidos experimentalmente. É possível concluir que a modelação analítica simula com rigor suficiente os resultados experimentais.

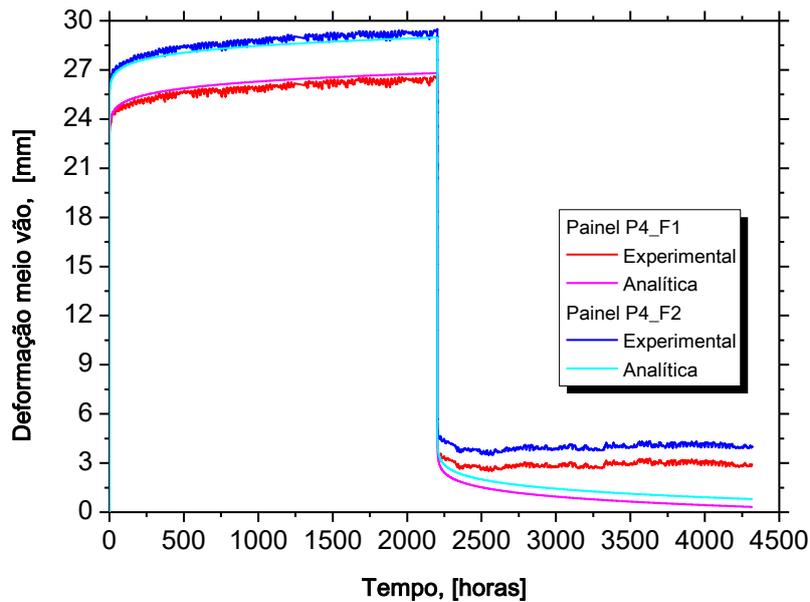


Figura 121. Resultado gráfico da deformação a meio vão (experimental e analítica) ao longo dos ensaios.

Considerando os valores médios de m e n (determinados anteriormente pela lei de *Findley*), é possível estimar a flecha por fluência a 50 anos através da equação (59) tem em conta o mesmo nível de carga na qual os parâmetros foram calculados, tendo em atenção que t é o tempo em horas.

$$d_{\text{creep}} = 2.245 \cdot (50 \cdot 365 \cdot 24)^{0.121} = 10.80 \text{ mm} \quad (63)$$

De modo a estimar a flecha a 50 anos para o nível de carga de serviço de 0.81 kN/m (combinação de ações quase permanente), através da aplicação da lei de *Findley*, primeiramente partiu-se do pressuposto que a fluência é linear, sendo assim, possível realizar a proporção entre cargas para obter a deformação por fluência. Uma vez que a carga de fluência foi de 3.58 kN/m obteve-se uma flecha por fluência de 10.80 mm, para a carga de serviço de 0.81 kN/m a flecha de fluência correspondente é de 2.44 mm, como constata-se pela equação (64).

$$d_{\text{creep}}(t = 50 \text{ anos}) = \frac{0.81 \cdot 10.80}{3.58} = 2.44 \text{ mm} \quad (64)$$

Por fim apresenta-se na Tabela 49 com a comparação dos resultados obtidos para a flecha a meio vão a 50 anos do painel sanduíche híbrido, para uma combinação de ações quase permanente, segundo a CNR – DT 205/2007, o EUROCOMP UD e a lei de *Findley*.

Tabela 49. Tabela comparativa da flecha a meio vão a 50 anos (combinação quase permanente de ações).

Parâmetro	CNR – DT 205/2007	EUROCOMP UD	Lei de Findley	Unidades
$d(t = 0)$	4.88			mm
$d_{creep}(t = 50 \text{ anos})$	3.74	1.31	2.44	mm
$d_{total}(t = 50 \text{ anos})$	8.62	6.19	7.32	mm

Será necessário salientar que as propostas nas normas CNR e EUROCOMP foram formuladas para materiais compósitos. Por outro lado, a lei de *Findley* é uma expressão empírica que cautela o comportamento real medido no painel sanduíche híbrido. Segundo o Eurocódigo 2 [23], a deformação de um elemento não deve ser prejudicial ao seu correto funcionamento tendo-se, por isso, definido um limite máximo para a flecha de um elemento sujeita a uma combinação de ações quase-permanente inferior a $L/500$ (ver Secção 1.2.3), sendo que no caso do painel Easyfloor têm um vão de 4.5 m, obtém-se uma deformação de 9 mm. Por fim, conclui-se que a flecha a 50 anos prevista no painel para um carregamento de serviço de 0.81 kN/m encontra-se entre os 6.19 mm e os 8.62 mm, sendo que o resultado mais espetável seja próximo dos 7.32 mm, cumprindo assim os requisitos dados pelo Eurocódigo 2.

5.4. Conclusões

Neste capítulo descreveram-se os ensaios de fluência realizados em painéis sanduíche híbridos, que incluíram uma componente experimental e uma componente analítica. A duração total dos ensaios foi de 6 meses, sendo que durante a primeira metade do tempo os painéis estiveram sob o efeito de uma carga constante (Fase 1) e no restante tempo e estiveram sem carga (Fase 2). Durante todo este período foram monitorizados os deslocamentos e extensões.

Na Fase 1 verificou-se uma flecha instantânea média de 22.21 mm e uma flecha por fluência média de 5.85 mm, enquanto na Fase 2 a flecha instantânea média foi de 21.67 mm e a flecha por fluência média de 2.95 mm. Em termos médios, relação à deformação máxima total e para o período em análise, resultou numa flecha residual final de 12 %. Em relação ao coeficiente de fluência médio, na Fase 1 foi de 0.27 e na Fase 2 foi de 0.14. Estes valores são inferiores aos coeficientes de fluência verificado p.e. nas estruturas em betão, mas dentro dos valores esperados para materiais compósitos.

Tendo por base os resultados experimentais obtidos e através da aplicação da lei de *Findley*, considerando o comportamento de fluência linear, foi estimar a flecha a meio vão a 50 anos para uma combinação de ações quase permanente (0.81 kN/m) tendo-se obtido uma flecha de 7.32 mm. Quando comparado com os requisitos de deformação do Eurocódigo 2, onde o limite dado para a deformação de uma estrutura deve ser inferior ao vão/500, neste caso seria de 9 mm, pelo que se encontra assegurado este estado limite de utilização.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões gerais

A presente dissertação de mestrado teve como objetivo principal o estudo do comportamento mecânico de um painel sanduíche híbrido, desenvolvido no âmbito do projeto EasyFloor. Para o efeito, incluiu componentes experimentais, numéricas e analíticas. Assim, tendo como base os resultados obtidos na presente dissertação é possível afirmar que os objetivos inicialmente definidos foram atingidos.

O painel sanduíche híbrido desenvolvido tem secção transversal retangular, com 300 mm de largura e 160 mm de altura. É composto por uma componente produzida por pultrusão (300 mm x 140 mm), com faces (inferior e superior) e nervuras (almas laterais) em GFRP com 6 mm de espessura e espuma de poliuretano (PUR) com densidade de 60 kg/m³. Sob a face superior de GFRP é adicionada betonada uma camada de FRC (do inglês *Fibre Reinforced Concrete*) com 20 mm de espessura.

Numa primeira fase da dissertação foi feito o enquadramento do projeto, englobando as suas várias componentes e fases, nomeadamente o enquadramento histórico, os requisitos regulamentares e outros, a conceção, o dimensionamento, a otimização até à solução final, tendo por base os vários relatórios desenvolvidos no âmbito de projeto.

Seguiu-se a caracterização experimental do FRC que incluiu ensaios de compressão e de flexão. De acordo com o Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1), o FRC foi classificado como sendo da classe de resistência C30/37. A caracterização dos restantes materiais que compõem o painel foram realizados no contexto de outras componentes do projeto EasyFloor.

Na avaliação mecânica do painel sanduíche híbrido a curto prazo incluiu i) ensaios à flexão de vão variável, que permitiram determinar por via experimentalmente a rigidez à flexão e a rigidez ao corte, e ii) ensaios à flexão à rotura de painéis simples e de painéis duplos, sendo estes últimos solidarizados através de ligação adesiva com recurso a um adesivo epóxi. Os painéis ensaiados à rotura, sob 4 pontos de carga, tinham um vão total de 4.5 m e um vão de corte de 1.5 m. A capacidade carga máxima à flexão média foi de 71 kN no caso do painel simples e, sensivelmente o dobro da capacidade de carga máxima no caso dos painéis duplos. No caso dos painéis duplos constatou-se um comportamento linear ao longo do ensaio até cerca de ~60% da capacidade máxima. Verificou-se que o modo de rotura em ambos os tipos de painéis é caracterizado pela rotura da alma do painel (GFRP) seguido do

esmagamento/destacamento da camada de FRC. O comportamento à flexão dos painéis foi alvo um estudo numérico com base numa análise linear elástica, através de modelos baseados no método de elementos finitos 3D. De uma forma geral, os modelos numéricos conseguiram simular com rigor suficiente a resposta experimental durante a fase em que se observou resposta linear.

Os estudos realizados através de ensaios de ligação painel – painel foi possível compreender o comportamento na direção transversal à direção da pultrusão. Foram realizados ensaios com provetes constituídos por 2 painéis sob quatro pontos de carga (Série 1) e aos constituídos por 3 painéis sob três pontos de carga (Série 2). A ligação adesiva entre painéis com recurso a um adesivo epóxi. Estes ensaios demonstraram que o adesivo utilizado demonstrou uma ser uma solução adequada, visto que o modo de rotura dos painéis não ocorreu nesta zona. Na Série 1 obteve-se uma capacidade de carga máxima de 13.6 kN associado a um deslocamento a meio vão de 20.91 mm e, na Série 2, obteve-se uma capacidade carga máxima de 8.5 kN e um deslocamento a meio vão de 22.33 mm. Realizam-se simulações numéricas dos ensaios painel – painel, que incluíram uma análise de sensibilidade da espessura (de 5 mm, 6 mm e 7 mm) da camada de GFRP do painel e verificou-se um aumento da rigidez de flexão de aproximadamente de 20%, por cada milímetro adicional. Na modelação numérica dos provetes da Série 1, obteve-se uma maior rigidez à flexão quando comparada com a obtida experimentalmente, eventualmente explicada pelo modelo apenas ter um comportamento linear elástico, não complementado os danos locais verificados experimentalmente. No caso da Série 2, os resultados numéricos descrevem melhor os resultados experimentais, sendo que o modelo numérico que mais se adequa face aos resultados experimentais é o modelo com 6 mm de espessura de GFRP.

Foram também realizados ensaios de caracterização da ligação painel – parede: i) LT-1L - cantoneiras nas faces inferiores das extremidades dos painéis e ligação parafusada; ii) LT-2L - cantoneiras nas faces inferiores e superiores das extremidades dos painéis e ligação parafusada; e, iii) LT-2LA - cantoneiras nas faces inferiores e superiores das extremidades dos painéis e ligação parafusada e adesiva. Verificou-se que o tipo de ligação utilizado tem influência na rigidez e a capacidade de carga dos painéis, havendo um acréscimo de rigidez e resistência da ligação tipo LT-1L para a LT-2L e da LT-2L para LT-2LA. O aumento da rigidez na ligação conduziu, naturalmente, ao aumento da rigidez do painel. De entre as soluções estudadas, conclui-se que a solução LT-2LA é a que apresente melhor performance. As simulações numéricas das diferentes ligações tipo painel – parede revelaram ser limitadas visto que o modelo não contemplou a não linearidade dos materiais e não linearidade geométrica. Assim, os resultados numéricos apresentam uma semelhante rigidez na fase inicial do ensaio experimental, até um deslocamento máximo a meio vão de 20 mm. Depois, verifica-se que existe uma perda de rigidez nos

ensaios experimentais, que não é contemplada na simulação numérica. Contudo, numa análise geral dos resultados numéricos obtidos permitiu avaliar o comportamento das ligações painel – parede e concluir qual a solução mais vantajosa em termos de rigidez à flexão.

No estudo dos ensaios de flexão dos painéis sanduíche híbridos a longo prazo foi dividido em duas fases. A Fase 1 teve a duração de 300 horas onde os painéis ensaiados tiveram sob um carregamento constante na qual se verificou uma flecha instantânea média de 21.12 mm e um coeficiente de fluência médio de 0.27. Na Fase 2 teve a mesma duração que a Fase 1, a qual corresponde à fase de remoção da carga e recuperação das deformações, que resultou numa recuperação instantânea da flecha (em média) de 21.67 mm, próxima da flecha verificada na Fase 1, e um coeficiente de fluência média de 0.14. Em termos médios, relativamente à deformação máxima total e para o período total do ensaio (Fase 1 e Fase 2), resultou numa flecha residual final de 12 %. Ao nível da variação da temperatura, durante a Fase 1, os efeitos provocados por esta tiveram pequenos efeitos na variação dos deslocamentos quando comparados com o deslocamento instantâneo dos painéis. Contudo, devido à diminuição da temperatura na Fase 2, pelos resultados da extensometria observou-se um efeito de “retração” não negligenciável nos materiais verificando-se que, por exemplo, na camada de GFRP após a remoção da carga as extensões sofreram alteração do sinal. Através do estudo analítico dos resultados dos ensaios à flexão a longo prazo do painel sanduíche híbrido, e da aplicação da lei de Findley, foi possível estimar a flecha a 50 anos para uma combinação de ações quase permanente, prevendo-se uma flecha de 7.3 mm que, segundo os requisitos do Eurocódigo 2 deve ser inferior a 9 mm ($v_{\text{ão}}/500$). Em face deste resultado prevê-se que a flecha a 50 anos é cerca de 81 % do limite máximo dado pelo Eurocódigo 2.

6.2. Trabalhos futuros

Os painéis sanduíche híbridos representam uma solução inovadora comparativamente com as soluções tradicionais em betão armado e aço. Apesar do projeto EasyFloor e a presente dissertação terem contribuído de forma significativa para a compreensão do painel desenvolvido, considera-se que existem estudos adicionais que deveriam ser realizados de modo a completar o seu conhecimento. Neste contexto, indicam-se alguns dos tópicos que poderão ser explorados/investigados em futuros trabalhos, nomeadamente:

- Desenvolvimento e estudo de uma ligação mecânica entre painéis;

- Estudo da influência da temperatura nas propriedades dos materiais que constituem o painel sanduíche híbrido, isoladamente e em conjunto;
- Desenvolvimento e calibração de modelos numéricos de elementos finitos para o estudo do comportamento não linear do painel sanduíche híbrido;
- Estudos de durabilidade do comportamento para aplicação exteriores;
- Avaliação da aplicação da solução desenvolvida a outras estruturas, por exemplo, na aplicação de tabuleiros de pontes pedonais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Aguiar, A. Cabrita, and J. Appleton, “Guia de apoio à reabilitação de edifícios habitacionais,” Lisboa, 2014.
- [2] Lisboa Green Capital 2020, “Economia Linear vs. Economia Circular,” 2020. <https://lisboagreencapital2020.com/noticias/sustentabilidade-o-que-e-isto/>.
- [3] João Appleton, *Reabilitação de Edifícios Antigos: Patologias e tecnologias de intervenção*. Orion, 2003.
- [4] INE; LNEC, *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação - Análise e Evolução 2001-2011*. 2013.
- [5] J. R. Correia, “GFRP pultruded profiles in civil engineering: hybrid solutions, boded connections and fire behaviour,” Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- [6] F. Cruz, “Desenvolvimento e caraterização de painéis sanduíche híbridos para a reabilitação de pisos de edifícios. Tese de Mestrado em Engenharia Civil,” Universidade do Minho, 2017.
- [7] E. Witter, T. Kraus, and M. Kühnel, “Composites Market Report 2014. Market developments, trends, challenges and opportunities. Carbon Composites and AVK Federation of Reinforced Plastics.,” 2014.
- [8] M. Proença, M. Garrido, J. R. Correia, G. Escusa, and J. Sena-Cruz, “Preliminary design of the EasyFloor sandwich panels, Task 1.1 - Relatório ICIST DTC n° 9/2017,” Lisboa, 2016.
- [9] M. Branco and L. M. Guerreiro, “Seismic rehabilitation of historical masonry buildings,” *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 5, pp. 1626–1634, May 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.01.033.
- [10] A. Costa, J. M. Guedes, and H. Varum, *Structural rehabilitation of old buildings*. 2014.
- [11] H. Andrade, “Caracterização de Edifícios Antigos - Edifícios ‘Gaioleiros’”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil,” Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [12] F. Pinho, *Paredes de edifícios Antigos em Portugal*. Lisboa: LNEC, 2008.
- [13] LNEC, “Evolução das tipologias construtivas em Portugal,” Lisboa, 2005.
- [14] CEN WG4, “Fibre Reinforced Polymer Structures – Scientific and Technical Report, submitted for approval to CEN/TC 250,” 2014.
- [15] European Committee for Standardization (CEN), “Eurocode 0 – Basis of structural design (EN

- 1990),” Brussels, 2002.
- [16] European Committee for Standardization (CEN), “Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings (EN 1991-1-1),” Brussels, 2002.
- [17] República Portuguesa, *Portaria n.º 379-A/2015 de 22 de outubro de 2015*, no. 1. 2015, p. 9196.
- [18] Porta da Habitação, “Guia prático do Regime Excepcional para a Reabilitação Urbana (RERU),” 2014, [Online]. Available: http://www.portaldahabitacao.pt/opencms/export/sites/portal/pt/portal/reabilitacao/RERU/RERU_F_Termica.pdf.
- [19] Portaria n.º 135/2020 de 2 de Junho, “Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE),” *Diário da República*, 2020.
- [20] República Portuguesa, *Portaria n.º 220/2008 de 12 de Novembro de 2008*. 2008.
- [21] J. L. Clarke, *Structural Design of Polymer Composites: EUROCOMP Design Code and Handbook*. London, 1996.
- [22] G. H. Staab, “Laminate analysis,” in *Laminar Composites*, Elsevier, 2015, pp. 189–284.
- [23] European Committee for Standardization (CEN), “Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão; Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios (NP EN 1992-1-1),” *Design*, 2010.
- [24] CNR-DT 205/2007, “Guide for the design and construction of structures made of FRP pultruded elements,” Roma, 2008.
- [25] M. Garrido, “Composite sandwich panel floors for building rehabilitation Civil Engineering. Tese em Doutoramento em Engenharia Civil,” 2015.
- [26] A. K. Chopra, “Dynamics of structures,” New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [27] W. Utlely, “Sound insulation of composite materials. Composites, Vol. 5, pp. 34-37.,” 1974.
- [28] E. I. 12354, “Building acoustics – Estimation of acoustic performance of building from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms,” Brussels, Belgium, 2000.
- [29] G. Escusa, J. Sena-Cruz, F. Cruz, E. Pereira, I. Valente, and J. Barros, “The use of genetic algorithms for structural optimization of hybrid sandwich panels,” 2017.

- [30] D. E. Goldber, “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning,,” 1988.
- [31] J. H. Holland, “Genetic algorithms. Scientific American,” 1992.
- [32] M. Proença, M. Garrido, M. G. Gomes, and J. R. Correia, “‘Thermal behavior of pultruded composite sandwich panels for applications in building floors’ , Task 4.6 - Report 4.6,” 2018.
- [33] M. Proença, M. Garrido, J. R. Correia, and A. N. Sousa, “Acoustic behavior of the EasyFloor composite sandwich panels, Task 4.5 – Report 4.5.1 - Relatório CERIS DTC nº9/2020,” 2020.
- [34] República Portuguesa, *Portaria n.º 305/2019 de 12 de setembro de 2019*. 2019.
- [35] M. Proença, M. Garrido, and J. R. Correia, “Fire reaction properties of the EASYFLOOR sandwich panels’ constituents, Task 4.7 – Report 4.7.1, Relatório CERIS DTC nº 4/2018,” 2018.
- [36] M. Proença, M. Garrido, and J. R. Correia, “‘Single burning item (SBI) tests of the EasyFloor composite sandwich panel floor system’, Task 4.7 – Report 4.7.3 - Relatório CERIS DTC nº 39/2020,” 2020.
- [37] M. Proença, M. Garrido, and J. R. Correia, “Fire behaviour of GFRP composite sandwich panels, Task 4.7 – Report 4.7.2 - Relatório CERIS DTC nº 3/2020,” 2020.
- [38] M. Proença, M. Garrido, J. R. Correia, and J. Sena-Cruz, “‘Fire behaviour of final Easyfloor composite sandwich panels’, Task 4.7 – Report 4.7.4 - Relatório CERIS DTC nº 43/2020,” 2020.
- [39] J. R. Proença, M., Garrido, M., Correia, “Behaviour of panel-to-wall connections of GFRP composite sandwich panels – Design and experimental assessment. EasyFloor Project, Task 4.4 – Report 4.4.2,” 2020.
- [40] NP EN 12390-3, “Ensaio do betão endurecido; Parte 3: Resistência à compressão de provetes,,” Lisboa, Portugal, 2011.
- [41] NP EN 12390-4, “Ensaio do betão endurecido; Parte 4: Resistência à compressão – Características das máquinas de ensaio,,” Lisboa, Portugal, 2003.
- [42] NP EN 12390-1, “Ensaio do betão endurecido; Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes,,” Lisboa, Portugal, 2012.
- [43] NP EN 12390-13, “Ensaio do betão endurecido - Part 13: Determinação do Módulo de elasticidade secante à compressão,,” 2013.
- [44] European Committee for Standardization, “EN 14651: Test method for metallic fibres concrete.

- Measuring the flexural tensile strength,” 2005.
- [45] RILEM TC 162-TDF, “RILEM TC 162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending test,” 2000.
- [46] J. M. Davies, *Lightweight sandwich construction*. 2001.
- [47] G. Escusa, F. Cruz, J. Sena-Cruz, E. Pereira, I. Valente, and J. Barros, “Shear behaviour of polyurethane foam,” *Proc. 6th Asia-Pacific Conf. FRP Struct. APFIS 2017*, no. July, pp. 19–21, 2017.
- [48] J. Sena-Cruz *et al.*, “The effect of surface treatment and environmental actions on the adhesive connection between GFRP laminate surface and fresh FRC,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 258, p. 119594, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119594.
- [49] Sika Portugal SA, “Fichas de dados do produto: Sikadur 32 EF,” Vila Nova de Gaia, 2017. [Online]. Available: https://prt.sika.com/dms/getdocument.get/a4f9838f-bc11-4366-8259-4041b59e3c3c/sikadur_-32_ef.pdf.
- [50] S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda, “Ficha Técnica - S&P Resin 220 HP,” Amora, Portugal, 2019. [Online]. Available: https://www.sp-reinforcement.pt/sites/default/files/field_product_col_doc_file/pt_resin220hp_04022019.pdf.
- [51] TNO DIANA BV, “DIANA finite element analysis; Documentation release 10.3 (J. Manie (ed.),” 2019. [Online]. Available: <https://dianafea.com/manuals/d102/RelNot/RelNot.html>.
- [52] CNR, “Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements. CNR DT205/2007,” Roma, 2008.

ANEXO I – FICHAS TÉCNICAS DO MATERIAL CONSTITUINTE DE GFRP

Ficha técnica *Mat 600*:

DATA SHEET			
COMBI REINFORCEMENTS			
STYLE		WRS-800M450-3X1	
PRODUCT CODE:		2002	
TECHNICAL CHARACTERISTICS			
Glass composition	E-glass		
Weight per unit area	g/m2	1278	ISO 4605
Tolerance of the nominal value	%	+/-7	
Dry thickness	mm	1,26	
Composition:			
layer 1: chopped fibers	weight	450 g/m2	
	length	50mm/38tex	
layer 2: woven roving twill 3x1	weight	828 g/m2	
warp:	54,5%	1200 tex	
weft:	45,5%	1200 tex	
sewing thread: PES 75D	g/m2	10	
sewing pattern	trico, gauge 3,5		
Cloth width(std)(1)	cm	125	DIN EN 1773
Tolerance of the nominal value	%	+/-1,5	
Type of size	suitable for UP and EP resins		
Coupling agent	silane		
Moisture content	%	<0,15	DIN EN ISO 3344
Roll length (1)	m	40	
Tube diameter	mm	76	
SAFETY INSTRUCTION			
Toxicological behaviour	Toxicologically harmless, non-respirable		
PACKAGING			
Pallet weight	kg	800	
rolls per pallet	4x4=16		
STORAGE			
In original packing. Keep dry			
(1)other roll length and widths also available			

Ficha técnica *Roving* 9600 (parte 1/2):



OCV™ Reinforcements

PRODUCT INFORMATION

399

Single-End Roving for Pultrusion

PRODUCT DESCRIPTION

Single-End Rovings are produced by pulling individual fibers directly from the bushing and winding them onto a roving package ready for shipment. The uniform distribution of a proprietary sizing system ensures an excellent resin-to-glass binding through uniform distribution of the binding agent. This results in maximum strand integrity.

Single-End Rovings are manufactured using the T30® Roving state-of-the-art technology of Owens Corning, in conjunction with statistical process control in manufacturing facilities certified to ISO 9001.

PRODUCT APPLICATION

399 Roving is specifically designed for use in pultrusion applications in polyester, vinyl ester and epoxy resin systems.

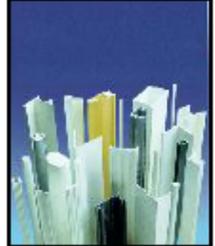
399 has been designed for processes needing very high tex such as ladder rails, pultruded structural shapes and grating systems.



© J. Sponga

FEATURES AND PRODUCT BENEFITS

<ul style="list-style-type: none"> • Excellent processing 	<ul style="list-style-type: none"> • 399 has no catenary, which means it will run out smoothly throughout the package under a variety of conditions and speeds. • 399 has been designed to run high tex with low fuzz properties that will result in smoother parts, less cleanup and improved machine efficiencies. • The Tack-Pak® packaging allows virtually 100 percent transfer efficiency.
<ul style="list-style-type: none"> • Multi-resin compatible 	<ul style="list-style-type: none"> • The silane-based sizing of 399 is designed for excellent adhesion with polyester, vinyl ester and epoxy resin systems. Multi-compatibility allows a change in resin systems without the need for the time consuming effort of changing glass in the creel.
<ul style="list-style-type: none"> • Excellent strand opening and spreading 	<ul style="list-style-type: none"> • 399 allows fast, uniform wet out of the strand in all resin systems. Fast wet out should allow for optimized part fabrication time, increased productivity and improved competitive position in the market.
<ul style="list-style-type: none"> • Available globally 	<ul style="list-style-type: none"> • 399 product line is available globally • Global availability allows for one product qualification rather than designing or modifying product or processes by region. • Global availability results in lower design and qualification costs.



Ficha técnica *Roving* 9600 (parte 2/2):

399

Single End Roving for Pultrusion

PRODUCT AVAILABILITY

Yield	Tex
52, 56, 62, 113, 207, 250	9600

MECHANICAL PROPERTIES

The following data was generated using production material 399 – 62 Yield (8000 tex)

Strand Tensiles : ASTM D 2343	Strength (MPa)	Strength (Ksi)
Epoxy resin	2270	330
Polyester F701 Resin	2204	320

Interlaminar Shear Strength NOL ring : ASTM D 2344	Dry shear strength (MPa)	Dry shear strength (psi)	shear strength Retention 72 hr boil (%)
Epoxy resin	58.8	8540	96%
Polyester F701 Resin	60.4	8770	85%

PACKAGING

Rovings are available in a single-end internal-pull package. Each pallet weighed about 1 ton. Pallets are stretch wrapped for load stability. All doffs are wrapped with Tack-Pak® or shrinkable film for protection during transport. Full doffs are available in weights between 20 kg (45 lb.) and 40 kg (88 lb.) and they can be packaged in bulk or Creel-Pak® format. More information is available in the Customer Acceptance Standards

STORAGE

Unless otherwise specified, it is recommended to store glass fiber products in a cool, dry area. The packaging is not waterproof. Be sure to protect the product from the weather and other sources of water. The glass fiber products must remain in their original packaging material until the point of usage. If these conditions are maintained, the glass fiber product should not undergo significant changes when stored for one year. Beyond one year after delivery, the product might evolve, specifically if stored outside the recommended conditions.

The best storage conditions are: temperatures between 22°C and 23°C and humidity between 60% and 65%.

The product should be stored in the workshop, within its original packaging, 48 hours prior to its utilization.



OCV Reinforcements

OWENS CORNING
COMPOSITE MATERIALS, LLC
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43659
1.800.GET.PINK™

www.owenscorning.com
www.ocvreinforcements.com

Contact:
SingleEndRovings.ocv@owenscorning.com

OWENS CORNING
FIBERGLAS, SPRL
166, CHAUSSEÉ DE LA HULPE
B-1170 BRUSSELS
BELGIUM
+32 267 48211

Contact:
SingleEndRovings.ocv@owenscorning.com

OWENS CORNING
OCV ASIA PACIFIC
SHANGHAI REGIONAL HEADQUARTERS
2F OLIVE LVO MANSION 620 HUA SHAN ROAD
SHANGHAI 200040
CHINA

+86 262 489 922
Contact:
SingleEndRovings.ocv@owenscorning.com

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this publication shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law safety code or insurance regulation.

Owens Corning reserves the right to modify this document without prior notice. ©2008 Owens Corning

SingleEndRovings_399_ww_06-2008_Rev 0

Ficha técnica *Combimat* 450/800 (parte 1/2):



OCV[™] Reinforcements

PRODUCT INFORMATION

Unifilo[®] for Pultrusion U527, U528, U529

PRODUCT DESCRIPTION

Unifilo[®] U528 is an Advantex[®] glass continuous strand mat of random orientation in multiple layers and held together by a binder. The Advantex[®] glass fiber combines the electrical and mechanical properties of traditional E-glass with the acid corrosion resistance of E-CR glass. Used for the manufacture of continuous profiles by pultrusion (compatible with UP, UP(V), EP and acrylic resins). Also used for the hot compression moulding of dielectrical laminates based on UP, UP(V) and EP resins.



© Cellite



© UDD

PRODUCT REFERENCE

Example : U528 450 -138
 U : Continuous strand mat (Unifilo[®])
 528 : Product classification code
 450 : Nominal weight per unit area (g/m²)

FEATURES AND PRODUCT BENEFITS

U528	<ul style="list-style-type: none"> • High tensile strength at temperature and in styrene • Easy processing (two faces well bound, easy splicing) • Very good mechanical and dielectrical properties of molded sheets • White color of the mat
U527	<ul style="list-style-type: none"> • Soft version for an easier conformability
U 529	<ul style="list-style-type: none"> • Stiff version for an improved tensile strength

TECHNICAL CHARACTERISTICS (NOMINAL VALUES)

REF.	BASIC SIZE	SOLUBILITY IN STYRENE	LINEAR WEIGHT OF BASIC STRANDS (TEX)	LOSS ON IGNITION (%)	TENSILE STRENGTH (N) ^a	MOISTURE CONTENT (%)
			Iso 1889	Iso 1887	Iso 3342	Iso 3344
U527	Silane	Very low	25	4.4 4	300 g/m ² : 70 450 g/m ² : 100	< 0.15
U528	Silane	Very low	25	6 5.5 4.6 4.2	225 g/m ² : 70 300 g/m ² : 100 450 g/m ² : 140 600 g/m ² : 160	< 0.15
U529	Silane	Very low	25	6.2 5.8	225 g/m ² : 80 300 g/m ² : 100	< 0.15

Ficha técnica *Combimat* 450/800 (parte 2/2):

Unifilo® for Pultrusion

U527, U528, U529

VISUAL CHARACTERISTICS OR POSSIBLE DEFECTS

- Type A: coarse strands
- Type B: cluster of glass fibre
- Type C: water spots
- Type D: binder spots, dirt and foreign matters (diameter below 30 mm)
- Type E: hole

Maximum number of defects allowed: each 100 lm Unifilo® roll section may contain at most 5 of the above listed defects

PRODUCT AVAILABILITY

APPROXIMATE DIMENSIONS OF FULL* ROLL, 100 CM WIDE				
ROLL WIDTH	STANDARD WEIGHTS	<ul style="list-style-type: none"> • <full roll>: a roll having a guaranteed length of at least 90% of the value indicated above. • Minimum number of full rolls in each delivery: 60 % 		
(cm)	(g/m ²)	Diameter (cm)	Nominal length (m)	Nominal weight (kg)
100	300	55	260	78
	450	55	170	77
	600	55	130	78

Available in widths from 50 to 300 cm.
 Upon customer's request, pultrusion Unifilo® rolls may be slit into widths ranging from a minimum of 9 cm to a maximum of 50 cm. These slits are delivered in cardboard boxes (9 - 39 cm) or as mini-rolls (40 - 50 cm).
 An extra charge will be applied for these slits from 9 to 50 cm.

PACKAGING

- Each roll of Unifilo® is wound up onto a cardboard tube of 0.7 kg/m with 103 mm internal diameter, then individually wrapped with a transparent protective film.
- Pallet type:
 - Rolls ≤ 205 cm width: standard pallet (vertical rolls 14 x 114cm)
 - Rolls > 205 cm width: wooden crate (horizontal rolls).
- Pallet protection:
 - Standard pallet = shrink-wrapped (cardboard base and cover)
 - Wooden crate = each roll packaged in a polyethylene bag.

LABELING

- Each roll carries an information label with product reference.
- Each pallet carries also an information label with: product reference, gross and net weights, the number of rolls on the pallet and their net weight.

STORAGE

Unifilo® mat must be stored in its original packaging in a place with no humidity and heat. The best conditions are temperatures between 15 and 35°C and a relative humidity level between 35 and 85%. If the product is stored at lower temperature (below 15°C), we recommend to condition it inside the workshop for at least 24 hours prior using, to prevent condensation.

On site stacking of pallets is possible on (1/1) only. Please use a plywood plank between the two pallets to avoid damage the lower pallet.

Contact
 Unifilo.ovamericas@owenscorning.com

Unifilo.ovemea@owenscorning.com

Unifilo.ovcap@owenscorning.com



OWENS CORNING
COMPOSITE MATERIALS, LLC
 ONE OWENS CORNING PARKWAY
 TOLEDO, OHIO 43659
 1.800.GET.PINK™
 www.owenscorning.com
 www.ovreinforcements.com

EUROPEAN OWENS CORNING
FIBERGLAS, SPRL.
 166, CHAUSSEE DE LA HULPE
 B-1170 BRUSSELS
 BELGIUM
 +32.2.674.82.11

OWENS CORNING - OCV ASIA PACIFIC
SHANGHAI REGIONAL HEADQUARTERS
 2F OLIVE LVO. MANSION
 620 HUA SHAN ROAD
 SHANGHAI 200040
 CHINA
 +86.21.62489922

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this publication shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law safety code or insurance regulation.

Pub. No. 10010965-B. Owens Corning reserves the right to modify this document without prior notice. ©2009 Owens Corning.
 Unifilo_U500_vwv_06-2008_Rev3

ANEXO II – ENSAIOS DE COMPRESSÃO DO FRC**Tabela 50.** Resultados obtidos nos ensaios de compressão do FRC.

Betonagem	Provete	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	Diâmetro [mm]	f_{cm} [MPa]	E [GPa]
M1	1	517.17	148.67	52.65	29.49
	2	516.03	149.67	50.35	25.98
	3	772.73	149.67	45.60	25.26
	4	1049.26	149.33	49.19	-
	5	1063.85	150.0	50.29	-
	Média	870.34 (4.36%)	149.7 (0.30%)	49.61 (4.64%)	26.91 (6.87%)
M2	1	803.50	149.33	45.88	-
	2	861.60	148.33	49.86	27.52
	3	858.60	149	49.24	27.41
	4	821.00	148.67	47.30	26.22
	Média	836.18 (2.96%)	148.83 (0.25%)	48.07 (3.29%)	27.05 (2.18%)
M3	1	761.30	148.33	44.05	-
	2	822.80	149.33	46.98	27.09
	3	825.40	149.33	47.13	25.58
	4	804.00	149.33	45.90	27.29
	Média	803.38 (3.19%)	149.8 (0.29%)	46.02 (2.67%)	26.65 (2.86%)
M4	1	746.50	149.67	42.43	-
	2	775.80	149.67	44.10	25.66
	3	789.10	149.67	44.85	22.93
	4	729.80	149.33	41.67	24.81
	Média	760.30 (3.08%)	149.58 (10%)	43.26 (2.94%)	24.47 (4.66%)

Nota: Os valores apresentados dentro de parênteses representam o coeficiente de variação.

ANEXO III – ENSAIOS DE FLEXÃO DO FRC

No presente anexo são apresentadas as dimensões, os resultados obtidos de todos os provetes ensaiados, incluído representação gráfica da força *vs.* deslocamento e força *vs.* CMOD e o estado pós ensaio dos provetes. No que diz respeito as dimensões dos provetes, durante a preparação do ensaio foi pesado os provetes, medido o comprimento total dos provetes (L) sendo de 60.5 centímetros, medido em 3 pontos diferentes do provete a largura de base (B) e altura do provete (H). Estes valores medidos encontram-se na

Tabela 51. A geometria do entalhe também foi necessário medir, recorrendo a um paquímetro, sendo que a altura do entalhe (HSP) e a sua largura (BSP) foi medida nas extremidades da largura do provete. As dimensões medidas encontram-se na Tabela 52

Tabela 51. Dimensões dos provetes prismáticos

Provete	Peso [kg]	L [mm]	B1 [mm]	H1 [mm]	B2 [mm]	H2 [mm]	B3 [mm]	H3 [mm]	B Médio [mm]	H Médio [mm]
M1_P1	31.36	60.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M1_P2	31.06	60.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M1_P3	31.72	60.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M1_P4	31.44	60.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M2_P1	31.20	60.5	15.0	15.0	15.2	15.0	15.1	15.0	15.1	15.0
M2_P2	31.20	60.5	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M2_P3	30.98	60.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.2	15.0	15.0
M2_P4	31.04	60.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M3_P1	30.76	60.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M3_P2	31.06	60.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M3_P3	31.58	60.5	14.9	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M3_P4	31.56	60.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M4_P1	31.00	60.5	15.0	15.0	15.1	15.0	15.0	15.1	15.0	15.0
M4_P2	31.30	60.5	15.1	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0	15.1	15.0
M4_P3	31.40	60.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
M4_P4	31.48	60.5	14.7	15.0	14.8	15.0	14.8	15.0	14.8	15.0

Tabela 52. Dimensões do entalhe dos provetes prismáticos

Provete	HSP 1 [mm]	HSP 2 [mm]	BSP 1 [mm]	BSP 2 [mm]	HSP Médio [mm]	BSP Médio [mm]
M1_P1	25.07	24.37	5.00	5.00	24.72	5.00
M1_P2	24.95	24.80	5.00	5.00	24.88	5.00
M1_P3	24.24	22.80	5.00	5.00	23.52	5.00
M1_P4	24.39	24.39	5.00	5.00	24.39	5.00
M2_P1	23.91	23.88	5.00	5.00	23.90	5.00
M2_P2	24.18	23.66	5.00	5.00	23.92	5.00
M2_P3	24.38	23.10	5.00	5.00	23.74	5.00
M2_P4	24.33	24.16	5.00	5.00	24.25	5.00
M3_P1	25.15	23.61	5.00	5.00	24.38	5.00
M3_P2	23.67	23.71	5.00	5.00	23.69	5.00
M3_P3	25.68	23.73	5.00	5.00	24.71	5.00
M3_P4	24.17	23.75	5.00	5.00	23.96	5.00
M4_P1	23.23	22.22	5.00	5.00	22.73	5.00
M4_P2	23.80	23.65	5.00	5.00	23.73	5.00
M4_P3	25.68	23.65	5.00	5.00	24.67	5.00
M4_P4	23.96	23.76	5.00	5.00	23.86	5.00

Resultados da primeira amassadura (M1):

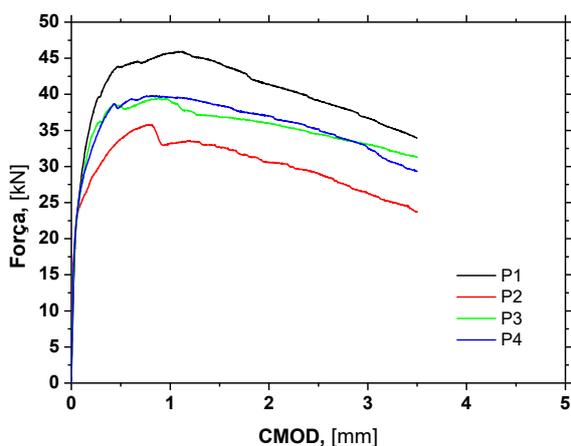


Figura 122. Representação gráfica Força vs. CMOD – Amassadura M1

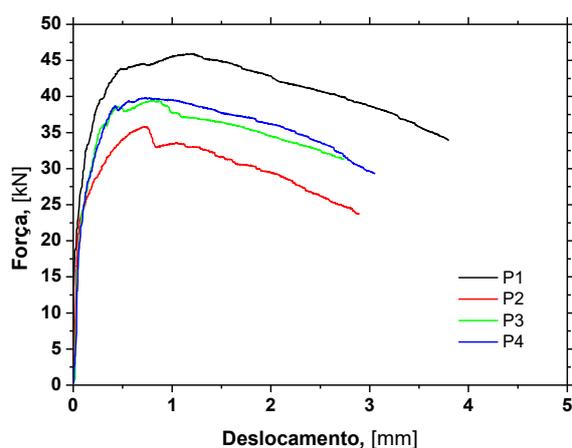


Figura 123. Representação gráfica Força vs. Deslocamento – Amassadura M1

Tabela 53. Resultados do ensaio à flexão dos provetes da amassadura M1

Provete	f_{ctL} [MPa]	d_L [mm]	f_{eq2} [MPa]	f_{eq3} [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
M1_P1	7.37	0.05	14.16	13.90	13.96	14.09	12.47	10.81
M1_P2	6.70	0.05	10.82	9.95	10.79	10.45	9.28	7.57
M1_P3	5.23	0.05	12.43	11.38	11.99	11.53	10.79	9.79
M1_P4	5.21	0.05	12.63	11.89	12.14	12.19	11.14	9.30
Média	6.13	0.05	12.51	11.78	12.22	12.07	10.92	9.37
CV	15.30%	1.15%	9.47%	12.02%	9.27%	10.99%	10.42%	12.48%

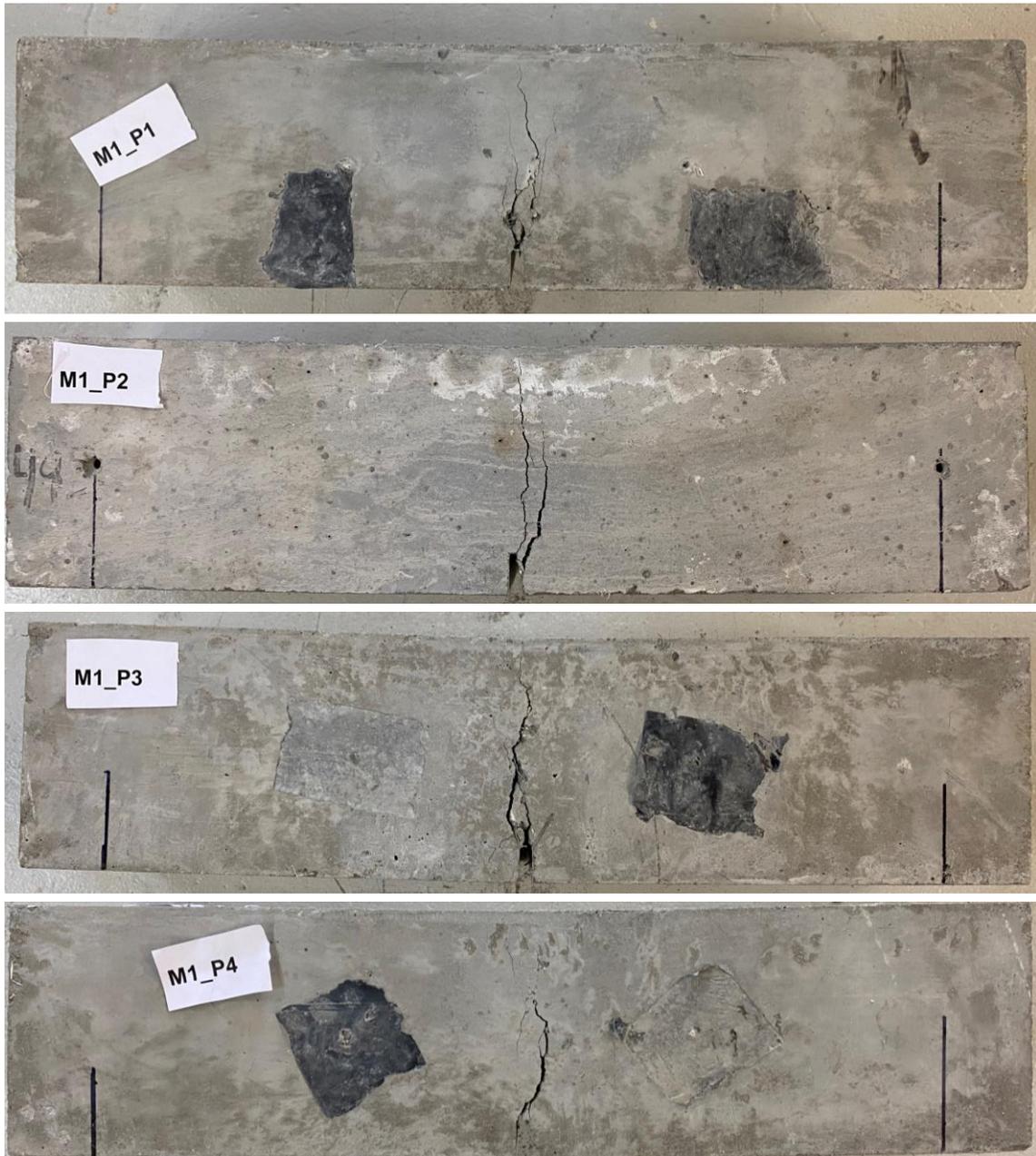


Figura 124. Estado dos provetes da amassadura M1 após o ensaio

Resultados da segunda amassadura (M2):

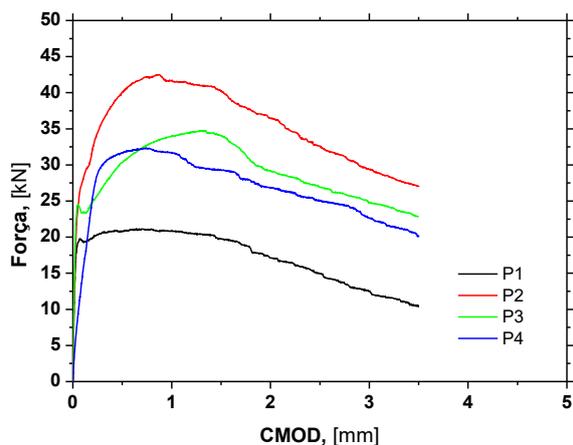


Figura 125. Representação gráfica Força vs. CMOD – Amassadura M2

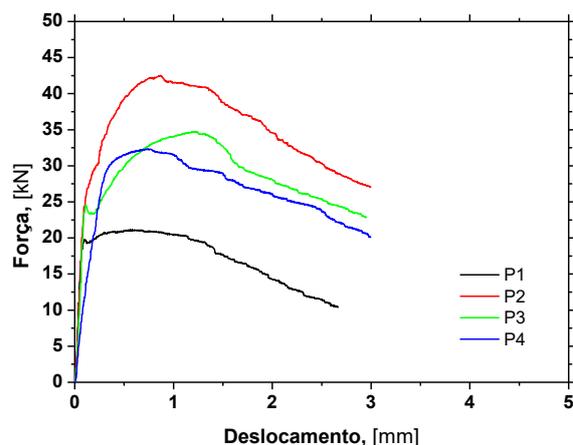


Figura 126. Representação gráfica Força vs. Deslocamento – Amassadura M2

Tabela 54. Resultados do ensaio à flexão dos provetes da amassadura M2

Provete	f_{ctL} [MPa]	d_L [mm]	f_{eq2} [MPa]	f_{eq3} [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
M2_P1	4.37	0.05	6.99	5.49	6.54	6.22	4.68	3.27
M2_P2	4.03	0.05	12.84	11.81	12.59	12.65	10.25	8.50
M2_P3	3.12	0.05	10.08	9.55	9.51	10.67	8.43	7.16
M2_P4	1.85	0.05	10.23	9.00	10.01	9.27	7.91	6.36
Média	3.34	0.05	10.03	8.96	9.66	9.70	7.82	6.32
CV	29.10%	1.25%	20.65%	25.26%	22.23%	24.15%	25.69%	30.36%

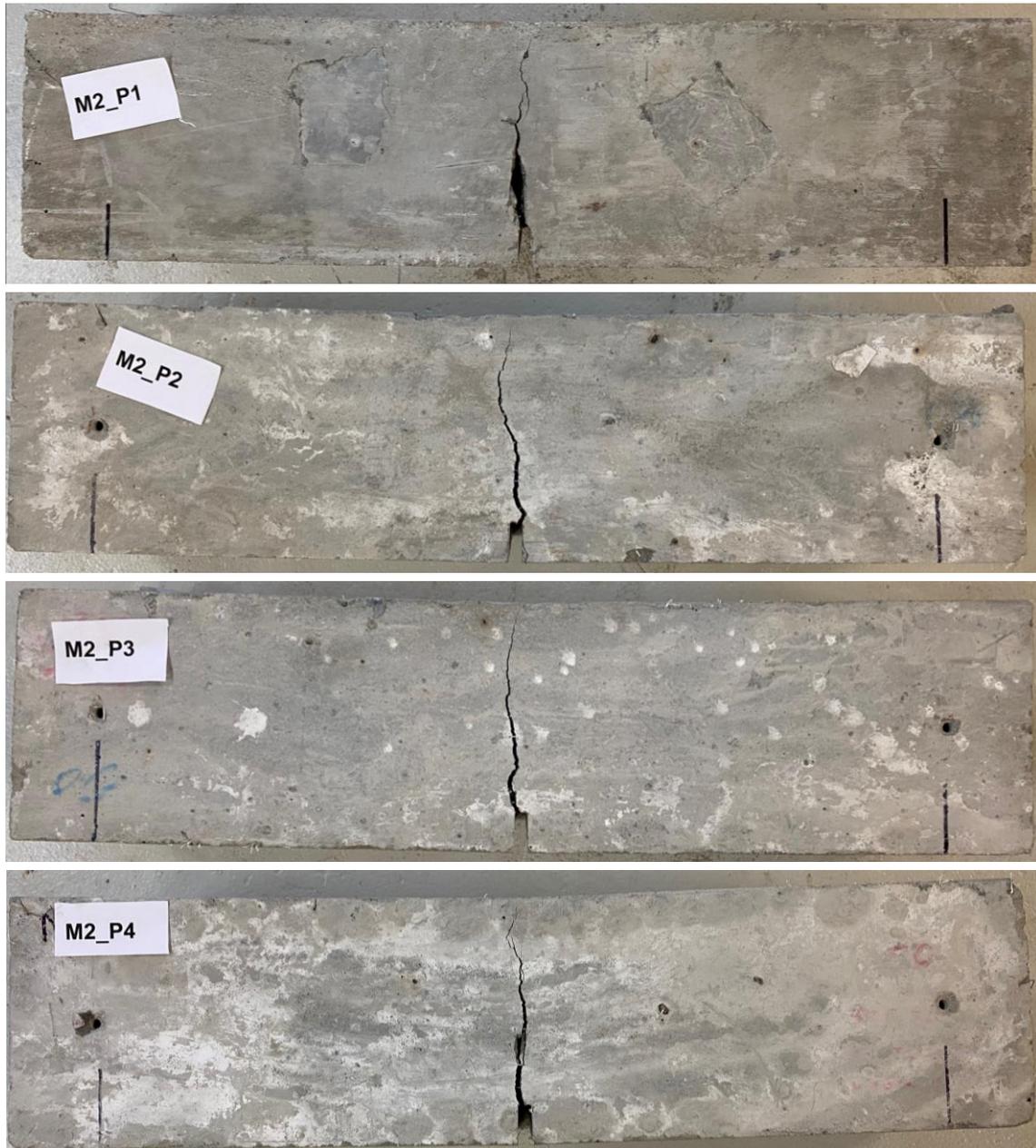


Figura 127. Estado dos provetes da amassadura M2 após o ensaio

Resultados da terceira amassadura (M3):

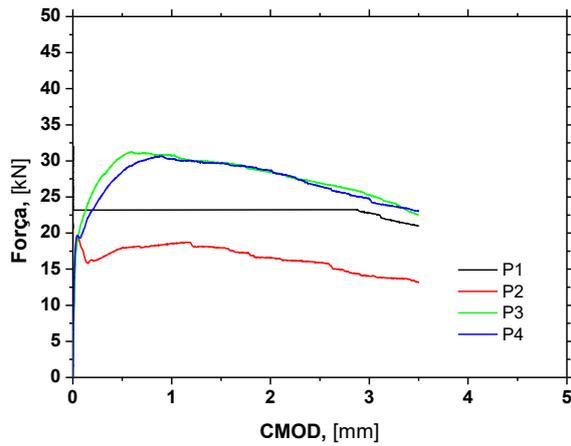


Figura 128. Representação gráfica Força vs. CMOD – Amassadura M3

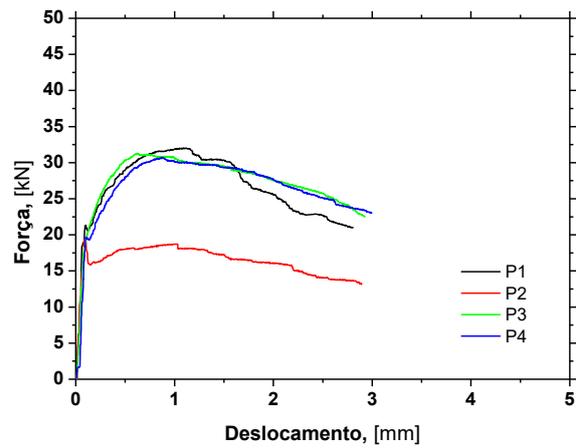


Figura 129. Representação gráfica Força vs. Deslocamento – Amassadura M3

Tabela 55. Resultados do ensaio à flexão dos provetes da amassadura M3

Provete	f_{ctL} [MPa]	d_L [mm]	f_{eq2} [MPa]	f_{eq3} [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
M3_P1	3.43	0.05	9.74	8.90	30.07	7.36	7.36	6.64
M3_P2	3.60	0.05	5.92	5.33	5.63	5.63	4.99	4.15
M3_P3	3.39	0.05	10.02	9.25	9.76	9.48	8.57	7.17
M3_P4	1.49	0.05	9.58	9.02	8.96	9.35	8.34	7.27
Média	2.98	0.05	8.82	8.12	13.60	7.95	7.32	6.31
CV	29.05%	2.61%	19.08%	19.91%	70.79%	19.94%	19.39%	20.11%

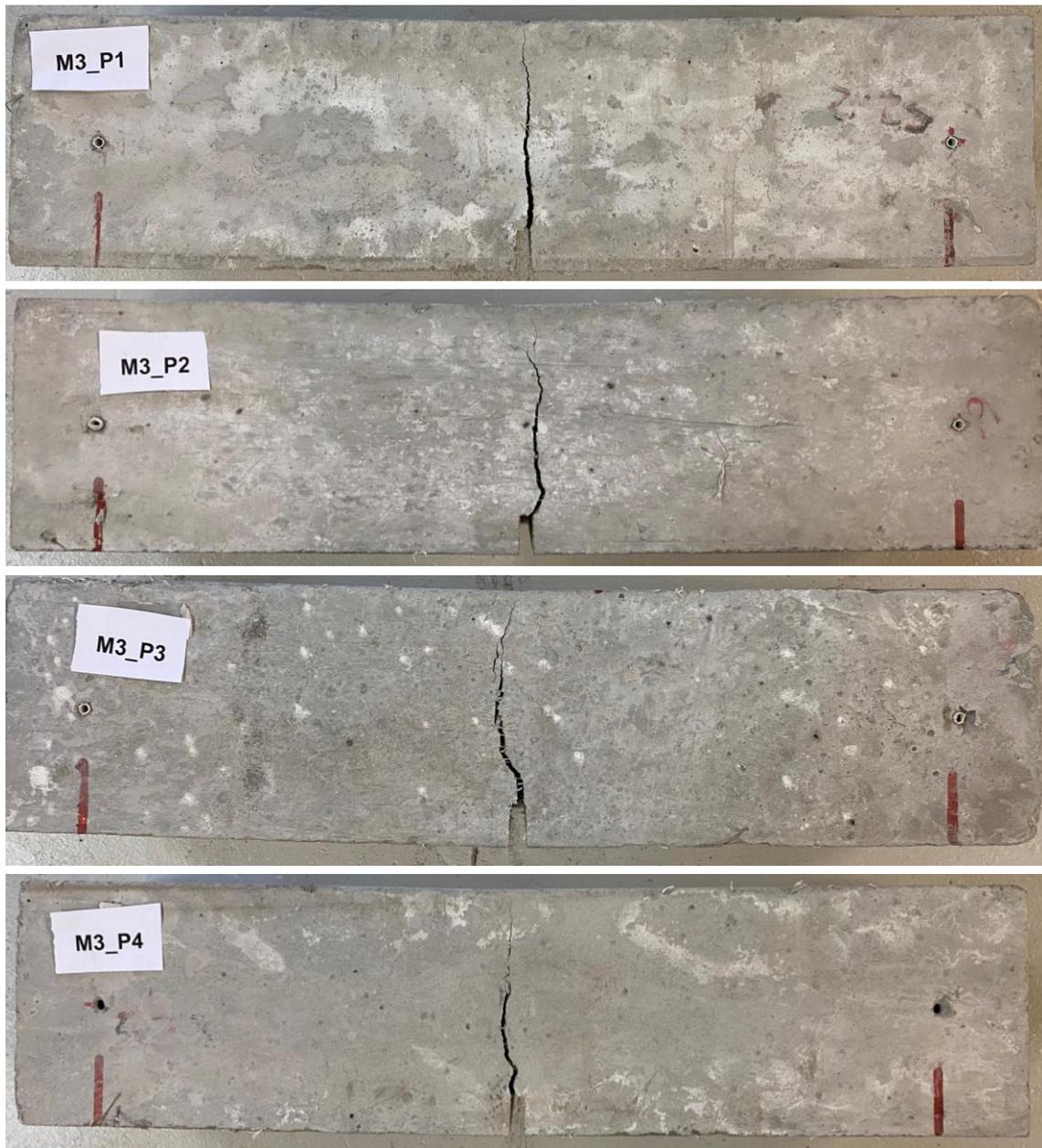


Figura 130. Estado dos provetes da amassadura M3 após o ensaio

Resultados da quarta e última amassadura (M4):

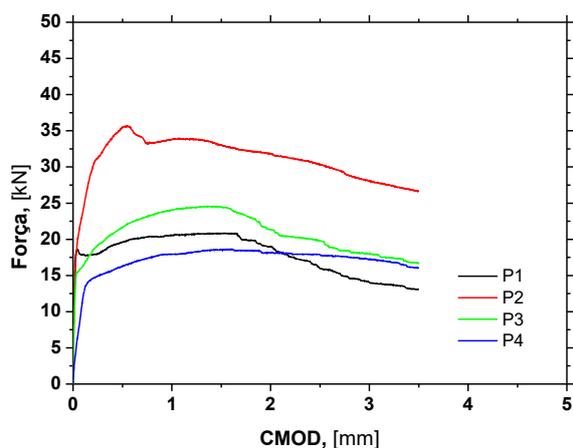


Figura 131. Representação gráfica Força vs. CMOD – Amassadura M4

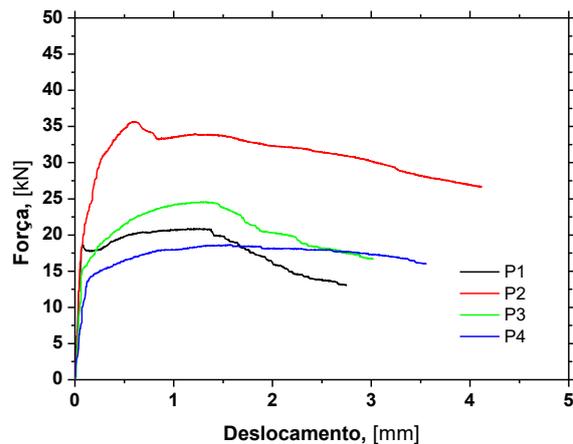


Figura 132. Representação gráfica Força vs. Deslocamento – Amassadura M4

Tabela 56. Resultados do ensaio à flexão dos provetes da amassadura M4

Provete	f_{ctL} [MPa]	d_L [mm]	f_{eq2} [MPa]	f_{eq3} [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
M4_P1	4.24	0.05	6.33	5.65	6.05	6.42	4.93	4.04
M4_P2	4.81	0.05	11.04	10.45	11.13	10.34	9.53	8.35
M4_P3	3.04	0.05	7.15	6.96	6.90	7.79	6.31	5.31
M4_P4	2.06	0.05	5.57	5.67	5.12	5.83	5.62	5.04
Média	3.54	0.05	7.52	7.18	7.30	7.60	6.60	5.69
CV	30.15%	1.43%	27.98%	27.29%	31.51%	22.88%	26.69%	28.31%

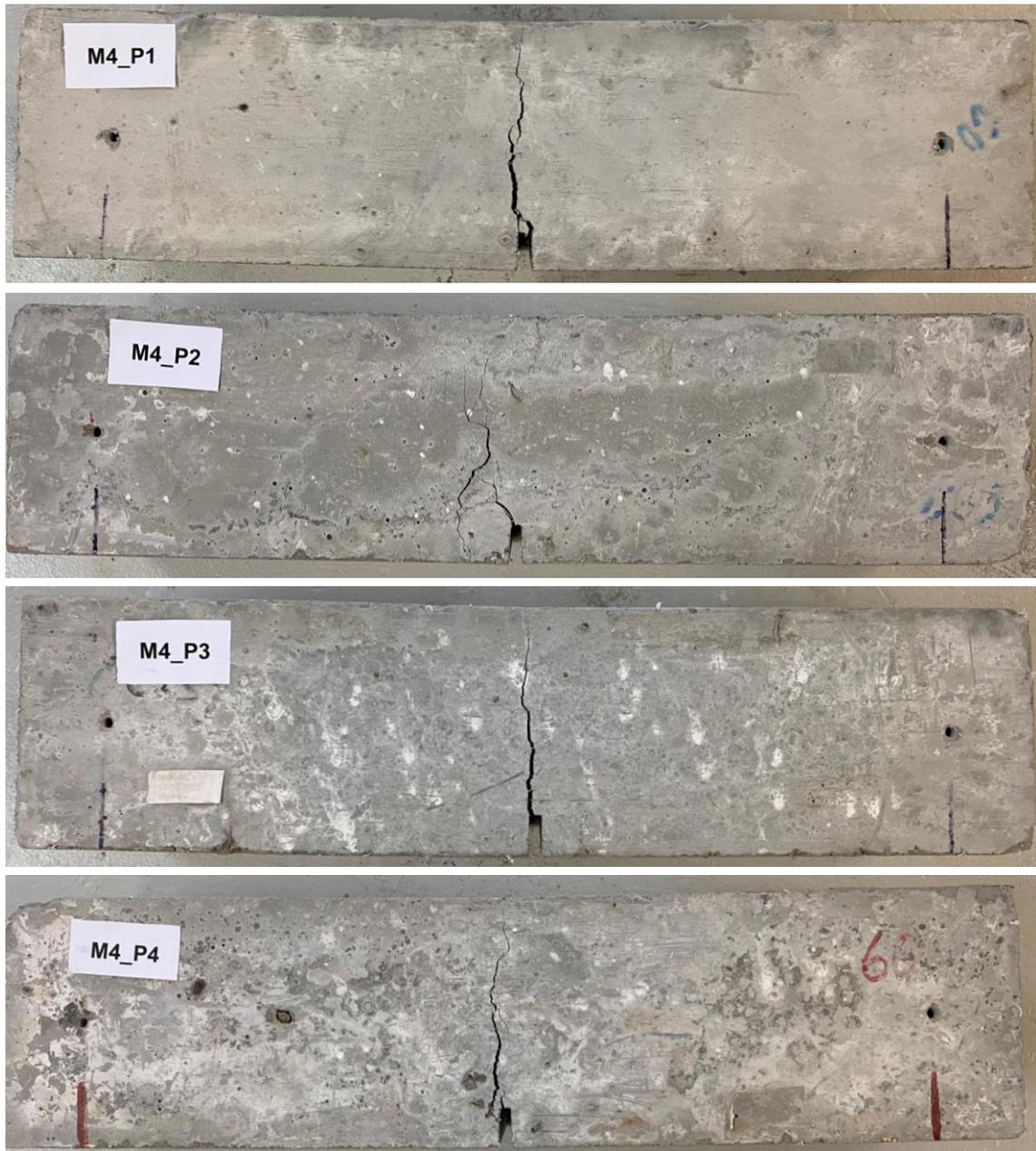


Figura 133. Estado dos provetes da amassadura M4 após o ensaio

ANEXO IV – ENSAIOS DE FLEXÃO DE VÃO VARIÁVEL

O presente anexo tem como objetivo apresentar os resultados gráficos e cálculos intermédios que levam ao cálculo da rigidez à flexão e ao corte dos restantes painéis, i.e., na Secção 3.2.1 apresenta-se a metodologia de cálculo aplicada ao caso do painel PE_1, as informações relativas aos restantes painéis encontram-se de seguida.

Resultados do painel PE_2:

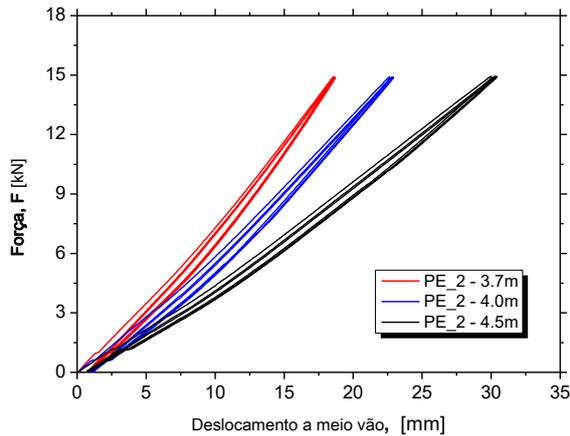


Figura 134. Resultado gráfico força vs. deslocamento a meio vão

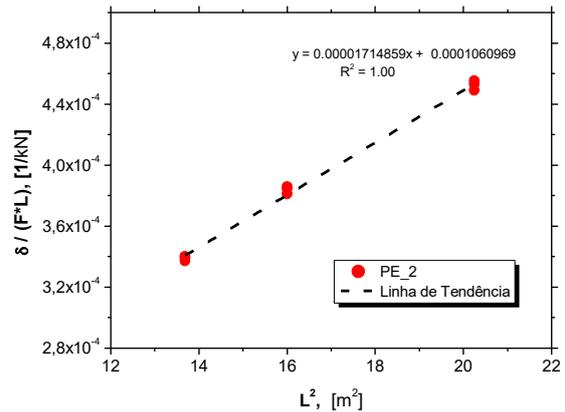


Figura 135. Resultado gráfico:

$$\frac{\delta_{\text{máx}}}{F_{\text{máx}} \cdot L} \text{ vs. } L^2$$

Tabela 57. Cálculo das coordenadas gráficas – Painel PE_2

L [m]	$F_{\text{máx}}$ [kN]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	Eixo das Ordenadas L^2 [m ²]	Eixo das abcissas $\frac{\delta_{\text{máx}}}{F_{\text{máx}} \cdot L}$ [1/kN]
3.7	14.89	18.57	13.69	3.37E-04
3.7	14.88	18.67	13.69	3.39E-04
3.7	14.88	18.73	13.69	3.40E-04
4.0	14.90	22.71	16.00	3.81E-04
4.0	14.90	22.90	16.00	3.84E-04
4.0	14.90	22.99	16.00	3.86E-04
4.5	14.94	30.17	20.25	4.49E-04
4.5	14.94	30.44	20.25	4.53E-04
4.5	14.93	30.58	20.25	4.55E-04

Resultados do painel PE_3:

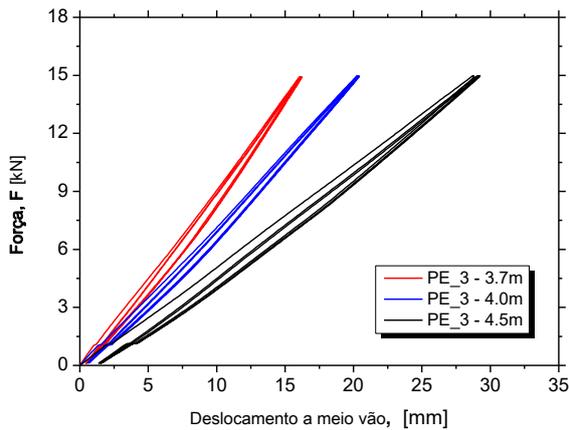


Figura 136. Resultado gráfico força vs. deslocamento a meio vão

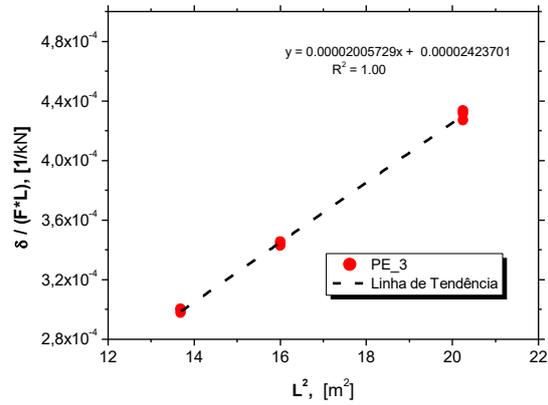


Figura 137. Resultado gráfico:

$$\frac{\delta_{\text{máx}}}{F_{\text{máx}} \cdot L} \text{ vs. } L^2$$

Tabela 58. Cálculo das coordenadas gráficas – Painel PE_3

L [m]	$F_{\text{máx}}$ [kN]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	Eixo das Ordenadas L^2 [m ²]	Eixo das abcissas $\frac{\delta_{\text{máx}}}{F_{\text{máx}} \cdot L}$ [1/kN]
3.7	14.92	16.44	13.69	2.98E-04
3.7	14.92	16.55	13.69	3.00E-04
3.7	14.92	16.59	13.69	3.01E-04
4.0	14.97	20.53	16.00	3.43E-04
4.0	14.97	20.63	16.00	3.45E-04
4.0	14.97	20.69	16.00	3.46E-04
4.5	14.98	28.78	20.25	4.27E-04
4.5	14.98	29.09	20.25	4.32E-04
4.5	14.98	29.23	20.25	4.34E-04

Resultados para o painel PE_4:

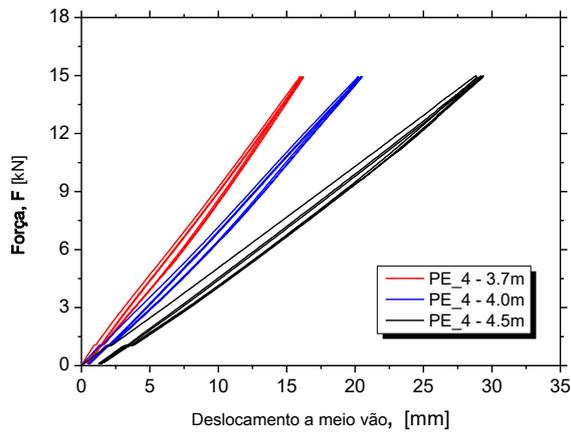


Figura 138. Resultado gráfico força vs. deslocamento a meio vão

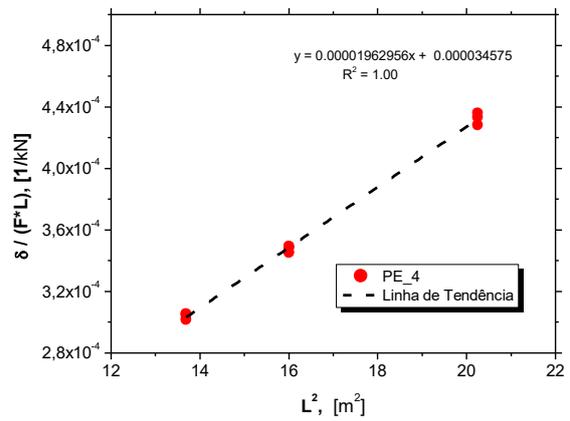


Figura 139. Resultado gráfico:

$$\frac{\delta_{\text{máx}}}{F_{\text{máx}} \cdot L} \text{ vs. } L^2$$

Tabela 59. Cálculo das coordenadas gráficas – Painel PE_4

L [m]	$F_{\text{máx}}$ [kN]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	Eixo das Ordenadas L^2 [m ²]	Eixo das abcissas $\frac{\delta_{\text{máx}}}{F_{\text{máx}} \cdot L}$ [1/kN]
3.7	14.94	16.68	13.69	3.02E-04
3.7	14.94	16.84	13.69	3.05E-04
3.7	14.93	16.89	13.69	3.06E-04
4.0	14.94	20.63	16.00	3.45E-04
4.0	14.94	20.81	16.00	3.48E-04
4.0	14.94	20.89	16.00	3.50E-04
4.5	14.98	28.86	20.25	4.28E-04
4.5	14.98	29.22	20.25	4.33E-04
4.5	14.98	29.38	20.25	4.36E-04

ANEXO V – ENSAIOS DE LIGAÇÃO PAINEL – PAINEL

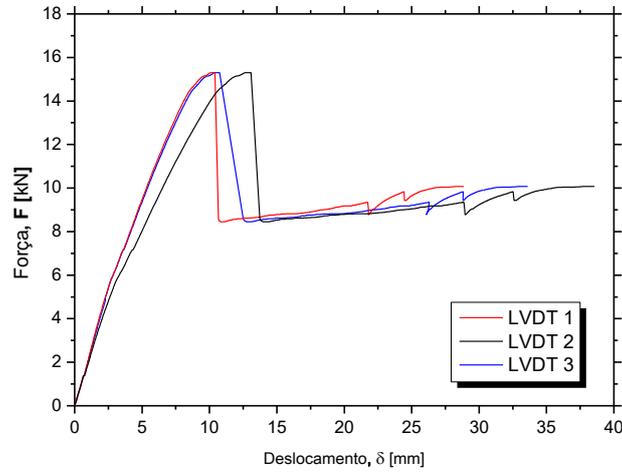


Figura 140. Resultado gráfico da força vs. deslocamento – Provete 2PP_01

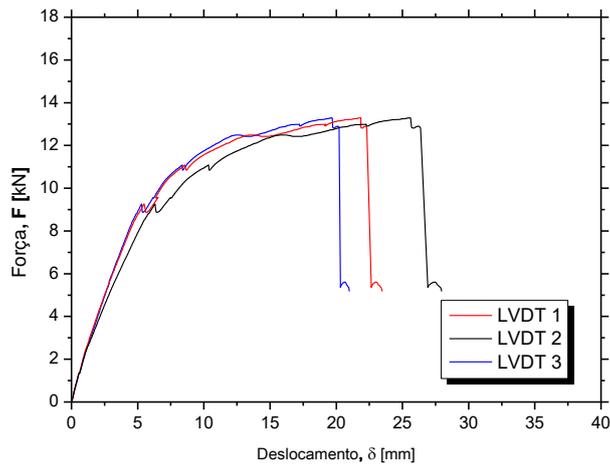


Figura 141. Resultado gráfico da força vs. deslocamento – Provete 2PP_02

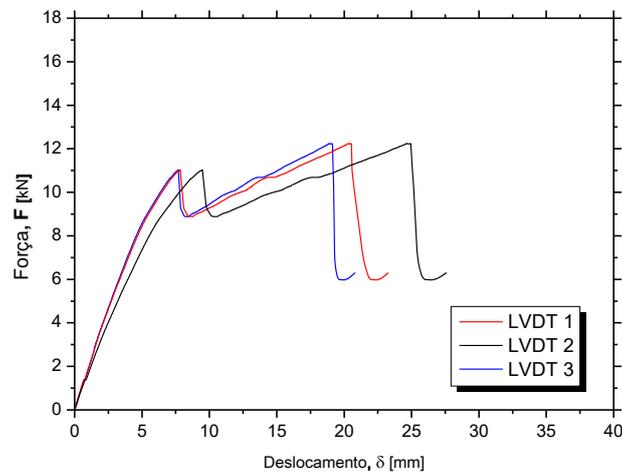


Figura 142. Resultado gráfico da força vs. deslocamento – Provete 2PP_03

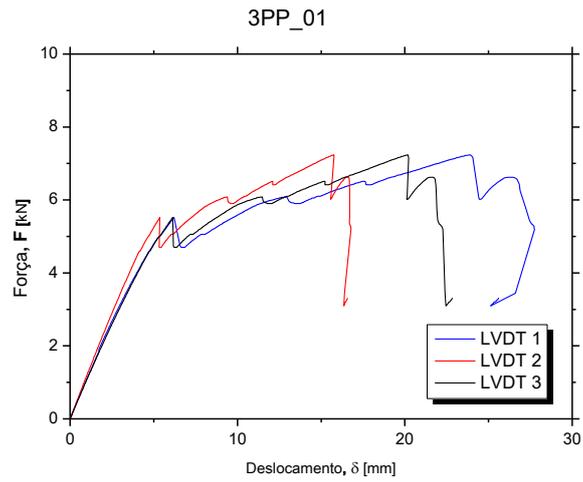


Figura 143. Resultado gráfico da força vs. deslocamento – Provete 3PP_01

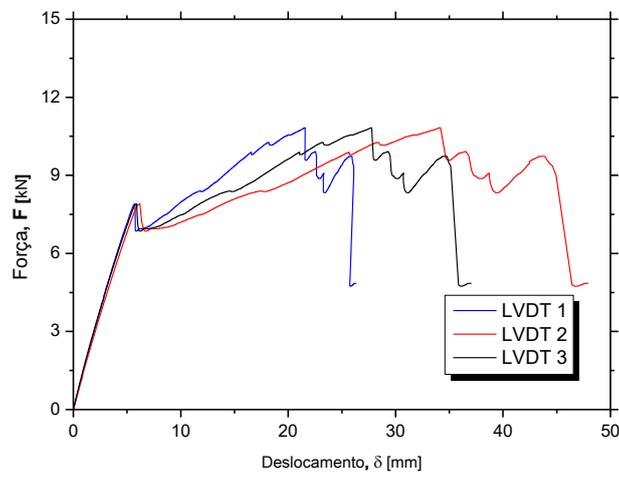


Figura 144. Resultado gráfico da força vs. deslocamento – Provete 3PP_02

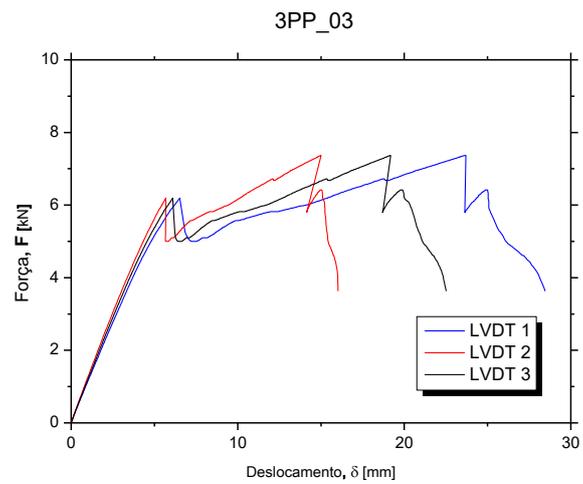


Figura 145. Resultado gráfico da força vs. deslocamento – Provete 3PP_03