



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL

DIOGO FREIRE DE ANDRADE PEYSSONNEAU NUNES
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

DESENVOLVIMENTO DE UM STUD EM FIBRA DE
CARBONO PARA UTILIZAÇÃO EM LIGAÇÃO LAJE-PILAR

Mestrado em Engenharia Civil
Universidade NOVA de Lisboa
Março 2024

DESENVOLVIMENTO DE UM STUD EM FIBRA DE CARBONO PARA UTILIZAÇÃO LAJE - PILAR

DIOGO FREIRE DE ANDRADE PEYSSONNEAU NUNES
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Orientador: Rui Pedro César Marreiros,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Coorientador: António Manuel Pinho Ramos,
Professor Catedrático, FCT-NOVA

Júri:

Presidente: João Carlos Gomes Rocha de Almeida,
Professor Associado, FCT-NOVA

Arguentes: Carla Alexandra da Cruz Marchão,
Professora Auxiliar, FCT-NOVA

Orientador: Rui Pedro César Marreiros,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
Março, 2024

DESENVOLVIMENTO DE UM STUD EM FIBRA DE CARBONO PARA UTILIZAÇÃO EM LAJE-PILAR

Copyright © DIOGO FREIRE DE ANDRADE PEYSSONNEAU NUNES, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Para a minha família Maria, Luís e Joana

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta tese teve o contributo importante de diversas pessoas, que de forma direta ou indireta ajudaram e apoiaram e a quem eu não quero deixar de prestar o meu profundo agradecimento.

Ao Professor Doutor Rui Marreiros, orientador científico desta dissertação, expresso o meu sincero agradecimento pela sua paciente orientação, as horas dedicadas a ouvir as minhas dúvidas e pela amizade e motivação que sempre me transmitiu.

Ao Professor Doutor António Pinho Ramos, co-orientador científico deste trabalho, é com prazer que reconheço os seus conselhos, sugestões, críticas e interesse, que foram fundamentais para o sucesso desta dissertação.

Às Empresas OXYBLACK, Mota-Engil nas pessoas dos Engenheiros Fernando Ferreira e Luís Nunes, respetivamente, agradeço a disponibilidade e fornecimento de materiais.

Ao Miguel Silva, orientador da produção de todas as peças produzidas em fibra de carbono nesta dissertação, que se destacou sempre na minha vida pela boa pessoa que é e como um bom amigo.

À minha família, Luís, Maria e Joana, que sempre me apoiou em todo o meu percurso de vida e investiu na minha formação académica.

Ao empenho e dedicação dos técnicos e amigos, responsáveis pelo laboratório de estruturas pesadas no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia Jorge Silverio e Vinícius Cordeiro.

À Maria Pulido, que me transmitiu informação crucial para a conceção dos desenhos técnicos.

À Amélia Murta e à Renata Sousa que estabeleceram o sucesso da cooperação com a Mota-Engil.

A toda a equipa da Mota-Engil, em Valongo, que ajudou na produção dos maciços.

E finalmente um especial obrigado ao meu Pai, que sempre se preocupou em transmitir a importância de uma formação digna de um grande futuro para os seus filhos.

*"Ninguém por ti trabalha se não fores tu,
Não podes ter a medalha sem esforço"
Mário Cotrim*

RESUMO

A dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um Stud em fibra de carbono destinado a ser utilizado em ligações laje-pilar, inserido em estruturas de betão armado. Este estudo insere-se num contexto prático, realçando a necessidade de ensaios até à rotura para uma adequada caracterização e seleção do tipo de fibra de carbono a utilizar, assim como ensaios de arrancamento, fundamentais para o desenvolvimento da geometria.

Os testes realizados revelaram resultados promissores relativamente ao desempenho dos protótipos do Stud, sugerindo que qualquer das soluções propostas para a cabeça do Stud em fibra de carbono alcançou o desempenho esperado. Adicionalmente, o material compósito demonstrou uma resistência consistente e adequada para a solução de ancoragem em estruturas de betão armado.

Em síntese, este trabalho de investigação contribui para o avanço na aplicação da fibra de carbono para potenciar a segurança e eficiência das estruturas construídas. Através da realização de vários ensaios, foi possível comprovar a viabilidade e o potencial deste material compósito em contexto prático, abrindo portas para a implementação de soluções mais seguras e sustentáveis no setor da construção civil.

Além disso, os resultados obtidos contribuem para o enriquecimento do conhecimento científico nesta área específica, fornecendo dados relevantes que podem ser utilizados como base para investigações futuras e desenvolvimento de novas tecnologias. Este estudo representa, assim, um passo na evolução da engenharia civil, promovendo a inovação e a melhoria contínua das práticas construtivas.

Palavras-chave: Stud, punçoamento, fibras de carbono, protótipo, ensaio de arrancamento

ABSTRACT

The main aim of this dissertation is to develop a carbon fibre Stud for use in slab-to-column connections in aircrete structures. This study is set in a practical context, highlighting the need for tests to failure in order to properly characterise and select the type of carbon fibre to be used, as well as pull-out tests, which are fundamental for developing the geometry.

The tests carried out revealed promising results regarding the performance of the Stud prototypes, suggesting that any of the proposed solutions for the carbon fibre Stud head achieved the expected performance. In addition, the composite material showed consistent and adequate resistance for the anchor-gem solution in reinforced concrete structures.

In summary, this research work contributes to advances in the application of carbon fibre to enhance the safety and efficiency of built structures. By carrying out various tests, it was possible to prove the viability and potential of this composite material in a practical context, opening doors to the implementation of safer and more sustainable solutions in the construction sector.

In addition, the results obtained contribute to enriching scientific knowledge in this specific area, providing relevant data that can be used as a basis for future research and the development of new technologies. This study thus represents a step in the evolution of civil engineering, promoting innovation and the continuous improvement of construction practices.

Keywords: Stud, punching, carbon fibres, prototype, pull-out test

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	IX
RESUMO.....	XII
ABSTRACT	XIV
ÍNDICE.....	XVI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIX
ÍNDICE DE TABELAS	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVO.....	1
1.3. ENVOLVIMENTO DE EMPRESAS	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	2
2. ESTADO DA ARTE.....	3
2.1. PUNÇOAMENTO.....	3
2.2. ESTRIBOS.....	6
2.3. STUDS.....	7
2.4. COMPÓSITO, FIBRA DE CARBONO	9
2.4.1. <i>Compósitos vs Compósitos Avançados</i>	9
2.4.2. <i>Vantagens e Desvantagens de um Compósito</i>	11
2.4.3. <i>Matriz</i>	12
2.4.4. <i>Fibras</i>	13
2.4.5. <i>Prepreg</i>	16
3. CONCEÇÃO DO STUD	18
3.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	18
3.2. CONFIGURAÇÕES E GEOMETRIAS.....	18
3.3. PRIMEIRO CONJUNTO DE ENSAIOS	23
3.3.1. <i>Provetes</i>	23
3.3.2. <i>Studs de aço</i>	26
3.3.3. <i>Ensaio (1). Laminado OXYBLACK: Plain 400 g/ m² Prepreg (e = 5mm)</i>	26
3.4. SEGUNDO CONJUNTO DE ENSAIOS	31
3.4.1. <i>Provetes</i>	31
3.4.2. <i>Ensaio (2). Laminado: UD 100 g/ m² Prepreg (e = 3mm)</i>	32

3.4.3.	<i>Ensaio (3). Laminado: Twill + UD, Prepreg (e = 5mm)</i>	42
4.	PROTÓTIPO PARA ENSAIO DE ARRANCAMENTO	52
4.1.	CARBONO	52
4.2.	DIMENSÃO	52
4.2.1.	<i>Alma</i>	52
4.2.2.	<i>Cabeça do Stud</i>	53
4.3.	PRODUÇÃO	58
5.	ENSAIO DE ARRANCAMENTO	64
5.1.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	64
5.1.1.	<i>Introdução</i>	64
5.1.2.	<i>Geometria dos Maciços de Betão</i>	65
5.1.3.	<i>Procedimento de Preparação dos Maciços</i>	67
5.1.4.	<i>Sistema de Ensaio e Instrumentação</i>	71
5.1.5.	<i>Caracterização do Betão</i>	75
5.2.	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	82
5.2.1.	<i>Protótipo PA</i>	82
5.2.2.	<i>Protótipo PB</i>	84
5.2.3.	<i>Protótipo PC</i>	86
5.2.4.	<i>Protótipo PD</i>	88
5.2.5.	<i>Resumo dos Resultados dos Protótipos</i>	91
5.3.	ANÁLISE DE RESULTADOS	93
6.	CONCLUSÕES	95
	BIBLIOGRAFIA	97
	A ANEXO	101

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PUNÇAMENTO DO TOPO DO PILAR ATRAVÉS DA LAJE DE BETÃO (ALCOBIA, 2015).....	4
FIGURA 2. VISTA SUPERIOR DOS ESPÉCIMES APÓS A FALHA (INÁCIO ET AL., 2015)	4
FIGURA 3. CORTES DE AMOSTRAS ENSAIADAS (INÁCIO ET AL., 2015).....	4
FIGURA 4. SOLUÇÕES PARA O EFEITO DE PUNÇAMENTO (ALCOBIA, 2015).....	5
FIGURA 5. ILUSTRAÇÃO DA ARMADURA DE ESFORÇO TRANSVERSO (ESTRIBOS)	6
FIGURA 6. PERDA DE TENSÃO NOS ESTRIBOS.....	6
FIGURA 7. VISUALIZAÇÃO DA ARMAÇÃO DE STUDS DE CORTE COM CABEÇA (ISUFI, 2018)	7
FIGURA 8. ILUSTRAÇÃO DE UMA CALHA PRÉ-FABRICADA TÍPICA (HALFEN)	8
FIGURA 9. CONDIÇÕES DE ANCORAGEM DOS STUDS	8
FIGURA 10. DIMENSÃO DO STUD COMUM ÀS EMPRESAS PRODUTORAS	9
FIGURA 11. COMPOSIÇÃO DE UM LAMINADO	10
FIGURA 12. REFORÇO DE 76 PILARES DO DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DE UTAH (UDOT), UTILIZANDO CAMADAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO	10
FIGURA 13. RETICULAÇÃO, LIGAÇÕES MOLECULARES.....	12
FIGURA 14. RESISTÊNCIA / DEFORMAÇÕES DAS FIBRAS.....	14
FIGURA 15. TECIDO PLAIN, DISTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS.....	16
FIGURA 16. TECIDO TWILL, DISTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS.....	16
FIGURA 17. MÁQUINA CNC.....	19
FIGURA 18. COMPOSIÇÃO DO LAMINADO (3)	20
FIGURA 19. PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO DO STUD	21
FIGURA 20. ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS E POSSÍVEIS ROTURAS DA PEÇA	22
FIGURA 21. COMPORTAMENTO DE UD NA PEÇA	22
FIGURA 22. PROVETE (1)	24
FIGURA 23. PORMENOR DOS PROVETES (1).....	25
FIGURA 24. ROTURA DO PROVETE 1 (A)	29
FIGURA 25. ROTURA DO PROVETE 1 (B).....	29
FIGURA 26. ROTURA DO PROVETE 1 (C)	29
FIGURA 27. PROVETE (2) E (3).....	31
FIGURA 28. PROVETE SEM PROTEÇÃO APÓS ENSAIO	34
FIGURA 29. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 2(A1)	36
FIGURA 30. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 2(A2)	36
FIGURA 31. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 2(A3)	36
FIGURA 32. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 2(B)	37
FIGURA 33. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 2(C).....	37
FIGURA 34. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 2(A1).....	38

FIGURA 35. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 2(A).....	38
FIGURA 36. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 2(A3).....	38
FIGURA 37. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 2(B).....	39
FIGURA 38. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 2(C).....	39
FIGURA 39. ROTURA DO PROVETE 2(A).....	40
FIGURA 40. DETALHE DA ROTURA DO PROVETE 2(A).....	40
FIGURA 41. PROVETE 2(B).....	40
FIGURA 42. ROTURA DO PROVETE 2 (C).....	40
FIGURA 43. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 3(A1).....	44
FIGURA 44. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 3(A2).....	44
FIGURA 45. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 3(A3).....	44
FIGURA 46. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 3(B1).....	45
FIGURA 47. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 3(B2).....	45
FIGURA 48. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 3(C1).....	45
FIGURA 49. EXTENSÃO DE CADA LADO DO PROVETE 3(C2).....	46
FIGURA 50. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 3(A1).....	46
FIGURA 51. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 3(A2).....	46
FIGURA 52. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 3(A3).....	47
FIGURA 53. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 3(B1).....	47
FIGURA 54. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 3(B2).....	47
FIGURA 55. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 3(C1).....	48
FIGURA 56. GRÁFICO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE 3(C2).....	48
FIGURA 57. ROTURA DO PROVETE 3(A).....	49
FIGURA 58. PORMENOR DA ROTURA DO PROVETE 3(A).....	49
FIGURA 59. ROTURA DAS LAYERS DO PROVETE 3(A).....	49
FIGURA 60. ROTURA DO PROVETE 3(B).....	50
FIGURA 61. ROTURA DAS LAYERS DO PROVETE 3(B).....	50
FIGURA 62. ROTURA DO PROVETE 3(C).....	50
FIGURA 63. ROTURA DAS LAYERS DO PROVETE 3(C).....	50
FIGURA 64. DIMENSÕES DA CABEÇA DO PROTÓTIPO EM MM.....	54
FIGURA 65. “PASTILHA DE FIXAÇÃO 1” CORRESPONDENTE AOS PROTÓTIPOS PA E PC.....	55
FIGURA 66. FIGURA (2) “PASTILHA DE FIXAÇÃO 2” CORRESPONDENTE AOS PROTÓTIPOS PB E PD.....	56
FIGURA 67. DESENHO DO STUD A.....	56
FIGURA 68. DESENHO DO STUD B.....	57
FIGURA 69. DESENHO DO STUD C.....	57
FIGURA 70. DESENHO DO STUD D.....	58
FIGURA 71. MODELO DE CADA PROTÓTIPO A SER PRODUZIDO.....	58
FIGURA 72. CORTE DO LAMINADO 3, NA CNC.....	59
FIGURA 73. PROTÓTIPOS TRATADOS POSTERIORMENTE AO CORTE NA CNC.....	59
FIGURA 74. PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS “PASTILHAS”.....	60
FIGURA 75. FIXAÇÃO DAS PASTILHAS A UM PROTÓTIPO ATRAVÉS DE GRAMPOS.....	61
FIGURA 76. ETAPAS DA PRODUÇÃO DA CABEÇA DE ARRANCAMENTO.....	62
FIGURA 77. APLICAÇÃO DA FITA TERMORETRÁTIL.....	62
FIGURA 78. PLANTA MACIÇO E DISPOSIÇÃO DOS PROTÓTIPOS, DIMENSÕES EM (M).....	65
FIGURA 79. ARMADURAS DOS MACIÇOS E DISPOSIÇÃO DOS PROTÓTIPOS, DIMENSÕES EM (M).....	66
FIGURA 80. COFRAGEM LUBRIFICADA.....	67

FIGURA 81. APLICAÇÃO DA ARMADURA COM ESPAÇADORES.....	67
FIGURA 82. POSICIONAMENTO DOS PROTÓTIPOS.....	68
FIGURA 83. GANCHOS PARA O MANUSEAMENTO DO MACIÇO.....	68
FIGURA 84. VIBRAÇÃO DO MACIÇO BETONADO.....	69
FIGURA 85. FIXAÇÃO DOS PROTÓTIPOS À ESTRUTURA DE MADEIRA.....	69
FIGURA 86. AJUSTE DA VERTICALIDADE DO PROTÓTIPO.....	70
FIGURA 87. DISPOSIÇÃO FINAL DOS MACIÇOS.....	70
FIGURA 88. PROVETES BETONADOS.....	71
FIGURA 89. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO.....	72
FIGURA 90. SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE FORÇA.....	72
FIGURA 91. TRATAMENTO DA LAJE.....	73
FIGURA 92. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO, VISTA EM PLANTA.....	73
FIGURA 93. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO, CORTE AA.....	74
FIGURA 94. PREPARAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS.....	74
FIGURA 95. PREPARAÇÃO DOS PROVETES.....	75
FIGURA 96. MISTURA BETÃO C30/37, MOTA-ENGIL.....	76
FIGURA 97. ENSAIO DE COMPRESSÃO.....	76
FIGURA 98. ROTURA DO PROVETE CÚBICO À COMPRESSÃO.....	77
FIGURA 99. FORÇA DE COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO, CUBOS 1, 2 E 3.....	77
FIGURA 100. ENSAIO DE COMPRESSÃO.....	78
FIGURA 101. ROTURA DO PROVETE CILÍNDRICO À COMPRESSÃO.....	79
FIGURA 102. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	81
FIGURA 103. ROTURA DO PROVETE CILÍNDRICO À COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	81
FIGURA 104. GRÁFICO TENSÃO/EXTENSÃO, PA.....	83
FIGURA 105. GRÁFICO FORÇA/DESLOCAMENTO SUPERIOR, PA.....	83
FIGURA 106. GRÁFICO FORÇA/ESCORREGAMENTO, PA.....	84
FIGURA 107. ROTURA DOS PROTÓTIPOS PA1, PA2 E PA3.....	84
FIGURA 108. GRÁFICO TENSÃO/EXTENSÃO, PB.....	85
FIGURA 109. GRÁFICO FORÇA/DESLOCAMENTO SUPERIOR, PB.....	85
FIGURA 110. GRÁFICO FORÇA/ESCORREGAMENTO, PB.....	86
FIGURA 111. ROTURA DOS PROTÓTIPOS PB1, PB2 E PB3.....	86
FIGURA 112. GRÁFICO TENSÃO/EXTENSÃO, PC.....	87
FIGURA 113. GRÁFICO FORÇA/DESLOCAMENTO SUPERIOR, PC.....	87
FIGURA 114. GRÁFICO FORÇA/ESCORREGAMENTO, PC.....	88
FIGURA 115. ROTURA DOS PROTÓTIPOS PC1, PC2 E PC3.....	88
FIGURA 116. GRÁFICO TENSÃO/EXTENSÃO, PD.....	89
FIGURA 117. GRÁFICO FORÇA/DESLOCAMENTO SUPERIOR, PD.....	89
FIGURA 118. GRÁFICO FORÇA/ESCORREGAMENTO, PD.....	90
FIGURA 119. ROTURA DOS PROTÓTIPOS PD1, PD2 E PD3.....	90
FIGURA 120. FORÇAS DE ROTURA DOS PROTÓTIPOS.....	91
FIGURA 121. TENSÕES DE ROTURA DOS PROTÓTIPOS.....	91

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1. CARACTERÍSTICAS DA MATRIZ EPÓXI	13
TABELA 2. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS DOS LAMINADOS.....	23
TABELA 3. CARACTERÍSTICAS DE UM STUD DE AÇO STANDARD (ISUFI, 2018)	26
TABELA 4. RIGIDEZ TEÓRICA, LAMINADO (1).....	26
TABELA 5. FORÇAS DE ROTURAS TEÓRICAS, LAMINADO (1)	27
TABELA 6. RESULTADOS DO ENSAIO DO LAMINADO (1)	27
TABELA 7. MÓDULO DE YOUNG, LAMINADO (1), APÓS TRATAMENTO DE DADOS.....	29
TABELA 8. DADOS DO PREPREG UD 400 G/ M ²	32
TABELA 9. RESULTADOS DO ENSAIO DO LAMINADO (2)	33
TABELA 10. ROTURAS TEÓRICAS, LAMINADO (2)	34
TABELA 11. RESULTADOS DO ENSAIO DO LAMINADO (3)	42
TABELA 12. RESUMO DOS VALORES DA CARACTERIZAÇÃO DOS LAMINADOS	52
TABELA 13. VALORES MÉDIOS OBTIDOS A PARTIR DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS, LAMINADO 3.....	53
TABELA 14. DIMENSÕES DA CABEÇA DO STUD	55
TABELA 15. ENSAIO À COMPRESSÃO PURA DE PROVETES CÚBICOS (PRIMEIRO ENSAIO)	77
TABELA 16. ENSAIO À COMPRESSÃO PURA DE PROVETES CÚBICOS (SEGUNDO ENSAIO).....	79
TABELA 17. ENSAIO À COMPRESSÃO PURA DE PROVETES CILÍNDRICOS (SEGUNDO ENSAIO).....	80
TABELA 18. ENSAIO À COMPRESSÃO DIAMETRAL DE PROVETES CILÍNDRICOS (SEGUNDO ENSAIO)	81
TABELA 19. RESUMO DOS ENSAIOS CORRESPONDENTES AO PROTÓTIPO PA.....	82
TABELA 20. RESUMO DOS ENSAIOS CORRESPONDENTES AO PROTÓTIPO PB	84
TABELA 21. RESUMO DOS ENSAIOS CORRESPONDENTES AO PROTÓTIPO PC.....	86
TABELA 22. RESUMO DOS ENSAIOS CORRESPONDENTES AO PROTÓTIPO PD.....	88
TABELA 23. RESUMO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	92

1.1. Contexto e motivação

A dissertação ganhou um grande rumo a partir do momento que recebeu um interesse de colaboração por parte da empresa de compósitos OXYBLACK.

A partir daí, cresceu a vontade em explorar o que um material tão inovador como a fibra de carbono poderia oferecer relativamente a novas soluções construtivas. Já se desenvolveu bastante a utilização de fibra de carbono no ramo da construção civil; porém existe ainda margem para mais avanços, descobertas e aperfeiçoamentos de novas técnicas construtivas, com incorporação de materiais inovadores como a fibra de carbono.

Seria de especial interesse da empresa OXYBLACK o desenvolvimento de algo que fosse novo ou pouco explorado. O produto a ser desenvolvido teria de se enquadrar dentro da disponibilidade de produção da empresa, ser exclusivamente constituído por fibra de carbono, economicamente viável e de utilização abrangente, para que o produto pudesse vir a ser comercializado e ter uma boa perspectiva de venda.

Dentro de um vasto leque de ideias, foi-se criando alguma curiosidade relativamente à reabilitação de estruturas que necessitam de reforço ao punçoamento.

Sendo o reforço estrutural com fibras de carbono uma área já explorada e um dos requisitos da empresa a inovação, foi alterado o foco da área da reabilitação para o dimensionamento. Surgiu então a ideia do desenvolvimento de um Stud em fibra de carbono e daí nasceu um tema para dissertação, que foi visto tanto por parte da empresa como por parte dos orientadores como uma ideia com potencial. O que se revelou um assunto bastante complexo à medida que se foi aprofundando a investigação, como decorre da literatura deste documento.

1.2. Objetivo

A presente tese tem como objetivo o desenvolvimento de um Stud em fibra de carbono para utilização como armadura específica de punçoamento.

Perante este desafio, a dissertação enquadra-se dentro do domínio prático, prevalecendo a necessidade de ensaios até à rotura, para caracterização e escolha do tipo de carbono a utilizar, e ensaios de arrancamento, relevantes para o desenvolvimento da geometria.

Visto que não seria possível abranger toda a complexidade de ensaios para chegar a uma solução comercializável de um Stud em fibra de carbono, devido ao tempo semestral estipulado para a dissertação, a investigação teve como principal foco testar a capacidade de ancoragem do Stud desenvolvido. Como trabalhos futuros deverá aplicar-se a solução desenvolvida em lajes.

1.3. Envolvimento de Empresas

A colaboração entre a universidade e as empresas, que forneceram materiais essenciais, desempenhou um papel crucial no enriquecimento do desenvolvimento desta dissertação.

O apoio da OXYBLACK na produção das soluções testadas foi essencial. No entanto, para a execução de ensaios específicos, foi necessário o fornecimento de materiais de construção. Nesse contexto, a Mota-Engil desempenhou um papel fundamental ao garantir o fornecimento dos materiais necessários para os ensaios experimentais.

O comprometimento das empresas com o projeto foi notável, envolvendo reuniões regulares, suporte técnico e fornecimento de materiais. Essa colaboração estreita permitiu uma interação eficaz entre a parte académica e a indústria.

1.4. Organização do documento

O documento divide-se em seis capítulos, os quais são resumidos de seguida.

No capítulo 2 encontra-se a revisão bibliográfica. De seguida a organização do documento tenta sobretudo seguir a linha cronológica da realização dos ensaios e decisões tomadas durante o seu desenvolvimento.

O capítulo 3, Conceção do Stud, foca-se em investigar as características do material a ser utilizado no Stud. Após serem exploradas geometrias e configurações do material, são executados dois conjuntos de ensaios, dos quais 3.3, Primeiro Conjunto de Ensaios e 3.4 Segundo Conjunto de Ensaios.

No capítulo 4, denominado por Protótipo para o Ensaio de Arrancamento, são decididas as configurações finais das cabeças dos Studs. Foram estabelecidos 4 protótipos distintos a serem ensaiados, PA, PB, PC e PD.

No capítulo 5, Ensaio de Arrancamento, é descrita toda a campanha experimental dos ensaios finais.

Após analisar todos os ensaios, a investigação é concluída no capítulo 6.

2.1. Punçoamento

Neste capítulo, são revistos conceitos da literatura e de campanhas experimentais anteriores relevantes para esta dissertação.

A adoção de lajes de betão armado sem vigas é uma solução comum devido ao seu fator económico, de fácil e rápida construção. Este tipo de construção resulta em elementos mais simples e menos espessos, visto que a espessura do painel de laje é menor comparado com uma solução que necessite da altura de uma viga, permitindo uma utilização ótima e flexível do espaço. As vantagens particulares são:

- Baixos custos de cofragem;
- Elementos menos espessos, mais leves e mais estéticos;
- Maior facilidade de instalação de equipamentos sob as lajes (por exemplo, tubos ou condutas de ventilação);
- Maior flexibilidade para os arranjos interiores;
- A altura dos pisos pode ser reduzida.

Neste tipo de estruturas, um dos inconvenientes é o fenómeno de punçoamento, que surge pela concentração de esforços nos apoios da laje. O punçoamento pode ser visto como um caso particular de corte que poderá levar a uma rotura. Diz-se que ocorreu uma rotura por punçoamento numa laje quando se produz uma rotura no pilar onde a laje se apoia com forma tronco-piramidal, se o pilar for retangular ou com forma tronco-cónica, se o pilar for circular, tal como se pode observar na Figura 1 (Gouveia, 2013).

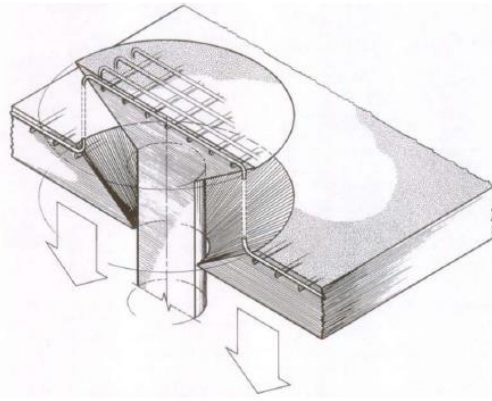


Figura 1. Punção do topo do pilar através da laje de betão (Alcobia, 2015)

Numa investigação experimental sobre o punção de lajes fungiformes de betão de alta resistência (HSC) sem armadura de corte (Inácio et al., 2015), foram moldados e testados três provetes de laje fungiforme com betão de alta resistência e um outro com betão de resistência normal. Através destes ensaios como se pode ver nas Figuras 2 e 3, foi possível obter uma sensibilidade prática do fenómeno de uma rotura por punção.

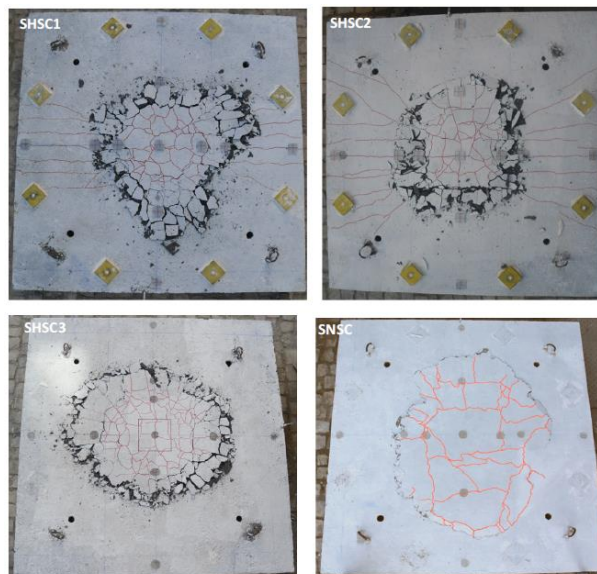


Figura 2. Vista superior dos espécimes após a falha (Inácio et al., 2015)

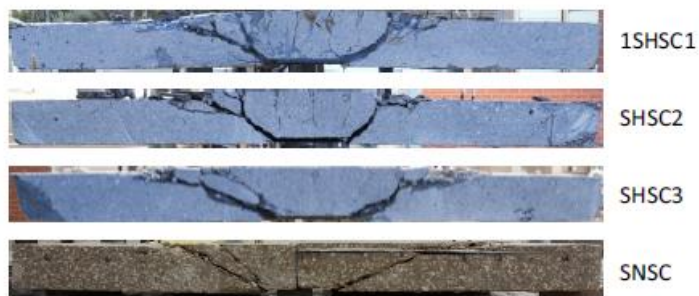


Figura 3. Cortes de amostras ensaiadas (Inácio et al., 2015)

As lajes fungiformes são suscetíveis ao colapso progressivo se não forem tomadas as medidas necessárias. A ocorrência de uma rotura por punçoamento numa ligação laje-pilar pode levar à rotura por punçoamento de ligações adjacentes ou de ligações em pisos inferiores, devido ao aumento da carga vertical e aos efeitos dinâmicos associados que ocorrem quando um painel de laje fungiforme cai quando deixado sem apoios suficientes.

Existem diversas técnicas para melhorar a capacidade resistente ao punçoamento, como por exemplo, Figura 4, a colocação de armaduras transversais na forma de estribos ou de Studs, a colocação de um capitel de betão, o aumento da espessura da laje ou da secção do pilar, utilização de pós-tensão ou mais recentemente o uso de betão reforçado com fibras (BRF). Cada uma das técnicas enumeradas apresenta vantagens e desvantagens.

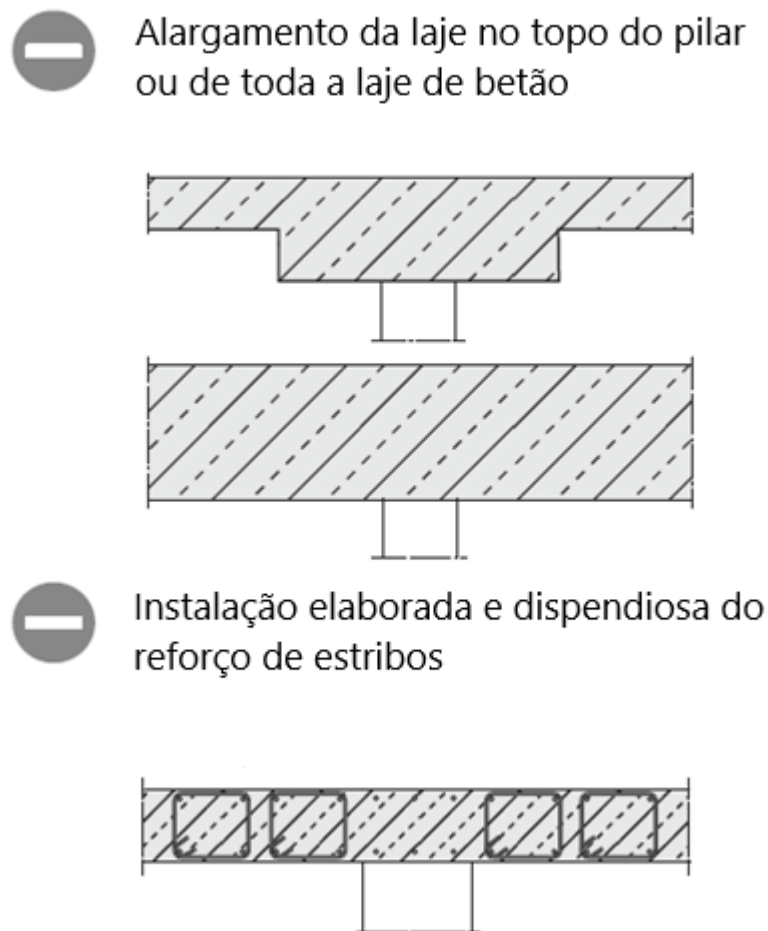


Figura 4. Soluções para o efeito de punçoamento (Alcobia, 2015)

No caso de situações em que se pretende melhorar o comportamento da laje de betão armado face ao efeito de punçoamento existem várias soluções, entre elas parafusos de aço pós-instalados, que revelam ser uma solução eficiente para o reforço de estruturas existentes, melhorando o comportamento estrutural e a resistência ao punçoamento (Almeida et al., 2019).

2.2. Estribos

Os estribos de aço, Figura 5, são um dos tipos mais comuns de armadura de corte, uma vez que podem ser facilmente produzidos no local com varões de armadura ordinárias, com a mesma técnica e equipamento utilizados para a armadura longitudinal. A sua utilização como armadura de corte é muito eficaz, aumentando a resistência ao efeito de corte e de dissipação de energia (Almeida et al., 2016).

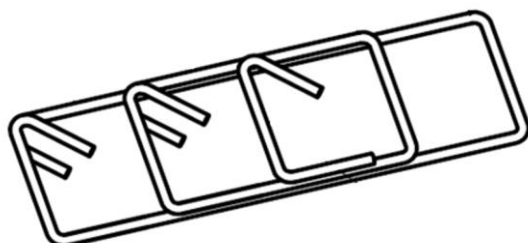


Figura 5. Ilustração da armadura de esforço transverso (estribos)

São reconhecidas as seguintes deficiências dos estribos:

- Perda de tensão devido a um apoio imperfeito nos varões da armadura longitudinal e devido ao arredondamento nos cantos, figura 6. Este fenómeno é descrito na norma ACI 421.1R-99 (ACI 1999).

- Dificuldade de produção e de colocação em obra de lajes com armaduras densas. Quando várias camadas de estribos fechados devem ser colocadas com um pequeno espaçamento, a vibração do betão torna-se difícil.

- Se a espessura da laje se mantiver inalterada, a profundidade efetiva da laje é reduzida em comparação com uma laje sem armadura de corte, porque os estribos envolvem a armadura de flexão. Por conseguinte, os requisitos de durabilidade são orientados pelo recobrimento dos estribos em vez do da armadura de flexão.

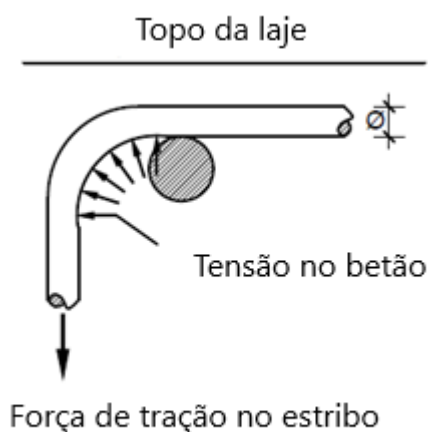


Figura 6. Perda de tensão nos estribos

Numerosos ensaios de punção centrado monotónico de provetes reforçados com estribos foram relatados na literatura, como por exemplo em (Seible, 1980); (Vollum, 2010); (Lips, 2012); (Hegger, 2017). Estes ensaios mostraram que, quando comparados com os provetes sem armadura de corte, a resistência das lajes fungiformes com estribos aumenta significativamente. No entanto, quando comparados com outros sistemas de armadura de punção, como com Studs (Park, 2012), os estribos nem sempre oferecem o maior aumento da capacidade.

2.3. Studs

Os Studs são barras (geralmente redondas) com cabeças alargadas integrais que servem para ancoragem, Figura 7, (Isufi, 2018). As cabeças podem ser soldadas ou forjadas. Os Studs com cabeça têm muitas aplicações em estruturas de betão armado, desde vigas com alma fina, a paredes de corte, vigas pré-fabricadas, etc. (Ghali e Youakim, 2005). São especialmente práticos e eficazes no aumento da resistência ao punção de lajes fungiformes e sapatas. Por vezes, os Studs são ligados com uma calha fina para formar um pente de conectores, Figura 8, que facilita a sua instalação.

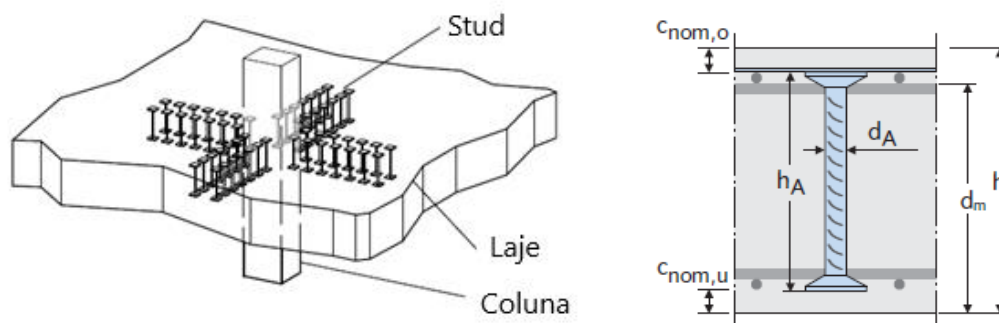


Figura 7. Visualização da armação de Studs de corte com cabeça (Isufi, 2018)

Os Studs demonstram ser muito eficazes tanto para o aumento da resistência ao punção como para o comportamento pós-elástico de ligações laje-pilar. O seu melhor comportamento em comparação com outros tipos de reforço de corte é geralmente atribuído às boas condições de ancoragem em ambas as extremidades do Stud. A utilização de Studs em edifícios é ainda mais encorajada pela sua vantagem na velocidade de construção. Na prática, são frequentemente utilizados como produtos próprios que estão prontos a ser colocados no local após a fixação da armadura longitudinal da laje.

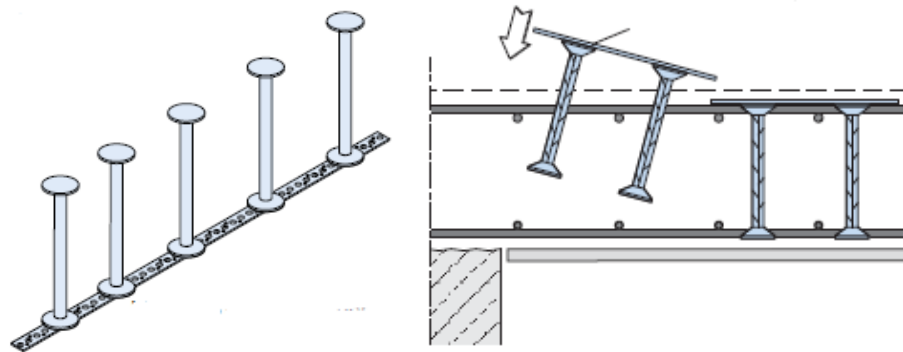


Figura 8. Ilustração de uma calha pré-fabricada típica (HALFEN)

Existem numerosos produtos comerciais, para os quais vários produtores concebem diferentes configurações da calha metálica de ligação dos Studs, com os seguintes objetivos:

- Facilidade de instalação (a unidade pré-fabricada assenta na armadura de flexão ou é estabilizada durante o fabrico, pelo que a instalação é simples);
- Minimização da influência no recobrimento do betão (a tira de ligação é geralmente fina e, em alguns produtos, podem ser fixadas tiras transversais para apoiar a unidade pré-fabricada nas barras para um maior recobrimento de betão);
- Melhor ancoragem;
- Flexibilidade para alterar o espaçamento e a disposição dos Studs no local (em alguns produtos, o espaçamento dos Studs pode ser ajustado fazendo deslizar os Studs na tira de ligação fina).

As condições de ancoragem dos Studs de corte são melhores do que as dos estribos, visto que o efeito da perda de tensão, tal como foi apresentado no ponto (2.2), não é relevante para Studs corretamente concebidos, Figura 9 (Ghali e Youakim, 2005). O diâmetro da cabeça deve ser de pelo menos 3ϕ de acordo com MC2010 (fib, 2013) e $\sqrt{10}\phi$ de acordo com ACI 318 (ACI 2014) para que o Stud desenvolva a sua tensão de cedência.

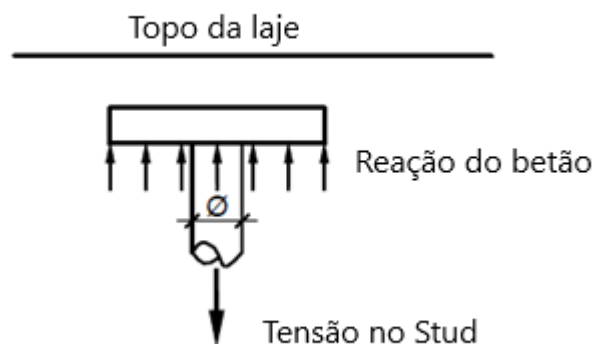


Figura 9. Condições de ancoragem dos Studs

O MC2010 (fib 2013) [2] e o ACI 318-14 (ACI 2014) reconhecem as propriedades superiores dos Studs em comparação com os estribos e fornecem recomendações que conduzem a uma resistência ao corte por punçoamento mais elevada quando são utilizados Studs.

O EC2 não dá indicações específicas para Studs, mas reconhece a possibilidade de utilizar produtos patenteados. Neste caso, recomenda que a resistência ao corte seja "determinada por ensaios em conformidade com a Aprovação Técnica Europeia relevante" (CEN 2004c).

Como método de análise foram verificadas as dimensões de Studs de várias empresas. Entre elas a HALFEN, a Cortarte e a Peikko foram as que receberam um maior foco.

Desta maneira foi reconhecida uma dimensão comum a todos os produtos das empresas produtoras de Studs. O diâmetro da cabeça deve ser de pelo menos 3ϕ , de acordo com estas empresas. Assim, tal como ilustra a Figura 10, é definida uma proporção a ser seguida.

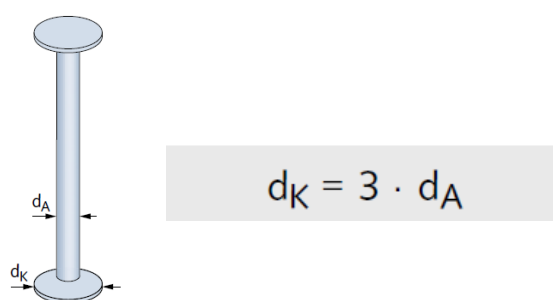


Figura 10. Dimensão do Stud comum às empresas produtoras

2.4. Compósito, Fibra de Carbono

2.4.1. Compósitos vs Compósitos Avançados

Os materiais compósitos são constituídos por dois ou mais materiais que trabalham em conjunto; cada material constituinte mantém a sua identidade única dentro do material compósito e contribui com as suas próprias propriedades estruturais, mas, após a combinação, o material resultante tem propriedades superiores às dos seus constituintes. Um bom exemplo de um material compósito é o betão. O betão é feito com quantidades específicas de areia e agregado, misturado com cimento para as unir. Se o betão fosse aberto para ver o seu interior, os constituintes individuais seriam visíveis. O tipo e as quantidades dos materiais individuais podem ser ajustados para dar ao betão resultante melhores propriedades de compressão, tração e/ou flexão, dependendo da aplicação.

Esta investigação centrou-se nos laminados, compósitos feitos a partir de uma combinação de fibras de reforço e de um material de matriz que une as fibras, Figura 11. A maioria dos "compósitos de matriz reforçada com fibras" de uso corrente são feitos com fibras de vidro curtas misturadas com um polímero ou matriz plástica ou resina: banheiras, chuveiros, pias, piscinas, portas, para-lamas e vários materiais de construção enquadram-se nesta categoria (Dorworth et al., 2019).



Figura 11. Composição de um laminado, adaptado de (Dorworth et al., 2019)

As estruturas compósitas altamente carregadas utilizam normalmente reforços contínuos ou de fibras longas que transferem cargas ao longo de feixes ou folhas (ou "camadas") de fibras dispostas ao longo do comprimento e da largura da estrutura, tal como as camadas de uma folha de contraplacado. Este tipo de disposição é normalmente utilizado no fabrico de estruturas como: barcos, pontes, pranchas de snowboard, quadros de bicicletas, carros de corrida e estruturas de aeronaves.

Os compósitos "avançados" são geralmente considerados como aqueles que utilizam reforços de fibra avançados, como a fibra de carbono e o Kevlar, e que apresentam rácios de resistência/peso elevados. São normalmente mais caros, com propriedades adaptadas com maior precisão para atingir um objetivo específico.



Figura 12. Reforço de 76 pilares do Departamento de Transportes de Utah (UDOT), utilizando camadas de polímero reforçado com fibra de carbono, extraído de (Dorworth et al., 2019)

As estruturas de engenharia civil estão a progredir de forma constante na utilização de compósitos. Os revestimentos de fibra de carbono para reparação e reforço de pilares, vigas, lajes de betão e estruturas de pontes têm-se tornado cada vez mais comuns, Figura 12. Estas soluções de reparação oferecem uma reparação resistente aos alcalinos que é normalmente mais rápida e menos dispendiosa de instalar devido ao seu peso reduzido. A fibra de carbono nos suportes dos cabos das pontes também está a progredir, oferecendo uma elevada resistência e rigidez com um peso mínimo.

2.4.2. Vantagens e Desvantagens de um Compósito

As vantagens de um compósito são as seguintes.

- Elevada resistência e relação rigidez/peso. As estruturas compósitas podem atingir rácios 4 a 10 vezes melhores do que as estruturas feitas de metais. No entanto, estas estruturas não são conseguidas facilmente, sendo necessárias muitas soluções de compromisso para obter estruturas verdadeiramente leves.

- Estruturas otimizadas. As fibras são orientadas e as camadas são colocadas numa sequência de empilhamento planeada para suportar cargas específicas e alcançar um desempenho estrutural preciso. Os materiais da matriz são escolhidos para satisfazer o ambiente de serviço a que as estruturas estão sujeitas, a matriz normalmente determina a capacidade de temperatura da peça.

- A fadiga não é um problema. A elevada vida útil à fadiga é uma das razões pelas quais os compósitos são comuns na construção de pás de rotores de helicópteros, no entanto, os compósitos podem apresentar algum comportamento à fadiga em torno dos locais de fixação. É necessário um design cuidadoso e um bom controlo do processo para garantir uma longa vida útil das juntas compósitas ligadas por adesivos e fixadas mecanicamente.

- Os materiais compósitos não sofrem corrosão. Daí a sua popularidade na indústria naval. Este aspeto também é pertinente para fábricas de produtos químicos, armazenamento e tubagem de combustível e outras aplicações que têm de resistir a ataques químicos.

- Facilmente moldáveis. Os materiais compósitos podem ser moldados em quase todas as formas, normalmente com bastante facilidade e sem compensações dispendiosas nas propriedades estruturais.

- Menos peças. As estruturas compósitas integradas substituem frequentemente conjuntos de várias peças, reduzindo drasticamente o número de peças e de fixadores, bem como os custos de aquisição e de fabrico. Por vezes, as montagens termoplásticas soldadas ou ligadas por adesivos podem eliminar quase completamente os fixadores, reduzindo ainda mais o número de peças e o tempo de produção.

As desvantagens de um compósito são as seguintes.

- Materiais caros. Os materiais e processos compósitos de elevado desempenho custam normalmente mais do que a madeira, o metal e o betão. O custo do petróleo e das matérias-primas à base de petróleo determina frequentemente o preço destes materiais.

- Armazenamento e manuseamento especiais. Muitos materiais, como as películas adesivas e os pré-impregnados, têm normalmente um tempo de trabalho limitado (out-time), normalmente medido em dias. A maioria dos pré-impregnados também requer armazenamento congelado e pode ter um prazo de validade limitado de alguns meses a um ano. A gestão de materiais é fundamental para estes materiais.

- Nem sempre são recicláveis. Embora exista alguma capacidade de reciclagem de compósitos termoplásticos, a reciclagem de compósitos em geral não é tão direta como a de metais, madeira ou plásticos não reforçados. A investigação continua a progredir neste domínio.

-Trabalho intensivo. A personalização das propriedades requer normalmente a colocação exata do material, quer através de colocação manual ou de processos automatizados. Cada etapa do processo pode exigir uma inspeção e/ou outra avaliação. Tudo isto requer mão de obra qualificada que, nalguns casos, pode ser dispendiosa.

-Elevados custos de equipamento. Fornos, autoclaves, prensas, controladores e software são dispendiosos de comprar e de operar. As máquinas automatizadas e os custos de programação podem representar um investimento considerável.

2.4.3. Matriz

A matriz atua para unir e/ou encapsular as fibras, permitindo a transferência de cargas de fibra para fibra. Também protege moderadamente as fibras da degradação devida a efeitos ambientais, incluindo: humidade, radiação ultravioleta (UV), ataque químico, abrasão e impactos.

A seleção de um material de matriz tem grande influência nas propriedades de corte de um laminado compósito, incluindo o corte interlaminar e o corte no plano. A resistência ao corte interlaminar é importante para estruturas que funcionam sob cargas de flexão, enquanto a resistência ao corte no plano é importante sob cargas de torção. A matriz também proporciona resistência à encurvadura das fibras num laminado sob cargas de compressão e, por isso, é considerada um fator importante na resistência à compressão de um compósito.

As resinas termoendurecidas são utilizadas principalmente em estruturas com cargas elevadas devido à sua elevada resistência e relativa facilidade de processamento. As resinas termoplásticas são utilizadas quando se pretende resistência ao impacto ou quando a produção de grandes volumes exige um material de processamento rápido. As matrizes metálicas e cerâmicas, como o titânio e o carbono, são consideradas principalmente para aplicações a temperaturas muito elevadas (>343° C).

Nas resinas termoendurecíveis, as moléculas reagem quimicamente e unem-se por reticulação, formando uma estrutura rígida e tridimensional em rede, Figura 13. Uma vez que estas ligações cruzadas são formadas durante a cura, as moléculas ficam bloqueadas e não podem ser fundidas ou remodeladas novamente pela aplicação de calor e pressão.

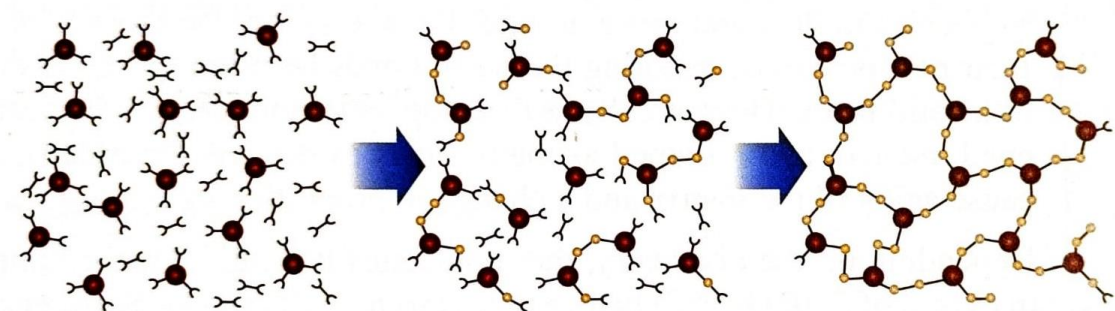


Figura 13. Reticulação, ligações moleculares

As resinas termoendurecíveis normalmente requerem tempo para reagir completamente ou "curar" a temperaturas que variam desde a temperatura ambiente até mais de 343°C. Exemplos de materiais de matriz termoendurecível incluem: poliéster, éster vinílico, poliuretano, epóxi, fenólico, éster de cianato, bismaleimida (BMI) e resinas de poliimida.

Na produção de todos os laminados utilizados na presente pesquisa, foi impregnada resina epóxi como matriz, a qual possui as propriedades apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características da matriz epóxi

Tensão de cedência	Módulo de Young	Alongamento na ruptura
[MPa]	[GPa]	[%]
48.3 - 89.6	2.7 - 3.7	2 - 3

2.4.4. Fibras

As propriedades mecânicas da maioria das fibras de reforço são consideravelmente mais elevadas do que as dos sistemas de resina não reforçada. As propriedades mecânicas do compósito fibra/resina são, por conseguinte, dominadas pela contribuição da fibra para o compósito.

Os quatro principais fatores que determinam a contribuição da fibra são

1. As propriedades mecânicas básicas da própria fibra.
2. A interação superficial entre a fibra e a resina.
3. A quantidade de fibra no compósito ("fração volumétrica de fibra").
4. A orientação das fibras no compósito.

A interação superficial entre a fibra e a resina é controlada pelo grau de ligação que existe entre as duas. Esta interação é fortemente influenciada pelo tratamento dado à superfície da fibra.

A quantidade de fibra no compósito é largamente determinada pelo processo de fabrico utilizado. No entanto, os tecidos de reforço com fibras muito compactadas darão Frações de Volume de Fibra (FVF) mais elevadas num laminado do que os tecidos fabricados com fibras mais grossas ou com grandes espaços entre os feixes de fibras. O diâmetro das fibras é um fator importante neste caso, sendo que as fibras mais caras e de menor diâmetro proporcionam áreas de superfície de fibra mais elevadas, distribuindo as cargas interfaciais fibra/matriz. Regra geral, a rigidez e a resistência de um laminado aumentam proporcionalmente à quantidade de fibras presentes. No entanto, acima de cerca de 60-70% de FVF (dependendo da forma como as fibras se agrupam), embora a rigidez à tração possa continuar a aumentar, a resistência do laminado atingirá um pico e depois começará a diminuir devido à falta de resina suficiente para manter as fibras devidamente unidas.

Finalmente, uma vez que as fibras de reforço são concebidas para serem carregadas ao longo do seu comprimento e não ao longo da sua largura, a orientação das fibras cria propriedades altamente "específicas de direção" no compósito. Esta característica anisotrópica dos compósitos pode ser utilizada com vantagem nos projetos, com a maioria das fibras a serem colocadas ao longo da orientação dos principais caminhos de carga. Isto minimiza a quantidade de material parasita que é colocado em orientações onde há pouca ou nenhuma carga.

As propriedades do compósito derivam das propriedades da fibra, mas também da forma como esta interage com o sistema de resina utilizado, das propriedades da própria resina, do volume de fibra no compósito e da sua orientação. Os diagramas que se seguem, Figura 14, mostram uma comparação básica dos principais tipos de fibra quando utilizados num pré-impregnado epóxi unidirecional típico de alto desempenho ("Guide to Composites," n.d.).

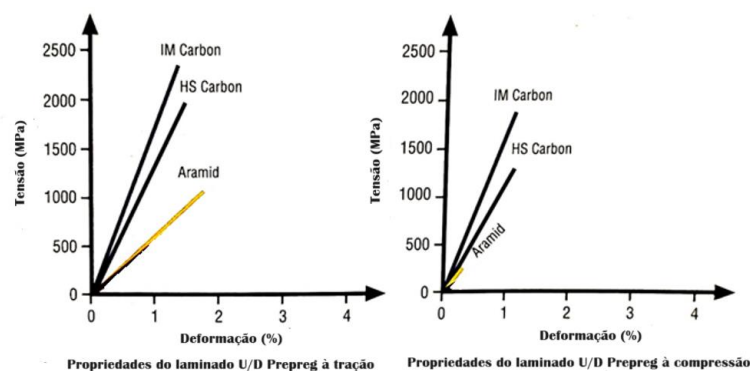


Figura 14. Resistência / deformações das fibras

Estes gráficos mostram as resistências e as deformações máximas dos diferentes compósitos na rotura. O gradiente de cada gráfico também indica a rigidez (módulo) do compósito: quanto mais acentuado for o gradiente, maior será a sua rigidez. Os gráficos também mostram que algumas fibras, como a aramida, apresentam propriedades muito diferentes quando carregadas em compressão, em comparação com o carregamento em tração.

Existem vários graus de fibras de carbono, (Epsilon Composites, n.d.):

- Alta Resistência / Módulo Padrão (HS), o grau mais comum;
- Módulo intermédio (IM);
- Módulo elevado (HM);
- Módulo ultra-alto (UHM).

Na produção de todos os laminados utilizados na presente pesquisa, foram utilizadas fibras de carbono de alta resistência (HS).

Em termos de compósito polimérico, um tecido é definido como um conjunto manufacturado de fibras longas de carbono, aramida ou vidro, ou uma combinação destas, para produzir uma folha plana de uma ou mais camadas de fibras. Estas camadas são mantidas juntas, quer por interbloqueio mecânico das próprias fibras, quer por um material secundário que une estas fibras e as mantém no lugar, dando ao conjunto integridade suficiente para ser manuseado.

Os tipos de tecido são classificados de acordo com a orientação das fibras utilizadas e com os vários métodos de construção utilizados para manter as fibras unidas.

As quatro principais categorias de orientação das fibras são: Unidirecional, 0/90°, Multiaxial e Outra/aleatória. Estas são descritas de seguida.

2.4.4.1. Tecidos unidireccionais (UD)

Um tecido unidirecional (UD) é um tecido em que a maioria das fibras corre apenas numa direção. Uma pequena quantidade de fibra ou outro material pode correr noutras direções com a intenção principal de manter as fibras primárias em posição, embora as outras fibras possam também oferecer algumas propriedades estruturais. Enquanto algumas tecelagens de tecidos 0/90° designam como unidirecional um tecido com apenas 75% do seu peso numa direção, a designação unidirecional só se aplica aos tecidos com mais de 90% do peso das fibras numa direção.

Os verdadeiros tecidos unidireccionais oferecem a possibilidade de colocar fibras no componente exatamente onde é necessário e na quantidade ideal. Para além disso, as fibras UD são retas e não são frisadas. Isto resulta nas propriedades mais elevadas possíveis das fibras de um tecido na construção de componentes compósitos. No que diz respeito às propriedades mecânicas, os tecidos unidireccionais só podem ser melhorados através de fita unidirecional pré-impregnada, em que não existe qualquer material secundário que mantenha as fibras unidireccionais no lugar. Nestes produtos pré-impregnados, apenas o sistema de resina mantém as fibras no seu lugar.

Existem vários métodos para manter as fibras primárias em posição num tecido unidirecional, incluindo a tecelagem, a costura e a colagem. Tal como acontece com outros tecidos, a qualidade da superfície de um tecido unidirecional é determinada por dois fatores principais: a combinação de textura e o número de fios da fibra primária e a quantidade e o tipo de fibra secundária.

2.4.4.2. Tecidos 0°/90°

Os tecidos são produzidos pelo entrelaçamento de fibras a 0° e fibras a 90° num padrão regular ou estilo de tecelagem. A integridade do tecido é mantida pelo entrelaçamento mecânico das fibras. O “drape”, capacidade de um tecido se adaptar a uma superfície complexa, a suavidade da superfície e a estabilidade de um tecido são controlados principalmente pelo estilo de tecelagem. O peso por área, a porosidade e, em menor grau, a humidade são determinados pela seleção da combinação correta de fibras e do número de fibras por cm^2 . Plain, Twill, Satin, Basket, Leno e Mock Leno são alguns dos estilos de tecelagem mais comuns.

2.4.4.2.1. Plain

Cada fibra a 0° passa alternadamente por baixo e por cima de cada fibra a 90° , assim como expressa a Figura 15. O tecido é simétrico, com boa estabilidade e porosidade razoável. No entanto, é o tecido mais difícil de drapear e o elevado nível de ondulação das fibras confere propriedades mecânicas relativamente baixas em comparação com os outros estilos de tecelagem.

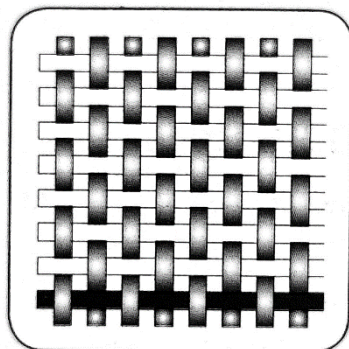


Figura 15. Tecido Plain, distribuição das fibras

2.4.4.2.2. Twill

Uma ou mais fibras de 0° tecem alternadamente sobre e sob duas ou mais fibras de 90° de uma forma repetida e regular, tal como ilustra a Figura 16. Produz o efeito visual de uma "nervura" diagonal reta ou quebrada no tecido. Com uma ondulação reduzida, o tecido tem também uma superfície mais lisa e propriedades mecânicas ligeiramente superiores ao Plain.

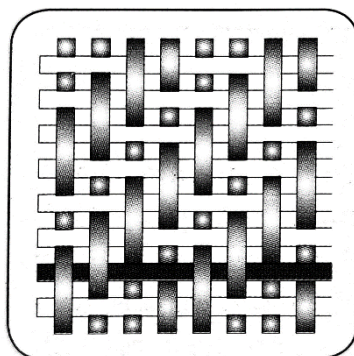


Figura 16. Tecido Twill, distribuição das fibras

2.4.5. Prepreg

Considerando os materiais compósitos como um todo, existem muitas opções de escolha de materiais diferentes nas áreas das resinas, fibras e núcleos, todos com o seu próprio conjunto único de propriedades, tais como resistência, rigidez, resistência ao calor, custo, taxa

de produção, etc. No entanto, as propriedades finais de uma peça compósita produzida a partir destes diferentes materiais não resultam apenas das propriedades individuais da matriz de resina e da fibra (e, nas estruturas em sanduíche, também do núcleo), mas dependem também da forma como os materiais são projetados na peça e também da forma como são processados. Existem inúmeros métodos de produção de compósitos normalmente utilizados.

Os tecidos e as fibras são pré-impregnados pelo fabricante dos materiais, sob calor e pressão ou com solvente, com uma resina pré-catalisada. O catalisador é em grande parte retardado a temperaturas baixas, dando aos materiais várias semanas, ou por vezes meses, de vida útil quando descongelados. No entanto, para prolongar o tempo de armazenamento, os materiais são armazenados congelados. Os pré-impregnados são colocados à mão ou à máquina numa superfície de molde, ensacados a vácuo ou levados a uma prensa e depois aquecidos a 120-180°C. Este processo permite que a resina se incorpore inicialmente e, em seguida, se cure.

Opções de materiais:

Resinas: Geralmente resinas epóxi, poliéster, fenólicas e de alta temperatura, tais como poliimidadas, ésteres de cianato e bismaleimidadas.

Fibras: Qualquer uma; podem ser utilizadas diretamente de um rolo ou como um tecido de qualquer tipo.

Principais Vantagens:

- Os níveis de resina/catalisador e o teor de resina na fibra são definidos com exatidão pelo fabricante dos materiais. É possível obter com segurança elevados teores de fibra com baixos teores de ácido.

- Os materiais têm excelentes características de saúde e segurança, são limpos para trabalhar e têm potencial para automatização e poupança de mão de obra.

- O custo da fibra é minimizado nas fitas unidireccionais, uma vez que não existe um processo secundário para converter a fibra em tecido antes da utilização.

- A química da resina pode ser optimizada em termos de desempenho mecânico e térmico, sendo as resinas de alta viscosidade impregnáveis devido ao processo de fabrico.

- Os tempos de trabalho prolongados (até vários meses à temperatura ambiente) significam que é possível obter facilmente camadas complexas e estruturalmente optimizadas.

- Potencial de automatização e de poupança de mão de obra.

Principais Desvantagens:

- O custo dos materiais é mais elevado para tecidos pré-impregnados e para estas aplicações são frequentemente necessárias resinas avançadas dispendiosas.

- São normalmente necessários autoclaves para curar o componente. Estes são caros, de funcionamento lento e de dimensão limitada.

3.1. Contexto e Motivação

Com a colaboração da OXYBLACK, assegurou-se o avanço no desenvolvimento da investigação na área da fibra de carbono. Foram então estabelecidas algumas diretrizes para a dissertação. Priorizava-se especialmente o desenvolvimento de algo inovador ou pouco explorado, com a condição de que o produto a ser criado se adequasse à capacidade de produção da empresa. A peça final deveria ser exclusivamente composta por fibra de carbono, além de ser economicamente viável e ter, possivelmente, uma aplicação abrangente.

Após uma análise inicial as áreas de investigação que se destacaram, foram as seguintes: betão com fibras de carbono, armadura em fibra de carbono e soluções construtivas para reforço em fibra de carbono.

Sendo o reforço estrutural com fibras de carbono uma área já explorada e um dos requisitos da empresa a inovação, foi alterado o foco na área da reabilitação para o dimensionamento. Surgiu então a ideia do desenvolvimento de um Stud em fibra de carbono e daí nasceu um tema para a dissertação, que foi visto tanto por parte da empresa como por parte dos orientadores como uma ideia com potencial.

3.2. Configurações e Geometrias

Antes de serem definidas as dimensões geométricas, algumas restrições tiveram de ser delineadas na medida em que o produto final tivesse em conta a capacidade de produção da empresa, tendo em atenção todas as limitações do material.

Para que a sua produção fosse economicamente viável e de maneira a necessitar o mínimo de mão de obra possível foi utilizada uma máquina denominada por CNC, Figura 17, que neste caso permite o corte de um desenho 2D numa placa com espessura constante. Deste

modo é possível automatizar operações complexas, reduzindo a necessidade de intervenção humana, tornando o processo mais eficiente e economicamente viável.



Figura 17. Máquina CNC

O Controle Numérico Computadorizado (CNC) é a solução mais apropriada para problemas de maquinagem complexos. Onde anteriormente se exigia uma máquina ou uma ferramenta especial, atualmente é feito com o CNC de uma forma muito simples.

O Comando Numérico Computadorizado (CNC), é um equipamento mecânico/ eletrônico que recebe informações (coordenadas numéricas X, Y, Z) da forma em que a máquina vai realizar uma operação, por meio de linguagem própria, denominado programa CNC, processa essas informações, e devolve-as ao sistema através de impulsos elétricos. Os sinais elétricos são responsáveis pelo acionamento dos motores que darão à máquina os movimentos desejados com todas as características da maquinagem, realizando a operação na sequência programada sem a intervenção do operador. A introdução do CNC na indústria mudou radicalmente os processos industriais.

Desta maneira, curvas são agora facilmente cortadas e o número de passos no processo com intervenção de operadores humanos é drasticamente reduzido (M3T, n.d.). Graças a este método de maquinação é possível manusear um material tão complexo como a fibra de carbono com uma ampla liberdade para definir qualquer forma ou dimensão. Para que fosse possível caracterizar a viabilidade da inovação foi necessário desde logo definir qual o tipo de laminado a ser maquinado.

Dentro da disponibilidade da OXYBLACK, relativamente às espessuras admissíveis dos laminados, o valor máximo em medidas standard seria 5 mm, tendo como outras possibilidades espessuras de 1, 2, 3, e 4 mm.

Outra variável a ser definida seria a constituição do laminado em fibra de carbono. Dentro das opções disponíveis três diferenciaram-se. Era do requisito da empresa OXYBLACK testar uma placa produzida pela própria empresa, daí os primeiros ensaios a serem executa-

dos terem sido com provetes de fibra de carbono Plain 400 g/m² Prepreg. Por razões específicas, que serão descritas detalhadamente mais à frente, foram testados mais dois laminados distintos, sendo um deles constituído unicamente por fibra de carbono UD 100 g/m² Prepreg, com todas as fibras na mesma orientação, e outro de um fornecedor da empresa. Mantendo a proteção de dados exigida pela OXYBLACK, é possível descrever o laminado do fornecedor como um conjunto de dois tipos de carbono, uma layer de Twill 200 g/m² na base e no topo do laminado e várias layers de UD com orientações perpendiculares entre si até preencherem a espessura idealizada, tal como ilustra a Figura 18.

A solução para a geometria final teria de ter em conta a otimização da sua produção e daí os seguintes requisitos: prevalecer a utilização de máquinas na sua produção, mais concretamente a CNC; prescindir ao máximo a mão de obra em intervenções intermedias durante a produção; encontrar um balanço entre mínimo de material utilizado e eficácia do produto final perante os seus requisitos e finalmente obter uma dimensão viável para que o seu corte, a partir de uma placa, fosse possível de se otimizar.

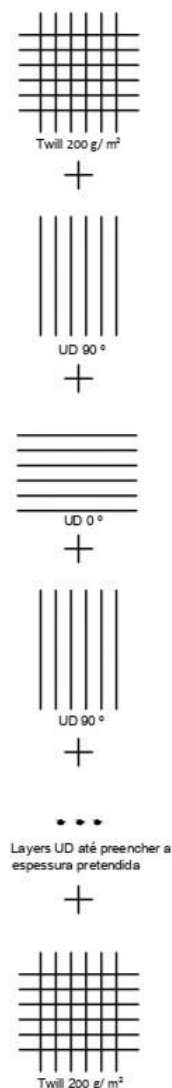


Figura 18. Composição do laminado (3)

Sendo evidente a necessidade de análise de um Stud standard, existente já no mercado, foi executada uma investigação primária. Nesta investigação conclui-se que todos os fornecedores apresentam um produto com o mesmo leque de dimensões e características. O Stud standard é constituído por um varão, geralmente nervurado, com duas cabeças ligadas, geralmente por meio de soldadura, em cada extremidade superior e inferior do varão.

Aproveitando a linha de pensamento, foi ponderada uma peça com as mesmas características, algo que tivesse uma alma e duas cabeças, para conferir as exigências geométricas de um Stud standard. As fixações da alma às duas cabeças, tal como demonstra a Figura 19, constituíram um problema, visto que a ligação do material metálico é feita através de soldadura e torna-se impossível poder comparar a sua resistência a uma solução de colagem entre peças de fibra de carbono.

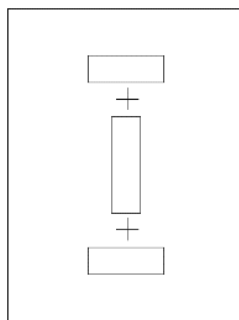


Figura 19. Primeira configuração do Stud

Assim, obteve-se uma solução bastante pragmática. Uma vez que se pretende o uso da CNC, tirou-se partida da sua capacidade de execução de peças com formatos complexos à solução do problema apresentado. Assim sendo a conceção da peça foi estabelecida de uma forma integral, recortando toda a peça de uma só vez a partir de um laminado.

Tentando conciliar as necessidades estruturais da peça, com a liberdade do compósito e a utilização da CNC, surgiram algumas ideias. Uma vez que a peça irá surgir de um laminado, é possível criar múltiplas opções de como este será constituído. Um laminado é constituído por várias layers de carbono e cada layer de carbono pode ter características distintas, tal como explicado na secção 2.4.

Desta maneira foram estabelecidas algumas potenciais fragilidades da peça a serem resolvidas. Primeiro que tudo é necessário entender que a alma da peça será exposta a forças de tração que são transmitidas sobretudo através das cabeças, devido à abertura de fendas perante o efeito de punçoamento.

A fim de combater a ocorrência de fraturas, ilustradas a vermelho na Figura 20, na zona entre alma e a cabeça, é possível conjugar a orientação das fibras de maneira que as forças localizadas se possam dispersar ao longo da peça, conferindo uma maior resistência à mesma.

Consoante a variação da orientação da malha as forças que nela forem aplicadas são distribuídas também de maneira distinta. De modo a melhorar a reação da peça face às tensões localizadas, é possível ajustar o ângulo de certas layers para 45° . Ou seja, o compósito é composto por uma malha com fibras a 0° e 90° , tal como demonstra a primeira ilustração da Figura 20. Alterando a configuração da orientação das fibras para 45° , como está representado na segunda ilustração da Figura 20, é possível mitigar a rotura ilustrada a vermelho, uma vez que as fibras perpendiculares à direção da possível rotura estão tracionadas e transmitem as tensões pelas fibras adjacentes.

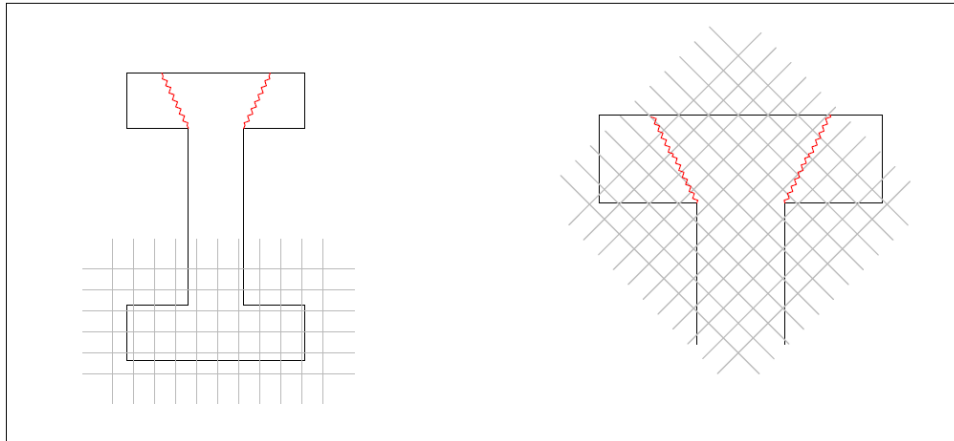


Figura 20. Orientação das fibras e possíveis roturas da peça

Para se retirar conclusões sobre o assunto abordado seria necessário um estudo exclusivamente dedicado a este tema, com apoio de um modelo computacional e de ensaios destrutivos.

A fim de redirecionar o foco da dissertação para o desenvolvimento de um protótipo, é possível concluir este tema com uma vantagem e uma desvantagem. Como vantagem, apenas com a orientação das fibras pode ser possível obter uma solução que englobe menos material, garantindo as características necessárias. Por outro lado, o cuidado a ter na preparação de um laminado com características complexas aumenta o nível de exigência da produção da própria peça.

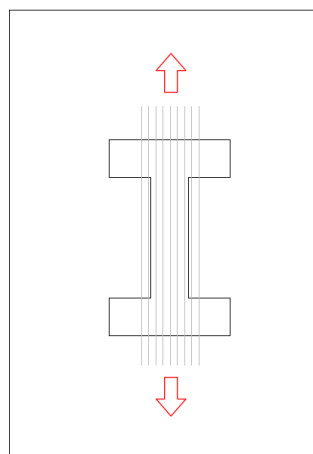


Figura 21. Comportamento de UD na peça

Relativamente ao desempenho do Stud face à tração pura, a principal zona da peça responsável por combater este efeito é a própria alma. Dentro das opções, um carbono com fibras unidirecionais (UD) é o mais indicado, visto que 100% das fibras estarão a resistir à tração, tal como ilustra a Figura 21. Para além das fibras UD serem utilizadas principalmente para forças unidirecionais, o fator económico também justifica a importância da sua implementação, visto que no mercado o carbono UD se revela ser mais económico comparado com qualquer outra malha.

Existindo várias soluções a explorar é necessário primeiro ensaiar e caracterizar o material constituinte do Stud. Avançou-se assim para o ensaio do laminado produzido pela empresa OXYBLACK.

Na Tabela 2 estão listados os ensaios exploratórios que se realizaram ao material.

Tabela 2. Ensaio exploratórios dos laminados

Conjunto de ensaio	Primeiro	Segundo	
Laminado	1	2	3
Carbono	Prepreg	Prepreg	Prepreg
	Plain 400 g/m ² 12k	UD 100 g/m ²	Twill + UD
Protótipos	[1(A), 1(B), 1(C)]	[2(A), 2(B), 2(C)]	[3(A), 3(B), 3(C)]

3.3. Primeiro Conjunto de Ensaio

3.3.1. Provetes

No processo de desenvolvimento de uma peça é essencial testá-la. Neste caso, sendo a aplicação um Stud, o espectável é o mesmo estar tracionado.

Perante a grande variedade de configurações que um compósito em fibra de carbono pode assumir são também vários os comportamentos que cada configuração pode apresentar perante os ensaios.

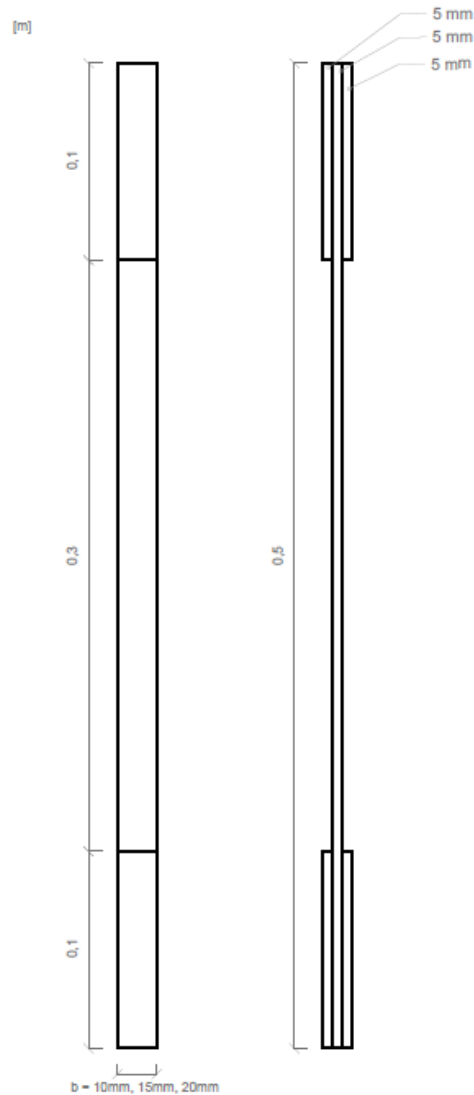


Figura 22. Provete (1)

Tendo sido a geometria já relativamente explorada, é preciso agora estabelecer espessuras e dimensões mais concretas e para isso é necessário caracterizar a resistência à tração, a tensão de rotura e o módulo de Young do laminado que irá ser utilizado. Com estes dados, será possível estabelecer dimensões mais específicas.

Para obter estes valores, foram definidos e construídos diversos provetes.

Para definir as dimensões do provete foram avaliadas as condições e requisitos da máquina que irá executar o ensaio de tração (CONTROLS C56Z00).

A força exercida pela máquina é transmitida por garras, que agarram as duas extremidades do provete. Uma vez cravadas exercem uma pré força e a partir de aí a força entre as garras vai aumentando gradualmente. Como output a máquina disponibiliza a variação do afastamento entre as garras juntamente com a força aplicada ao longo do tempo.

Tal como está catalogado, a distância mínima entre garras é de 30 cm. Adicionando a essa distância o tamanho das garras, 10 cm cada uma, obtêm-se as dimensões para o primeiro

provete a ser ensaiado. Assim como se pode ver na Figura 22, foram adicionadas duas peças que coincidem exatamente com a zona onde o provete é fixado nas garras. Desta maneira é possível proteger o provete dos "dentes" existentes na garra, evitando que o provete seja danificado e a rotura não ocorra na garra. No documento, estas peças serão denominadas por peças de reforço.

Uma vez estabelecida a dimensão compatível com as exigências da máquina de tração é necessário estabelecer a largura, b , e a espessura, e , dos provetes. Para isso, foram comparadas, nos seguintes capítulos, as características do aço utilizado nos Studs correntes, A500NR, e do carbono a ser testado.



Figura 23. Pormenor dos provetes (1)

Os provetes foram extraídos de um laminado, por meio de uma máquina CNC. Este laminado é constituído por uma sobreposição de malhas de fibra de carbono Prepreg Plain 400 g/m². Todos os processos de fabrico do laminado foram cuidadosamente executados. As layers de Prepreg foram devidamente comprimidas até que se verificasse a espessura pretendida. Posto isto, a peça foi introduzida numa prensa, "hot-press", à qual foi introduzida uma pressão de 10 bar e uma temperatura de 120°C durante sensivelmente duas horas. Uma vez pronto o laminado, este é levado à CNC e são recortados os provetes juntamente com as peças de reforço.

De maneira a maximizar a aderência da colagem, tanto as peças de reforço como o provete, foram lixados e passados com acetona, para que se retirasse toda a gordura existente. Para a colagem foi utilizado um adesivo da Sika, Biresin® Kraft Kleber Thix Power Adhesive. Após a sua aplicação as peças de reforço são devidamente posicionadas e é exercida uma força de compressão através de grampos.

Uma vez assegurada a sua fixação, os provetes são introduzidos numa estufa com uma temperatura de cerca de 60°C para concluir a cura. Estando então todos os processos de cura finalizados os provetes estão prontos para os ensaios de tração, tal como demonstra a Figura 23.

3.3.2. Studs de aço

Como método de comparação foram assumidas as características de um Stud de diâmetro de 8 mm (Isufi, 2018). Desta forma os valores a ter como base são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Características de um Stud de aço standard (Isufi, 2018)

Studs de aço	
Diâmetro [mm]	8
Módulo de Young [GPa]	200
Tensão de rotura [MPa]	500
Rigidez axial [$\text{kPa}\cdot\text{m}^2$]	10053.1
Força de cedência [kN]	25.13

3.3.3. Ensaio (1). Laminado OXYBLACK: Plain 400 g/ m² Prepreg (e = 5mm)

3.3.3.1. Pré-dimensionamento

A determinação da largura (b) e espessura (e) dos provetes levou em consideração os valores fornecidos pela empresa OXYBLACK para o carbono a ser testado, nomeadamente a tensão de rotura de 1820 MPa e o módulo de Young de 140 GPa.

A partir desses valores, foi calculada a rigidez axial teórica, Tabela 4, e os valores da força de rotura dos provetes, Tabela 5, em função da largura e da espessura.

Tabela 4. Rigidez teórica, laminado (1)

Rigidez ($\text{kPa}\cdot\text{m}^2$)						
	e (mm)					
b (m)	1	2	3	4	5	6
0.03	4200	8400	12600	16800	21000	25200
0.02	2800	5600	8400	11200	14000	16800
0.015	2100	4200	6300	8400	10500	12600
0.01		2800	4200	5600	7000	8400

Tabela 5. Forças de roturas teóricas, laminado (1)

Rotura (kN)						
b (m)	e (mm)					
	1	2	3	4	5	6
0.03	54.6	109.2	163.8	218.4	273	327.6
0.02	36.4	72.8	109.2	145.6	182	218.4
0.015	27.3	54.6	81.9	109.2	136.5	163.8
0.01		36.4	54.6	72.8	91	109.2

Com o intuito de aproximação dos valores calculados para os Studs de aço, rigidez de $10053.1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^2$ e rotura 25.13 kN , foram escolhidas as dimensões dos provetes.

Como se pode ver na Tabela (5), qualquer uma das espessuras satisfaz os requisitos relativos à força de rotura. Deste modo o fator de escolha é a tensão de rotura, que a fim de se aproximar o mais possível do valor da rigidez do aço em questão, foi definida uma espessura, 5 mm, juntamente com três larguras diferentes, 10, 15 e 20 mm. Os valores da rigidez e da rotura para estas dimensões estão destacados a laranja nas Tabelas 4 e 5, respetivamente.

3.3.3.2. Objetivos do ensaio de tração

O Ensaio (1) teve os seguintes objetivos:

- Determinar a Força de Rotura
- Determinar a Tensão de Rotura
- Determinar o Módulo de Young
- Análise do comportamento na rotura

3.3.3.3. Resultados

Os resultados do primeiro ensaio dos provetes 1(A), 1(B) e 1(C) foram retirados diretamente da máquina de tração e apresentam-se na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados do ensaio do laminado (1)

Laminado 1 (e = 5mm)	Provete A (b= 10mm)	Provete B (b= 15mm)	Provete C (b= 20mm)
Força de Rotura [kN]	34.9	50.3	81.1
Tensão de Rotura [MPa]	698.8	671.0	811.3
Módulo de Young [GPa]	15.9*	15.7*	15.3*

(* , obtido a partir do deslocamento das garras da prensa, incluindo possível deslizamento em relação a estas)

3.3.3.4. Análise de Resultados

- Força de Rotura:

Os valores obtidos no primeiro ensaio, 34.9 kN, 50.3 kN e 81.1 kN, para os provetes A, B e C respetivamente, mostraram-se significativamente distantes dos resultados desejados. Revelou-se um padrão nos resultados dos ensaios. Os três provetes apresentaram roturas com valores ligeiramente inferiores a metade do valor calculado na Tabela 5, 91 kN, 136,5 kN e 182 kN.

- Tensão de Rotura:

Seria de esperar que os valores dos ensaios se aproximassem da tensão de rotura teórica do composto 1820 MPa. Tal como a força de rotura, a tensão de cedência demonstrou valores bastante inferiores. É também de notar que, para além de um coeficiente de variação de cerca de 8.3%, os três resultados, 698.8 MPa, 671 MPa e 811.3 MPa, respetivamente, aproximam-se da metade do valor pretendido.

- Módulo de Young:

Conforme mencionado anteriormente, esperava-se obter resultados próximos a 140 GPa; contudo tal não se verificou.

Foram investigadas as possíveis razões para estes resultados. Nas peças de reforço do provete, é notória a ocorrência de escorregamento entre a garra e as peças. Deste modo torna-se importante destacar que o deslocamento entre pinças não traduz precisamente a deformação do provete. Durante o processo de cravação completo das garras, a máquina regista valores que não refletem com precisão a realidade. Deste modo foi recalculado o módulo de Young, seguindo a seguinte formula.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad 3-1$$

Sendo que,

- E, módulo de Young;
- σ , tensão;
- ε , deformação.

Conforme evidenciado na Tabela 7, os valores apresentaram melhorias, no entanto continuam a distanciar-se consideravelmente do valor esperado.

Tabela 7. Módulo de Young, laminado (1), após tratamento de dados

Laminado 1	Provete A (b= 10mm)	Provete B (b= 15mm)	Provete C (b= 20mm)
Módulo de Young [GPa]	21*	21*	22*

(* , erro na medição causado pelo arrastamento de garras)

- Análise do comportamento da rotura

Tanto o provete 1(A) como o provete 1(B) com espessuras 10 mm e 15 mm respectivamente, revelaram uma rotura em três zonas distintas. O provete 1(C), com uma espessura de 20 mm, cedeu em quatro zonas distintas.

Nas seguintes Figuras, 24, 25 e 26, estão representadas as roturas dos provetes 1(A), 1(B) e 1(C), respetivamente.

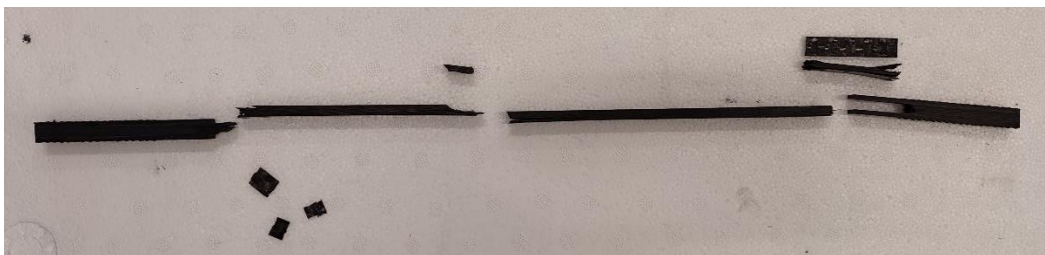


Figura 24. Rotura do provete 1 (A)



Figura 25. Rotura do provete 1 (B)



Figura 26. Rotura do provete 1 (C)

Uma observação preocupante foi a sistemática rotura do provete entre as peças de reforço. Esta rotura deu-se exatamente na zona onde acaba a fixação da garra, fixação esta que deveria acabar exatamente no limite da peça de reforço. Este pequeno erro deveu-se ao facto da abertura das próprias garras exercer um deslocamento no sentido oposto do provete e mesmo após a cravação das mesmas a distância entre elas ser maior que a distância mínima.

Nesse sentido, foram revistas as condições da máquina de tração, tendo-se detetado um desalinhamento entre as garras, que possivelmente contaminou os resultados do ensaio de tração.

3.3.3.5. Conclusão do ensaio

O padrão sistemático de obtenção de valores com cerca de metade dos valores esperados não pode ser desprezado, havendo necessidade de analisar este fenómeno.

Foram aprofundadas as características do carbono. Dentro do compósito há duas variáveis a serem analisadas, sendo elas a matriz e as fibras que constituem as layers do laminado. As próprias fibras revelam uma maior resistência à tração quando comparadas ao próprio compósito, isto porque a rotura se origina muito mais cedo na matriz do compósito do que nas fibras. Contudo, por meio de comparação de catálogos de vários fornecedores de carbono, os valores da rotura de um laminado não se afastam do valor que se teve em consideração neste estudo. Conclui-se então que o fenómeno da fragilidade da matriz num laminado deve ser tido em consideração.

Assim resta analisar as características do próprio carbono. A tensão de cedência do carbono utilizado está catalogada; porém a sua disposição em malha ao longo do provete pode ser relevante para o fenómeno em análise. Uma vez que as fibras são tecidas irá haver duas orientações perpendiculares entre si. Uma das direções é paralela à ação que está a ser exercida a força, estando todas as fibras em tensão, a outra metade das fibras está perpendicular à ação da força. Ou seja, a razão para a discrepância de valores pode dever-se a este fator.

Tal como foi descrito na análise do módulo de Young, os valores avaliados foram retirados diretamente da máquina de tração, que se revelou ser pouco precisa devido ao escorregamento entre garras e provete. Novos provetes devem ser testados, agora com extensómetros, a fim de obter resultados de deformação mais precisos. Ao mesmo tempo, uma vez que um extensómetro será colocado em cada lado do provete, poder-se-á verificar se há algum empenamento no provete.

Para evitar a ocorrência de rotura a meio das peças de reforço, as dimensões dos novos provetes deverão ser reajustadas. Para isso foram medidas as distâncias entre garras durante os primeiros ensaios, a fim de definir as dimensões dos novos provetes.

Tal como foi descrito na análise do comportamento da rotura, as pinças da máquina de tração estão desalinhas. A fim de corrigir este problema, foi pedido aos técnicos responsáveis uma nova calibração da mesma.

3.4. Segundo Conjunto de Ensaio

3.4.1. Provetes

Após as conclusões do primeiro ensaio, verificou-se a necessidade de fazer algumas alterações e ajustes no provete e no próprio ambiente experimental dos ensaios. Com a máquina com uma calibração mais ajustada e com as garras da máquina de tração a agarrarem por inteiro a zona de reforço do provete foram definidas as medidas a serem introduzidas na CNC, indicadas na Figura 27.

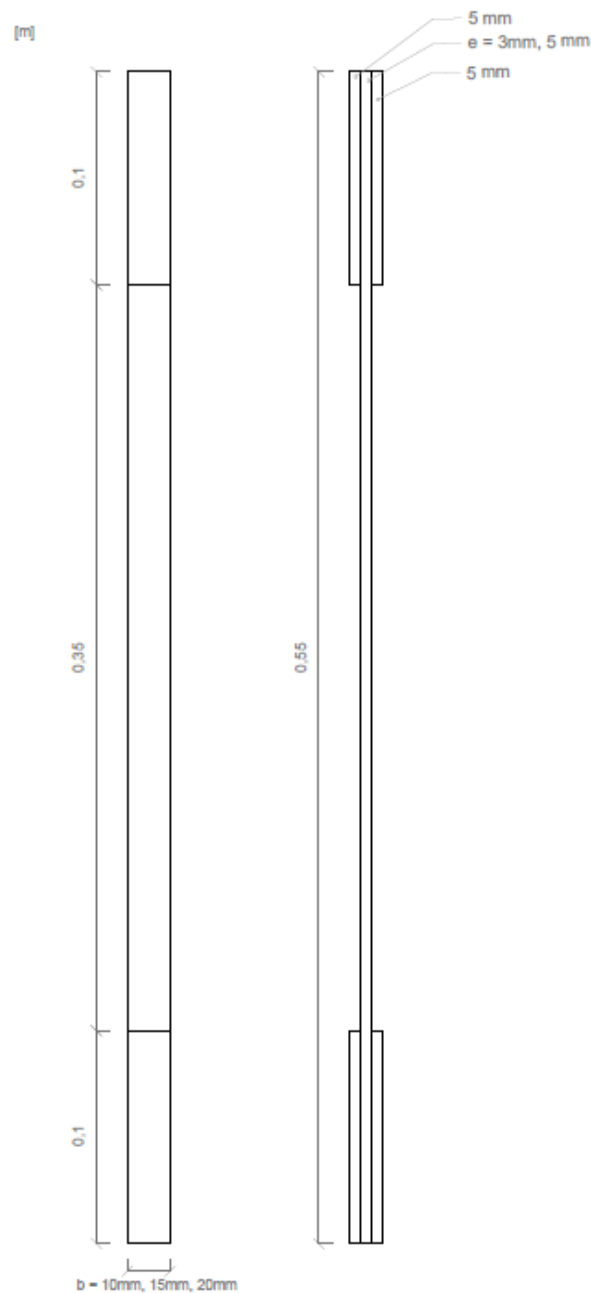


Figura 27. Provette (2) e (3)

A preparação do laminado seguiu todas as exigências necessárias durante a sua produção, como foi descrito na preparação dos primeiros provetes. Retirando os provetes da CNC, o mesmo adesivo foi aplicado para colagem das peças de proteção do provete juntamente com as precauções descritas na preparação dos anteriores provetes. No entanto, no processo de colagem, em vez de se utilizar grampos para aplicar pressão durante a fixação, e de repousar os provetes numa estufa, optou-se por cobri-los com fita, cuja pressão foi aplicada manualmente, e não houve o repouso dos mesmos em condições de temperatura elevada. Essa técnica de colagem foi aplicada nos conjuntos de provetes 2 e 3, e é possível que cause problemas na realização dos ensaios subsequentes.

3.4.2. Ensaio (2). Laminado: UD 100 g/ m² Prepreg (e = 3mm)

Tal como foi mencionado anteriormente, foi sugerida a ideia de utilizar carbono unidirecional, uma vez que este é mais adequado para resistir a forças numa única direção. Além disso, o carbono unidirecional é economicamente mais viável do que uma malha de carbono.

Nos ensaios do laminados (1) OXYBLACK: Plain 400 g/ m² Prepreg, uma grande dúvida se levantou perante os resultados obtidos. Não seriam de esperar resultados tão baixos e visto que todos se aproximavam de metade dos esperados, a necessidade de um ensaio de um provete constituído por carbono unidirecional tornou-se bastante relevante a fim de concluir se o valor apresentado pelos fornecedores corresponde à resistência à tração do compósito com uma configuração das fibras em malha ou se estes valores correspondem à resistência do compósito com o conjunto de fibras alinhadas segundo a direção da força aplicada.

É de sublinhar que a espessura dos provetes não é a mesma que o laminado (1). A espessura dos provetes deste conjunto de ensaios com carbono unidirecional é de apenas 3 mm. Porque as disponibilidades da OXYBLACK não são ilimitadas e face à inesperada decisão de testar um provete de carbono unidirecional não foi possível à empresa disponibilizar qualquer espessura do laminado.

Na Tabela 8 estão representados os valores disponibilizados pela empresa fornecedora do Prepreg UD.

Tabela 8. Dados do Prepreg UD 400 g/ m²

Provete 2		Prepreg
		UD 100 g/m ²
Propriedades das fibras	Tensão de Ruptura [MPa]	4137
	Módulo de Young [GPa]	242
Propriedades do compósito	Tensão de Ruptura [MPa]	1800
	Módulo de Young [GPa]	139

3.4.2.1. Objetivos do ensaio de tração

O Ensaio (2) teve em consideração os seguintes objetivos:

- Determinar a Força de Rotura
- Determinar a Tensão de Rotura
- Determinar o Módulo de Young
- Analise do comportamento da rotura
- Comparar o comportamento à tração do carbono em malha e unidirecional

3.4.2.2. Resultados

Os resultados do segundo conjunto de ensaios dos provetes 2(A), 2(B) e 2(C) apresentaram-se na Tabela 9.

Tabela 9. Resultados do ensaio do laminado (2)

Laminado 2 (e= 3mm)		Provete A (b= 10mm)	Provete B (b= 15mm)	Provete C (b= 20mm)
Ensaio 1	Força Máxima Registada [kN]	25.4	53.0**	100.8
	Tensão Máxima Registada [MPa]	846.0	1177.3**	1679.4
	Módulo de Young [GPa]	133	141.0	142.7
Ensaio 2	Força Máxima Registada [kN]	14.4	-	-
	Tensão Máxima Registada [MPa]	480.7	-	-
	Módulo de Young [GPa]	127	-	-
Ensaio 3	Força de Rotura [kN]	25.1	-	-
	Tensão de Rotura [MPa]	835.8	-	-
	Módulo de Young [GPa]	135	-	-

(**, força e tensão máxima exercida no provete, não levado á rotura)

A Tabela 9 apresenta 3 ensaios, tendo-se verificado uma inesperada rotura do adesivo de colagem das peças de proteção dos provetes.

Durante a realização dos ensaios de tração nos provetes 2(A) e 2(B), o material a ser ensaiado separou-se das peças de proteção. Mesmo que o ensaio esteja já contaminado, visto o provete estar sem proteção contra o desgaste das pinças, decidiu-se prosseguir com o ensaio agarrando o provete mesmo sem as peças de proteção, Figura 28.



Figura 28. Provete sem proteção após ensaio

No que diz respeito ao provete 2(A), duas peças soltaram-se no ensaio 2(A1) e as restantes no ensaio 2(A2), sendo que a rotura do provete ocorreu apenas no terceiro ensaio, 2(A3).

Quanto ao provete 2(B), verificou-se uma rotura em todas as peças de reforço, no entanto, o ensaio foi interrompido antes de levar o provete à rotura. Seguindo assim para o último provete que foi levado à rotura no primeiro ensaio.

Resumindo, o provete 2(A) foi ensaiado 3 vezes e os provetes 2(B) e 2(C) só uma.

3.4.2.3. Análise de Resultados

- Força de Rotura

Este conjunto de resultados não pode ser tratado da mesma maneira que o ensaio 1, visto que para cada provete houve condições distintas.

Tabela 10. Roturas teóricas, laminado (2)

Provete 2 (e =3mm)	
b (m)	Rotura (kN)
0.02	108
0.015	81
0.01	54

Relativamente ao provete 2(A), $b = 10$ mm, o valor esperado para este ensaio seria de 54 kN, tal como descrito na Tabela 10. Neste ensaio teremos de excluir a análise do ensaio 2(A2), que apenas resultou na remoção das peças de reforço, após ser aplicado 14.4 kN. Ao observar os valores dos ensaios 2(A1) e 2(A3), 25.4 kN e 25.1 kN respetivamente, provavelmente ocorreu a rotura de metade das fibras no primeiro ensaio, e o restante da rotura no terceiro ensaio,

uma vez que cada um dos ensaios registou novamente valores da ordem de grandeza de metade do valor esperado.

Uma vez que o provete 2(B) não foi levado até à rotura, pouco se pode concluir com este ensaio. Porém pode-se realçar que a máquina registou 53 kN antes de ser interrompido o ensaio, o que corresponde a 65,4 % da suposta força de rotura. O provete não representava nenhuma fratura visível e as suas dimensões mantiveram-se inalteradas.

O provete 2(C) foi levado totalmente à rotura sem nenhuma ocorrência inesperada. Desta forma pode-se comparar diretamente o resultado experimental, 100.8 kN, com o valor esperado, 108 kN, observando-se uma grande aproximação de resultados.

- Tensão de Rotura

Tanto para o provete 2(A) como para o provete 2(B) os valores não são constantes, pela razão apresentada anteriormente. Assim a análise destes resultados torna-se pouco relevante.

Posto isto, o foco direciona-se exclusivamente para o provete 2(C), que apresenta um valor de 1679.4 MPa, valor este que se aproxima bastante do valor catalogado de 1800 MPa, desviando-se apenas 6.7%.

- Módulo de Young

O tratamento de dados para o módulo de Young seguiu uma abordagem diferente daquela adotada até agora. Como mencionado anteriormente, foram colocados dois extensómetros, um em cada lado do provete, de forma a obter valores mais precisos das deformações.

Houve, portanto, duas fontes de informação, ambas apresentando valores que necessitam de um tratamento coordenado, visto que a máquina conectada aos extensómetros forneceu dados de deformação a cada 1 segundo, enquanto a máquina de tração registou valores da força exercida em intervalos de 0.102 segundos.

Conforme as Figuras 29, 30, 31, 32 e 33, os valores de deformação registados por cada extensómetro, registados a azul e a laranja, indicam que os provetes não sofreram empenamento durante o ensaio de tração. Diante disso, realizou-se a média dos valores de deformação registados pelos dois extensómetros a fim de se definir uma só função para uma posterior análise.

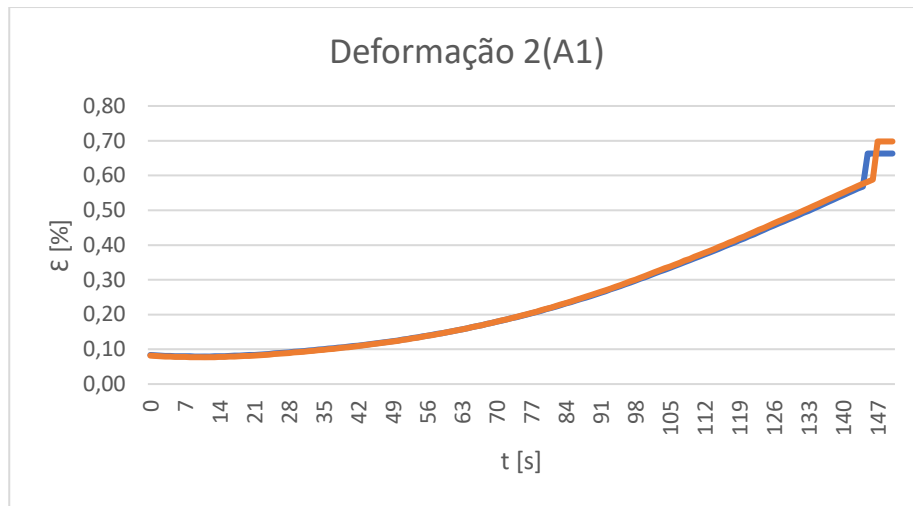


Figura 29. Extensão de cada lado do provete 2(A1)

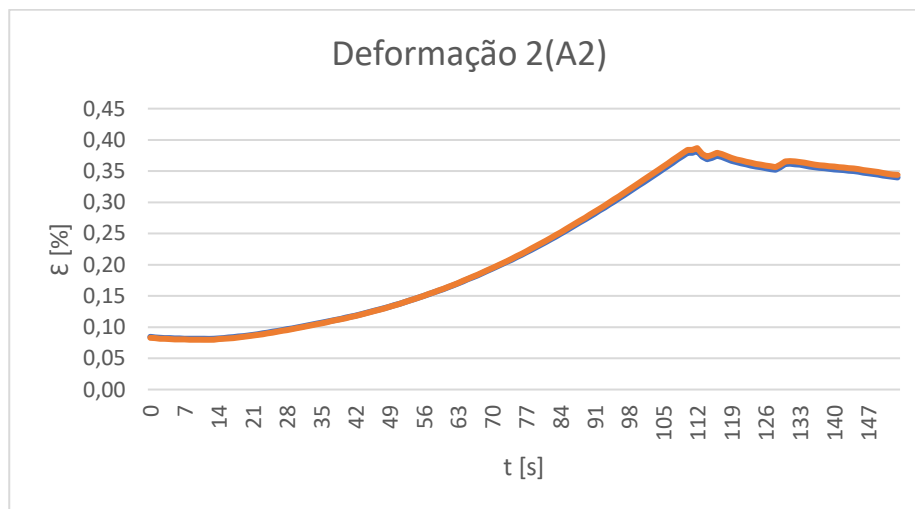


Figura 30. Extensão de cada lado do provete 2(A2)

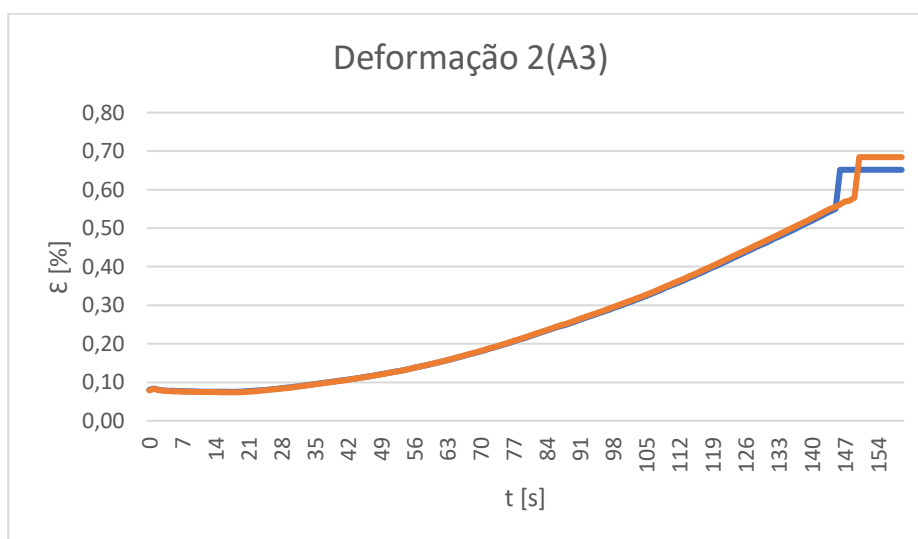


Figura 31. Extensão de cada lado do provete 2(A3)

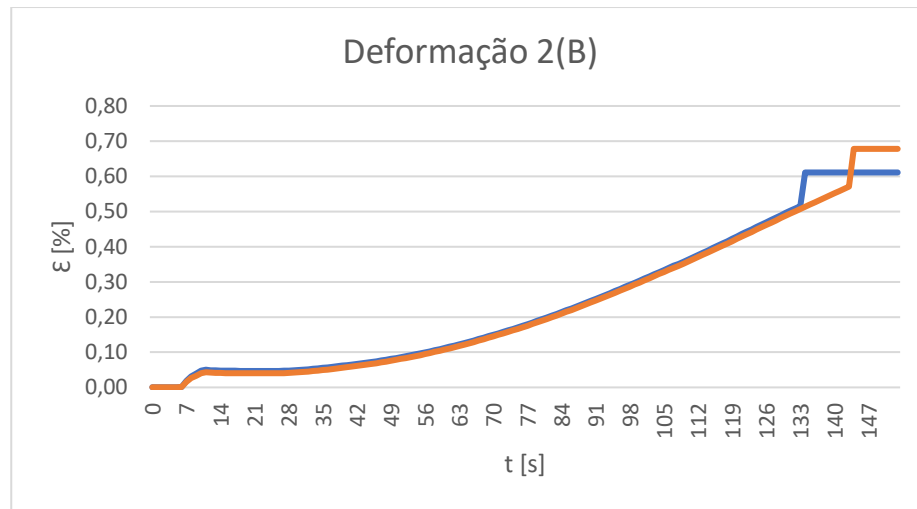


Figura 32. Extensão de cada lado do provete 2(B)

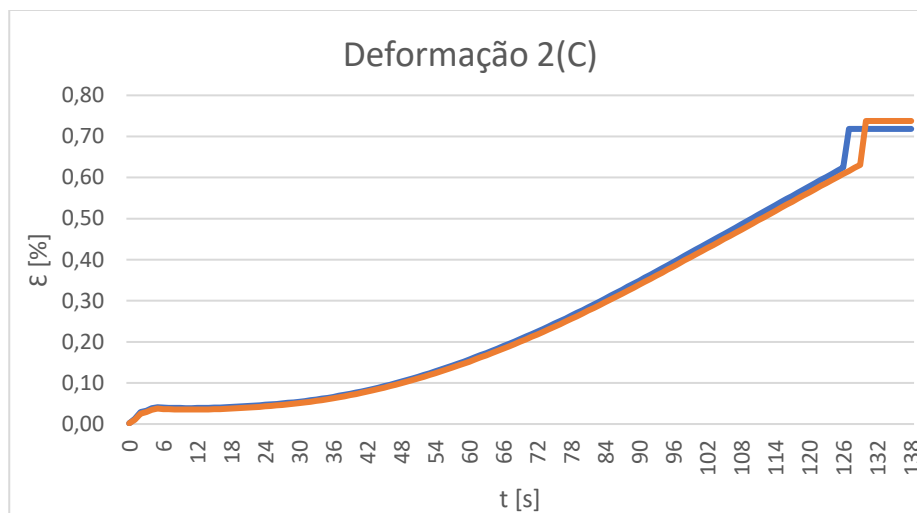


Figura 33. Extensão de cada lado do provete 2(C)

Visto que nenhum provete sofreu empenamento, os dados retirados para cada ensaio foram tratados de modo a criar gráficos de tensão em função da deformação, Figuras 34, 35, 36, 37 e 38, permitindo o cálculo dos valores do módulo de Young, desprezando o arranque inicial, tal como descrito no ponto (3.3.3.4), os quais são apresentados na Tabela 9.

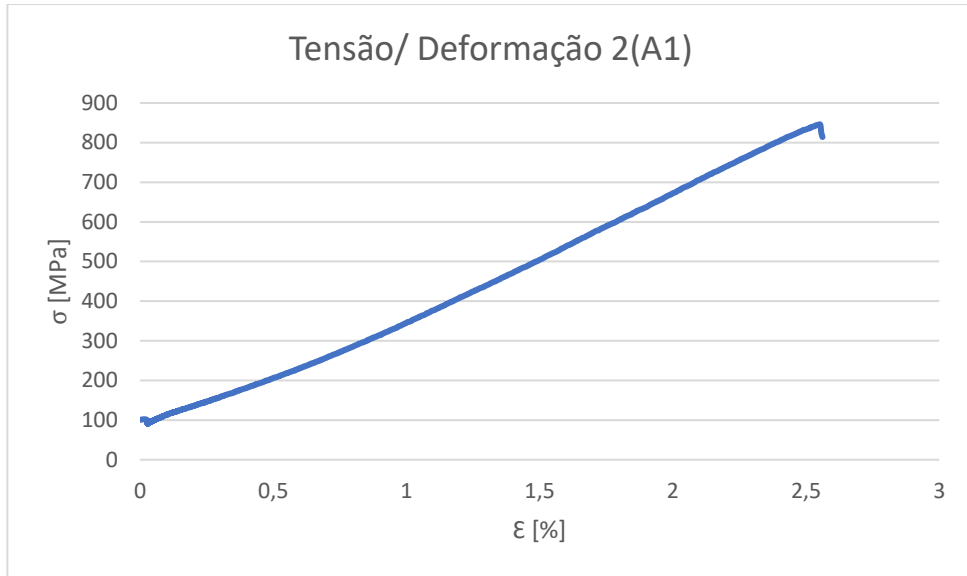


Figura 34. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 2(A1)

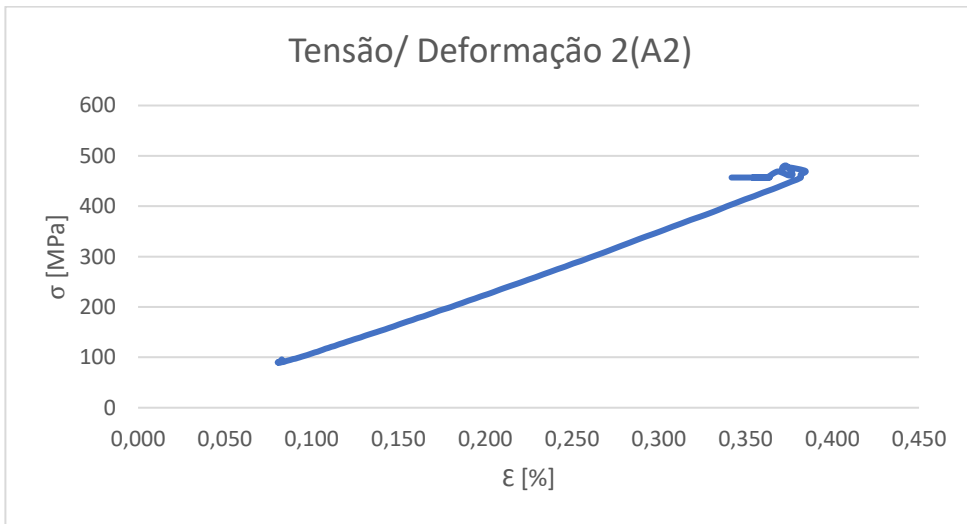


Figura 35. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 2(A2)

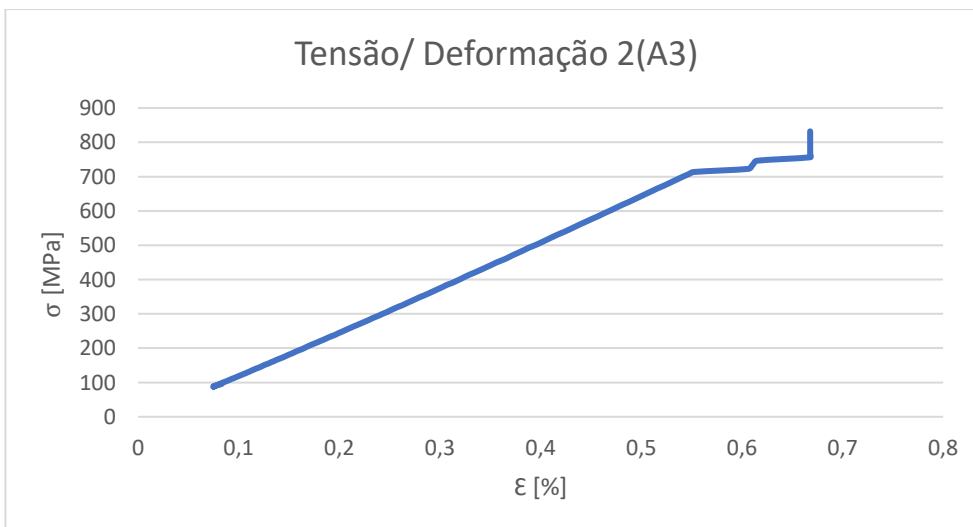


Figura 36. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 2(A3)

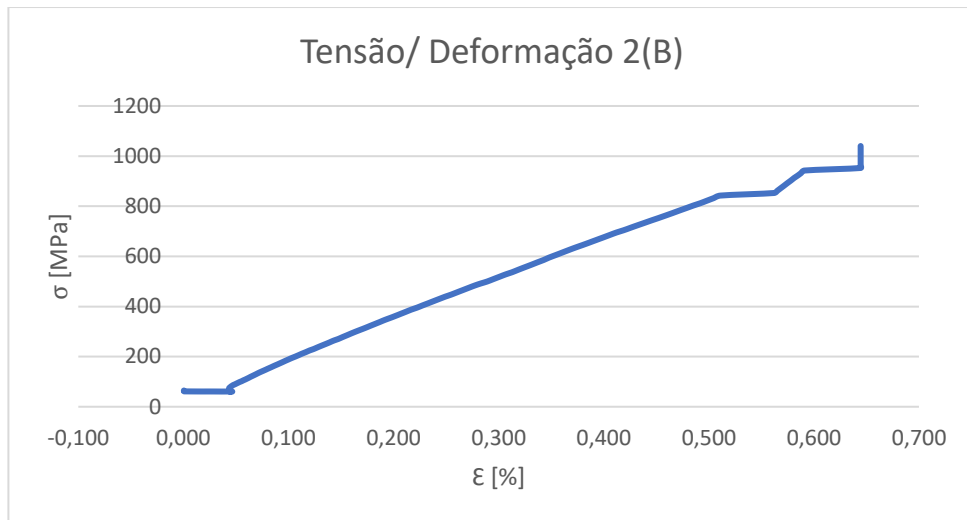


Figura 37. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 2(B)

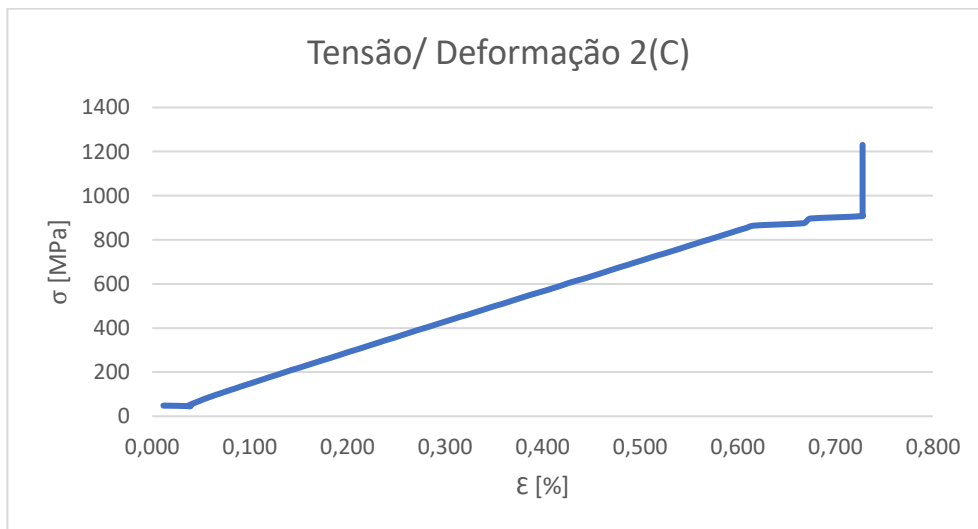


Figura 38. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 2(C)

- Análise do comportamento da rotura

Nestes ensaios ocorreram modos de roturas diferentes para cada tipo de provete.

A rotura do provete 2(A) deu-se por meio de laminação, Figura 39. Ao observar a Figura 40 é possível ver como a erosão das pinças danificou o provete, acabando por conduzir a resultados pouco fidedignos.

O provete 2(B) não foi levado à rotura, encontrando-se, tal como demonstra a Figura 41, intacto após o seu ensaio.

O provete 2(C) apresentou uma rotura total por delaminação. Na Figura 42 pode ver-se como o provete teve uma rotura explosiva.



Figura 39. Rotura do provete 2(A)

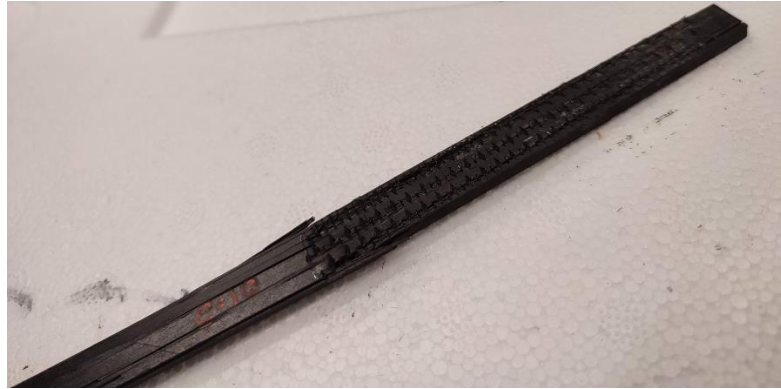


Figura 40. Detalhe da rotura do provete 2(A)



Figura 41. Provete 2(B)



Figura 42. Rotura do provete 2 (C)

- Comparar o comportamento à tração do carbono em malha (1) e unidirecional (2)

Uma vez que os ensaios foram feitos para provetes cujas espessuras variam, sendo que para o ensaio do laminado (1), OXYBLACK: Plain 400 g/m² Prepreg, a espessura dos provetes foi de 5 mm e para o ensaio do laminado (2), OXYBLACK: UD 100 g/m² Prepreg, a espessura foi de 3 mm, não é possível comparar diretamente valores da força de rotura. Deste modo apenas se torna viável a comparação dos valores da tensão de cedência e do módulo de Young.

A avaliação da tensão de cedência é também questionável, isto porque os resultados do provete 2(A) não são precisos e do provete 2(B) são inconclusivos.

Uma vez que os ensaios dos provetes 1(A), 1(B) e 1(C) foram feitos sem extensómetros, os valores daí retirados não têm a precisão pretendida. Ainda assim ao avaliar ambos os ensaios, os valores da tensão de cedência aumentaram cerca de 21% do provete 1(A) para 2(A), 75% do provete 1(B) para 2(B) e 107% do provete 1(C) para 2(C).

Relativamente ao módulo de Young, os valores evoluem de valores que rodam 21 GPa, no ensaio 1, para valores que rondam 140 GPa, no ensaio 2.

3.4.2.4. Conclusões do Ensaio

Relativamente ao provete 2(A) os resultados revelaram-se pouco fiáveis devido a progressivas roturas das peças de reforço. Assim, não foi possível executar o ensaio do início ao fim com as condições pretendidas, acabando os valores por serem contaminados devido ao arrastamento das pinças, aos sucessivos testes no mesmo provete e ao dano causado pela cração das próprias pinças.

O provete 2(B) não chegou à rotura acabando por se separar por completo das peças de reforço. Ainda assim mobilizou uma tensão 75% maior que no primeiro ensaio.

A tensão de rotura do provete 2(C) foi obtida com apenas um ensaio revelando um aumento de 107% relativamente ao ensaio 1(C).

Tendo em conta este último ensaio 2(C), dos três o único que demonstrou condições que permitem retirar conclusões, verifica-se que os valores catalogados de tensão e módulo de Young coincidem com as características de um conjunto de fibras unidirecionais.

Pode-se concluir que as informações fornecidas sobre as características de um laminado, independentemente da configuração das fibras que o compõem, incluindo a configuração de uma malha Plain, testada no ensaio (1), dizem respeito à resistência à tração das fibras que estão alinhadas numa única direção paralela à força exercida.

Ainda que a colagem das peças de reforço nos provetes não tenha sido devidamente executada, pôde-se verificar que para as larguras do provete 10 mm e 15 mm a colagem não resistiu à força exercida; para a largura 20 mm já houve área suficiente para que a colagem fosse suficientemente forte para suportar a força nela exercida.

Uma vez que é previsível a execução de uma colagem no Stud final, este fenómeno pode-se tornar importante. Para além da dimensão da peça, é preciso ter em atenção que, mesmo para uma colagem devidamente executada, a área de colagem é um fator a considerar. Ou seja, mesmo que a peça esteja dimensionada para conseguir resistir às ações que lhe forem

impostas, se a aderência entre peças não for suficiente poderá haver uma rotura imprevisível na zona da colagem, alterando a resistência prevista da peça.

3.4.3. Ensaio (3). Laminado: Twill + UD, Prepreg (e = 5mm)

O ensaio de um laminado produzido por outro fornecedor tem como principal objetivo obter outra amostra de resultados, para de um laminado com fibras com direções perpendiculares, que funcione como comparação para os ensaios do laminado (1).

Sendo assim, foi assumida uma espessura de 5 mm de modo que seja possível comparar diretamente as características com o primeiro ensaio.

3.4.3.1. Objetivos do Ensaio de Tração

O Ensaio (3) teve em consideração os seguintes objetivos:

- Determinar a Força de Rotura
- Determinar a Tensão de Rotura
- Determinar a Módulo de Young
- Análise do comportamento da rotura

3.4.3.2. Resultados

Os resultados do segundo conjunto de ensaio dos provetes 3(A), 3(B) e 3(C) apresentam-se na Tabela 11.

Tabela 11. Resultados do ensaio do laminado (3)

Laminado 3 (e=5 mm)		Provete A (b= 10mm)	Provete B (b= 15mm)	Provete C (b= 20mm)
Ensaio 1	Força Máxima Registada [kN]	34.0	61.2	59.7
	Tensão Máxima Registada [MPa]	679.2	816.3	597.2
	Módulo de Young [GPa]	88	75	75
Ensaio 2	Força Máxima Registada [kN]	29.4	45.1	59.2
	Tensão Máxima Registada [MPa]	588.3	601.9	592.5
	Módulo de Young [GPa]	49	78	64
Ensaio 3	Força de Rotura [kN]	31.7	-	-
	Tensão de Rotura [MPa]	634.9	-	-
	Módulo de Young [GPa]	31	-	-

3.4.3.3. Análise de Resultados

- Força de Rotura

Como todos os provetes tiveram uma rotura inicial na colagem entre o provete e as peças de reforço torna-se difícil a análise e a comparação dos mesmos. Fazer uma média dos valores registados não se revela ser o melhor método de comparação. Deste modo foi escolhido o maior valor registado como representativo da força de rotura do provete.

Ignorando o facto de a amostra de resultados estar contaminada, é possível verificar alguma concordância de resultados. No ensaio do provete 3(A) foi registado um valor máximo de 34 kN que, em comparação com o ensaio 1(A), 35 kN, se aproxima bastante. No ensaio 3(B) o valor foi de 61 kN, pouco mais do que no ensaio 1(B) 50 kN. Por último, no o ensaio 3(C) foi cerca de 60 kN, menos que no ensaio 1(C) com 81 kN.

- Tensão de Rotura

Na análise da tensão de rotura o provete 3(A) registou uma média de 634 MPa o qual não se afasta do valor 1(A), 699 MPa. O provete 3(B) registou uma média de 700 MPa, novamente perto do provete 1(B), 671 MPa e o provete 3(C) com uma média de 595 MPa ficou um pouco afastado do valor registado no provete 1(C), 811 MPa.

Mesmo com valores para a tensão de rotura um pouco oscilantes, entre os 600 MPa e os 700 MPa, a média total do provete é de 643 MPa. Ao comparar com a média registada para o laminado unidirecional, 1234 MPa, pode confirmar-se a conclusão do principal assunto abordado no ensaio (2), Laminado OXYBLACK: UD 100 g/ m² Prepreg.

- Módulo de Young

O tratamento de dados para o módulo de Young seguiu a mesma abordagem que foi descrita no ensaio (2), laminado OXYBLACK: UD 100 g/ m² Prepreg. Como mencionado anteriormente, foram colocados dois extensómetros, um em cada lado do provete, de forma a obter valores mais precisos das extensões.

Conforme as Figuras 43, 44, 45, 46, 47, 48 e 49, a análise dos valores registados pelos dois extensómetros, a azul e a laranja, indica que os provetes não sofreram empenamento durante o ensaio de tração, com exceção do primeiro ensaio do provete 3(A). Assim, realiza-se a média dos valores de deformação registados pelos dois extensómetros a fim de se definir uma só função para uma posterior análise, tal como foi feito no capítulo anterior.

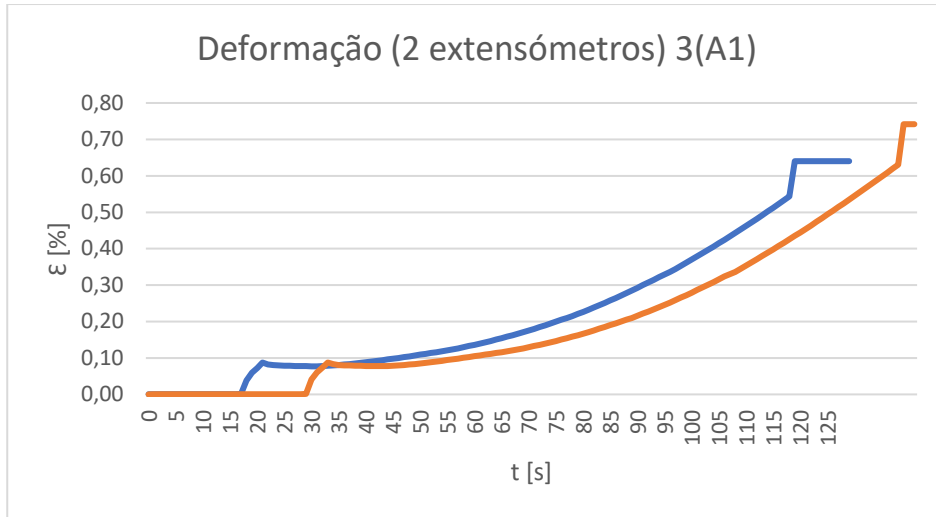


Figura 43. Extensão de cada lado do provete 3(A1)

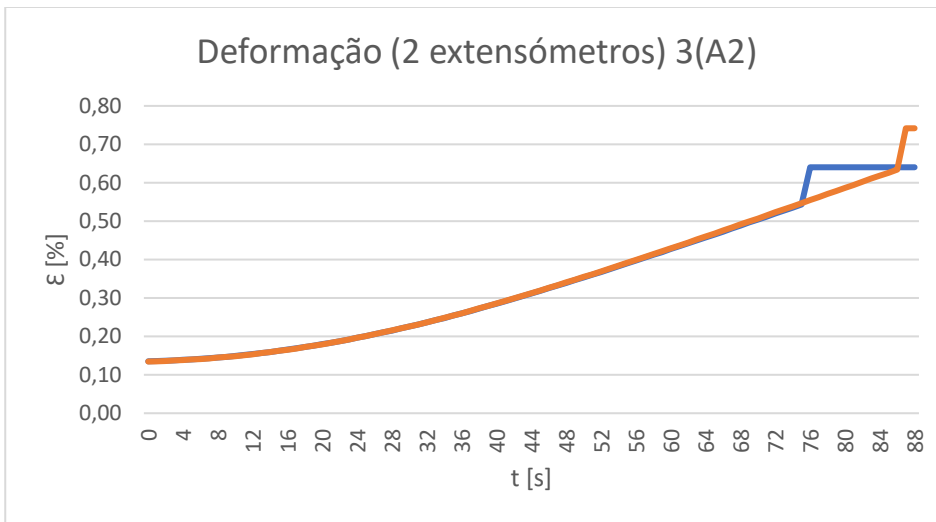


Figura 44. Extensão de cada lado do provete 3(A2)

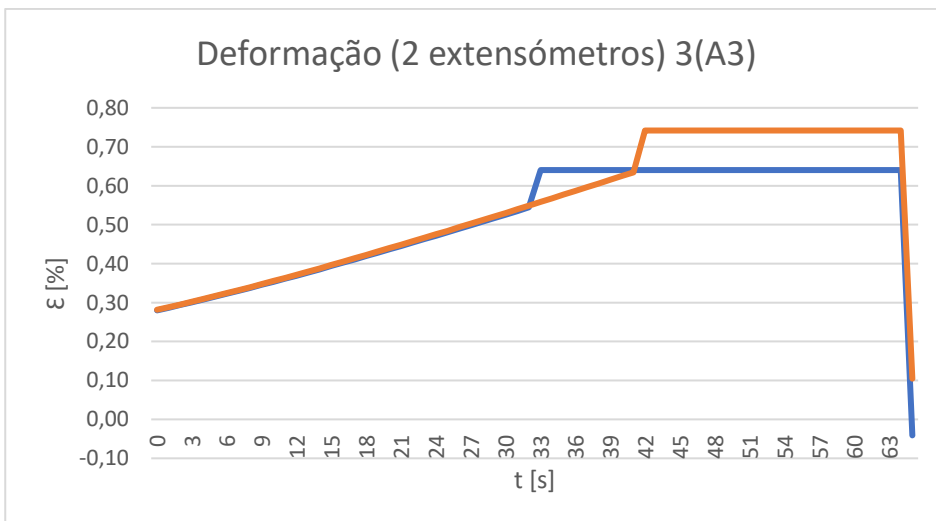


Figura 45. Extensão de cada lado do provete 3(A3)

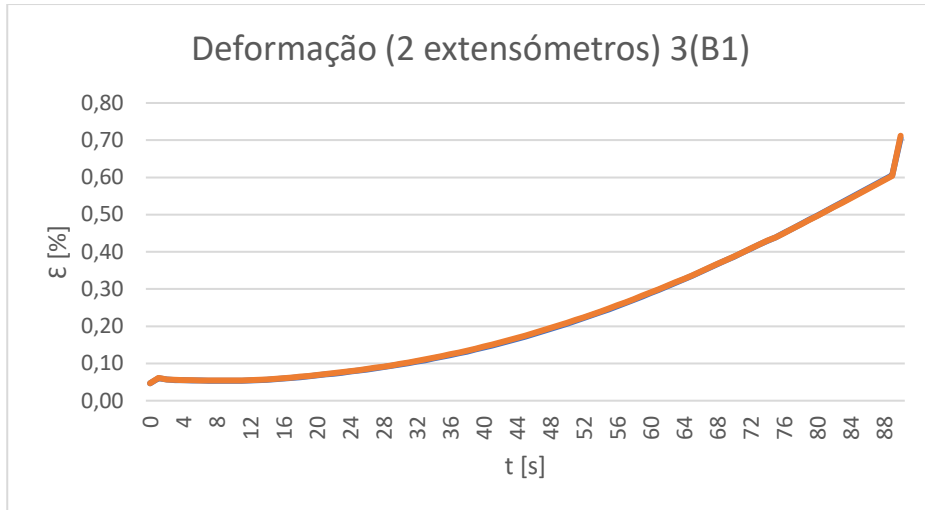


Figura 46. Extensão de cada lado do provete 3(B1)

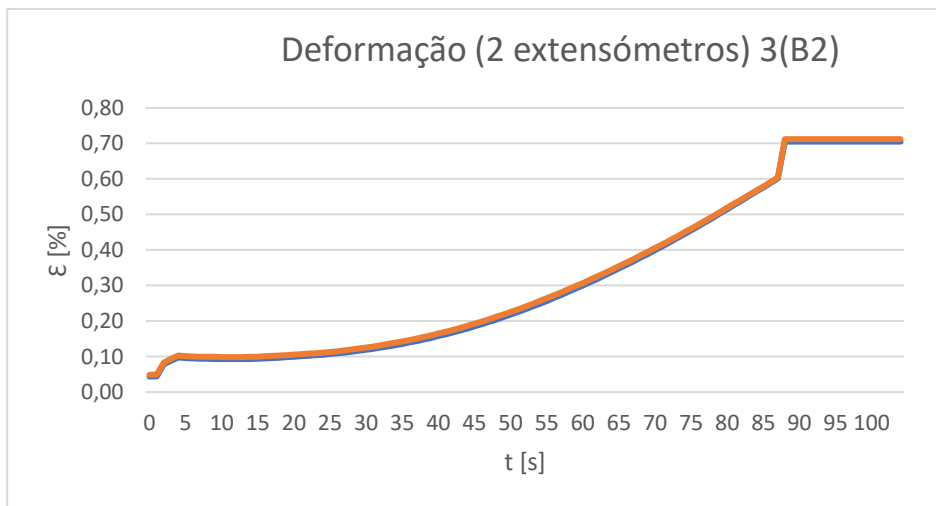


Figura 47. Extensão de cada lado do provete 3(B2)

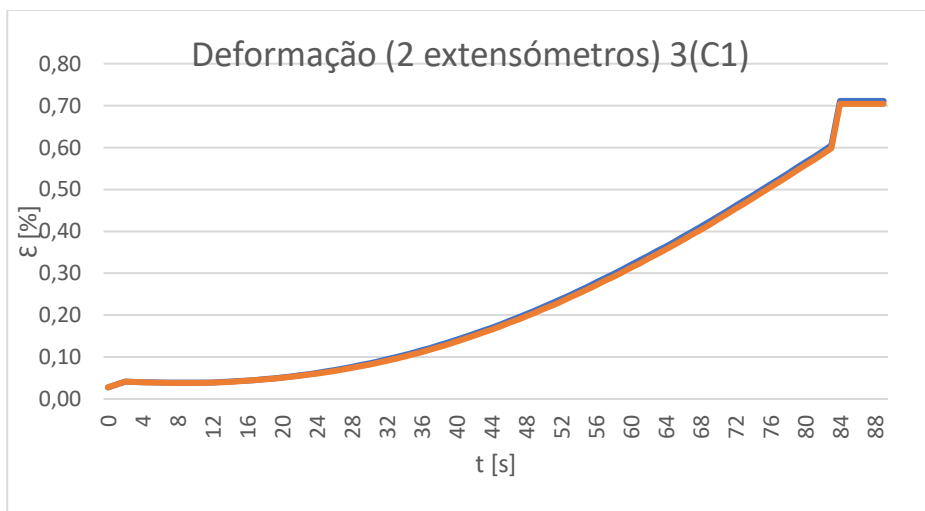


Figura 48. Extensão de cada lado do provete 3(C1)

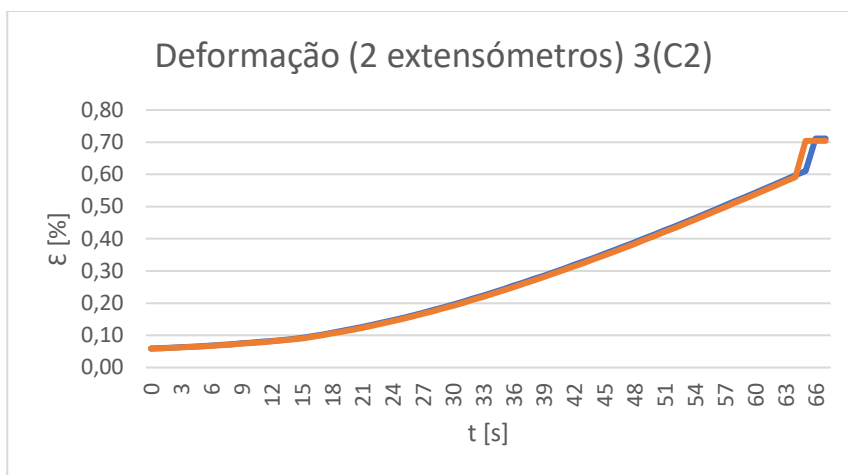


Figura 49. Extensão de cada lado do provete 3(C2)

Visto que nenhum provete sofreu empenamento, os dados retirados para cada ensaio foram tratados de modo a criar gráficos de tensão em função da deformação, Figuras 50, 51, 52, 53, 54, 55 e 56, permitindo o cálculo dos valores do módulo de Young, os quais são apresentados na Tabela 11. Este processo seguiu a mesma abordagem adotada no primeiro ensaio.

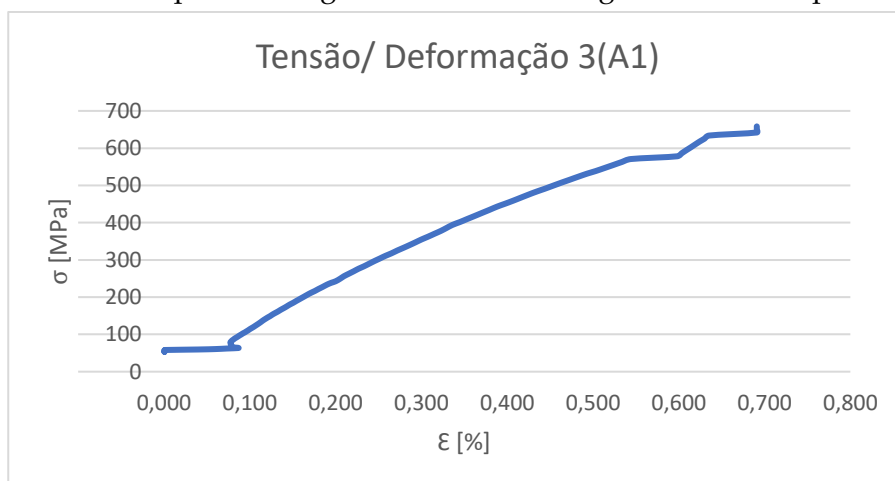


Figura 50. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 3(A1)

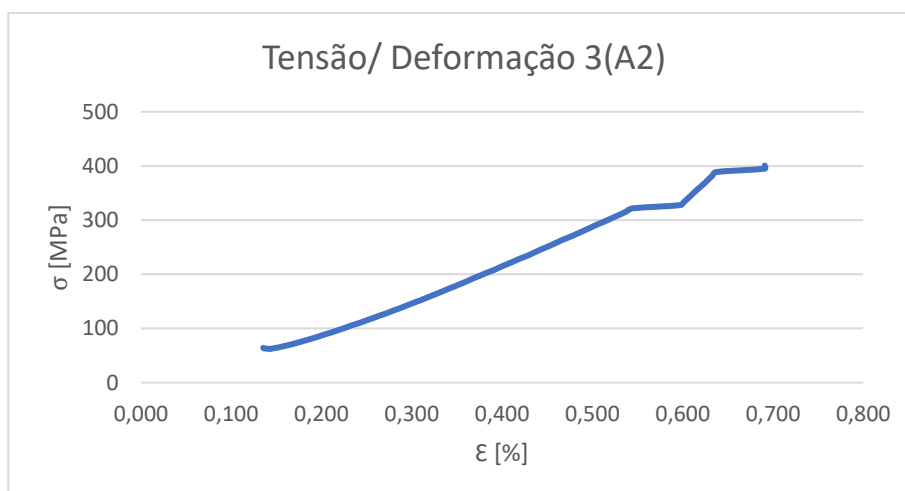


Figura 51. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 3(A2)

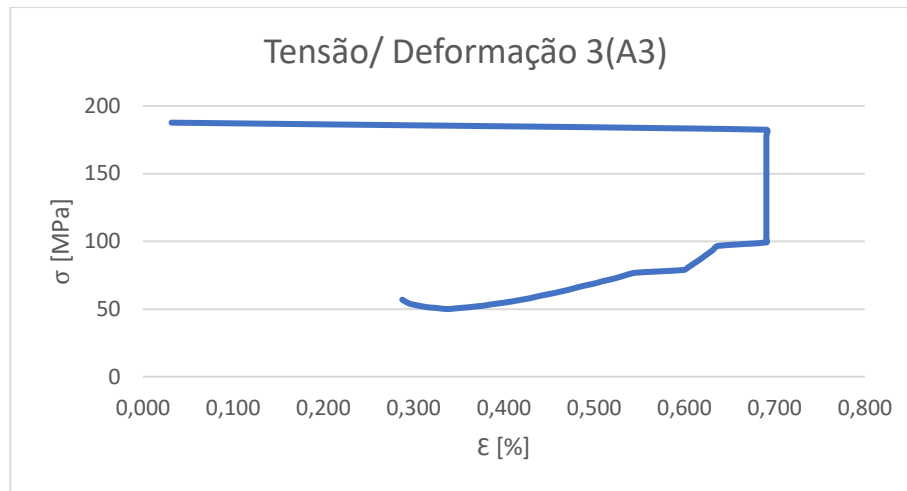


Figura 52. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 3(A3)

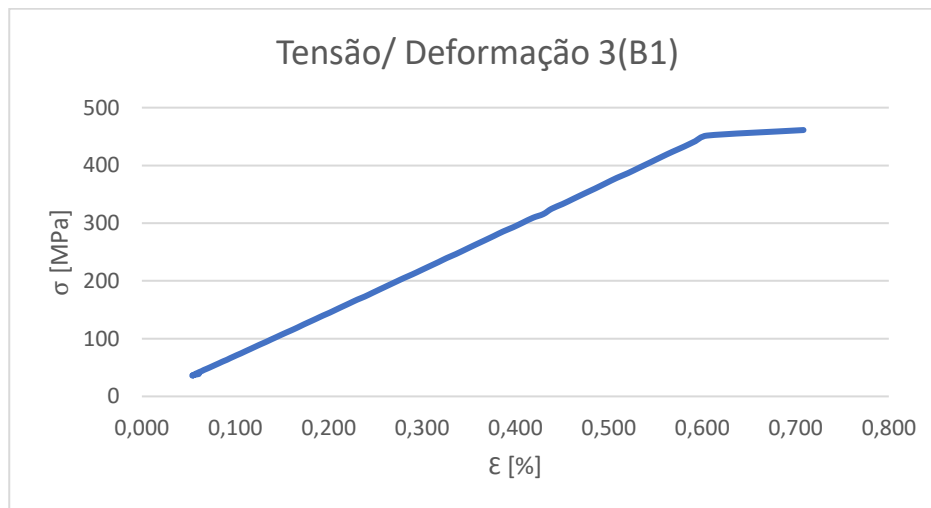


Figura 53. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 3(B1)

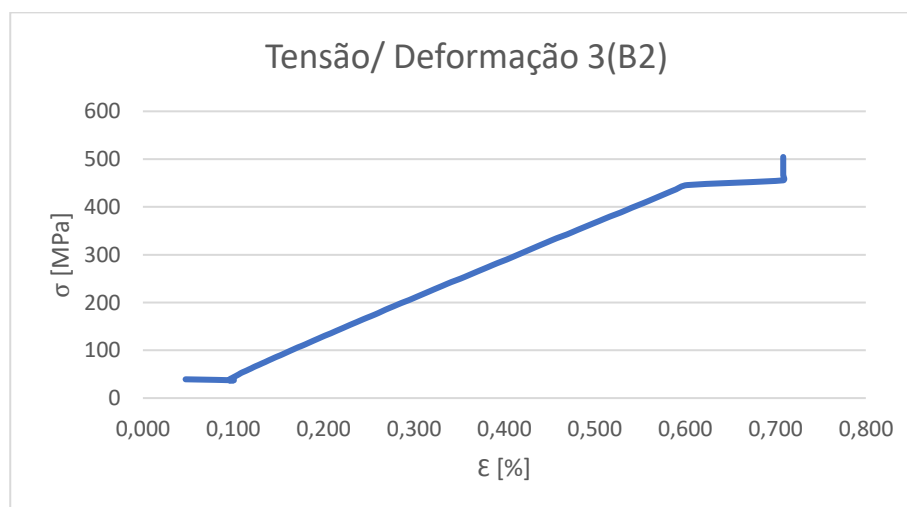


Figura 54. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 3(B2)

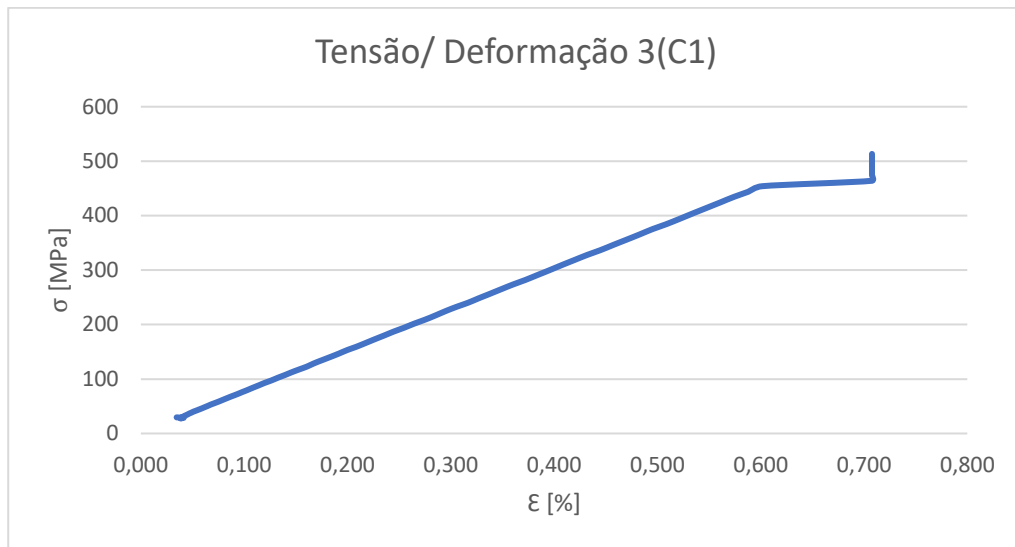


Figura 55. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 3(C1)

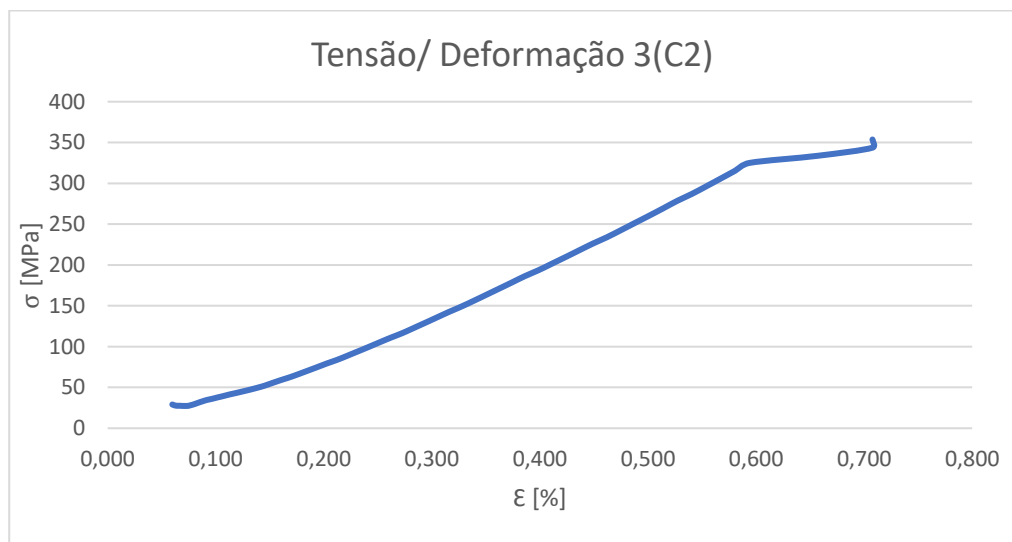


Figura 56. Gráfico da tensão em função da deformação do provete 3(C2)

- Análise do comportamento da rotura

Ocorreu o mesmo tipo de rotura em todos os provetes, por laminação.

É possível ver como todas as peças de reforço se separaram do provete, o que acabou por provocar erosão através da cravação das pinças, danificando o provete e conduzindo a resultados pouco fidedignos.

A constituição do laminado (3) provocou um tipo de rotura diferente das que até agora se verificaram. Uma vez que é principalmente constituído por layers de fibras de carbono unidirecional, a 0° e 90° consecutivamente, cada camada com a direção das fibras perpendicular à força provocou uma descontinuidade, ocorrendo as roturas apresentadas nas Figuras 57, 58, 59, 60, 61, 62 e 63.



Figura 57. Rotura do provete 3(A)



Figura 58. Pormenor da rotura do provete 3(A)



Figura 59. Rotura das layers do provete 3(A)



Figura 60. Rotura do provete 3(B)



Figura 61. Rotura das layers do provete 3(B)

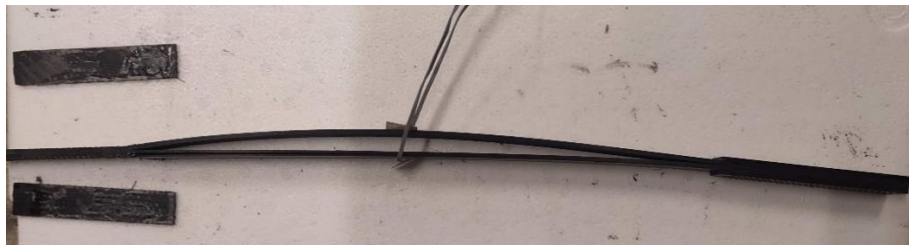


Figura 62. Rotura do provete 3(C)



Figura 63. Rotura das layers do provete 3(C)

3.4.3.4. Conclusões do ensaio

Houve concordância entre os resultados do primeiro e do terceiro ensaios, pelo que se poderá afirmar que os resultados revelam a inexistência de defeitos de produção do laminado.

A composição do laminado revelou uma rotura diferente para cada conjunto de ensaios. No ensaio (1), com uma distribuição das fibras em malha, a rotura deu-se transversalmente ao comprimento do provete, no ensaio (2), onde as fibras estavam todas segundo a mesma orientação, a rotura foi por delaminação entre fibras, no ensaio (3) ocorreu uma rotura por delaminação entre layers.

Protótipo para Ensaio de Arrancamento

4.1. Carbono

Para a conceção do protótipo foram avaliados três laminados diferentes, com características distintas entre si. Sendo assim, foi necessária a escolha entre os laminados indicados na Tabela 12.

Tabela 12. Resumo dos valores da caracterização dos laminados

Laminado	1	2	3
Carbono	Prepreg	Prepreg	Prepreg
	Plain 400 g/m ² 12k	UD 100 g/m ²	Twill + UD
Tensão de Rotura [MPa]	727.04	1234.25	644.32
Módulo de Young [GPa]	-	139	80

Para além dos resultados não serem os mais fiáveis, tal como foi avaliado no capítulo 3, o laminado 1 revela-se impossível de ser concebido perante as dimensões exigidas para o ensaio de tração e as disponibilidades da empresa OXYBLACK.

Uma vez que o laminado 2 apenas apresenta fibras apenas numa direção, numa peça constituída apenas por carbono UD apenas poderia ser aplicada uma força de tração pura ao longo de toda a peça, o que tornava impossível a sua conceção devido à variação e concentração de forças aplicadas nas cabeças de um Stud.

Desta forma foi decidido avançar com a produção dos protótipos para o ensaio de arrancamento a partir do laminado 3.

4.2. Dimensão

4.2.1. Alma

Como método de comparação foi tida em consideração a dissertação de Isufi (2018). Nesta investigação Isufi construiu Studs a partir de varões de aço com 8 mm de diâmetro, com tensão de cedência característica nominal $f_{yk} = 500$ MPa.

Para além da resistência característica do aço é tida também em consideração a força de cedência característica calculada pela seguinte expressão, (4-1).

$$F_y = A_s \times f_{yk} = 20.11 \text{ kN} \quad (4-1)$$

Tabela 13. Valores médios obtidos a partir dos ensaios experimentais, laminado 3

Laminado			3
Carbono			Prepreg
			Twill + UD
En- saio	espessura	[mm]	5
	Provete A (b=10 mm)	Força de Rotura [kN]	31.71
		Tensão de Rotura [MPa]	634.16
		Módulo de Young [GPa]	87.87
	Provete B (b=15 mm)	Força de Rotura [kN]	53.18
		Tensão de Rotura [MPa]	709.08
		Módulo de Young [GPa]	76.46
	Provete C (b=20mm)	Força de Rotura [kN]	59.48
		Tensão de Rotura [MPa]	594.80
		Módulo de Young [GPa]	69.92

Para qualquer uma das dimensões “b”, as forças de roturas experimentais, expressas na Tabela 13, têm valores superiores à força de rotura indicada por Isufi. Relativamente à tensão de rotura, os valores apresentam uma variabilidade não esperada, com uma média de 646.01 MPa, também superior à resistência característica do aço.

Dado que não conhecemos como a peça reage a diferentes concentrações de tensões, todos os resultados obtidos são aceitáveis, uma vez que abrangem valores superiores a $F_y = 20.11 \text{ kN}$. Optou-se por duas dimensões para a largura da alma: 10 mm e 15 mm.

4.2.2. Cabeça do Stud

Após consultar diversas soluções comerciais de Studs, considerou-se um diâmetro da cabeça 3 vezes maior que o diâmetro do varão.

Portanto, se a área do varão for dada pela equação (4-2).

$$A_{\text{varão}} = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (4-2)$$

A área da cabeça será expressa pela equação (4-3).

$$A_{cabeça} = \pi \times \left(\frac{3d}{2}\right)^2 = 9 \times \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (4-3)$$

Desta forma se conclui que a relação $A_{cabeça} / A_{varão}$ é dada pela equação (4-4).

$$A_{cabeça} = 9 \times A_{varão} \quad (4-4)$$

Tendo em conta que os Studs em estudo são retangulares, para o caso particular de uma alma de 15 mm de largura e 5 mm de espessura, foram exploradas algumas hipóteses, como se mostra na Figura 64.

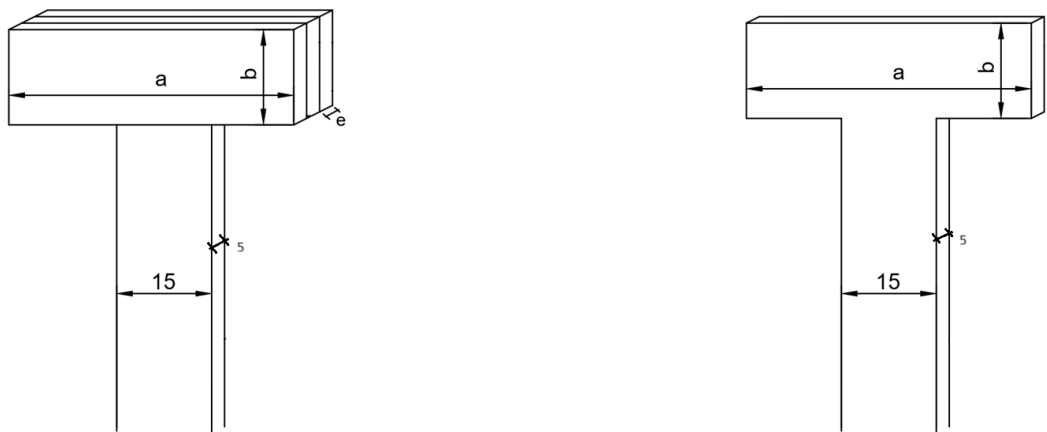


Figura 64. Dimensões da cabeça do protótipo em mm

$$a = \frac{A_{cabeça}}{5+2e} \quad (4-5)$$

$$b = \frac{b-15}{2} \quad (4-6)$$

Com base nas equações (4-5) e (4-6) foram exploradas algumas hipóteses para a cabeça do Stud, respeitando sempre a relação $A_{cabeça} = 9 \times A_{alma}$.

Após terem sido analisadas várias soluções para a cabeça do protótipo chegou-se à conclusão de que uma espessura $e = 5$ mm e $A_{cabeça} = 9 \times A_{alma}$, seria a que apresentava melhores dimensões para um produto final, expressas na Tabela 14.

Tabela 14. Dimensões da cabeça do Stud

		Valor	Unidades
	Área	75	[mm ²]
	Cabeça	675	[mm ²]
e = 5 mm	a	45	[mm]
	b	15	[mm]

Como foi analisado no capítulo (3.2), uma simples forma em “T” invertido iria causar uma concentração de tensões junto da zona que faz um ângulo de 90°, entre a cabeça e a alma da peça. De forma a mitigar esta fragilidade a peça foi dimensionada com um arredondamento cujo raio corresponde à espessura da alma.

Relativamente ao acréscimo da espessura da cabeça foi necessário definir qual a dimensão da peça a ser colada. De modo a poder retirar conclusões de qual a melhor solução, foram consideradas duas dimensões da peça responsável pelo aumento da espessura da cabeça do protótipo, “pastilha de fixação”.

Conforme ilustrado na Figura 65, a primeira solução para a “pastilha de fixação 1” corresponde a uma peça paralelepipedal exatamente com as dimensões “a” e “b”, descritas acima.

Na Figura 66, a peça denominada de “pastilha de fixação 2”, tem um acréscimo que acompanha o ajuste arredondado imposto no protótipo.

Comparando as duas soluções, a primeira diminui os gastos na sua produção, no que diz respeito à organização do corte do laminado na CNC. Contudo tem uma menor área de colagem que a segunda solução. Outro fator que pode favorecer a segunda solução é a sua maior área ao longo de toda a face superior da pastilha em contacto com o betão.



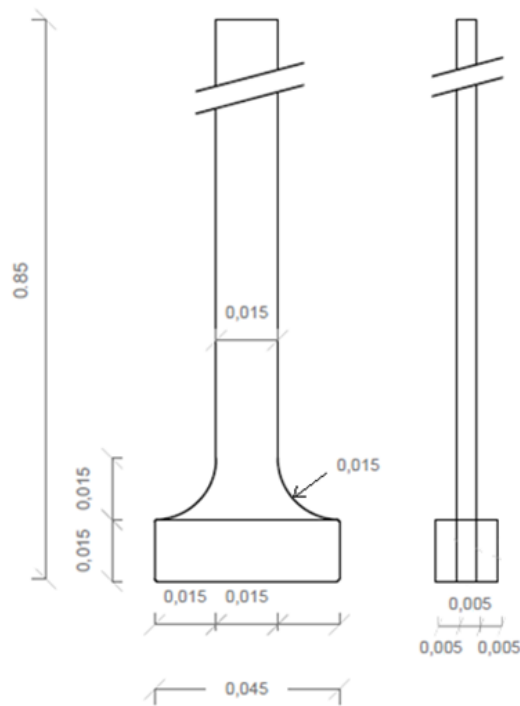
Figura 65. “Pastilha de fixação 1” correspondente aos protótipos PA e PC



Figura 66. Figura (2) "Pastilha de fixação 2" correspondente aos protótipos PB e PD

Concluindo, deliberou-se submeter a ensaio quatro conjuntos, cada um composto por três protótipos. As dimensões respectivas são expressas nas Figuras 67, 68, 69 e 70.

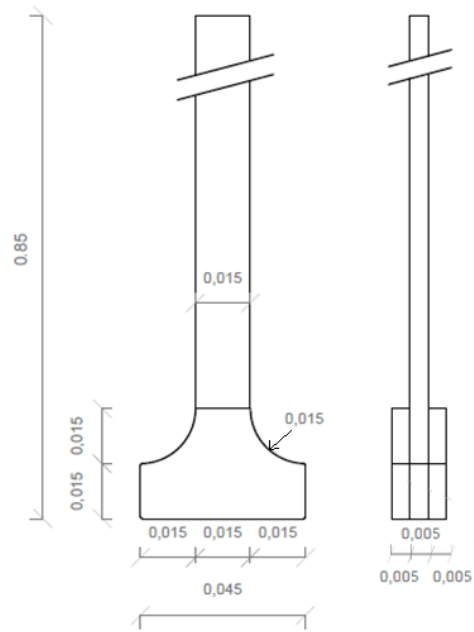
- PA [1, 2, 3]



Stud A

Figura 67. Desenho do Stud A

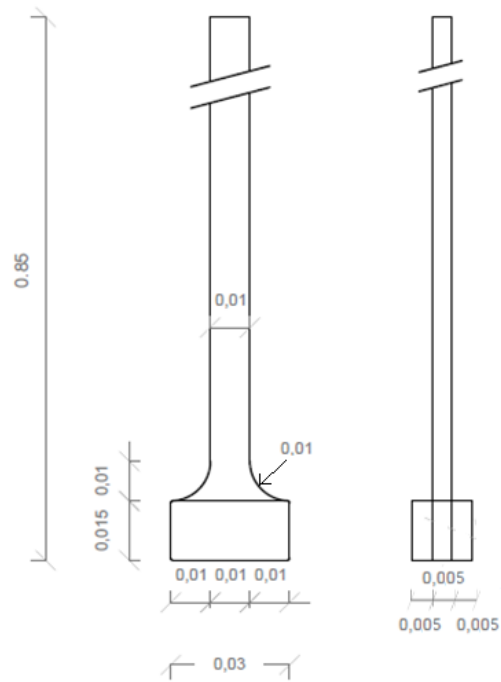
- PB [1, 2, 3]



Stud B

Figura 68. Desenho do Stud B

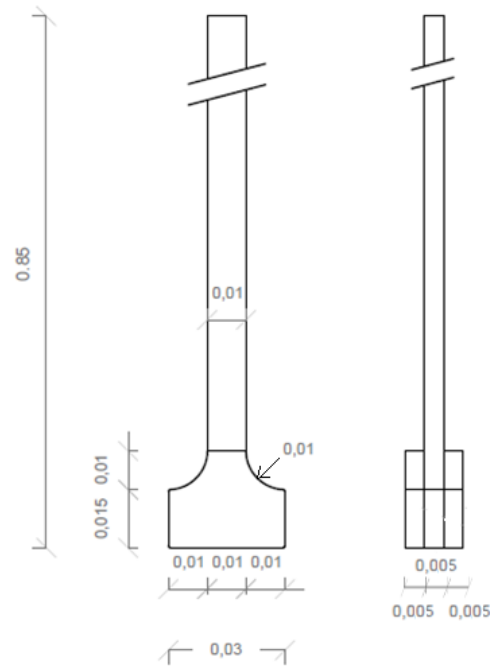
- PC [1, 2, 3]



Stud C

Figura 69. Desenho do Stud C

- PD [1, 2, 3]



Stud D

Figura 70. Desenho do Stud D

4.3. Produção

Todos os processos de produção, de qualquer peça em fibra de carbono utilizada na presente dissertação, foram cuidadosamente acompanhados e muitos deles executados pelo autor. Neste capítulo é descrito todo o processo da produção dos protótipos a serem utilizados no ensaio final de arrancamento. Na Figura 71 está apresentada uma ilustração 3D dos protótipos a serem produzidos.



Figura 71. Modelo de cada protótipo a ser produzido



Figura 72. Corte do laminado 3, na CNC



Figura 73. Protótipos tratados posteriormente ao corte na CNC

Através das dimensões estabelecidas nos capítulos anteriores, a empresa OXYBLACK disponibilizou a CNC e executou os cortes do laminado 3, Figura 72, com base nos desenhos apresentados no Anexo A.

Para se obterem as peças ilustradas na Figura 73 é necessária a remoção de pontes de ligação existentes após o corte da CNC e lixar todos os restantes excessos.



Figura 74. Processo de produção das “pastilhas”

Relativamente ao corte das “pastilhas”, do laminado 3, através da CNC, e antes do processo de remoção das pontes, foi adicionada uma camada fina de resina, aplicada peelply (película texturada para criação de micro-texturas) e a placa levada a uma estufa, para que a resina fosse curada com uma textura rugosa, tal como se pode ver na primeira imagem da Figura 74.

Assumindo uma boa superfície de colagem, as “pastilhas” são removidas e lixadas, apresentando o aspeto indicado na segunda imagem da Figura 74.

De seguida, os protótipos são lixados junto às cabeças, às quais são posteriormente coladas as pastilhas, através de uma resina epoxy (Sicomín Epoxy Systems, n.d.). Na terceira imagem da Figura 74 é possível ver a aplicação da resina na face rugosa da “pastilha” e na cabeça do protótipo.

Deixando a resina endurecer um pouco, para que a fixação seja mais eficaz e menos escorregadia, as “pastilhas” são colocadas cuidadosamente nos locais destinados e é aplicada pressão através de grampos, Figura 75. Assim que o endurecimento da resina está assegurado, o protótipo é levado para uma estufa a 60°C durante 60 minutos, que irá conferir as condições finais para o endurecimento da peça.



Figura 75. Fixação das pastilhas a um protótipo através de grampos

Dado que é necessário executar 12 cabeças de arrancamento, no local onde as cunhas irão apertar o laminado, foi pensada uma estratégia para que a sua conceção fosse mais eficaz. Sabendo qual a inclinação pretendida, em ensaios experimentais e de modo a diminuir ao máximo o processo de tratamento da inclinação da cabeça, foram calculadas as dimensões ótimas de cada layer de modo a quando fossem aplicadas fosse possível obter desde logo a inclinação final pretendida.

Na Figura 76 é possível ver as várias etapas da produção da cabeça de arrancamento. Do lado direito, a seguir às layers recortadas, está o protótipo ao qual é aplicada uma camada inicial envolvendo toda a alma do protótipo, conferindo aderência entre a cabeça e o protótipo e reforçando a zona final da cunha, que irá transferir a força de arrancamento e poderá causar possíveis danos.

A próxima etapa é a aplicação das layers previamente recortadas; entre cada três layers é aplicada uma força de compressão, tal como exigido pelas normas da empresa OXYBLACK, que irá conferir o aspeto final apresentado na Figura 76.

Por último, a cabeça é envolvida por uma fita termoretrátil (Faserverbundwerkstoffee Composite Technology, n.d.), Figura 77, que ao ser exposta a temperaturas altas irá retrair e aplicar uma força de compressão. De maneira que a fita não altere de posição e que a resina do Prepreg não babe para o resto da peça é aplicada uma fita azul isoladora de elevada resistência térmica.

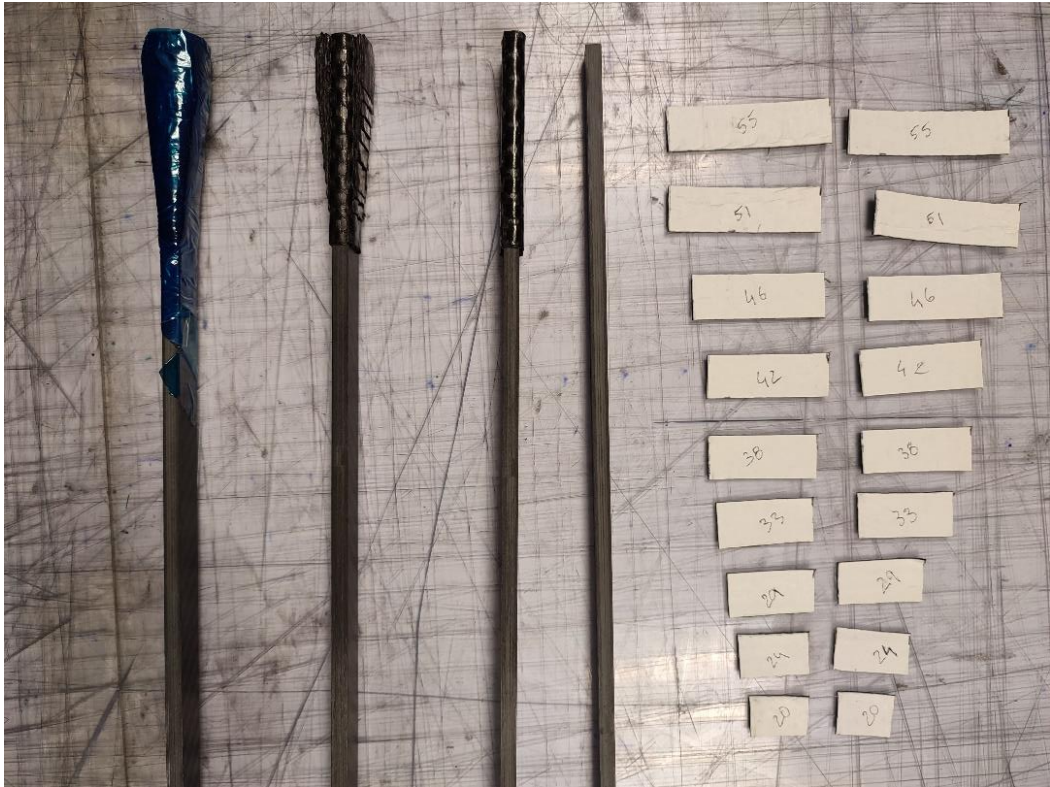


Figura 76. Etapas da produção da cabeça de arrancamento



Figura 77. Aplicação da fita termoretrátil

5.1. Programa Experimental

5.1.1. Introdução

Neste capítulo caracterizam-se os modelos experimentais utilizados para estudar as diferentes soluções de ancoragem e os resultados do comportamento ao arrancamento das soluções desenvolvidas.

Apresentam-se também os resultados dos ensaios de caracterização mecânica do betão utilizado. Descreve-se ainda o sistema de ensaio e a instrumentação utilizada.

A análise das várias soluções teve como objeto estudar o comportamento dos protótipos e a sua capacidade de carga, face às características específicas de um laminado e às soluções desenvolvidas para as diferentes cabeças dos protótipos.

Para cada solução foram fabricados 3 protótipos que foram testados através de um ensaio de arrancamento.

Todos os materiais utilizados na produção do maciço, tal como o processo de betonagem, foram financiados e executados pela empresa Mota-Engil, na central de produção de betão de Valongo.

5.1.2. Geometria dos Maciços de Betão

Foram executados dois maciços de betão, com as mesmas dimensões e com o mesmo tipo de betão. Na Figura 78 estão representadas as dimensões de cada uma das lajes (1.2 m por 2 m). As dimensões e espaçamentos entre espécimes foram baseadas nos ensaios monotónicos e cíclicos de (Reguengo, 2010), com uma espessura 0.12 m. O corte AA é apresentado no anexo A.

Os maciços de betão foram armados com uma malha quadrada de varões nervurados com diâmetro de 10 mm e espaçamento de 15 cm, Figura 79.

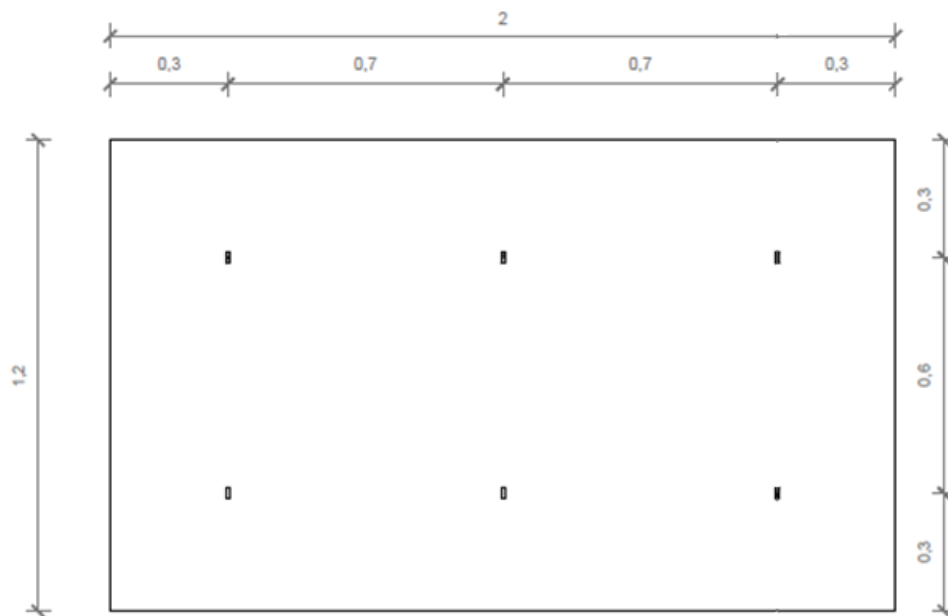
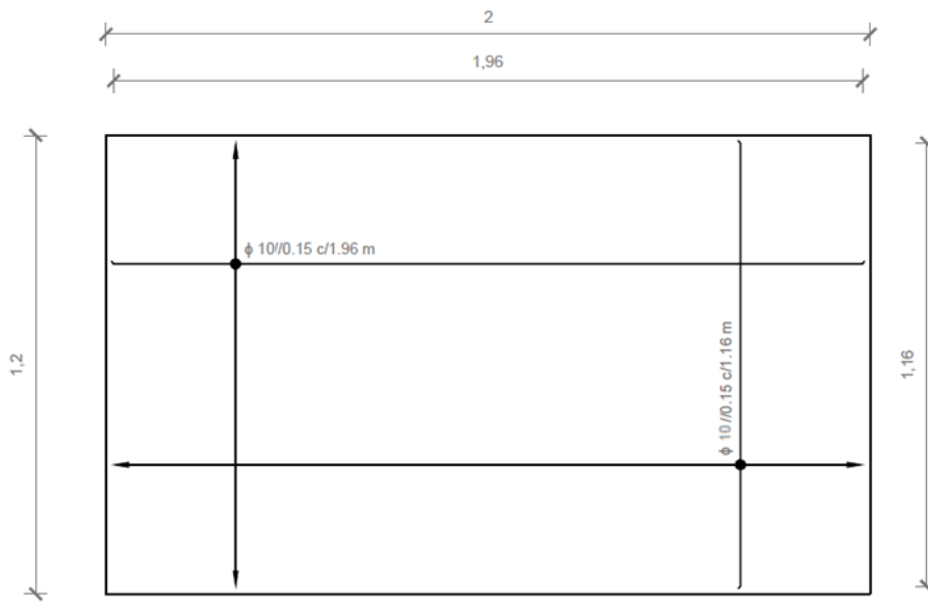
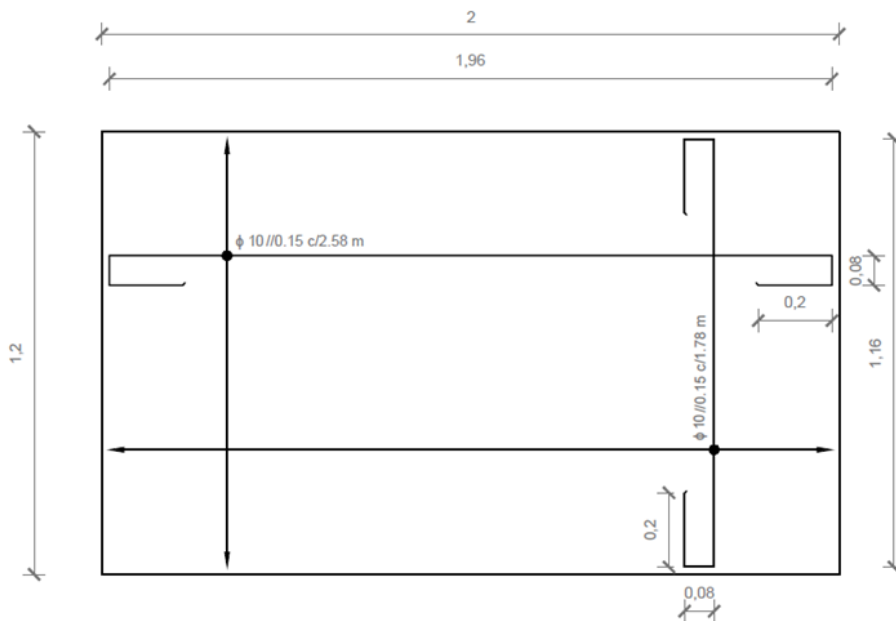


Figura 78. Planta maciço e disposição dos protótipos, dimensões em (m)



Armadura Inferior



Armadura Superior

Figura 79. Armaduras dos maciços e disposição dos protótipos, dimensões em (m)

Para informações mais específicas, pode consultar-se o desenho que foi disponibilizado à Mota-Engil e que se apresenta no Anexo A.

Procurou-se que a distância do protótipo aos apoios metálicos do sistema de ensaio fosse semelhante para todas as situações. Existiu também a preocupação de deixar posicionados os

protótipos a uma distância mínima dos bordos do maciço de betão de 250 mm, tal como adotado por Eligehausen para não ocorrer fendilhação devido à proximidade do bordo (Eligehausen, 2006).

5.1.3. Procedimento de Preparação dos Maciços

Para a betonagem do maciço de betão foi utilizada uma cofragem de madeira de superfície lisa lubrificada com óleo descofrante, Figura 80. Os maciços de betão foram betonados todos no mesmo dia, tendo-se especificado um betão da classe C30/37.



Figura 80. Cofragem lubrificada



Figura 81. Aplicação da armadura com espaçadores

Na Figura 81 pode-se observar a cofragem já com a armadura previamente dobrada e com os devidos espaçadores. Para um melhor manuseamento do maciço foram colocados ganchos, representados na Figura 83.



Figura 82. Posicionamento dos protótipos

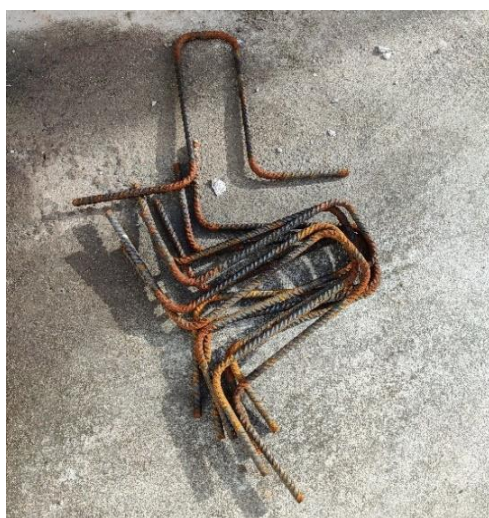


Figura 83. Ganchos para o manuseamento do maciço

Antes de betonar foi construída uma estrutura de madeira, responsável pelo posicionamento dos protótipos, Figura 82. Tal como se pode observar na Figura 85, houve especial atenção em posicionar o protótipo encostado à cofragem inferior e no centro da malha de aço, evitando que a armadura alterasse os resultados.



Figura 84. Vibração do maciço betonado



Figura 85. Fixação dos protótipos à estrutura de madeira

Com os protótipos devidamente posicionados procedeu-se à betonagem e à vibração do betão, Figura 84. Para que os protótipos tenham uma configuração final vertical tal como mostra a Figura 87, os protótipos foram ajustados com ajuda de uma régua niveladora, da maneira como se pode observar na Figura 86.



Figura 86. Ajuste da verticalidade do protótipo



Figura 87. Disposição final dos muros

Durante a betonagem dos muros foram também betonados 12 provetes cúbicos e 12 provetes cilíndricos para caracterização do betão, Figura 88.



Figura 88. Provetes betonados

5.1.4. Sistema de Ensaio e Instrumentação

Após o betão ter adquirido resistência suficiente (19 dias após a betonagem), a Mota-Engil assegurou o transporte dos dois maciços juntamente com os provetes de Valongo para Almada.

Os ensaios de todos os modelos foram realizados no laboratório de estruturas pesadas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa.

5.1.4.1. Estrutura de suporte

Para realizar os ensaios de arrancamento, foi necessário criar uma estrutura de suporte para apoiar o cilindro hidráulico e a célula de carga. O sistema de arrancamento é constituído por uma estrutura metálica de reação formada por dois perfis de secção quadrada e uma viga composta por dois perfis UPN, tal como mostra a Figura 89.

O maciço foi apoiado em dois perfis metálicos, de modo que haja espaço suficiente para posicionar elementos de medição por baixo da laje.



Figura 89. Configuração do ensaio de arrancamento

5.1.4.2. Sistema de Puxe

O sistema de ensaio foi constituído por um cilindro hidráulico perfurado (Enerpac 12 Ton) acionado por uma bomba hidráulica (Enerpac GPEW 2020 WSN) e colocado sobre uma célula de carga (CLC-200KNA), que, ao ser atuado, exerce uma força de arrancamento no protótipo a ensaiar. O sistema de transmissão da força de arrancamento ao protótipo é conseguido utilizando uma cabeça de ancoragem de pré-esforço e respetivas cunhas planas, como mostra a Figura 90.



Figura 90. Sistema de transmissão de força

5.1.4.3. Configuração Geral do Ensaio

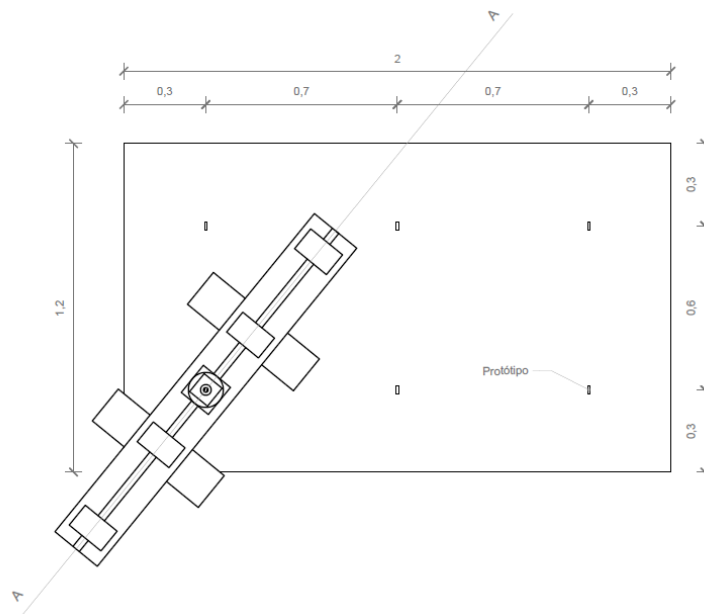
O sistema de ensaio é auto equilibrado, ou seja, não necessita de reação exterior já que a força é exercida no próprio maciço de betão. Para o arrancamento dos protótipos, que estão embebidos nos maciços, foi necessário adotar diferentes tipos de posicionamentos do sistema, consoante a localização do protótipo no bloco.

Os protótipos foram encostados à cofragem para se poder ter uma perspetiva, do lado inferior da laje, do comportamento de cada um. Contudo o maciço teve de receber um desbaste para que a cabeça dos protótipos estivesse à vista, Figura 91.



Figura 91. Tratamento da laje

Para fornecer uma melhor panorâmica da configuração geral do ensaio de arrancamento, nas Figuras 92 e 93 apresenta-se um desenho do ensaio de arrancamento, correspondente a um protótipo de canto. Para mais informações o desenho técnico original disponibilizado aos técnicos responsáveis pelo laboratório encontra-se no Anexo A.



Planta Teste de Arrancamento

Figura 92. Configuração do ensaio de arrancamento, vista em planta

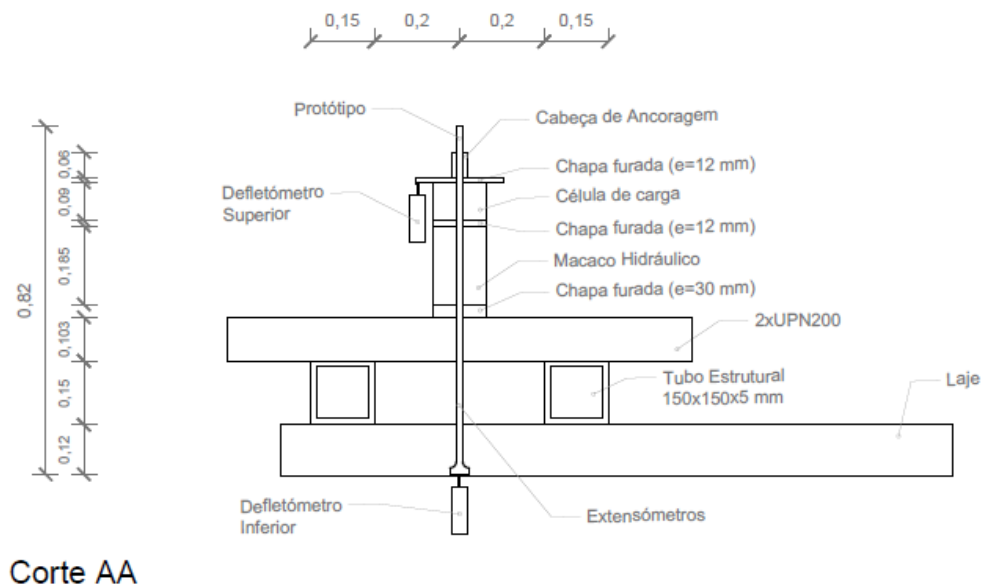


Figura 93. Configuração do ensaio de arrancamento, corte AA

5.1.4.4. Configuração Geral do Ensaio

O sistema de instrumentação para aquisição de dados, indicado na Figura 96, é constituído por uma célula de carga, defletómetros, superior e inferior, (CDP 100) e extensómetros elétricos (Strain Gauges, BFLA-5-8-3L), ligados a um DataLogger Spider 8(HBM), que por sua vez envia a informação para um computador. Os dados foram recolhidos através de um software da HBM (CATMAN) e posteriormente exportados para uma folha de cálculo para tratamento complementar.

Ao DataLogger estava ligada a célula de carga, dois defletómetros e dois extensómetros.

Na Figura 94 está um técnico a colocar um extensómetro em cada lado do protótipo, 7 cm acima do maciço. Para além disso foi colocado um defletómetro encostado a uma placa metálica acrescentada junto à cabeça de arrancamento, para obter o seu deslocamento, e outro defletómetro situado por baixo do maciço para obter o deslocamento da cabeça do protótipo, que corresponde ao escorregamento, durante o ensaio de arrancamento.

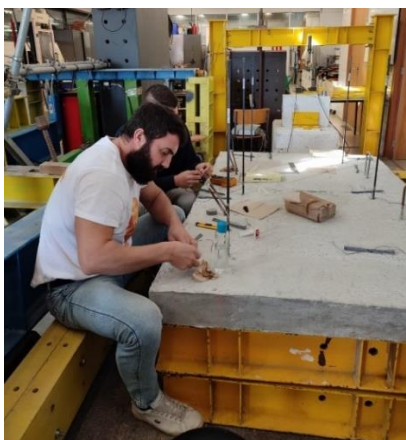


Figura 94. Preparação dos extensómetros

A célula de carga da marca Tokyo Sokki Yenkyujo (CLC-200kN) foi colocada entre o macaco hidráulico e a chapa metálica junto á cabeça de arrancamento de modo a medir a força transmitida pelo macaco ao protótipo.

5.1.5. Caracterização do Betão

A betonagem das duas lajes foi feita toda a partir de uma só mistura de betão C30/37, Figura 96. Aquanto da betonagem dos maciços, foram betonados cubos e cilindros para caracterizar o betão em relação à sua resistência à compressão e tração. Como demonstra a Figura 97, houve o cuidado de vibrar o betão após a betonagem dos provetes, tal como na betonagem dos maciços.

Os ensaios de caracterização do betão foram realizados em dois momentos distintos. O primeiro ocorreu durante a semana dos testes de arrancamento, mais precisamente no segundo dia, correspondendo a um betão com precisamente 28 dias de idade. O segundo foi conduzido na semana subsequente, com o betão atingindo uma idade de 34 dias. No primeiro momento foram realizados ensaios à compressão de cubos, enquanto no segundo momento foram realizados ensaios à compressão de cubos e de cilindros, e ainda ensaios de compressão diametral para caracterizar resistência à tração do betão. Neste subcapítulo, serão apresentados os valores de resistência obtidos nos ensaios de compressão pura e compressão diametral, realizados nos provetes cujos moldes foram disponibilizados pela FCT Nova e transportados até à central de betonagem da Mota-Engil, em Valongo.

No primeiro conjunto de ensaios, dedicado exclusivamente à compressão pura, foram utilizados 3 provetes cúbicos (cub1, cub2, cub3), cada um com 150 mm de aresta. Já no segundo ensaio, foram testados à compressão pura 6 cubos (cub4, cub5, cub6, cub7, cub8, cub9) com as mesmas dimensões previamente mencionadas, bem como 6 cilindros (cil1, cil2, cil3, cil4, cil5, cil6) com um diâmetro de 150 mm e um comprimento de 300 mm. Além disso, foram executados ensaios à compressão diametral em 6 cilindros (cil7, cil8, cil9, cil10, cil11, cil12) com as dimensões já referidas.

Para os ensaios à compressão foi necessário a retificação dos 6 cilindros, operação que foi realizada pela APEB - Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto.



Figura 95. Preparação dos provetes



Figura 96. Mistura betão C30/37, Mota-Engil

5.1.5.1. Resistência à Compressão

5.1.5.1.1. Primeiros ensaios (27/02/2024)

O ensaio de compressão, ver Figuras 97 e 98, foi realizado segundo a norma NP EN 12390-3 através de uma prensa da CONTROLS (C56Z00).



Figura 97. Ensaio de compressão



Figura 98. Rotura do provete cúbico à compressão

No gráfico da Figura 99, podem-se observar as evoluções da força de compressão aplicada durante os ensaios e na Tabela 15 os correspondentes valores de rotura.

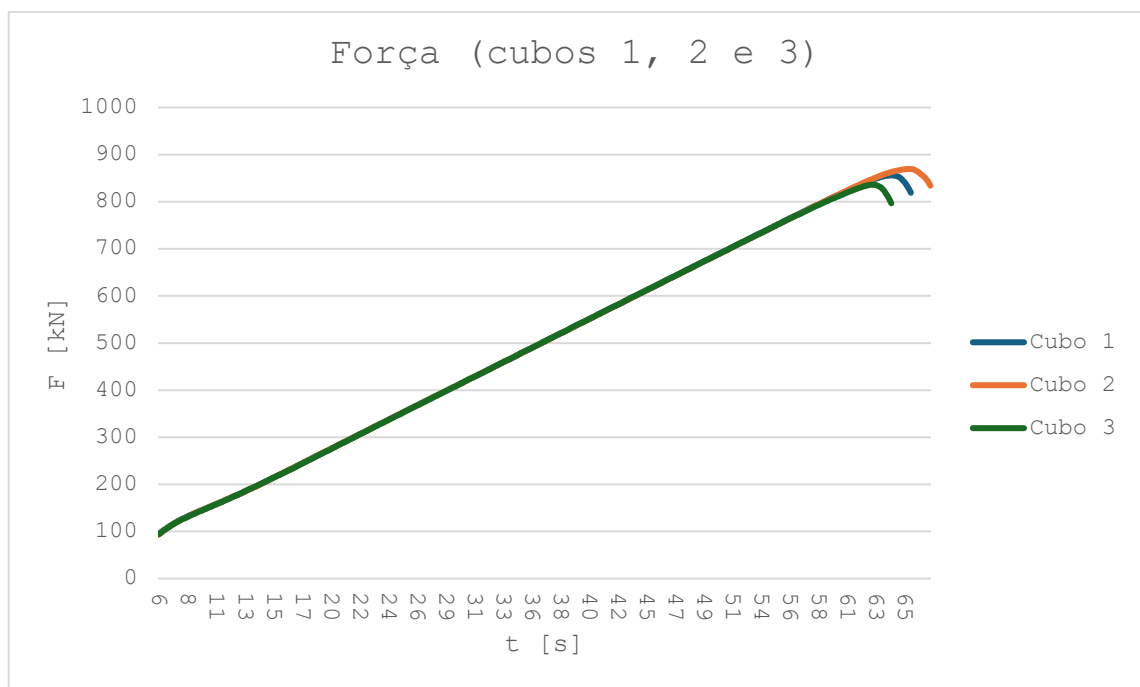


Figura 99. Força de compressão em função do tempo, cubos 1, 2 e 3

Tabela 15. Ensaio à compressão pura de provetes cúbicos (primeiro ensaio)

Provete	Força [kN]	f_{cc} [MPa]
Cub1	856.1	38.05
Cub2	869.5	38.65
Cub3	835.9	37.15
Média	853.9	37.95

A partir dos valores da força de rotura é possível determinar a tensão de rotura à compressão do betão (f_{cc}), através das seguintes expressões (NP EN 12390-3, 2003):

$$f_{cc} = \frac{F}{A_c} \quad (5-1)$$

Sendo,

- f_{cc} , resistência à compressão do provete cúbico;
- F , carga associada à rotura;
- A_c , área da secção transversal do provete na qual se aplica a força de compressão.

Calculando a média de valores obtidos para f_{cc} , tem-se:

$$f_{ccm} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n} = 37949.32 \text{ kN/m}^2 = 37.95 \text{ MPa} \quad (5-2)$$

5.1.5.1.2. Segundos ensaios (04/03/2024)

O ensaio de compressão foi realizado segundo a norma NP EN 12390-3 através de uma prensa da FORM+TEST PRUFSYSTEME, Figura 100.



Figura 100. Ensaio de compressão

Para o conjunto de cubos ensaiados foram retirados os valores indicados na Tabela 16.

Tabela 16. Ensaio à compressão pura de provetes cúbicos (segundo ensaio)

Provete	Força [kN]	f_{cc} [MPa]
Cub4	868	38.58
Cub5	834	37.07
Cub6	824	36.62
Cub7	843	37.47
Cub8	863	38.36
Cub9	853	37.91
Média	848	37.67

A partir dos valores da força de rotura é possível determinar a resistência à compressão do betão (f_{cc}), através das seguintes expressões (NP EN 12390-3, 2003):

$$f_{cc} = \frac{F}{A_c} \quad (5-3)$$

Sendo,

- f_{cc} , resistência à compressão do provete cúbico;
- F , carga associada à rotura;
- A_c , área da secção transversal do provete na qual se aplica a força de compressão.

Calculando a média de valores obtidos para f_{cc} , tem se:

$$f_{ccm} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n} = 37666.7 \text{ kN/m}^2 = 37.67 \text{ MPa} \quad (5-4)$$

O valor de resistência à compressão obtido aos 34 dias, 37.67 MPa é muito próximo do obtido nos ensaios de compressão pura, executado previamente aos 28 dias, 37.95 MPa .



Figura 101. Rotura do provete cilíndrico à compressão

Para o conjunto de ensaios dos cilindros retificados, Figura 101, foram retirados os valores indicados na Tabela 17.

Tabela 17. Ensaio à compressão pura de provetes cilíndricos (segundo ensaio)

Provete	Força [kN]
Cil1	564
Cil2	562
Cil3	555
Cil4	545
Cil5	553
Cil6	492
Média	545

A partir dos valores da força de rotura é possível determinar a resistência à compressão do betão (f_c), através das seguintes expressões (NP EN 12390-3, 2003):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5-3)$$

Sendo,

- f_c , resistência à compressão do provete cilíndrico;
- F , carga associada à rotura;
- A_c , área da secção transversal do provete na qual se aplica a força de compressão.

Calculando a média de valores obtidos para f_c , tem-se:

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n} = 30850.12 \text{ kN/m}^2 = 30.85 \text{ MPa} \quad (5-5)$$

Segundo o EC2, (EN1992-1-1, NP., 2010):

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} = 30.85 - 8 = 22.85 \text{ MPa} \quad (5-6)$$

- f_{ck} , resistência característica do betão à compressão;
- f_{cm} , resistência média à compressão.

5.1.5.2. Resistência à Tração

5.1.5.2.1. Segundos ensaios (04/03/2024)

Para determinação da resistência à tração do betão foi realizado o ensaio de compressão diametral segundo a norma NP EN 12390-6, através de uma prensa da FORM+TEST PRUFSYSTEME, Figuras 102 e 103.



Figura 102. Ensaio de compressão diametral

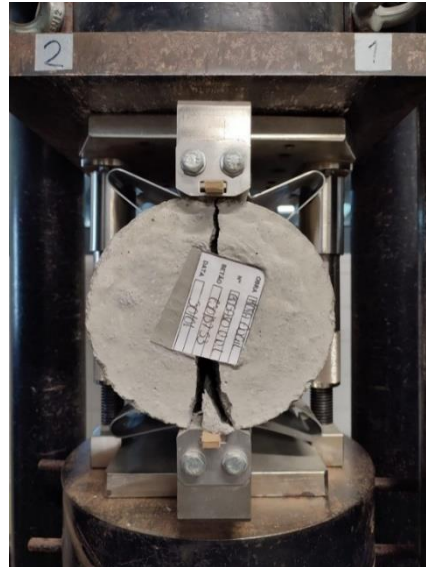


Figura 103. Ruptura do provete cilíndrico à compressão diametral

Para o conjunto de cilindros ensaiados foram obtidos os valores indicados na Tabela 18.

Tabela 18. Ensaio à compressão diametral de provetes cilíndricos (segundo ensaio)

Provete	Força [kN]	$f_{ct,sp}$ [kPa]
Cil7	197	2787.0
Cil8	153	2164.5
Cil9	209	2956.7
Cil10	168	2376.7
Cil11	185	2617.2
Cil12	215	3041.6
Média	188	2657.3

A partir destes valores é efetuada uma média e determinada a tensão média da resistência à tração do betão (NP EN 12390-6, 2003):

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times L} = 2657.3 \text{ kN/m}^2 = 2.66 \text{ MPa} \quad (5-7)$$

Sendo,

- F , média das cargas de ruptura;
- $d = 0,15m$, diâmetro do provete;
- $L = 0,30m$, comprimento do provete.

Com base no valor da tensão de ruptura por compressão diametral, pode-se determinar o valor médio da tensão resistente á tração do betão, a partir dos 21 dias de idade, segundo o EC2 (EN1992-1-1, NP., 2010):

$$f_{ctm} = 0.9 \times f_{ct,sp} = 2.4 \text{ MPa} \quad (5-8)$$

5.2. Apresentação de Resultados

Neste capítulo são apresentados na forma de tabelas e diagramas os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento.

Os resultados retirados pela célula de carga são apresentados em função dos defletómetros, superior e inferior. Para cada protótipo estão apresentados no mesmo gráfico os resultados dos três espécimes.

O defletómetro superior, que mede o deslocamento do ponto a cerca de 0.58 m acima do maciço, sofreu no início de todos os ensaios um deslocamento inicial, causado por uma pré-carga, de aproximadamente 1 kN, exercida no sistema para que se dê a devida cravação das cunhas na cabeça de puxe.

Por fim são também apresentando os modos de rotura de cada protótipo.

5.2.1. Protótipo PA

Estão apresentadas na Tabela 19 as dimensões do protótipo, juntamente com os seus valores máximos de carga e tensão. Nas Figuras 104, 105 e 106 pode-se analisar o comportamento do protótipo e na Figura 107 o modo de rotura. Através destes gráficos é possível verificar a ocorrência de uma pré-rotura, representada pelo decréscimo da força registada pela célula de carga, e pelo aumento do deslocamento superior, na Figura 105. A mesma ocorrência descrita (decréscimo da força e do escorregamento) observa-se na Figura 106, correspondente ao deslocamento da cabeça do Stud devido à pré-rotura. Este fenómeno ocorre para os protótipos PA2 e PA3. O protótipo PA1 exibiu uma rotura progressiva com o aumento da carga aplicada. Os dados deste protótipo, medidos pelos extensómetros, Figura 104, foram interrompidos devido a um erro técnico, que foi posteriormente corrigido para todos os outros ensaios. Com base no gráfico da Figura 104 calculou-se o módulo de Young.

Tabela 19. Resumo dos ensaios correspondentes ao protótipo PA

b [mm]		15		
e [mm]		5		
A [mm ²]	Secção	75		
	Cola- gem	675		
Protótipo		PA1	PA2	PA3
F_m [kN]		39.52	39.232	34.88
σ_m [MPa]		526.9	523.1	465.1

Sendo,

- F_m , força máxima;
- σ_m , tensão máxima.

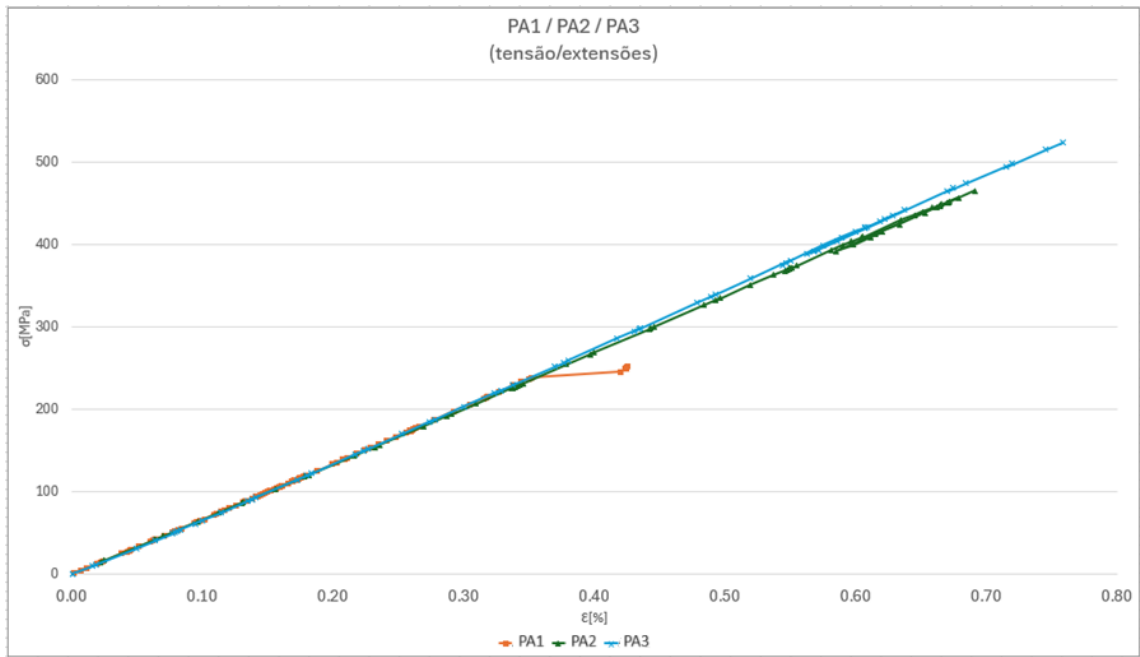


Figura 104. Gráfico tensão/extensão, PA

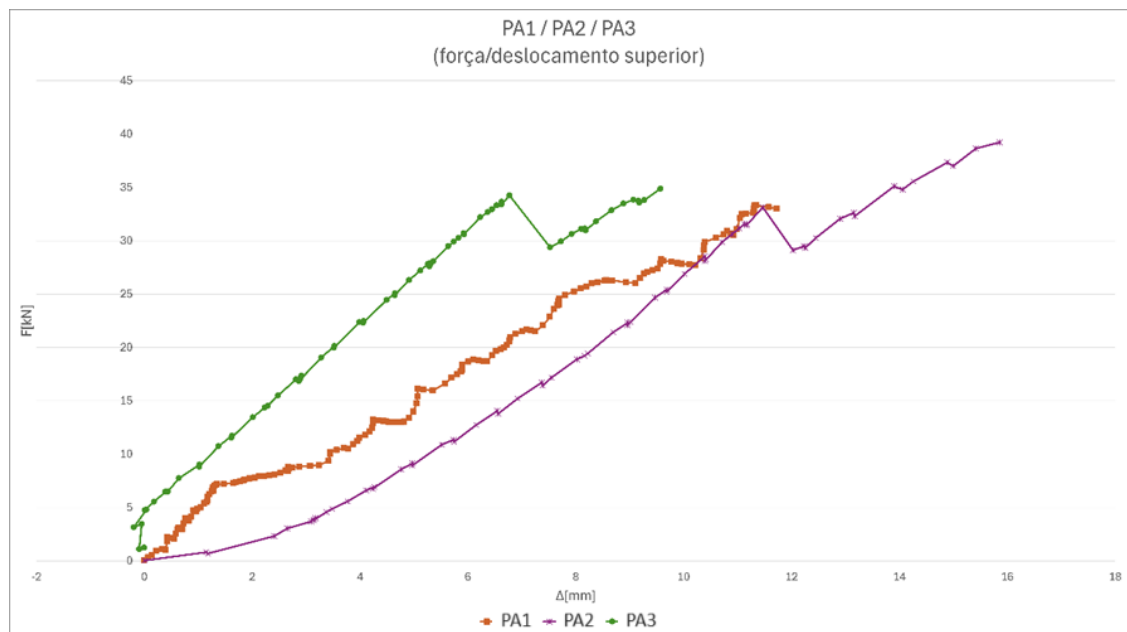


Figura 105. Gráfico força/deslocamento superior, PA

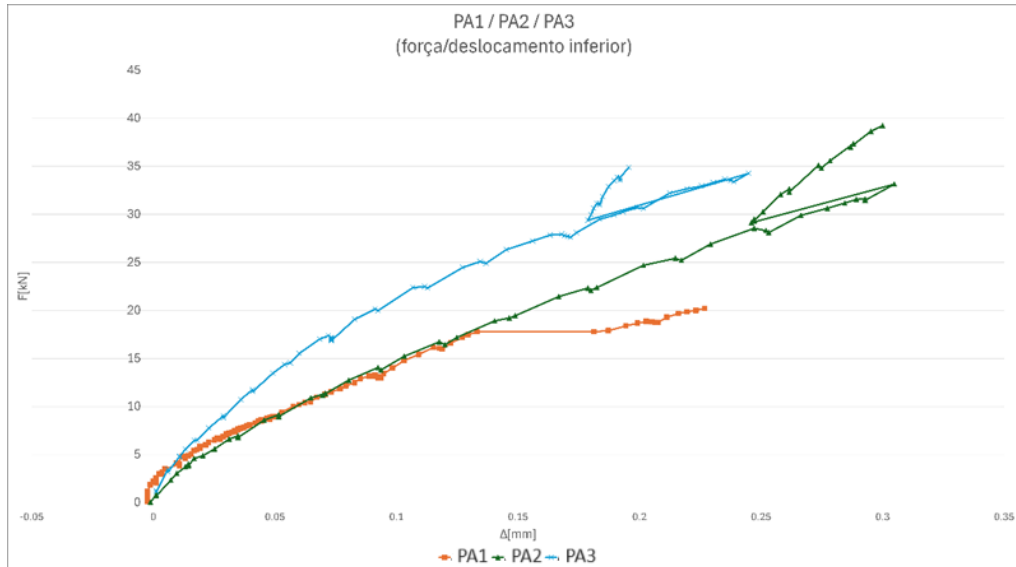


Figura 106. Gráfico força/escorregamento, PA

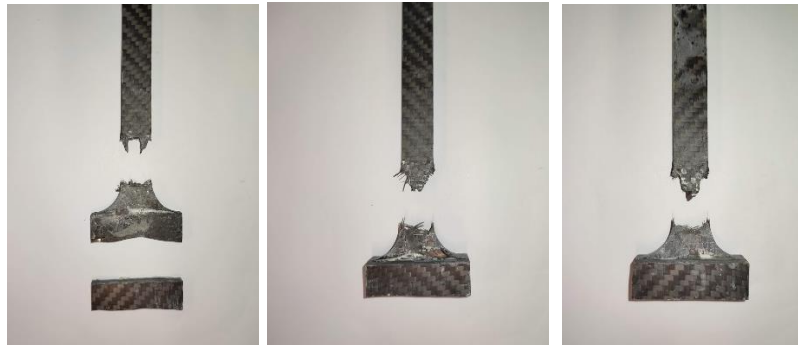


Figura 107. Rotura dos protótipos PA1, PA2 e PA3

5.2.2. Protótipo PB

Estão apresentadas na Tabela 20 as dimensões do protótipo, juntamente com os seus valores máximos de carga e tensão. Nas Figuras 108, 109 e 110 pode-se analisar o comportamento do protótipo e na Figura 111 a modo de rotura. Através destes gráficos é possível verificar a ocorrência de uma pré-rotura, representada pelo decréscimo da força e o aumento do deslocamento superior, na Figura 109. A variação repentina da força e o do escorregamento, na Figura 110, corresponde ao deslocamento da cabeça do Stud devido à pré-rotura. Com base no gráfico da Figura 108, calculou-se o módulo de Young.

Tabela 20. Resumo dos ensaios correspondentes ao protótipo PB

b [mm]		15		
e [mm]		5		
A [mm ²]	Secção	75		
	Cola- gem	996.6		
Protótipo		PB1	PB2	PB3
F_m [kN]		38.43	40.93	33.66
σ_m [MPa]		512.4	545.7	448.9

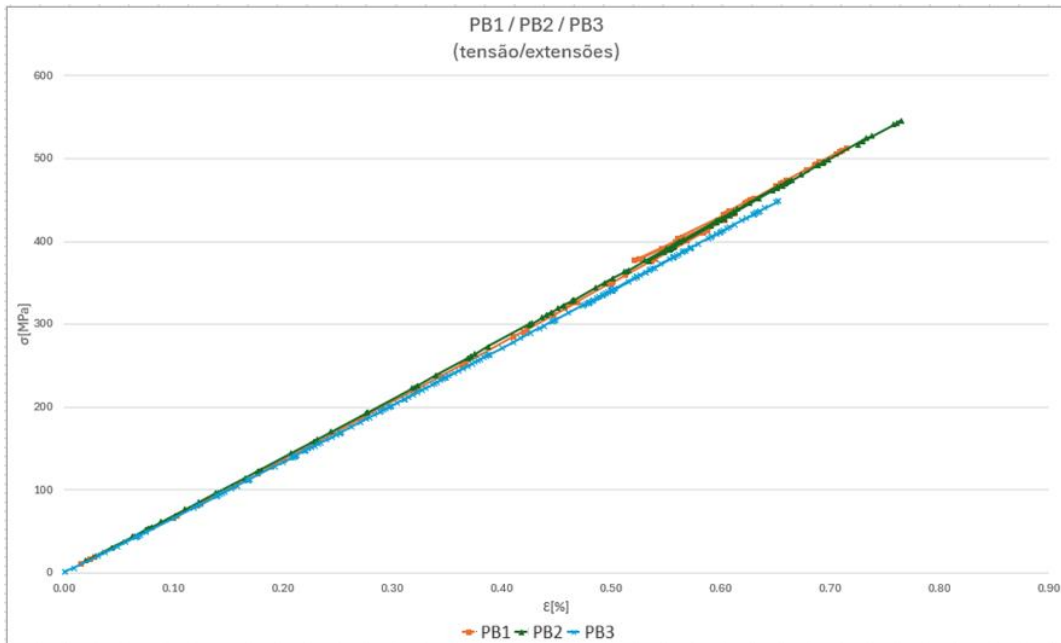


Figura 108. Gráfico tensão/extensão, PB

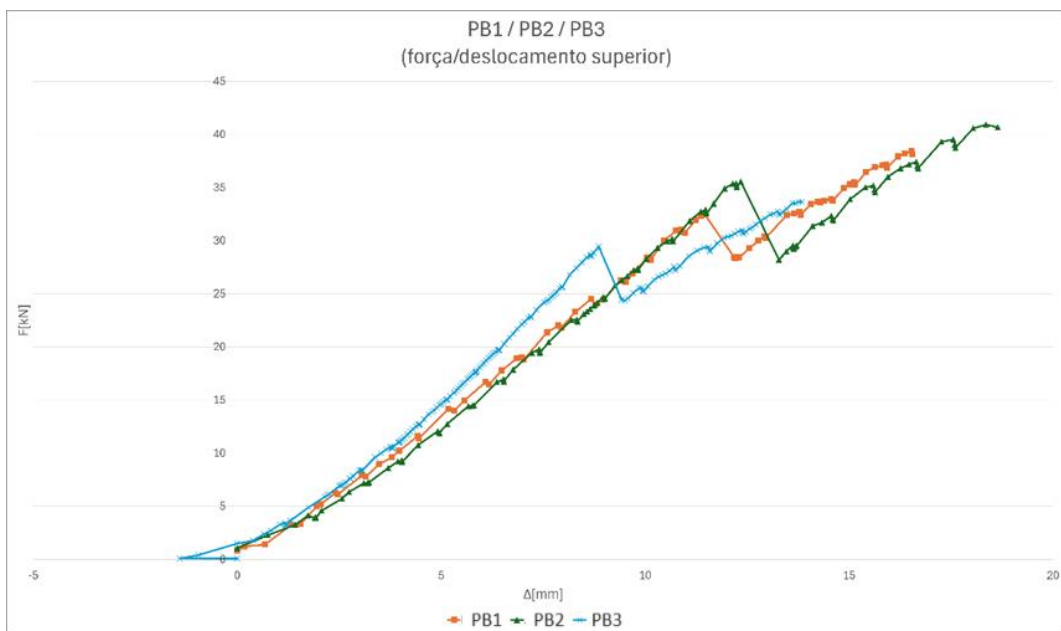


Figura 109. Gráfico força/deslocamento superior, PB

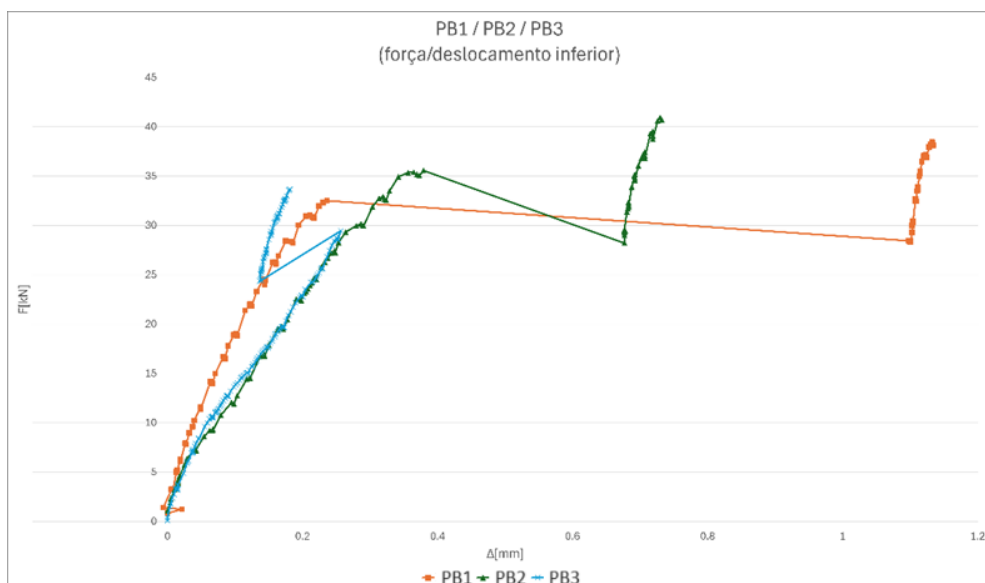


Figura 110. Gráfico força/escorregamento, PB



Figura 111. Rotura dos protótipos PB1, PB2 e PB3

5.2.3. Protótipo PC

Estão apresentadas na Tabela 21 as dimensões do protótipo, juntamente com os seus valores máximos de carga e tensão. Nas Figuras 112, 113 e 114 pode-se analisar o comportamento do protótipo e na Figura 115 o modo de rotura. Com base no gráfico da Figura 112 calculou-se o módulo de Young. Na Figura 114, não se apresenta o escorregamento do protótipo PC2 porque houve um problema com o material de medição que fez com que não fosse possível a medição do ensaio deste protótipo.

Tabela 21. Resumo dos ensaios correspondentes ao protótipo PC

b [mm]		10		
e [mm]		5		
A [mm ²]	Secção	50		
	Cola-gem	450		
Protótipo		PC1	PC2	PC3
F_m [kN]		20.32	26.85	29.33
σ_m [MPa]		406.4	537.0	586.6

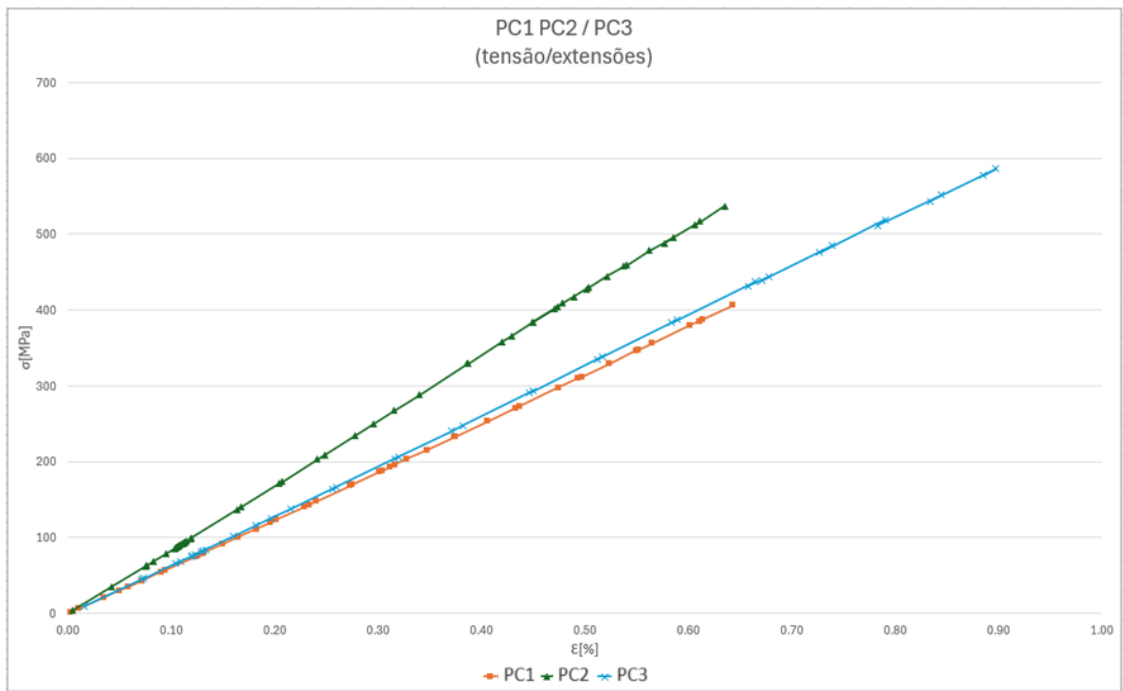


Figura 112. Gráfico tensão/ extensão, PC

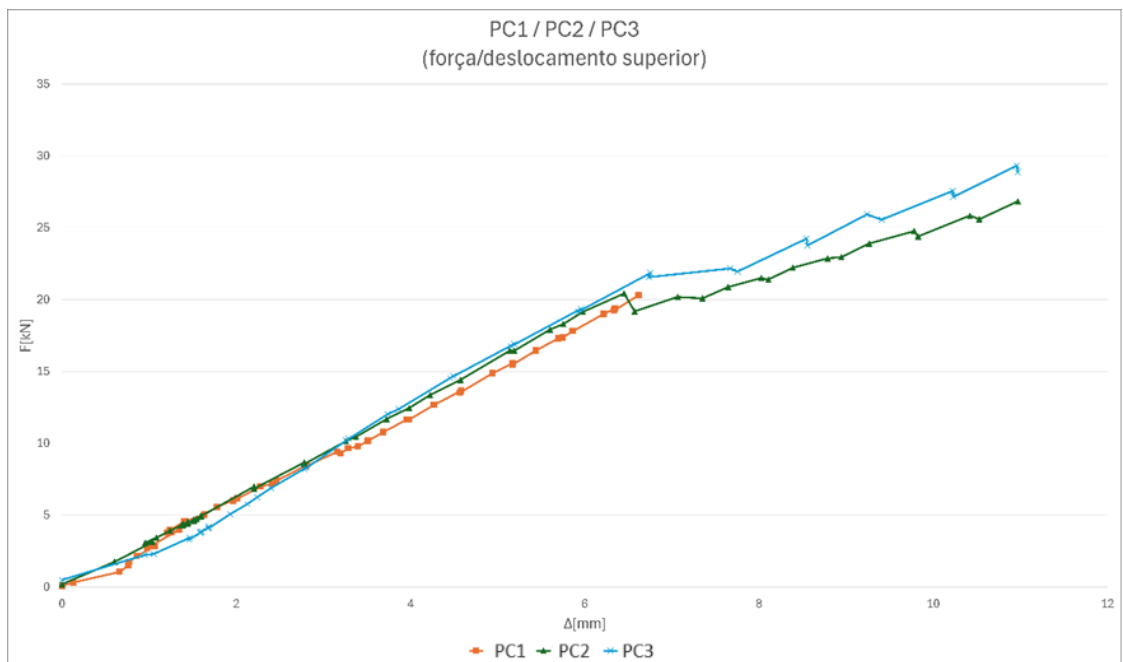


Figura 113. Gráfico força/ deslocamento superior, PC

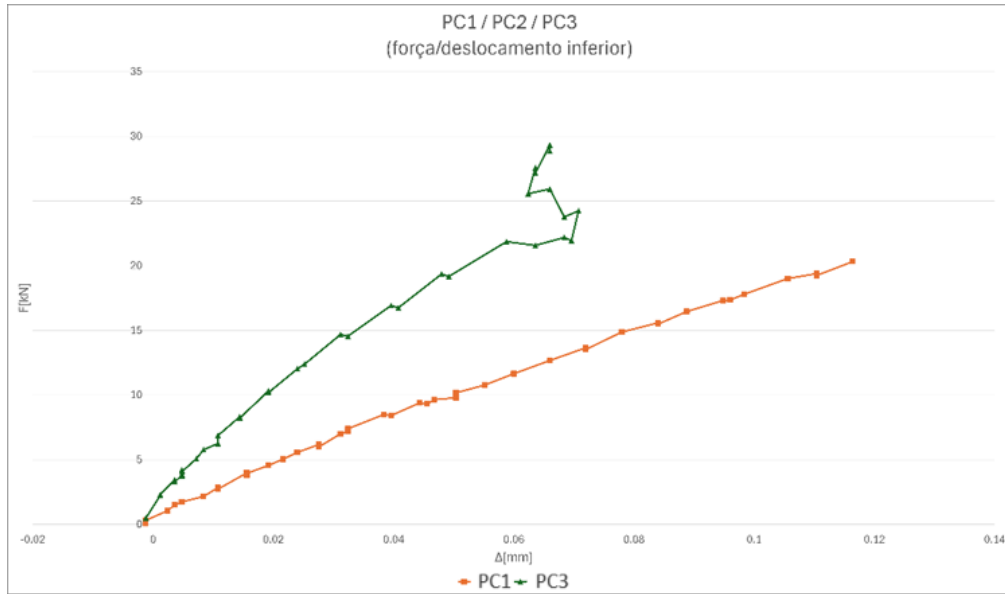


Figura 114. Gráfico força/escorregamento, PC



Figura 115. Rotura dos protótipos PC1, PC2 e PC3

5.2.4. Protótipo PD

Estão apresentadas na Tabela 22 as dimensões do protótipo, juntamente com os seus valores máximos de carga e tensão. Nas Figuras 116, 117 e 118 pode-se analisar o comportamento do protótipo e, na Figura 119 o modo de rotura. A variação repentina da força e o do escorregamento na Figura 118 corresponde ao deslocamento da cabeça do Stud devido à pré-rotura. Com base no gráfico da Figura 116 calculou-se o módulo de Young.

Tabela 22. Resumo dos ensaios correspondentes ao protótipo PD

b [mm]		10		
e [mm]		5		
A [mm ²]	Secção	50		
	Cola- gem	742.9		
Protótipo		PD1	PD2	PD3
F_m [kN]		28.61	23.90	29.18
σ_m [MPa]		572.2	478.1	583.

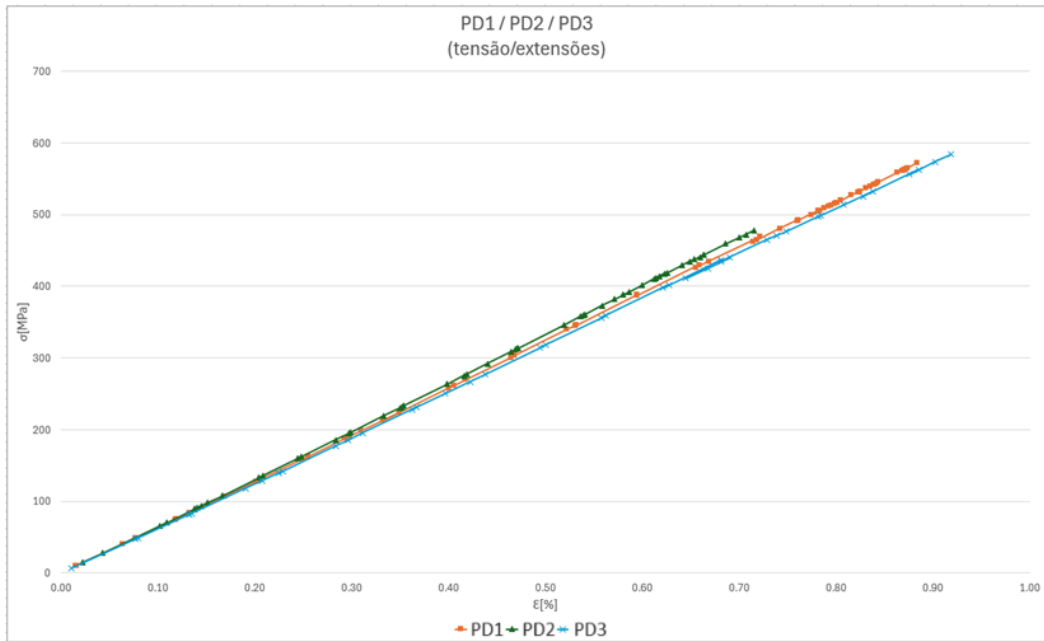


Figura 116. Gráfico tensão/extensão, PD

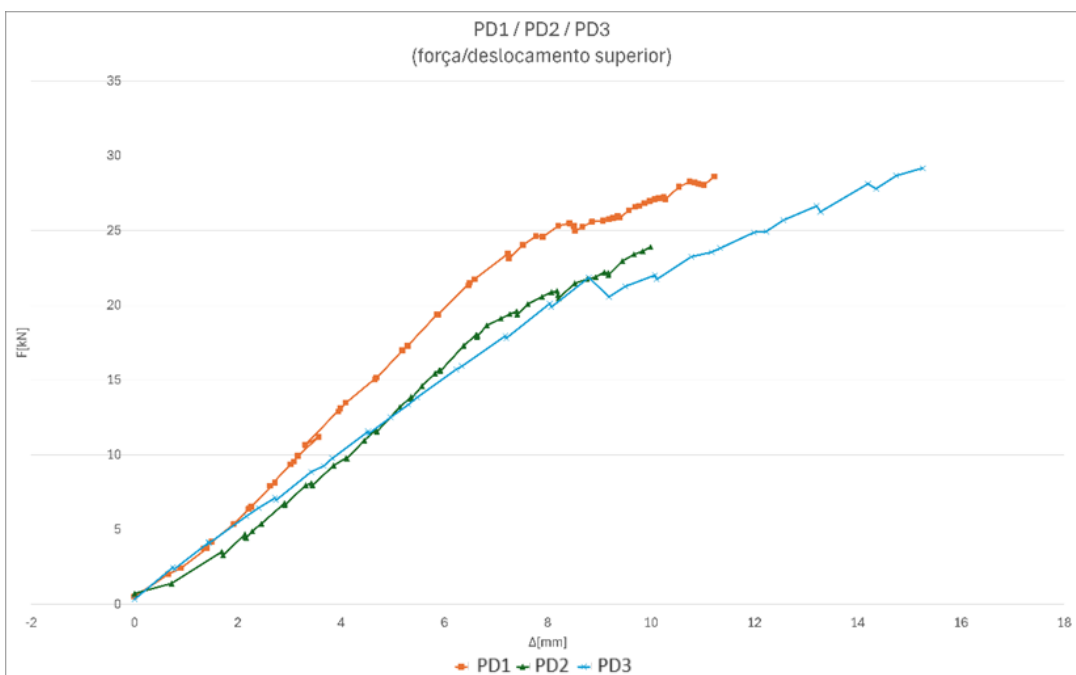


Figura 117. Gráfico força/deslocamento superior, PD

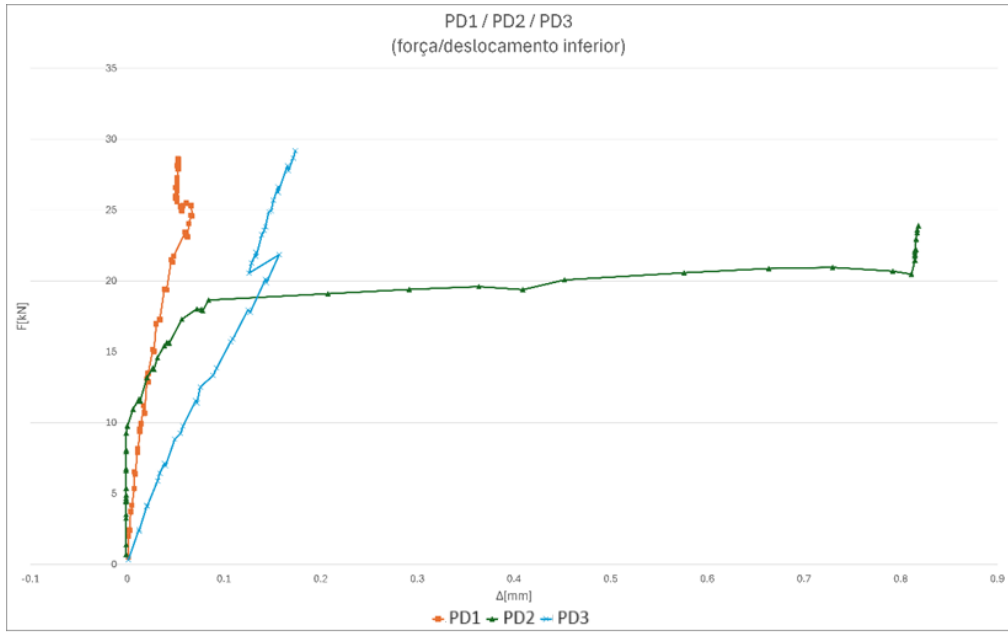


Figura 118. Gráfico força/escorregamento, PD



Figura 119. Ruptura dos protótipos PD1, PD2 e PD3

5.2.5. Resumo dos Resultados dos Protótipos

Nas Figuras 120 e 121 estão representados os valores de força e tensão de rotura dos protótipos.

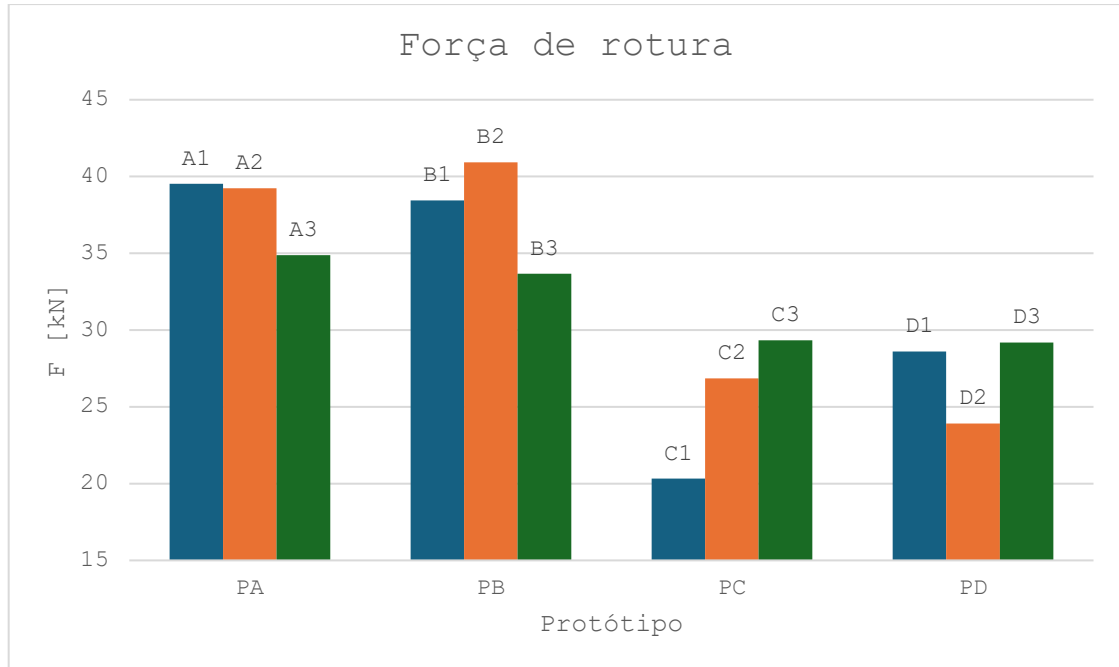


Figura 120. Forças de rotura dos protótipos

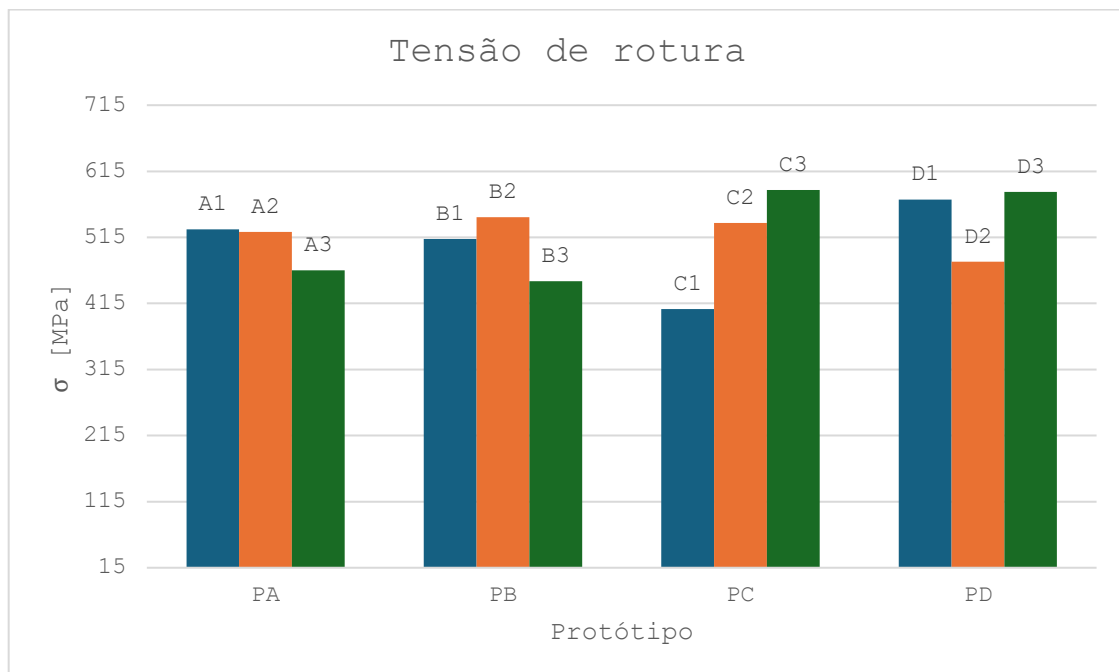


Figura 121. Tensões de rotura dos protótipos

Na Tabela 23 estão apresentados os seguintes valores, para cada protótipo.

- F_m , força máxima;
- σ_m , tensão máxima;
- Δ_{RT} , deslocamento do topo na rotura;
- Δ_{SI} , escorregamento pré-rotura;
- E, módulo de Young;
- DL, rotura dentro da laje;
- CP, rotura na cabeça de puxe;
- -, problemas no material de medição.

Tabela 23. Resumo dos ensaios de arrancamento

		F_m	σ_m	Δ_{RT}	Δ_{SI}	E	Local de rotura
		[kN]	[MPa]	[mm]	[mm]	[GPa]	
PA	1	39.52	526.93	7.81	0.76	68	DL
	2	39.23	523.09	15.86	0.30	71	DL
	3	34.88	465.07	9.57	0.24	69	DL
	Média	37.88	505.03	11.08	0.44	69	
PB	1	38.43	512.43	16.56	1.13	72	DL
	2	40.93	545.71	18.64	0.73	72	DL
	3	33.66	448.85	13.84	0.26	69	DL
	Média	37.67	502.33	16.35	0.71	71	
PC	1	20.32	406.40	6.62	0.12	63	CP
	2	26.85	536.96	10.97	-	85	DL
	3	29.33	586.56	10.97	0.07	67	CP
	Média	25.50	509.97	9.52	0.09	72	
PD	1	28.61	572.16	11.23	0.07	66	DL
	2	23.90	478.08	9.99	0.82	67	CP
	3	29.18	583.68	15.26	0.17	64	DL
	Média	27.23	544.64	12.16	0.35	66	

5.3. Análise de Resultados

- Força de rotura

Para a análise da força de rotura é necessário separar primeiro os protótipos PA e PB, com uma alma de 15 mm, dos provetes PC e PD, com uma alma de 10 mm.

A solução da cabeça dos Studs, para o protótipo PA e para o protótipo PB, conduziu a resultados bastante próximos, 37.88 kN e 37.67 kN, respetivamente. Isso leva-nos a concluir que independentemente do tipo de solução é possível obter forças de rotura semelhantes.

Relativamente aos protótipos PC e PD, com forças de rotura médias de 25.50 kN e 27.23 kN, os resultados têm uma diferença de 6.7 %. Ainda que a dispersão de valores médios seja maior que o conjunto de protótipos anterior, os resultados continuam a ser bastante semelhantes, prevalecendo a opinião de não haver distinção na melhor solução de cabeça do Stud.

- Tensão de rotura

Considerando a tensão média de rotura de cada protótipo pode-se concluir que o material teve um comportamento bastante uniforme ao longo dos ensaios. Com um coeficiente de variação, equação 5-3, de 3.27%, o ensaio de arrancamento obteve um valor de 515.49 MPa, cerca de menos 20 % do valor calculado no ensaio de tração apresentado no capítulo (3.4.3), 644.32 MPa.

$$\text{Coeficiente de variação (\%)} = \frac{\text{Desvio padrão}}{\text{Média}} \times 100 \quad 5-9$$

- Deslocamento do topo na rotura

As soluções com maior área de colagem, PB e PD, exibiram um maior deslocamento relativamente aos protótipos com menor área de colagem, PA e PC. Contudo, não houve uma grande dispersão de resultados, obtendo-se um coeficiente de variação de 20%.

- Escorregamento pré-rotura

Tal como se pode observar nos gráficos força/ escorregamento, geralmente ocorre uma pré-rotura do protótipo, identificada pela diminuição da força medida pela célula de carga.

Relativamente à grandeza do escorregamento, pode-se concluir que foi baixa quando comparada com o deslocamento no topo; logo foram desenvolvidas boas soluções de ancoragem para as cabeça dos protótipos.

- Rotura

Todas as roturas, com exceção dos protótipos PC1, PC3 e PD2, ocorreram exatamente na mesma zona, exatamente na transição entre o final da cabeça e início da alma, tal como se pode verificar nas figuras das roturas dos protótipos.

As exceções referidas anteriormente ocorreram muito possivelmente devido à inclinação excessiva do reforço das cabeças de puxe, que fez com que se aplicasse uma compressão excessiva no final das mesmas.

Conclusões

A dissertação foca-se no desenvolvimento de um Stud em fibra de carbono para utilização em ligações laje-pilar, em estruturas de betão armado. Este estudo destaca a importância de ensaios até à rotura para a caracterização e seleção adequada da fibra de carbono, além de ensaios de arrancamento para o desenvolvimento da geometria.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios (força de rotura, tensão de rotura, deslocamento do topo na rotura, escorregamento pré-rotura e comportamento geral das peças durante o processo de rotura) é possível tirar várias conclusões significativas sobre o desempenho dos protótipos de Stud desenvolvidos neste estudo.

Em relação à força de rotura, os protótipos PA e PB apresentaram resultados muito próximos, indicando que as diferentes soluções da cabeça do Stud não se distinguiram significativamente entre si, relativamente à força de rotura. Por outro lado, os protótipos PC e PD também demonstraram resultados semelhantes, embora com uma dispersão ligeiramente maior. Isso sugere que, apesar das diferenças na geometria das cabeças dos Studs, não houve uma distinção clara na melhor solução.

Analisando a tensão de rotura, observou-se um comportamento consistente do material ao longo dos ensaios, com um valor médio de 515.5 MPa. Assim, é viável considerar que se alcançou a mobilização quase completa da resistência do material. Não foi exequível mobilizar a totalidade da capacidade resistente do material devido à concentração de tensões nos pontos onde ocorreram as roturas na transição entre os banzos de ancoragem e o local de inserção das cunhas.

Os três tipos de laminados que foram ensaiados, permitiram compreender que a orientação das fibras irá influenciar a resistência do material, pois uma malha com as fibras distribuídas em duas direções tem metade da resistência à tração do que um laminado constituído por fibras unidirecional. Deste modo é possível variar a tensão de rotura de um Stud consoante a distribuição e orientação das fibras que o constituem.

Quanto ao escorregamento pré-rotura, verificou-se que foi baixo em todos os protótipos, sugerindo que as soluções de ancoragem das cabeças dos Studs foram eficazes para resistir ao movimento antes da rotura.

Em suma, os resultados dos ensaios demonstraram um desempenho consistente e promissor dos protótipos de Stud desenvolvidos. Esses resultados fornecem informações valiosas para o dimensionamento de um Stud em fibra de carbono para utilização em ligações laje-pilar, em estruturas de betão armado, contribuindo para a segurança e eficiência dessas estruturas.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se fazer uma modelação numérica não-linear com a intenção de otimizar a forma do Stud e a sua aplicação a outro tipo de estruturas como vigas e lajes.

BIBLIOGRAFIA

ACI (1999). Joint ACI-ASCE Committee 421. ACI 421.1R-99 - Shear reinforcement for slabs.

ACI, (2014). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-14). Farmington Hills, MI, USA.

Alcobia, B. M. T. A. (2015, Setembro). Punçoamento Cíclico de Lajes Fungiformes com Armadura Específica. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Almeida, A. F., Inácio, M. M., Lúcio, V. J., & Ramos, A. P. (2016, Junho). Punching behaviour of RC flat slabs under reversed horizontal cyclic loading. *Engineering Structures*, 117, 204–219. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.007>

Almeida, A. F. O., Ramos, A. P., Lúcio, V., & Marreiros, R. (2019, Outubro 22). Behavior of RC flat slabs with shear bolts under reversed horizontal cyclic loading. *Structural Concrete*, 21(2), 501–516. <https://doi.org/10.1002/suco.201900128>

Cortartec. (n.d.). Recuperado Março 21, 2024, from <https://cortartec.net/produtos/estruturas/armaduras-anti-puncoamento/>

Dorworth, L. C., Gardiner, G. L., & Mellema, G. M. (2019, January 1). Essentials of Advanced Composite Fabrication and Repair. http://books.google.ie/books?id=pfbWvgEA-CAAJ&dq=Essentials+os+advanced+composite+fabrication+%26+repair&hl=&cd=1&source=gbs_api

fib (2013). fib Model Code for concrete structures 2010. Wiley. doi: 10. 1002 / 9783433604090.

Eligehausen, R.; Simons, I.; Kretschmar, M. (2006); “Behaviour of Post-installed Rebars under Reversed Cyclic Loading”; fib, Proceedings of the 2nd International Congress, Naples

EN1992-1-1, NP. (2010), Eurocódigo 2 - Projeto de Estruturas de Betão, Parte 1.1: Regras Gerais e regras para Edifícios. Instituto Português da Qualidade.

Epsilon Composites. (n.d.). Retrieved March 21, 2024, from <https://www.epsilon-composite.com/en/carbon-fiber-grades>

Faserverbundwerkstoffee Composite Technology. (n.d.). Hi-Shrink Tape Perforated 1" + 2.5"/ 91.4 M. Retrieved March 21, 2024, from <https://www.r-g.de/en/art/390450-P>

Ghali, A. and S. A. Youakim (2005). "Headed studs in concrete: state of the art." In: ACI Structural Journal 102.5

Gouveia, N. D. (2013, November). Punçoamento em Lajes de BRFA - Estado da Arte. In *Relatório 3. Comportamento De Lajes Fungiformes Sujeitas a Acções Cíclicas E Sísmicas* (PTDC/ECM/114492/2009).

Gouveia, N. D., Lapi, M., Orlando, M., Faria, D. M. V., & Ramos, A. M. P. (2017, November 15). Experimental and theoretical evaluation of punching strength of steel fiber reinforced concrete slabs. *Structural Concrete*, 19(1), 217–229. <https://doi.org/10.1002/suco.201700136>

Guide to Composites. (n.d.). In *Gurit*. Retrieved March 21, 2024, from <https://www.gurit.com>

HALFEN. (n.d.). Retrieved March 21, 2024, from https://www.halfen.com/en_GB/product-ranges/concrete/reinforcement-systems/punching-shear-reinforcement

Hegger, J., A. G. Sherif, D. Kueres, and C. Siburg (2017). "Efficiency of various punching shear reinforcement systems for flat slabs." In: ACI Structural Journal 114.3

Inácio, M. M., Almeida, A. F., Faria, D. M., Lúcio, V. J., & Ramos, A. P. (2015, November). Punching of high strength concrete flat slabs without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 103, 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.010>

Isufi. (2018, December). Seismic behaviour of flat slabs with punching shear reinforcement. Tese de Douturamento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

M3T. (n.d.). Retrieved March 21, 2024, from <https://m3t.pt/areas-de-negocio/maquina-cao-cnc/>

NP EN 12390-3 2003, Ensaio do betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio, IPQ

NP EN 12390-6 2003, Ensaio do betão endurecido – Parte 8: Resistência à tração por compressão dos provetes, IPQ

Park, T. W. (2012). "Inspection of collapse cause of Sampoong Department Store." In: *Forensic Science International* 217.1-3

Peikko. (n.d.). Punching Shear Reinforcement System. Retrieved March 21, 2024, from <https://www.peikko.com/products/reinforcement-systems/punching-and-shear-reinforcement-system/>

Reguengo, G. (2010, February). Comportamento da ligação pilar-fundação em estruturas pré-fabricadas com armaduras salientes do pilar. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Seible, F., A. Ghali, and W. H. Dilger (1980). "Preassembled shear reinforcing units for flat plates." In: ACI Journal Proceedings. Vol. 77. 1

Sicomín Epoxy Systems. (n.d.). Epoxy Resin SR8200. Retrieved March 21, 2024, from <https://sicomin.com/en/epoxy-products/epoxy/contact-vacuum-lamination/sr-8200/>

Vollum, R., T Abdel-Fattah, M Eder, and A. Elghazouli (2010). "Design of ACI-type punching shear reinforcement to Eurocode 2." In: Magazine of Concrete Research 62.1

MATERIAIS

BETÃO

- C25/30 ou C30/37

ACO

- S500NII

RECOMENDADOS

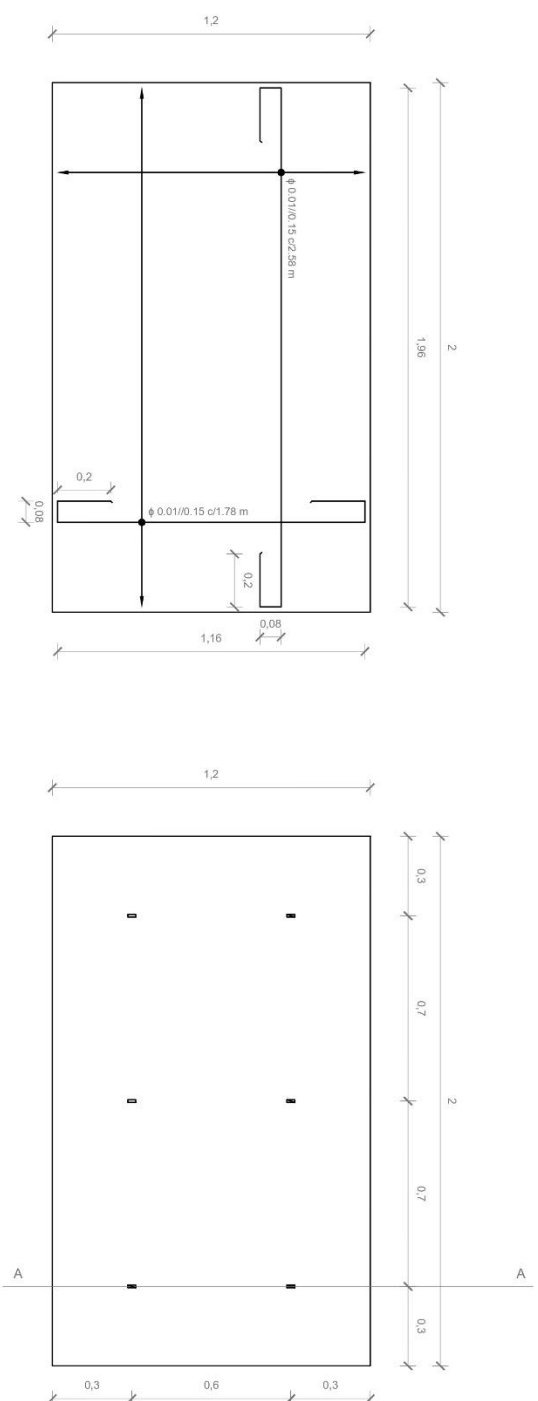
- 20 mm

NOTA: Os moldes devem ser providos com espaçadores colocados entre as armaduras e a oclagem e devem respeitar o disposto na Especificação LNEC E 469-2006.

NOTAS GERAIS

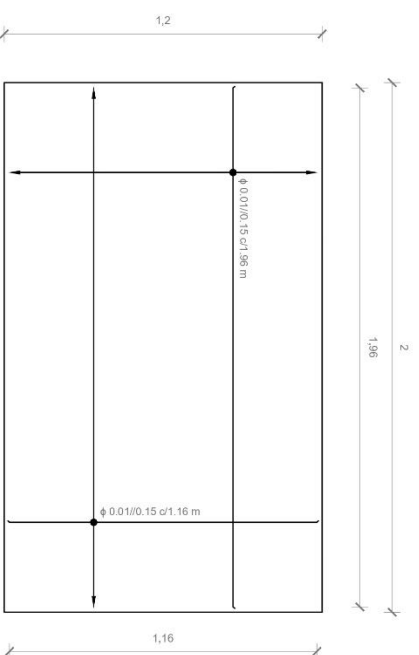
- As cotas estão dadas em metros.
- Os locais de montagem são todos indicados nos desenhos.

NÚMERO DE LAJES = 2

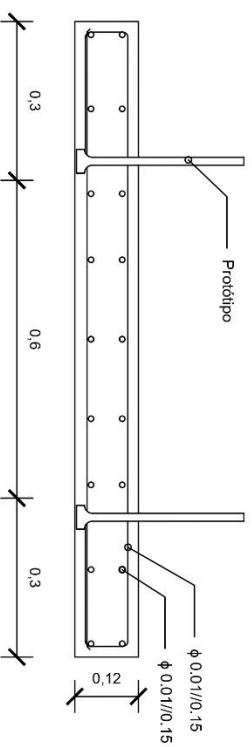


Armadura Superior Esc: 1/20

Planta Esc: 1/20



Armadura Inferior Esc: 1/20



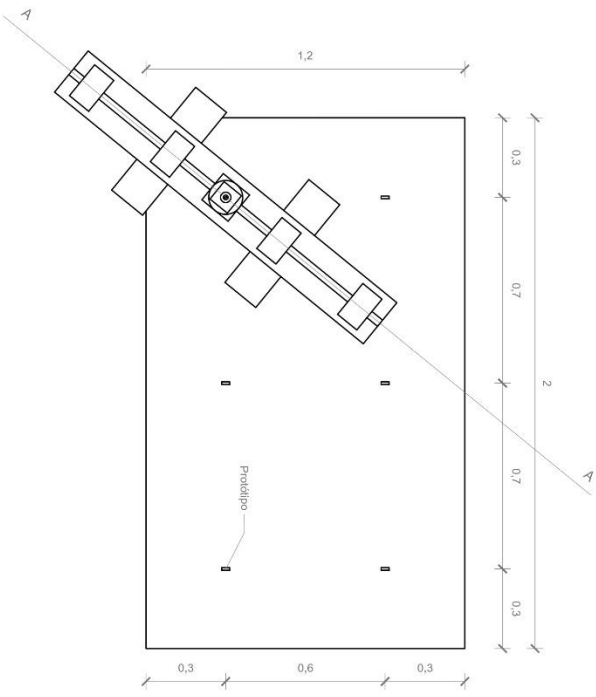
Corte AA Esc: 1/10

IDENTIFICAÇÃO

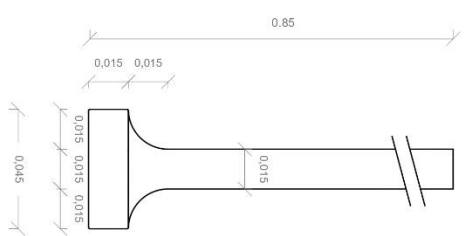
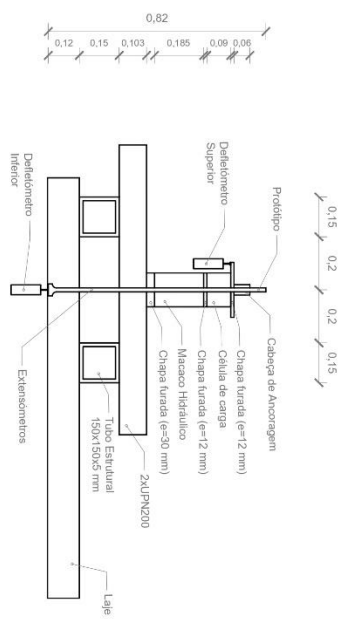
Diogo Faria de Andrade Pezossanau Nunes

Dissertação para Mestrado em Engenharia Civil - Especializado em Estruturas
Orientador: Professor Doutor Rui Marenco
Coordenador: Professor Doutor António Pinto Ramos

FACULDADE	DESENHO		
NOVA - FCT	Lajes para ensaio de arrancamento		
ESCALA	FORMATO	DATA	INTESEIÇÃO
1/20 e 1/10	A3	Novembro 2023	1



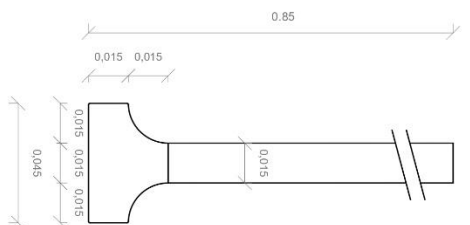
Planta Teste de Arrancamento Esc. 1/20



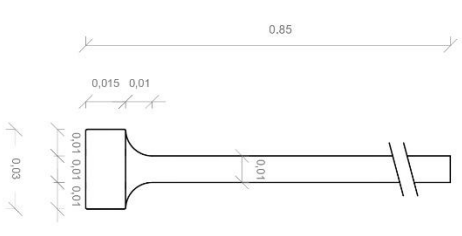
Protótipo A Esc. 1/2



Protótipo B Esc. 1/2



Protótipo C Esc. 1/2



Protótipo D Esc. 1/2

MATERIAIS

BETÃO

- C25/30 ou C30/37
- AÇO
- A500 NH

FIBRA DE CARBONO

- OXTRAK

REFORÇAMENTOS

- 20 mm

NOTA: Os melhoramentos devem ser identificados com requintes coloridos entre as armaduras e a colagem e devem constar o disposto na Especificação INCT 7489-2006.

NOTAS GERAIS

- As cores estão indicadas em metros.
- Os pontos de montagem são estáis indicados nos desenhos.

NUMERO DE LANCES = 2

Módulo de Siga a serem anexados: A, B, C e D

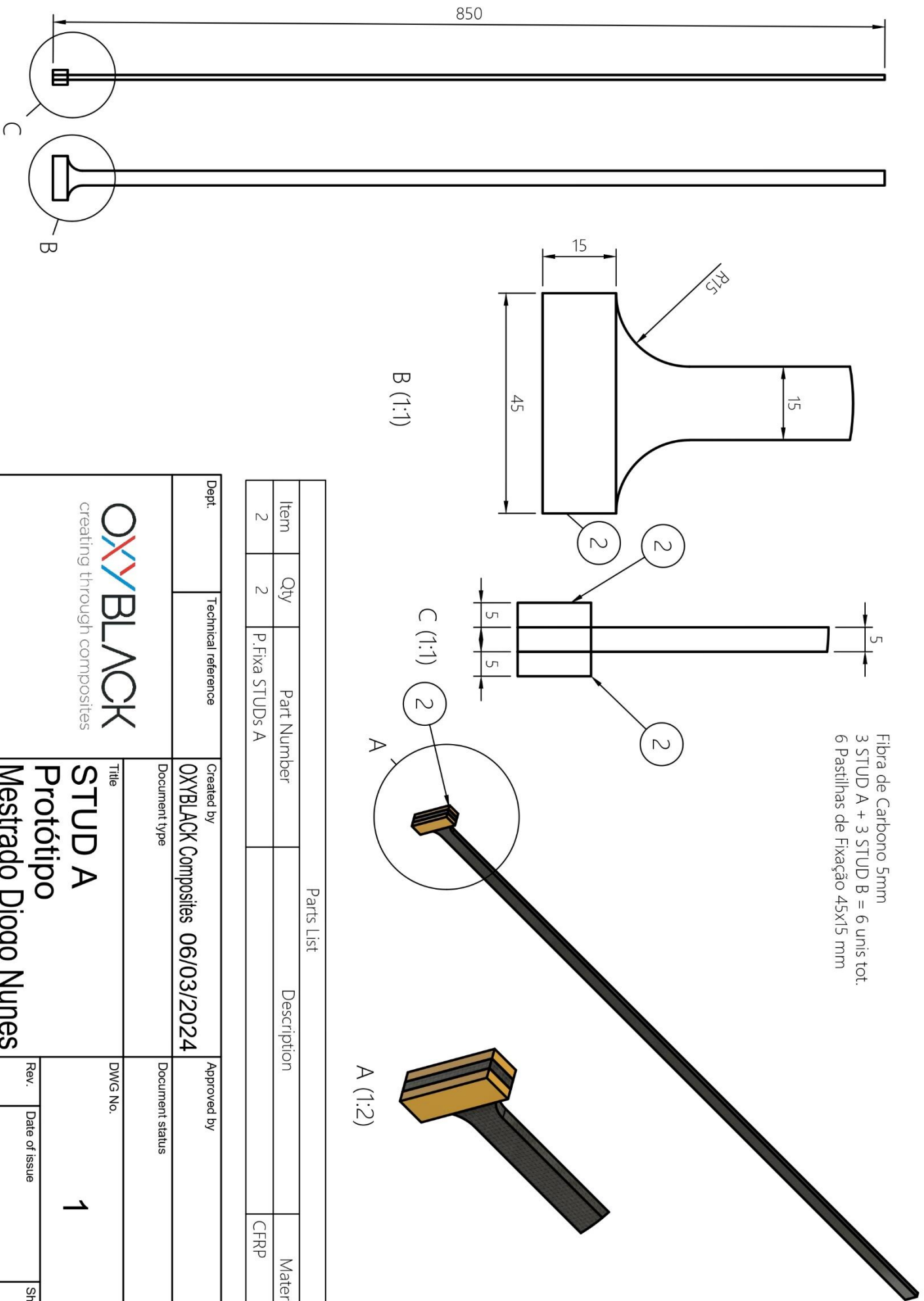
Numero de ensaios por módulo: 3

Escalas por tipo:

L4F-1-A1, A2, A3, B1, B2, B3

L4F-2-C1, C2, C3, D1, D2, D3

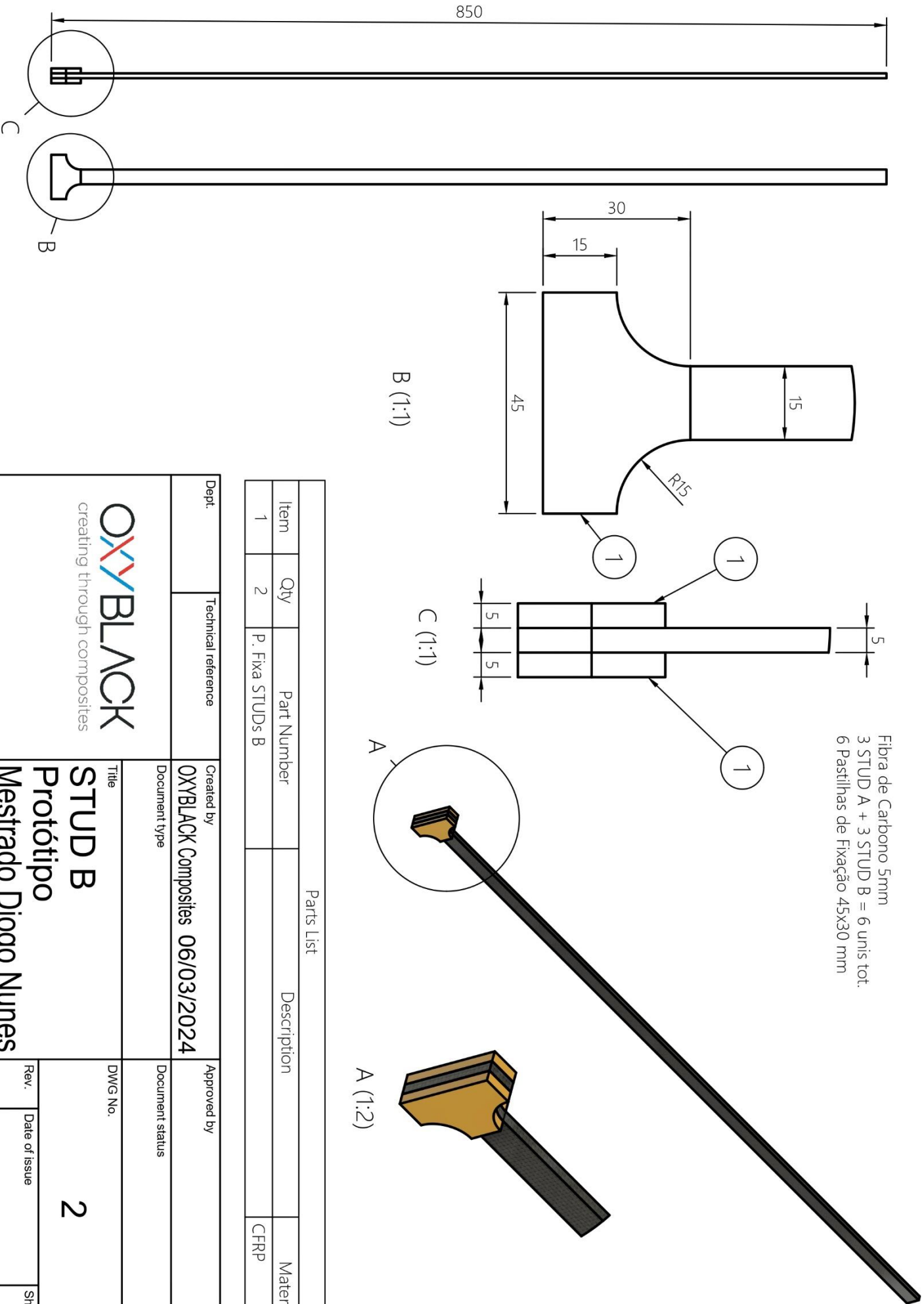
IDENTIFICAÇÃO			
Diogo Fale de Andrade Peyssonneau Nunes			
Dissertação para Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Estruturas			
Orientador: Professores Doutor Antonio Pinto Ramos			
FAVULDADE	DESENHO		
NOVA - FCT	Ensaio de arrancamento e dimensões Siga		
ESCALA	FORMATO	DATA	ND/DESENHO
1/20 e 1/2	A3	Dezembro 2023	2



Fibra de Carbono 5mm
 3 STUD A + 3 STUD B = 6 unis tot.
 6 Pastilhas de Fixação 45x15 mm

Parts List			
Item	Qty	Part Number	Description
2	2	P.Fixa STUDs A	
			Material
			CFRP

Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		OXYBLACK Composites 06/03/2024	
		Document type	Document status
		Title	DWG No.
		STUD A	1
		Protótipo	
		Mestrado Diogo Nunes	
Rev.	Date of issue	Sheet	
		1/1	

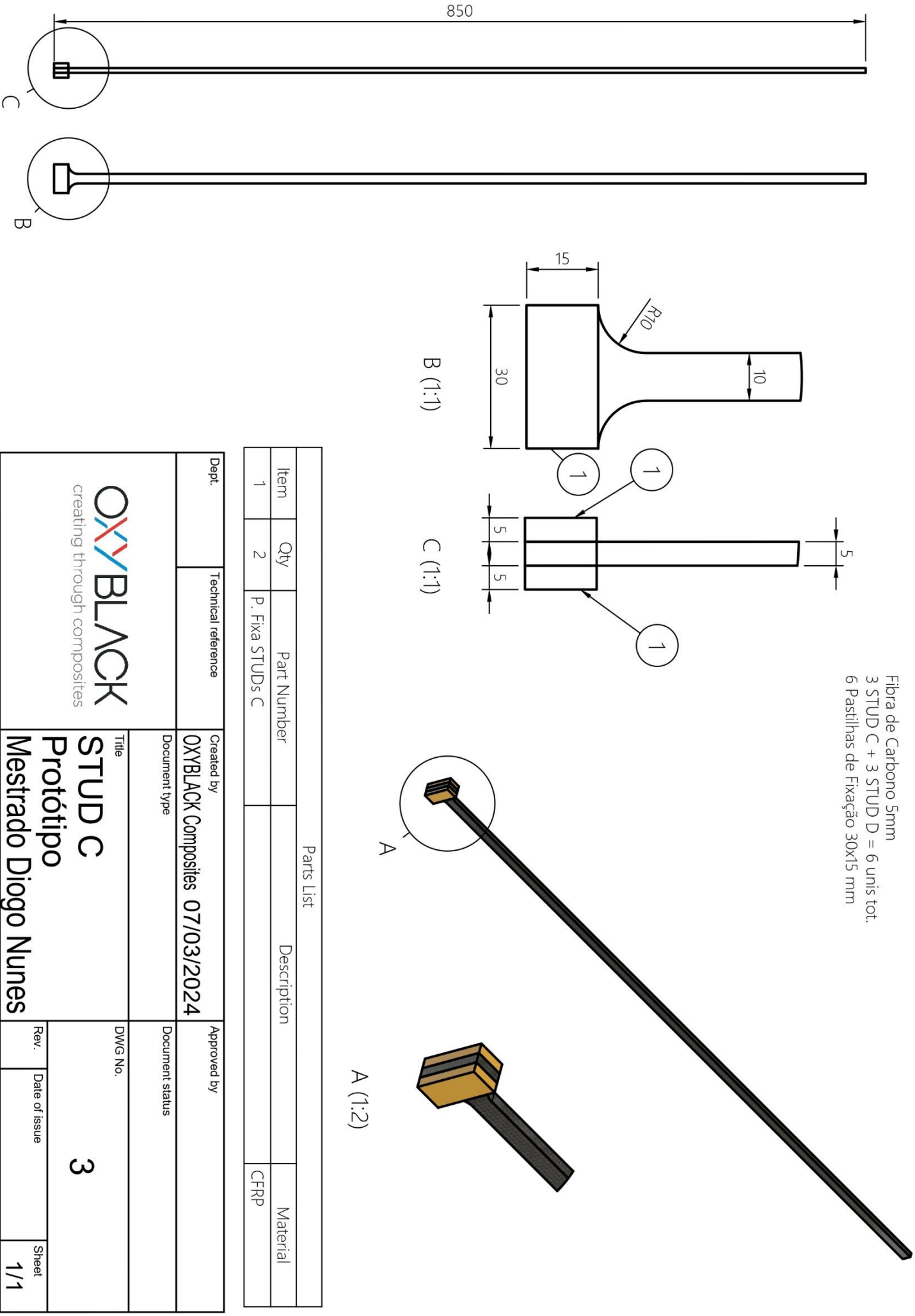


Fibra de Carbono 5mm
 3 STUD A + 3 STUD B = 6 unis tot.
 6 Pastilhas de Fixação 45x30 mm

Parts List			Description		Material
Item	Qty	Part Number			
1	2	P. Fixa STUDS B			CFRP

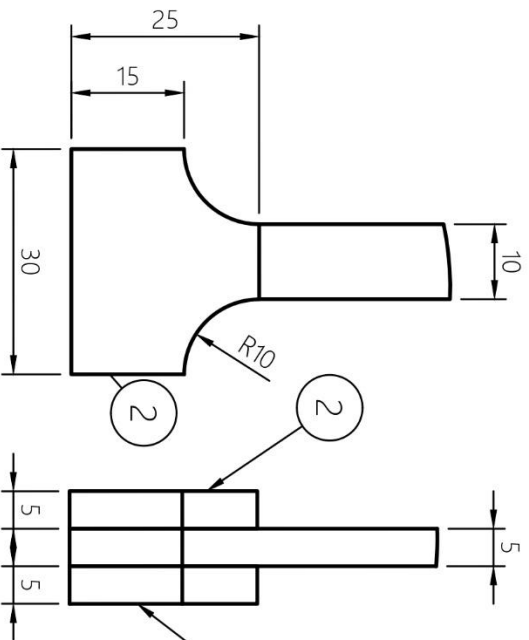
Dept:	Technical reference	Created by	Approved by
		OXYBLACK Composites 06/03/2024	
		Document type	Document status
STUD B Protótipo Mestrado Diogo Nunes		DWG No.	2
Rev.	Date of issue	Sheet	1/1

Fibra de Carbono 5mm
 3 STUD C + 3 STUD D = 6 unis tot.
 6 Pastilhas de Fixação 30x15 mm



Parts List		Description		Material
Item	Qty	Part Number		
1	2	P. Fixa STUDs C		CFRP

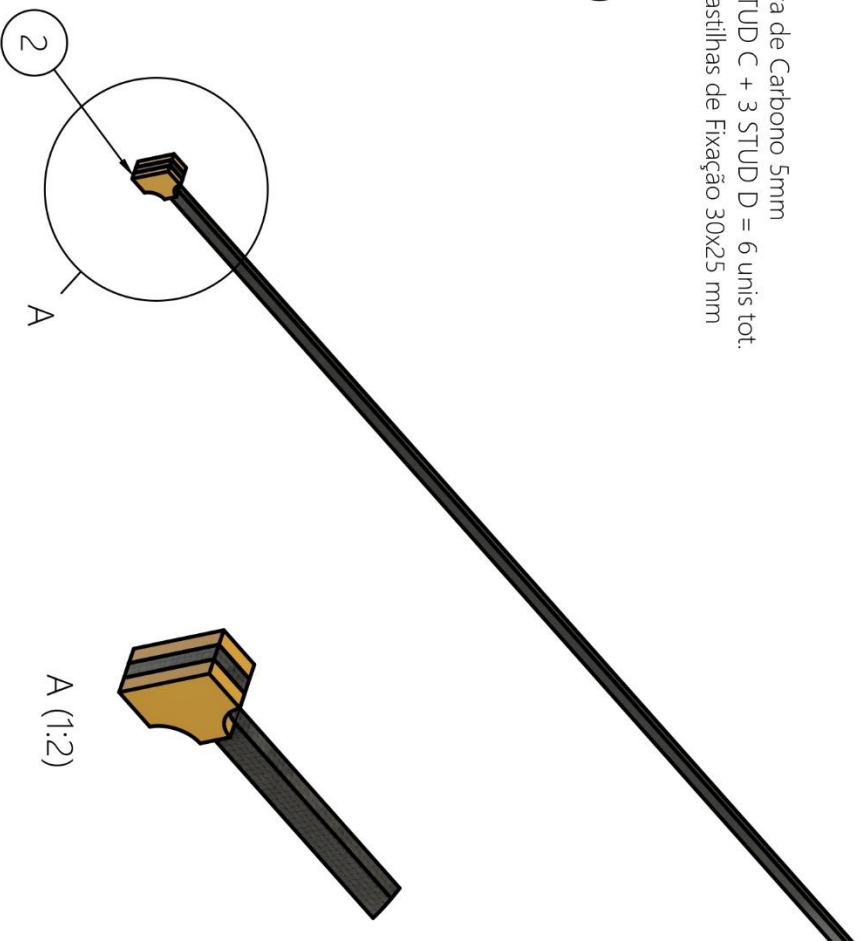
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		OXYBLACK Composites 07/03/2024	
		Document type	Document status
		Title	DWG No.
		STUD C	3
		Protótipo	
		Mestrado Diogo Nunes	
Rev.	Date of issue	Sheet	
		1/1	



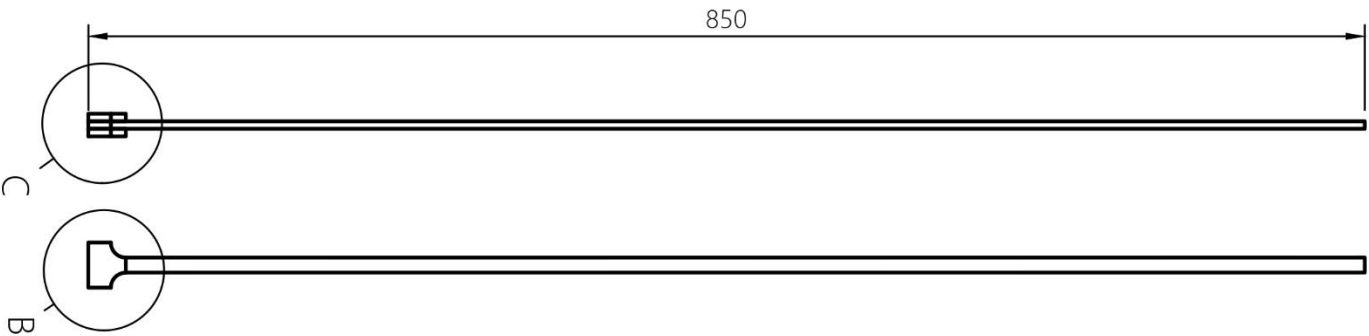
Fibra de Carbono 5mm
 3 STUD C + 3 STUD D = 6 unis tot.
 6 Pastilhas de Fixação 30x25 mm

B (1:1)

C (1:1)



A (1:2)



Item	Qty	Part Number	Description	Material
2	2	P. Fixa STUDs D		CFRP
Parts List				

Dept:	Technical reference	Created by	Approved by
		OXYBLACK Composites 07/03/2024	
	Document type	Document status	
		Title	DWG No.
		STUD D	4
		Protótipo	
		Mestrado Diogo Nunes	
Rev.	Date of issue	Sheet	
		1/1	



<2024>

Diogo Freire de Andrade Peyssonneau
Nunes

DESENVOLVIMENTO DE UM STUD
EM FIBRA DE CARBONO