

Caracterização e otimização de painéis de fachada e parede de pedra natural pré-esforçada

Pedro Miguel Ramos Pereira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor Pedro Miguel Gomes Abrunhosa Amaral

Orientador: Professor Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio

Júri

Presidente: Professor Doutor António Manuel Figueiredo Pinto da Costa

Orientador: Professor Doutor Pedro Miguel Gomes Abrunhosa Amaral

Vogal: Professor Doutor José Manuel De Matos Noronha da Câmara

Outubro 2018

*“Work in silence...
...Let your success be your noise!”
Frank Ocean*

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Ciente que não seria capaz de elaborar esta dissertação sozinho, agradeço a todos aqueles que por orientação, apoio moral ou auxílio na recolha dos elementos necessários, contribuíram para a concretização deste trabalho, nomeadamente:

Ao Prof.^o Pedro Amaral e ao Prof.^o Eduardo Júlio, pela disponibilidade, apoio constante e pelo fundamental acompanhamento crítico,

A todos os colaboradores da empresa Frontwave pela partilha do conhecimento, apoio científico e pela cedência dos materiais e do espaço para a montagem dos painéis,

À empresa SOLANCIS pela cedência das placas de pedra utilizadas para a montagem dos painéis,

Ao Eng.^o Hugo Costa, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pela disponibilidade e apoio científico na realização dos ensaios mecânicos aos painéis,

e de modo muito especial,

A toda a minha família, em especial à minha Mãe pela força que sempre me deu e pelo investimento na minha formação académica,

Ao meu irmão, ele sabe porquê,

À minha namorada e aos meus amigos, pelo companheirismo e pelos bons momentos passados,

E por último... Pai, esta é para ti!

RESUMO

Na última década verificou-se uma crise global no sector da construção civil e uma consequente redução de construção nova, particularmente em Portugal, tendo o setor da pedra natural sido um dos mais afetados a nível produtivo. A este período de baixa demanda precede um período de abundância nesta indústria, categorizado pela produção em massa de produtos *standard*¹.

Atualmente o mercado está cada vez mais focado na procura de produtos inovadores que se destaquem em termos estéticos e funcionais, privilegiando, no caso das fachadas de edifícios, a utilização de painéis de grandes dimensões e/ou de espessura reduzida e que apresentem versatilidade geométrica e/ou técnica. Neste contexto, com esta dissertação, pretende-se prosseguir com o estudo iniciado em 2008 num projeto de I&DT em consórcio entre o Instituto de Engenharia da Faculdade do Porto e as empresas Frontwave – Engenharia e Consultadoria S.A. e Solancis, de uma solução de painéis de pedra natural de grande dimensão, inicialmente concebida para fachada ventilada. O resultado deste projeto originou uma validação do conceito base para a conceção dos painéis, o qual se baseia na aplicação de forças de pré-esforço para a junção de placas de pedra natural.

Neste trabalho experimental procura-se colmatar as principais lacunas apresentadas pelo painel no que diz respeito à sua resposta estrutural, facilidade de produção, rapidez de montagem e comportamento energético. Para tal, será utilizada uma ferramenta de simulação numérica para a criação de um modelo de elementos finitos, cuja validação será efetivada através da realização de ensaios mecânicos à flexão aos painéis.

Palavras-chave: Pedra Natural; Pedra Natural Pré-esforçada; Prefabricação; Painéis de Fachada e Parede; Método dos elementos finitos; Extensometria elétrica.

¹ *standard* – que é conforme a uma norma de fabricação, a um modelo ou a um tipo.

ABSTRACT

In the last decade has been a global crisis in the construction sector and a substantial reduction of new construction, particularly in Portugal, being the stone sector one of the most affected in terms of production. This period of low demand precedes a period of abundance in this industry, characterized mainly by the mass production of standard products.

The current market is increasingly focused on the demand for innovative products that stand out in aesthetic and functional terms, favoring, in the case of building façades, the use of large and reduced thickness panels and presenting versatility in architectural terms. In this context, this thesis intends to continue the study, initiated in 2008, in a R&D project in a consortium between the Institute of Engineering of the Faculty of Porto and the companies Frontwave - Engenharia e Consultadoria S.A. and Solancis, of a solution of large natural stone panels, originally designed for ventilated façade. The result of this project originated a validation of the basic concept for the design of the panels, which is based on the application of prestress forces for the joining of natural stone slabs.

This experimental work seeks to fill the main shortcomings presented by the panel in terms of its structural response, ease of production, fast assembly and energy performance. For this, a numerical simulation tool will be used to create a finite element model, whose validation will be carried out by means of mechanical tests on the panels.

KEYWORDS: Natural Stone, Prestressed Natural Stone, Prefabrication, Façade and Wall panels, Finite element method, Electrical extensometry.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização da Dissertação	3
2.	PREFABRICAÇÃO	5
2.1	Introdução	5
2.2	Breve Contextualização Histórica	6
2.3	Prefabricação em Portugal	8
2.4	Solução de Fachada Prefabricada em Pedra Natural	10
2.5	Análise SWOT: Construção Prefabricada	17
3.	FACHADA	18
3.1	Os Edifícios e as Fachadas	18
3.2	Exigências Funcionais	21
4.	PEDRA NATURAL	24
4.1	Introdução	24
4.2	Classificação da Pedra Natural	24
4.3	Rochas Ornamentais em Portugal	25
4.4	Pedra Natural para Revestimento de Paredes e Fachadas	31
5.	PAINEL DE FACHADA E PAREDE EM PEDRA NATURAL	37
5.1	Metodologia de desenvolvimento	37
5.2	Solução Base	37
5.3	Planeamento de fabrico	40
5.4	Montagem dos painéis	42
5.5	Ensaio Mecânico	50
6.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	60
6.1	Método dos Elementos Finitos	60
6.2	Criação de um Modelo de Elementos Finitos	60
6.3	Criação do modelo numérico	62
6.4	Apresentação de resultados e validação do modelo numérico	69
7.	SOLUÇÃO OTIMIZADA	74
7.1	Otimizações ao Sistema Base	74
7.2	Placas de pedra	74
7.3	Pré-esforço	75
7.4	Aro de periferia	76
7.5	Sistema de fixação	77
8.	Considerações Finais	79
	Referências Bibliográficas	81

ANEXOS..... 85

ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DA PEDRA NATURAL	86
ANEXO B – REGISTO DAS EXTENSÕES, DETERMINAÇÃO DAS CARGAS DE PRÉ-ESFORÇO E ESTIMATIVA DAS PERDAS DE PRÉ-ESFORÇO	88
ANEXO C – ENSAIOS MECÂNICOS	89
ANEXO D – SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Prefabricação pesada (Fonte: <i>ArchiExpo</i>).....	5
Figura 2-2 - Prefabricação leve, Vancouver (Fonte: <i>Acton Ostry Architects Inc.</i>)	5
Figura 2-3 - Sistema construtivo <i>balloon frame</i> (Fonte: <i>Jean Huets, Omaha Reservation, Nebraska, 1877</i>).....	6
Figura 2-4 – Interior do Palácio de Cristal (Fonte: <i>Ilustração dos Irmãos Dickinson, 1ª Grande Exposição Universal, 1851</i>)	6
Figura 2-5 - Sistema construtivo Dom-Ino, Le Cobusier (Fonte: <i>Vierlinger, R., et al, Emergent Hybrid Prefab Structures in Dwellings, 2013</i>).	7
Figura 2-6 - Techbuilt House, Carl Koch (Fonte: adaptado de <i>Carl Koch, At Home with Tomorrow, 1958</i>)	8
Figura 2-7 - Eames House, Charles e Ray Eames, 1945-1949 (Fonte: <i>cima – Paolo Gamba, 2015; baixo – Eames Foundation</i>)	8
Figura 2-8 - Centro Comercial Colombo, Lisboa (Fonte: <i>Jornal Expresso, 2015</i>).	9
Figura 2-9 - Casa da Música, Porto (Fonte: <i>OMA, 2014</i>).	9
Figura 2-10 - Torre do Tombo, Lisboa (Fonte: <i>Arquivo Nacional da Torre do Tombo, 2016</i>).	9
Figura 2-11 - Sede CGD, Lisboa (Fonte: <i>Caixa Geral de Depósitos, 1993</i>).	9
Figura 2-12 - Representação 3D do sistema (Dimensões do painel: 3000 x 1200 x 90 [mm])	10
Figura 2-13 – Vista explodida <i>3D do sistema</i>	10
Figura 2-14 - Painel segundo a direção horizontal (Fonte: <i>retirado de [14]</i>).	11
Figura 2-15 - Painel segundo a direção vertical (Fonte: <i>retirado de [14]</i>).	11
Figura 2-16 - Mesa de trabalho para a montagem dos painéis (Fonte: <i>retirado de [14]</i>).	12
Figura 2-17 - Introdução das placas de pedra junto às extremidades longitudinais (Fonte: <i>retirado de [14]</i>).....	12
Figura 2-18 - Introdução dos varões de aço (Fonte: <i>retirado de [14]</i>).	12
Figura 2-19 - Colocação das placas interiores do pano superior e introdução das cintas plásticas (Fonte: <i>retirado de [14]</i>).	12
Figura 2-20 – Introdução das chapas de ancoragem e do sistema <i>cunha+barrilete</i>	12
Figura 2-21 - Ancoragem passiva.	12
Figura 2-22 - Ancoragem passiva oculta na placa de fecho (Fonte: <i>retirado de [14]</i>).	13
Figura 2-23 - Ancoragem ativa a atuar sobre a placa de fecho (Fonte: <i>retirado de [14]</i>).	13
Figura 2-24 - Injeção da camada de isolamento térmico e acústico (Fonte: <i>retirado de [14]</i>).	13
Figura 2-25 - Ancoragem Dowel (Fonte: <i>Halfen</i>).	14
Figura 2-26 - Detalhes geométricos a executar nas placas de fecho	15
Figura 2-27 - Representação das juntas entre placas	15
Figura 2-28 - Esquematização das pontes térmicas nas placas de fecho.....	16
Figura 2-29 - Análise SWOT da construção prefabricada (Fonte: adaptado de [15]).....	17
Figura 3-1 - Casa do Ferreira das tabuletas, Lisboa (Fonte: <i>Wikipedia, 2007</i>).	18
Figura 3-2 - Sede da Vodafone, Porto, 2009 (Fonte: <i>Engenharia e Construção, 2011</i>).	18
Figura 3-3 - Evolução das fachadas em Portugal (Fonte: adaptado do <i>Manual da alvenaria de tijolo, 2000</i>).....	19
Figura 3-4 - Exemplo de fachada-cortina: Perry & Marty Granoff Center, Providence, Rhode Island, USA, 2011 (Fonte: <i>ArchDaily</i>)	20

Figura 3-5 - Representação do sistema de fachada ventilada (Fonte: <i>Repinor – Serviços de Reabilitação</i>).....	20
Figura 3-6 - Infiltrações devido ao gradiente de pressões entre o interior e o exterior (Fonte: adaptado de <i>Camposinhos, R., Fachadas-Cortina pressurizáveis, ISEP, Porto, 2005</i>).....	21
Figura 3-7 - Sistema geral do edifício (Fonte: adaptado de <i>Schittich, C., In Detail-Building Skins-Concepts, Layers, Materials, Munique, 2001</i>).....	22
Figura 3-8 - Exigências de desempenho da parede de fachada e da fachada ventilada (Fonte: adaptado de Sousa, R., et al, <i>Fachadas de edifícios, Lidel – Edições Técnicas Lda., 2016</i>)	23
Figura 4-1 - Granito "Branco Almeida" (Fonte: <i>INETI</i>).	25
Figura 4-2 - Mármore "Branco" (Fonte: <i>INETI</i>).....	25
Figura 4-3 - Lioz Azulino de Maceira (Fonte: <i>INETI</i>).....	25
Figura 4-4: 1 - Granito: 'Cinzento Apalhão'; 2 - Mármore: 'Branco Anilado'; 3 - Calcário: 'Alpinina Clara'; 4 - Ardósia: 'Ardósia de Canelas' (Fonte: <i>INETI</i>).	28
Figura 4-5 - Operações de extração (Pedreira do Rosal).	29
Figura 4-6 - Operações de transformação (Empresa: <i>Stork Composites</i>).....	29
Figura 4-7 - Deposição de resíduos em áreas contíguas às frentes de exploração.....	30
Figura 4-8 - Deposição de resíduos em áreas contíguas às áreas de transformação.	30
Figura 4-9 - Branco do Mar ou Semi-Rijo do Arrimal (Fonte: <i>Solancis, 2016</i>).....	33
Figura 4-10 – Pedreira Vale da Moita nº1, Arrimal, Porto-de-Mós (Fonte: <i>Solancis, 2016</i>)	33
Figura 4-11 - Pesagem do provete.....	34
Figura 4-12 - Pesagem imersa do provete.....	34
Figura 4-13 - Provetes de pedra "Branco Real": dimensões 300 mm x 50 mm x 50 mm.....	35
Figura 4-14 - Ensaio de flexão com carga concentrada (segundo EN 12372).	35
Figura 4-15 - Rotura de um provete durante o ensaio.	35
Figura 4-16 - Verificação da rotura dos provetes ao centro.....	35
Figura 5-1 - Etapas do processo de desenvolvimento dos painéis de fachada e parede.	37
Figura 5-2 - Placa interior com rasgos nos bordos laterais.....	38
Figura 5-3 - Inclusão de guias metálicas para criação da caixa-de-ar.	38
Figura 5-4 - Representação das placas interiores de topo com sulcos nas extremidades para permitir o encaixe das chapas de ancoragem.....	39
Figura 5-5 - Elementos de pré-esforço (da esquerda para a direita): cunha, barrilete e varões de aço.	39
Figura 5-6 - Representação do sistema cunha + barrilete.	39
Figura 5-7 – i) Vista Explodida: 1 – cunha; 2 – barrilete; 3 – placa interior de topo; 4 – placa interior; 5 – varão de aço; 6 – guia de alumínio; 7 – placa de ancoragem; ii) Vista isométrica 3D; iii) 1 – Vista de topo; 2 – Alçado principal; 3 – Vista lateral.	40
Figura 5-8 - Área de produção: zona 1 - zona de armazenamento de matérias-primas; zona 2 - zona de montagem de painéis; zona 3 - zona de armazenamento de painéis.	41
Figura 5-9 - Placas de pedra.	42
Figura 5-10 - Elementos de pré-esforço.....	42
Figura 5-11 - Bomba manual Enerpac P-39 Última.	42
Figura 5-12 - Limpeza das placas de pedra com recurso a pistola de ar comprimido.	43
Figura 5-13 – Realização da furação na guia metálica.	43
Figura 5-14 – Pesagem da mistura epóxi bi-componente.	43
Figura 5-15 - Colocação das placas do pano de pedra inferior.	44
Figura 5-16 - Aplicação e espalhamento da resina.....	44
Figura 5-17 - Introdução das guias de alumínio.....	44
Figura 5-18 - Introdução das chapas de ancoragem e dos varões de aço.....	44
Figura 5-19 - Introdução do pano de pedra superior.	44
Figura 5-20 - a) <i>Manifold</i> ; b) Cilindro hidráulico; c) Mangueira hidráulica; d) Encaixe macho-fêmea (Fonte: <i>Enerpac</i>).....	45
Figura 5-21 - Conjuntos <i>cunha + barrilete</i>	45
Figura 5-22 - Conjunto <i>cunha + barrilete</i>	45
Figura 5-23 - Expansão dos cilindros hidráulicos	46
Figura 5-24 - Conjunto <i>cunha + barrilete 3</i>	46
Figura 5-25 - Aplicação da carga de pré-esforço.....	46

Figura 5-26 – <i>Strain Gauge (sg)</i>	46
Figura 5-27 - Varão com <i>sg</i>	46
Figura 5-28 - <i>Clip Gauge</i>	47
Figura 5-29 – Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração ao varão de aço.....	47
Figura 5-30 - Esquematização do sistema de aquisição de dados (Fonte: <i>National Instruments</i>).....	48
Figura 5-31 - Sistema de aquisição de dados: 1 – <i>sg</i> colocado no interior do painel; 2 – <i>sg</i> de compensação; 3 – bloco de terminais; 4 – dispositivo DAQ.	48
Figura 5-32 - Ponte de <i>Wheatstone</i>	49
Figura 5-33 - Quarto de ponte do tipo II	49
Figura 5-34 - Evolução no tempo da carga de pré-esforço.....	49
Figura 5-35 - Macaco de reação.	50
Figura 5-36 – Apoio com célula de carga.....	51
Figura 5-37 - Sistema de carregamento.....	51
Figura 5-38 - Transdutores de deslocamento.	51
Figura 5-39 - Identificação da posição dos LVDT's durante o ensaio mecânico.	51
Figura 5-40 - Setup e instrumentação do ensaio à flexão do painel (adaptado de [51])	52
Figura 5-41 - Pórtico de reação.....	52
Figura 5-42 - Gráfico carga-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 1.	53
Figura 5-43 - Gráfico deslocamento-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 1.	53
Figura 5-44 - Gráfico carga-deslocamento relativo do ensaio à flexão do painel 1.....	54
Figura 5-45 - Modo de rotura relativo ao ensaio à flexão do painel 1.....	54
Figura 5-46 - Gráfico carga-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 2.	55
Figura 5-47 - Gráfico deslocamento-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 2.	56
Figura 5-48 - Gráfico carga-deslocamento relativo ao ensaio à flexão do painel 2.....	56
Figura 5-49 - Modo de rotura relativo ao ensaio à flexão do painel 2.....	57
Figura 5-50 - Gráfico carga-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 3.	58
Figura 5-51 - Gráfico deslocamento-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 3.	58
Figura 5-52 - Gráfico carga-deslocamento relativo ao ensaio à flexão do painel 3.....	59
Figura 5-53 - Modo de rotura relativo ao ensaio à flexão do painel 3.....	59
Figura 6-1 – Vista explodida do modelo geométrico utilizado na simulação numérica.	62
Figura 6-2 - Modelo geométrico utilizado na simulação numérica (dimensões do painel: 1500 x 600 x 120 [mm]).....	62
Figura 6-3 - Parâmetros para a definição da <i>Curvature based mesh</i>	64
Figura 6-4 - Propriedades consideradas para a malha do tipo <i>Curvature-based mesh</i>	64
Figura 6-5 - Representação do modelo numérico utilizando uma malha do tipo <i>Curvature-based mesh</i>	64
Figura 6-6 - Refinamento <i>h</i> nos barriletes utilizando <i>Curvature-based mesh</i>	65
Figura 6-7 - Refinamento <i>h</i> nas placas de ancoragem utilizando <i>Curvature-based mesh</i>	65
Figura 6-8 - Refinamento <i>h</i> no sulco das placas de pedra utilizando uma <i>Curvature-based mesh</i>	66
Figura 6-9 - Aplicação das cargas de pré-esforço na superfície exterior dos barriletes. (Dimensões do painel: 1500 x 600 x 120 mm)	66
Figura 6-10 - Cargas de vão (Dimensões do painel: 1500 x 600 x 120 mm)	67
Figura 6-11 - Condições de fronteira: apoio fixo.	67
Figura 6-12 - Condições de fronteira: apoios móveis.	67
Figura 6-13 - Sistema de carregamento para a simulação ao painel 1 (Dimensões do painel: 1500 x 600 x 120 mm).....	69
Figura 6-14 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação do ensaio à flexão do painel 1.	70
Figura 6-15 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação do ensaio à flexão do painel 2.	70
Figura 6-16 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação do ensaio à flexão do painel 3.	71
Figura 6-17 - Destacamento do pano de pedra inferior nos modelos real e numérico relativos do painel 1.....	72
Figura 7-1 - Placa de topo (Dimensões: 100 x 100 x 30 mm).....	75
Figura 7-2 - Placa interior (Dimensões: 100 x 100 x 30 mm).....	75
Figura 7-3 - Esquematização global - placas de pedra.....	75
Figura 7-4 – Placa de ancoragem: 1 - vista de topo; 2 – alçado principal; 3 - vista lateral.	75
Figura 7-5 - Placa de ancoragem: vista 3D isométrica	75

Figura 7-6 – Vista Explodida do sistema de pré-esforço	75
Figura 7-7 - Sistema de aplicação do pré-esforço	75
Figura 7-8 – Aro de periferia.....	76
Figura 7-9 - <i>Exploded View</i> do sistema.....	76
Figura 7-10 – Colagem do aro de periferia nas placas de pedra.....	76
Figura 7-11 - Processo de fabrico de perfis pultrudidos (Fonte: <i>adaptado de Hi-Six – Projects & Foundation Solutions, 2009</i>)	77
Figura 7-12 – Vista Explodida do sistema de fixação	78
Figura 7-13 - Sistema de fixação	78
Figura 7-14 – Vista Explodida da ligação entre o sistema de fixação e a placa de ancoragem.....	78
Figura C-1 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação ao ensaio à flexão do painel 1.....	89
Figura C-2 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação ao ensaio à flexão do painel 2.....	90
Figura C-3 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação ao ensaio à flexão do painel 3.....	90
Figura D-1 - Campo de deslocamento segundo o eixo y referente ao ensaio à flexão do painel 1.....	92
Figura D-2 - Campo de tensão segundo o eixo x referente ao ensaio à flexão do painel 1.....	92
Figura D-3 - Campo de tensão segundo o eixo x no plano x-y definido pelo plano de corte X ₂ -X ₂	93
Figura D-4 - Campo de deslocamentos segundo o eixo y referente ao ensaio à flexão ao painel 2.....	94
Figura D-5 - Campo de tensão segundo o x referente ao ensaio à flexão ao painel 2.....	94
Figura D-6 - Campo de tensão segundo o eixo x no plano x-y definido pelo plano de corte X ₄ -X ₄	95
Figura D-7 - Campo de deslocamento segundo o eixo x relativo ao ensaio à flexão ao painel 3.....	96
Figura D-8 - Campo de tensões segundo o eixo y relativo ao ensaio à flexão ao painel 3.....	96
Figura D-9 - Campo de tensão segundo o eixo x no plano x-y definido pelo plano de corte X ₆ -X ₆	97

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4-1 - Principais características físico-mecânicas dos granitos portugueses [33].	26
Tabela 4-2 - Principais características físico-mecânicas dos mármorees portugueses [34].	27
Tabela 4-3 - Principais características físico-mecânicas dos calcários portugueses [34].	28
Tabela 4-4 - Principais características físico-mecânicas das ardósias portuguesas [34].....	28
Tabela 5-1 - Propriedades do <i>sg</i>	46
Tabela 5-2 - Propriedades do <i>clip gauge</i>	47
Tabela 6-1 – Propriedades dos materiais consideradas na simulação numérica.....	63
Tabela A-1 - Valores de massa volúmica aparente e de porosidade aberta obtidos nos ensaios.....	86
Tabela A-2 - Valores obtidos para a absorção de água à pressão atmosférica.....	86
Tabela A-3 - Registo da massa dos provetes para ensaio.....	87
Tabela A-4 - Valores de resistência à flexão obtidos do ensaio.....	87
Tabela A-5 - Valor mínimo esperado para a resistência à flexão.....	87
Tabela B-1 - Registo das extensões e determinação das cargas e perdas de pré-esforço no painel 1...88	
Tabela B-2 - Registo das extensões e determinação das cargas e perdas de pré-esforço no painel 2...88	
Tabela B-3 - Registo das extensões e determinação das cargas e perdas de pré-esforço no painel 3...88	
Tabela C-1 - Valores de deslocamento retirados do ensaio mecânico à flexão do painel 1.....	89
Tabela C-2 - Valores de deslocamento retirados do ensaio mecânico à flexão do painel 2.....	89
Tabela C-3 - Valores de deslocamento retirados do ensaio mecânico à flexão do painel 3.....	90
Tabela D-1 - Valores de deslocamento registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 1.....	91
Tabela D-2 - Valores de deslocamento relativo registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 1.....	91
Tabela D-3 - Valores de deslocamento registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 2.....	92
Tabela D-4 - Valores de deslocamento relativo registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 2.....	92
Tabela D-5 - Valores de deslocamento registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 3.....	95
Tabela D-6 - Valores de deslocamento relativo registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 3.....	95

NOMENCLATURA

Propriedades físicas e microestruturais

A_b – Absorção de água à pressão atmosférica, sob a forma percentual

b – Largura do provete junto ao plano de fratura, em milímetros

F – Força de rutura, em newtons

l – Distância entre os cilindros de apoio, em milímetros

m_d – Massa do provete seco, em gramas

m_h – Massa do provete imerso em água, em gramas

m_s – Massa do provete saturado, em gramas

ρ_b – Massa volúmica aparente do provete, em quilogramas por metro cúbico

p_o – Porosidade aberta do provete, sob a forma percentual

ρ_{rh} – Massa volúmica real da água, em quilogramas por metro cúbico

R_{tf} – Resistência à flexão do provete, em megapascais

Extensometria elétrica

A – Área da secção do varão de aço, em milímetros quadrados

σ – Tensão aplicada, medida em megapascais

E – Módulo de elasticidade do varão de aço, em megapascais

F – Força de pré-esforço, em newtons

ε – Extensão do varão de aço

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Na última década verificou-se uma crise no sector da construção civil e uma consequente redução de construção nova em Portugal, tendo o setor da pedra natural sido um dos mais afetados a nível produtivo. A este período de baixa procura por materiais nobres precede um período de abundância nesta indústria, categorizado pela produção em massa de produtos *standard*².

Atualmente o mercado está cada vez mais focado na procura de produtos inovadores que se destaquem em termos estéticos e funcionais, privilegiando, no caso das fachadas, a utilização de painéis de grandes dimensões e/ou de espessura reduzida e que, em termos arquitetónicos, apresentem versatilidade geométrica e flexibilidade técnica na aplicação. A evolução da indústria da pedra natural é marcada por uma procura constante de novas aplicações e funcionalidades, apresentando-se como um dos ramos mais promissores da indústria em Portugal no que diz respeito ao aproveitamento e utilização dos recursos naturais do país.

Como resposta a este novo tipo de procura, as empresas do sector tendem a apostar em novas tecnologias de produção, criando produtos inovadores passíveis de serem utilizados nos diferentes tipos de construção (nova, reabilitação e reconstrução). Estes produtos encontram-se integrados na “nova” cadeia de valor associada à construção, na qual a modelação, o projeto técnico e o planeamento se encontram cada vez mais interligados.

Um dos fatores que estimulou este investimento na procura de novas soluções de revestimento foi a crescente tendência, verificada nos últimos anos, de separação física entre a fachada e o restante edifício. Esta separação acarreta inúmeras vantagens em termos de eficiência energética e aumenta o leque de possibilidades de revestimento.

Nesse contexto, com esta dissertação, pretende-se prosseguir com o estudo, iniciado em 2008, num projeto de I&DT em consórcio entre o Instituto de Engenharia da Faculdade do Porto (ISEP) e as empresas Frontwave – Engenharia e Consultadoria S.A. e Solancis, de uma solução de painéis de pedra natural de grande dimensão para fachada ventilada. O resultado deste projeto originou uma validação do conceito base para a conceção dos painéis, o qual se baseia na aplicação de forças de pré-esforço para a junção de placas de pedra natural.

Neste trabalho experimental procura-se corrigir as principais lacunas apresentadas pelo painel no que diz respeito à sua resposta estrutural, facilidade de produção, rapidez de montagem e comportamento energético. Para tal, será utilizada uma ferramenta de simulação numérica para a criação de um modelo de elementos finitos, cuja validação será efetuada por intermédio de uma caracterização experimental do sistema, através da realização de ensaios mecânicos aos painéis.

² *standard* - que é conforme a uma norma de fabricação, a um modelo ou a um tipo.

1.2 Objetivos

Atendendo à crescente procura por soluções inovadoras prefabricadas pretende-se, com esta dissertação, desenvolver um painel em pedra natural pré-esforçada passível de ser utilizado como elemento de parede ou como elemento de fachada ventilada na envolvente exterior do edificado. Deste modo, definiram-se os principais objetivos a atingir:

- Conceção e modelação geométrica de uma solução base de painel de parede e fachada;
- Realização de ensaios experimentais para caracterização dos materiais constituintes do painel:
 - Ensaios de caracterização físico-mecânica a um tipo de pedra natural;
 - Ensaio de tração aos varões de aço para determinação do seu módulo de elasticidade.
- Simulação numérica da solução base utilizando um *software* de elementos finitos;
- Assemblagem de três painéis para ensaios mecânicos, a qual inclui:
 - Definição e implementação de um *setup* de montagem para a assemblagem dos painéis;
 - Aplicação de extensómetros elétricos nos varões de aço para avaliação e controlo da carga de pré-esforço aplicada;
 - Definição de uma metodologia para determinar uma estimativa de perdas de pré-esforço (instantâneas e diferidas) do sistema;
- Realização de ensaios mecânicos à flexão aos painéis produzidos;
- Validação da simulação numérica através de uma análise comparativa com os resultados experimentais referentes aos ensaios mecânicos;
- Conceção e modelação geométrica de uma solução de painel otimizada;

A taxa de aceitação de soluções construtivas prefabricadas, face às soluções construtivas correntes, é relativamente baixa no nosso país, pelo que, ao longo desta dissertação, procurou-se expor as principais vantagens inerentes a este tipo de construção.

1.3 Organização da Dissertação

Com vista a alcançar os objetivos propostos, esta dissertação encontra-se estruturada em oito capítulos, realizando-se, de seguida, uma breve descrição de cada um destes.

No capítulo 1 – Introdução – introduz-se o tema em estudo, realizando-se um enquadramento da solução no mercado atual, identificam-se os principais objetivos que se pretendem alcançar com esta dissertação e define-se a estrutura adotada ao longo do seu desenvolvimento.

No Capítulo 2 – Prefabricação - apresenta-se o conceito e realiza-se uma breve contextualização histórica do setor da prefabricação, particularizando-se a evolução do elemento fachada na conceção global do edifício. Apresenta-se o exemplo de solução prefabricada em pedra natural que servirá como base para o estudo desenvolvido nesta dissertação de mestrado. Por último, executa-se uma análise SWOT ao setor da pedra natural.

O Capítulo 3 – Fachada – inicia com uma breve descrição do papel das fachadas na valorização do edificado, bem como da sua importância no que diz respeito à proteção face aos agentes atmosféricos. Apresenta-se, de forma sumária, a evolução histórica das soluções construtivas de fachada em Portugal, com especial ênfase para a solução de fachada ventilada, cuja utilização tem sido cada vez mais recorrente nos últimos anos. Por último, identificam-se as exigências de desempenho associadas a um elemento de parede de fachada e a um elemento de fachada ventilada.

No Capítulo 4 – Pedra Natural – apresentam-se os princípios de classificação da pedra natural e das rochas ornamentais, de acordo com a origem e composição mineralógica e com a nomenclatura comercial, respetivamente. Dentro do âmbito das rochas ornamentais, especifica-se o impacto ambiental associado aos processos produtivos e analisa-se a utilização da pedra natural como elemento de revestimento de paredes e fachadas, exaltando-se a importância do conhecimento das suas propriedades físicas e mecânicas. Neste contexto, apresentam-se os diversos ensaios de caracterização físico-mecânica realizados a um tipo de pedra natural, utilizando-se os resultados obtidos para a criação do modelo numérico.

No Capítulo 5 – Desenvolvimento de uma solução de fachada e parede em pedra natural – apresenta-se a metodologia de desenvolvimento adotada tendo em vista a otimização desta solução de revestimento. A descrição da solução base, o planeamento de fabrico e a montagem dos painéis constituem as etapas principais prévias à realização dos ensaios mecânicos, os quais exigem uma definição cuidada do *setup* de ensaio. Por último, especifica-se a metodologia de ensaio adotada para testar os painéis à flexão e realiza-se uma análise aos resultados obtidos.

O Capítulo 6 – Simulação numérica – inicia com uma breve descrição do *software* de método de elementos finitos utilizado para a criação de um modelo numérico do painel. A caracterização dos materiais, a seleção do tipo de análise e de malha, a definição das condições de fronteira e de contacto e a introdução do sistema de carregamento constituem as principais etapas na conceção de um modelo

numérico. Por último, através de uma análise comparativa entre os modelos real e numérico, procura-se a validação deste último.

No Capítulo 7 – Solução Otimizada – procura-se apresentar as alterações mais relevantes ao sistema base, tendo em conta, numa primeira fase, os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e, posteriormente, considerando a necessidade de compatibilização com os restantes elementos construtivos, como é o caso da estrutura de fixação.

No Capítulo 8 – Considerações Finais – apresenta-se uma síntese do estudo realizado, exaltando-se as principais conclusões retiradas dos ensaios mecânicos aos painéis e da análise ao modelo numérico. Por fim, sugerem-se possíveis estudos futuros tendo em vista uma caracterização energética desta solução de revestimento.

2. PREFABRICAÇÃO

2.1 Introdução

O conceito de prefabricação encontra-se associado a um sistema construtivo que utiliza elementos normalizados, previamente fabricados segundo um conjunto de processos normalizados [1]. Ao longo do processo de fabrico os produtos são sujeitos a um rigoroso controlo de qualidade, garantindo uma redução substancial de potenciais anomalias comparativamente ao processo de construção *in situ*.

Fatores sociais, económicos e ambientais sugerem uma urgente necessidade de adoção de novos métodos construtivos. A utilização de elementos prefabricados surge como resposta a problemas de produtividade na construção civil, proporcionando uma maior economia de tempo e de recursos, e contribui para a industrialização do ramo da construção. A independência da realização dos trabalhos face às condições atmosféricas favorece, igualmente, a adoção deste método.

O grau de prefabricação caracteriza-se como total para situações em que existe uma elevada percentagem de elementos produzidos em fábrica, e como parcial em casos onde apenas uma pequena parcela das operações de construção é industrializada [2]. O sistema de prefabricação pode ainda ser classificado como aberto ou fechado. Num sistema aberto, dada a flexibilidade e o grau de compatibilidade dos elementos, admite-se a incorporação em obra de elementos de fabricantes diferentes. Num sistema fechado todos os elementos prefabricados são produzidos por uma única empresa, constituindo um sistema construtivo singular [3].

A prefabricação pode igualmente ser classificada de acordo com o peso próprio dos elementos: 1) prefabricação pesada ou estrutural; 2) prefabricação leve e 3) prefabricação ligeira ou de produtos standard. A prefabricação pesada engloba elementos com peso próprio elevado, como vigas, pilares e lajes de betão armado e pré-esforçado, ao passo que a prefabricação leve inclui peças cujo peso próprio não excede os 100 Kg/m^2 , tais como fachadas e divisórias leves, tetos falsos ou sistemas de revestimento de paredes. A prefabricação ligeira corresponde à produção de peças de pequenas dimensões para edifícios fabricados em série [2].



Figura 2-1 - Prefabricação pesada
(Fonte: ArchiExpo)



Figura 2-2 - Prefabricação leve, Vancouver
(Fonte: Acton Ostry Architects Inc.)

2.2 Breve Contextualização Histórica

O sistema de prefabricação tem desempenhado um papel importante na inovação do design e dos métodos construtivos, tendo superado, ao longo dos anos, inúmeros desafios económicos e sociais. O seu início não se pode precisar, contudo, é possível identificar duas épocas de especial ênfase deste sistema: a Revolução Industrial, em meados do século XVIII, e a Segunda Guerra Mundial (1939-1945).

Com a Revolução Industrial, deu-se início à mecanização do processo produtivo, ocorrendo uma progressiva substituição do modo de produção doméstico pelo sistema fabril. As alterações nos métodos produtivos das matérias-primas e a invenção da máquina a vapor potenciaram o desenvolvimento de novos métodos de produção de ferro e a criação de novos materiais como o vidro, promovendo uma renovação no setor da construção. Adicionalmente, a utilização exclusiva de matérias locais foi desvinculada aquando da criação de caminhos de ferro [4].

Após este período, nos EUA, verificaram-se inúmeros avanços a nível industrial, económico e urbano, sendo exemplo disso o projeto de reconstrução da cidade de Chicago, após o grande incêndio de 1871. A maioria dos edifícios foram inteiramente construídos em madeira segundo o sistema construtivo desenvolvido por George Washington Snow, denominado de *balloon frame*. Composto por uma malha densa de ripas de madeira de dimensões normalizadas, este método encontra-se intimamente ligado aos modos produtivos característicos da Revolução Industrial, conjugando a rapidez e eficiência construtivas com a resistência mecânica conferida pelos elementos de madeira [5].

Na Europa, a primeira grande construção modular foi o Palácio de Cristal (1851). Desenhado e projetado por Joseph Paxton para acolher a primeira Exposição Universal (Londres), esta obra é o reflexo dos avanços registados durante a Revolução Industrial no que diz respeito à utilização do ferro e do vidro. “A economia do projeto de Paxton teve como bases a prefabricação total, a rapidez de montagem e a possibilidade de recuperação total” [6].



Figura 2-3 - Sistema construtivo *balloon frame*
(Fonte: Jean Huets, *Omaha Reservation, Nebraska*, 1877)



Figura 2-4 – Interior do Palácio de Cristal
(Fonte: *Ilustração dos Irmãos Dickinson, 1ª Grande Exposição Universal, 1851*)

No período que sucede à 1ª Guerra Mundial (1914-1918), o sistema de prefabricação teve um papel preponderante dada a devastação verificada nas principais cidades europeias. A necessidade de providir uma resposta rápida e eficaz exprimiou-se em inúmeras experiências de prefabricação associadas a

programas habitacionais [2], as quais “*exploram as potencialidades dos novos materiais e propõem novos sistemas construtivos focados na racionalização dos processos*” [7].

O início do século XX é marcado pela descoberta das potencialidades do betão armado enquanto elemento estrutural, fomentando o desenvolvimento de novas soluções construtivas. O arquiteto Le Corbusier, tendo em vista a criação de uma solução racional e económica, concebe, entre 1914 e 1917, com o engenheiro Max du Bois, o sistema *Dom-ino*, o qual se encontra representado na Figura 2-5. Composto por lajes fungiformes ligadas por escadas, este sistema introduz o conceito de *fachada livre* face ao recuo dos pilares relativamente ao plano da fachada [8]. Todos os elementos apresentam dimensões padronizadas, facilitando a sua produção em série.

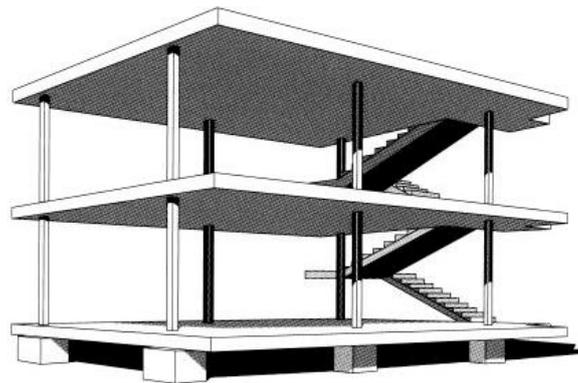


Figura 2-5 - Sistema construtivo Dom-ino, Le Corbusier (Fonte: Vierlinger, R., et al, *Emergent Hybrid Prefab Structures in Dwellings*, 2013).

Foram inúmeros os projetos e experiências realizados nesta época no contexto da prefabricação. Contudo, a falta de viabilidade económica e a inércia das empresas de construção face à alteração os princípios construtivos, levaram a que todos os esforços para a implementação deste novo sistema fossem pouco valorizados [9]. De facto, somente após a 2ª Guerra Mundial, é que se verificou um incremento substancial na procura por soluções prefabricadas.

Nos EUA, no início da década de 1950, o arquiteto Carl Koch criou o projeto *Techbuilt* (Figura 2-6). Caracterizado pela inovação em termos estruturais com a incorporação de pilares de aço e vigas de madeira, este projeto diferenciou-se pela simplicidade estética, utilização extensiva do vidro e incorporação de painéis modulares com revestimento exterior personalizável [10]. Também Charles e Ray Eames, através da utilização de novos materiais e tecnologias, projetaram a *Eames House* (Figura 2-7). A adoção de uma estrutura metálica portante, preenchida com painéis modulares, garante a integridade estrutural e a versatilidade em termos estéticos necessárias [11].

Estes são alguns exemplos de projetos que, através da inclusão e conjugação de novos materiais, procuraram criar uma solução prefabricada racional e versátil do ponto de vista estético e estrutural. Contudo, o período pós-guerra é marcadamente caracterizado por ambientes urbanos monótonos face à grande rigidez formal característica dos projetos de reconstrução [9]. A necessidade de construir em larga escala num curto espaço de tempo potenciou más práticas construtivas, o que se refletiu na qualidade final das construções em geral, instaurando-se um pré-conceito de má qualidade associado

às soluções prefabricadas [12]. Estes fatores fomentaram o declínio do setor da prefabricação, conduzindo ao encerramento de grande parte das unidades produtivas do setor [7].

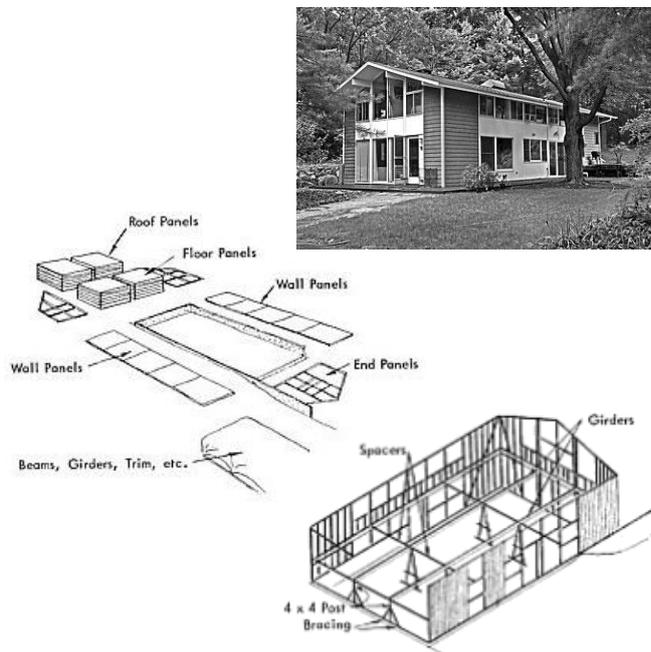


Figura 2-6 - Techbuilt House, Carl Koch
(Fonte: adaptado de Carl Koch, *At Home with Tomorrow*, 1958)



Figura 2-7 - Eames House, Charles e Ray Eames, 1945-1949 (Fonte: cima – Paolo Gamba, 2015; baixo – Eames Foundation)

A partir dos anos 80 assiste-se ao surgimento de um novo tipo de prefabricação, ocorrendo uma progressiva alteração dos sistemas construtivos e um abandono do conceito de *edifício-padrão*. Tendo como objetivo principal conferir uma maior flexibilidade estética aos edifícios prefabricados, esta nova vertente procura gerar um ambiente urbano singular, contrastando com a homogeneidade característica dos edifícios construídos até à data.

A partir da viragem do século, ocorreram inúmeras inovações no setor da construção e, em particular, no ramo da prefabricação. A evolução dos sistemas estruturais e dos métodos construtivos potenciou a separação física entre o elemento *fachada* e a restante estrutura, perdendo este a sua função estrutural. O destacamento da fachada relativamente ao plano do edifício confere uma flexibilidade estética ao elemento, colmatando uma das principais lacunas do sistema de prefabricação, a capacidade de personalização.

2.3 Prefabricação em Portugal

Em Portugal, os princípios de prefabricação surgem frequentemente associados ao período pós-terramoto (1755) [7]. A devastação da cidade de Lisboa, em particular da baixa pombalina, exigiu uma resposta célere, suscitando a necessidade de adoção de novos métodos construtivos. Caracterizado pela “*normalização de medidas, standardização de elementos repetitórios, racionalização da produção e sistematização da laboração*” [6], este novo método produtivo – sistema gaioleiro – permitiu dar resposta ao grande volume de construção que se verificou naquele período.

De facto, o sistema gaioleiro revelou-se extremamente engenhoso face à sua simplicidade de princípios e realização prática. A uniformidade característica dos projetos arquitetónico e urbanístico, bem como a tipificação e a repetição de componentes possibilitaram acelerar e simplificar o processo de transferência de propriedades da antiga malha para o novo traçado [6].

“É um erro muito frequente referirem que a prefabricação teve origem, em Portugal, na construção pombalina e confundirem a normalização, estandardização e tipificação com a prefabricação” [6*]. De facto, as primeiras experiências de utilização deste sistema em Portugal remontam à década de 1940, situando-se temporalmente mais avançadas comparativamente com outros países europeus.

Face ao vasto campo de aplicação e ao investimento realizado por inúmeras empresas de construção em meios tecnológicos e de mão de obra especializada, as soluções prefabricadas tornaram-se numa solução construtiva competitiva [13]. Conjuntamente, face ao incremento das exigências de desempenho térmico, acústico e estrutural, assistiu-se a um avanço na tecnologia de construção de fachadas, desenvolvendo-se produtos inovadores, eco eficientes, com *performance* melhorada.

Atualmente em Portugal é recorrente a adoção de soluções prefabricadas na construção de edifícios de maiores dimensões, sendo exemplo disso alguns dos mais icónicos edifícios nacionais. A utilização de painéis prefabricados em GRC (Glass Reinforced Concrete) para revestimento da fachada no Centro Comercial Colombo (Lisboa, 1997) (Figura 2-8) e da Casa da Música (Porto, 2005) (Figura 2-9) ou a utilização de painéis prefabricados em betão na construção dos pisos superiores da sede da Caixa Geral de Depósitos (Lisboa, 1993) (Figura 2-10) ou na fachada da Torre do Tombo (Lisboa, 1992) (Figura 2-11), são exemplos representativos de um sistema construtivo em expansão [7].



Figura 2-8 - Centro Comercial Colombo, Lisboa
(Fonte: *Jornal Expresso*, 2015).



Figura 2-9 - Casa da Música, Porto
(Fonte: *OMA*, 2014).



Figura 2-10 - Torre do Tombo, Lisboa
(Fonte: *Arquivo Nacional da Torre do Tombo*, 2016).



Figura 2-11 - Sede CGD, Lisboa
(Fonte: *Caixa Geral de Depósitos*, 1993).

2.4 Solução de Fachada Prefabricada em Pedra Natural³

2.4.1 Enquadramento

Em 2008, destacando-se das soluções correntes de revestimento em pedra natural, foi iniciado, num projeto I&DT em consórcio entre o ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto) e as empresas Frontwave – Engenharia e Consultadoria S.A. e Solancis, o desenvolvimento de um sistema de painéis de grande dimensão para fachada ventilada. Este sistema corresponde a uma nova tipologia de aplicação de pedra natural em fachadas de edifícios, caracterizando-se, de forma primordial, como uma solução sustentável e eficiente do ponto de vista ambiental. O acrónimo utilizado para este sistema é *PFSP – Prestressed Façade Stone Panels* (Patente de Inovação Nacional nº 104770).

2.4.2 Descrição do Sistema

A solução de painel tem como principal conceito a junção de placas de pedra natural pela ação de forças de pré-esforço, na procura de garantir um comportamento monolítico ao painel. Os painéis são compostos por três tipos de placas: placa de fecho, placa interior e placa de espaçamento, tal como se representa nas Figuras 2-12 e 2-13. A zona interior do painel é composta por dois panos de pedra, separados por uma caixa-de-ar, na qual se pressupõe a introdução de uma camada de isolamento térmico e/ou acústico.

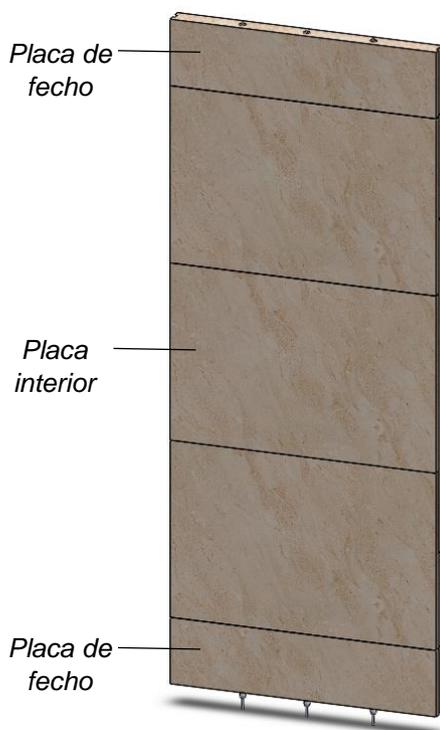


Figura 2-12 - Representação 3D do sistema
(Dimensões do painel: 3000 x 1200 x 90 [mm])

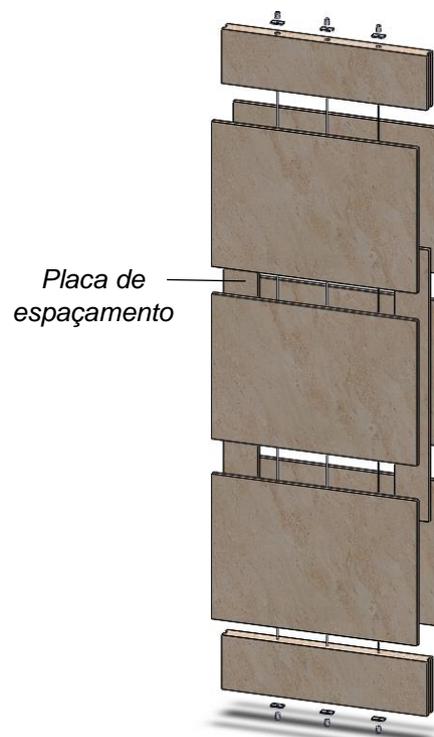


Figura 2-13 – Vista explodida 3D do sistema

³ Adaptado de [14], com exceção para o ponto 2.4.7.

As placas de fecho apresentam furações, segundo a sua largura, permitindo a passagem de varões de aço, responsáveis pela ação de pré-esforço. A transferência de tensão entre os varões de aço e as placas de pedra é assegurada por um sistema de *cunha+barrilete*, o qual atua sobre uma chapa de ancoragem de aço colocada ao nível das furações nas placas de fecho. Os varões de aço utilizados apresentam um diâmetro de 7 mm e uma tensão última de tração de 1860 MPa. O número de varões por painel e a carga aplicada variam consoante os requisitos de dimensionamento e a sua orientação na fachada – horizontal (entre dois pilares) ou vertical (entre duas vigas ou lajes), tal como se representa na Figura 2-14 e na Figura 2-15.

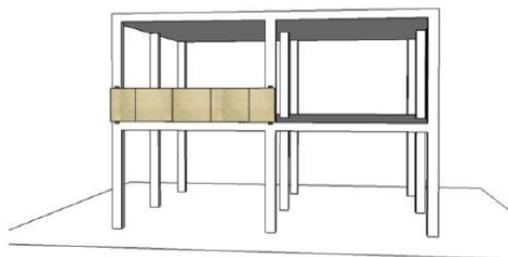


Figura 2-14 - Painel segundo a direção horizontal
(Fonte: retirado de [14]).

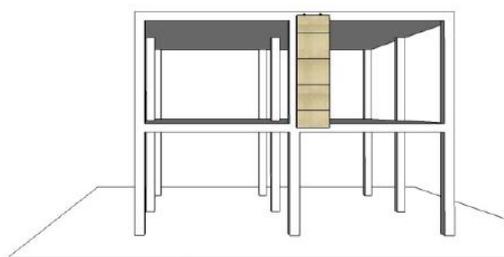


Figura 2-15 - Painel segundo a direção vertical
(Fonte: retirado de [14]).

A espessura total do sistema, dependendo dos pressupostos e exigências de projeto, varia entre 70 e 90 mm. Por sua vez, a espessura das placas interiores varia entre 20 e 30 mm e a caixa-de-ar entre 30 e 50 mm. Consoante as espessuras consideradas, o peso total dos painéis, por metro quadrado, varia entre 1,0 kN e 2,0 kN. Em situações correntes, no que diz respeito ao pé direito e ao espaçamento entre pilares, assumindo uma largura de painel de 1200 mm, o peso total de um painel varia entre 4 kN e 13 kN, respetivamente.

2.4.3 Montagem do Painel

A montagem dos painéis PFSP é executada na horizontal, assente numa mesa de trabalho devidamente nivelada, sobre vigas de madeira, permitindo o acesso à face inferior dos painéis durante esta operação (Figura 2-16). Nas figuras seguintes apresenta-se a sequência de montagem de um painel de dimensões: 3000 mm x 1200 mm x 90 mm. Para tal, foram produzidas seis placas interiores, de dimensões 800 mm x 1200 mm x 30 mm, duas placas de fecho, de dimensões 300 mm x 1200 mm x 90 mm e duas placas de espaçamento, de dimensões 1500 mm x 200 mm x 30 mm.

O processo de montagem inicia com a colocação, sobre a superfície de trabalho, das placas interiores, do pano inferior, e das placas de fecho. Concluída esta etapa e comprovado o nivelamento do sistema, procede-se à colagem das placas interiores e das placas de fecho, utilizando uma resina de base epóxi, por forma a criarem-se juntas estruturalmente monolíticas. Tendo como objetivo garantir-se o espaçamento entre os panos de pedra na zona central do painel, introduzem-se, junto às extremidades longitudinais do pano inferior duas placas de espaçamento (Figura 2-17). Estas placas são coladas às placas interiores do pano inferior utilizando-se, igualmente, uma resina de base epóxi.



Figura 2-16 - Mesa de trabalho para a montagem dos painéis (Fonte: retirado de [14]).



Figura 2-17 - Introdução das placas de pedra junto às extremidades longitudinais (Fonte: retirado de [14]).

Previamente à colocação do pano de pedra superior são colocados os varões de aço através das furações realizadas nas placas de fecho, tal como representado na Figura 2-18. Seguidamente procede-se à colocação do pano superior de pedra, colando-se as superfícies de contacto entre as placas com uma resina de base epóxi. De forma a garantir-se o alinhamento geométrico do sistema e uma distribuição uniforme da resina, utilizam-se cintas plásticas, tal como se verifica na Figura 2-19.



Figura 2-18 - Introdução dos varões de aço (Fonte: retirado de [14]).

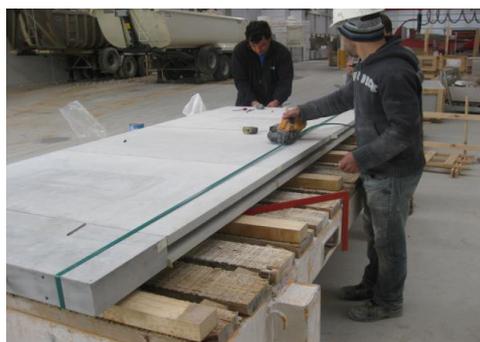


Figura 2-19 - Colocação das placas interiores do pano superior e introdução das cintas plásticas (Fonte: retirado de [14]).

2.4.4 Aplicação das Cargas de Pré-esforço

Para a aplicação das cargas de pré-esforço assume-se a existência de uma ancoragem ativa e de uma ancoragem passiva. Para tal, numa das placas de fecho, são realizados rasgos, para permitir a entrada de chapas de ancoragem, e furações, para permitir a inserção do sistema *cunha+barrilete*, funcionando como ancoragem passiva (Figuras 2-20 e 2-21).



Figura 2-20 – Introdução das chapas de ancoragem e do sistema *cunha+barrilete*.



Figura 2-21 - Ancoragem passiva.

Na ancoragem ativa, de forma a possibilitar o tracionamento dos cabos, os elementos de pré-esforço ficam visíveis, não sendo necessária a realização de rasgos e furações adicionais. Os aparelhos de tensionamento atuam diretamente nos varões de aço, evitando-se eventuais perdas elásticas devido à retração dos elementos.



Figura 2-22 - Ancoragem passiva oculta na placa de fecho (Fonte: retirado de [14]).



Figura 2-23 - Ancoragem ativa a atuar sobre a placa de fecho (Fonte: retirado de [14]).

2.4.5 Isolamento Térmico e Acústico

A última etapa do procedimento de montagem prende-se com a introdução de uma camada de isolamento térmico e acústico na caixa-de-ar formada entre as placas interiores. Nesse sentido, injeta-se uma espuma de poliuretano, de poliestireno expandido (EPS) ou de poliestireno extrudado (XPS), através dos orifícios localizados nas extremidades laterais, junto às placas de espaçamento, tal como se identifica na Figura 2-24.



Figura 2-24 - Injeção da camada de isolamento térmico e acústico (Fonte: retirado de [14]).

2.4.6 Sistema de Fixação

Para esta solução de painel utilizou-se um sistema de fixação indireto com ancoragens *Dowel*, representadas na Figura 2-25. As ancoragens podem estar inseridas nos topos superior e inferior ou nos bordos laterais do painel, em ambos os casos a meia espessura das placas de fecho, evitando-se eventuais excentricidades na distribuição do peso. Este sistema tem como principal vantagem a

flexibilidade de ajuste perante eventuais incongruências geométricas relativamente ao plano de fixação da estrutura portante.

Para a fixação dos painéis será, portanto, necessária a execução de furações nos painéis para permitir o encaixe nas ancoragens. O número de ancoragens a utilizar depende das considerações de projeto bem como do peso próprio de cada painel.



Figura 2-25 - Ancoragem Dowel (Fonte: Halfen).

2.4.7 Problemas apresentados pelo Sistema PFSP

Os painéis PFSP apresentam inúmeras condicionantes construtivas e funcionais que comprometem os processos de produção e montagem, bem como a sua *performance* em serviço. Funcionando esta como uma primeira iteração deste sistema de revestimento, revela-se indispensável a identificação e análise dos principais aspetos a corrigir em futuras iterações do mesmo. Nesse sentido, identificaram-se como principais problemas:

- 1) Elevado peso próprio: O peso próprio de um painel, tal como já foi referido no ponto 2.4.2, pode variar entre 4 kN e 13 kN, consoante a espessura considerada. Apresentando-se esta como uma solução de parede ou fachada ventilada, pode-se considerar que este sistema, comparativamente com outras soluções correntes de revestimento em pedra natural, apresenta um peso próprio elevado. A presença das placas de fecho tem, neste contexto, um significativo contributo negativo, dado que incrementam consideravelmente o peso da solução.

Este fator condiciona o sistema global de revestimento em aspetos relativos ao sistema de fixação, ao transporte dos painéis e ao seu manuseamento e colocação em obra. Quanto mais elevado for o peso próprio dos painéis, maior será a exigência estrutural associada ao sistema de fixação, refletindo-se num maior número de ancoragens a utilizar-se por painel. Este aspeto tem como consequência direta o aumento do custo final da solução.

Relativamente ao transporte, ao manuseamento e à colocação dos painéis em obra, quando maior for o seu peso próprio, maior serão os cuidados a ter durante estas operações. A necessidade de utilização de meios de elevação com elevada capacidade de carga, como camiões-grua, aumenta o custo destas operações.

- 2) Particularidades geométricas das placas de pedra: O tempo requerido para a execução dos entalhes e furações nas placas de fecho atrasa, consideravelmente, o processo produtivo dos painéis. A inviabilidade de utilização de maquinaria de corte automático em alguns destes elementos e a precisão geométrica exigida obrigam a trabalho manual moroso, incompatível com uma célere produção em massa.

Na Figura 2-26 representam-se os principais detalhes geométricos a executar na produção de placas de fecho: entalhe; furações para inserção dos barriletes; furações para passagem dos fios de pré-esforço; furação para inserção das placas de ancoragem.

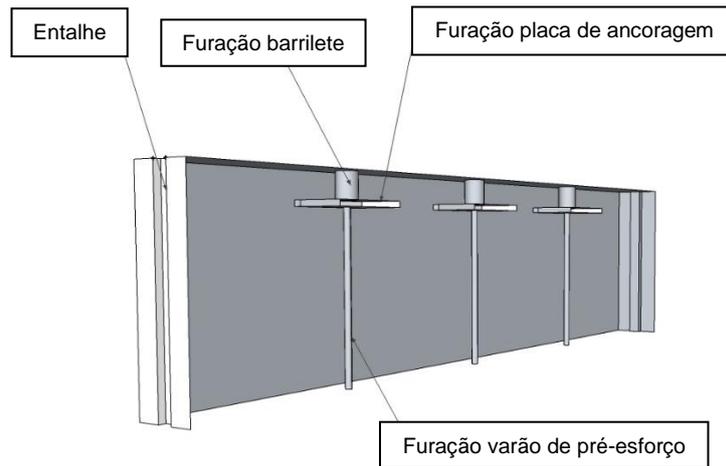


Figura 2-26 - Detalhes geométricos a executar nas placas de fecho

- 3) Aspeto estético do sistema global: A existência de 5 placas de pedra (2 placas de fecho e 3 placas interiores) segundo o plano vertical cria 4 juntas horizontais por painel, as quais, pelo facto de não estarem igualmente espaçadas, poderão não ir de encontro com as preferências estéticas do utilizador final. Na Figura 2-27 encontra-se representado o alçado principal de uma fachada composta por 8 painéis, no qual fica visível o efeito visual acima mencionado.

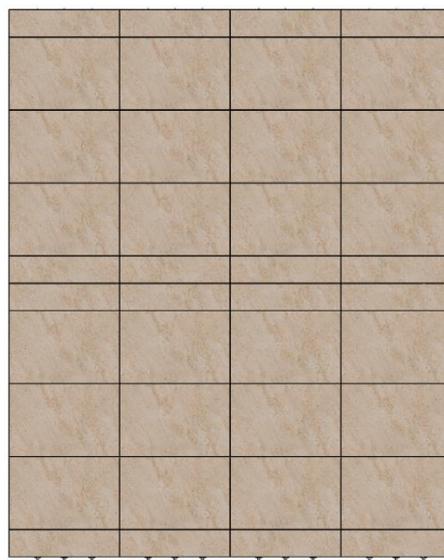


Figura 2-27 - Representação das juntas entre placas

- 4) Baixa *performance* energética: Os painéis PFSP pressupõem a utilização de duas placas de fecho, nos topos dos painéis, e de dois panos de pedra (cada um composto por três placas interiores) entremeados por uma camada de isolamento térmico. Embora não tenham sido realizados quaisquer tipos de ensaios de índole térmica, é possível afirmar que a interrupção da camada de isolamento térmico ao nível das placas de fecho induz a ocorrência de pontes térmicas nestas zonas. De facto, as propriedades físicas da pedra, comparativamente às do material isolante, facilitam a passagem de calor, o qual se desloca pelo trajeto com menor resistência térmica.

Na Figura 2-28 encontra-se esquematizado este fenómeno, cujas consequências podem ser agravadas em ambientes mais agressivos. As pontes térmicas constituem um fator deteriorante da qualidade térmica global duma construção, não só pelo acréscimo de perdas ou ganhos de calor, mas também pelo incremento do risco de condensações.

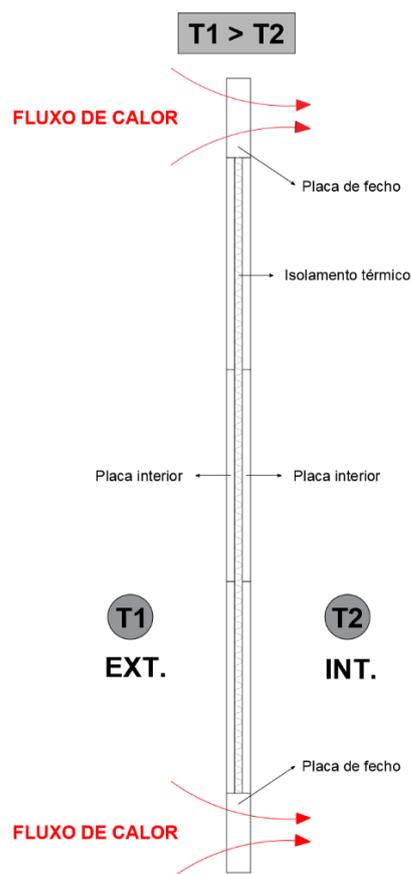


Figura 2-28 - Esquematização das pontes térmicas nas placas de fecho.

2.5 Análise SWOT: Construção Prefabricada

A análise SWOT é um utensílio comumente utilizado como base para gestão e planeamento estratégico de uma empresa ou corporação. No contexto da prefabricação, poderá ser utilizada na realização de uma análise de cenário, apresentada na Figura 2-29, procurando-se definir estratégias que tirem o máximo partido dos pontos fortes, aproveitando as oportunidades identificadas, e que minimizem os pontos fracos, fazendo frente, tanto quanto possível, às ameaças.

As soluções prefabricadas surgem, essencialmente, como resposta aos atuais problemas ambientais e de produtividade do setor da construção civil. Contudo, apesar da irrefutabilidade das suas vantagens, existem inúmeros fatores que desencorajam a utilização corrente deste sistema, em particular no nosso país. Nesse contexto, as empresas do setor devem procurar desmitificar o pré-conceito de baixa qualidade e de elevada restrição estética associado à construção prefabricada.



Figura 2-29 - Análise SWOT da construção prefabricada (Fonte: adaptado de [15])

3. FACHADA

3.1 Os Edifícios e as Fachadas

3.1.1 Introdução

Atualmente os edifícios não se caracterizam exclusivamente pela sua funcionalidade, i.e., uso habitacional, cultural, industrial ou de prestação de serviços. Mais do que oferecer proteção contra as condições climáticas e provir um espaço privativo, os edifícios caracterizam culturas e regiões [16]. Nesse contexto, a fachada é um elemento fundamental para a valorização do edificado, sendo o elemento construtivo sujeito a uma maior exposição visual. Nas Figuras 3-1 e 3-2 apresentam-se dois exemplos de fachada que caracterizam períodos arquitetônicos distintos.

Para além do valor estético que confere aos edifícios, a fachada desempenha um papel fundamental na sua performance, dado que, juntamente com a cobertura, constituem o invólucro da edificação, atuando como primeira e principal camada protetora face aos agentes atmosféricos [17]. Como resultado, poderá verificar-se o aparecimento de anomalias, com consequências diretas na qualidade do espaço urbano, no conforto dos utilizadores e nos custos de reparação e manutenção [18]. Assim, revela-se determinante uma escolha adequada dos materiais a utilizar na envolvente exterior.

Na construção moderna têm surgido novas soluções que resultam da utilização de novos materiais e novas tecnologias construtivas, procurando-se incrementar a produtividade e reduzir a incidência de manifestações patológicas [19]. Na busca da inovação, destacam-se soluções de revestimento que apresentem estéticas modernas ou reduzido peso próprio. O desenvolvimento de soluções mais leves facilita o processo de instalação em obra e não exige um sistema de fixação ou suporte tão resistente, alargando o campo de aplicações à reabilitação de edifícios.

As necessidades de otimização de custos, de meios e de tempos de execução, agregada às crescentes preocupações relativas à sustentabilidade ambiental, potenciam o aumento da utilização de soluções prefabricadas como elemento de fachada.



Figura 3-1 - Casa do Ferreira das tabuletas, Lisboa (Fonte: *Wikipédia*, 2007).



Figura 3-2 - Sede da Vodafone, Porto, 2009 (Fonte: *Engenharia e Construção*, 2011).

3.1.2 Evolução Histórica das Fachadas em Portugal

Ao longo do século XX, com a evolução tecnológica e o aumento das exigências funcionais, verificou-se uma progressiva evolução das soluções construtivas de fachada (Figura 3-3). Na primeira metade do século, dada a abundância e acessibilidade de pedra natural em Portugal, constroem-se edifícios com envolventes muito pesadas em alvenaria de pedra ou de tijolo maciço. Dado o reduzido conhecimento do comportamento e das propriedades dos materiais, as paredes apresentavam espessuras consideráveis de modo a afiançar um isolamento térmico apropriado e garantindo, por outro lado, a robustez estrutural. Nas regiões em que a pedra natural é um recurso escasso, utilizou-se o tijolo maciço como material substituto [20]. A partir dos anos 50, verifica-se uma reduzida utilização de pedra natural em alvenarias em detrimento do uso de materiais mais leves, como o tijolo vazado, passando estas a possuir um papel secundário de enchimento de panos.

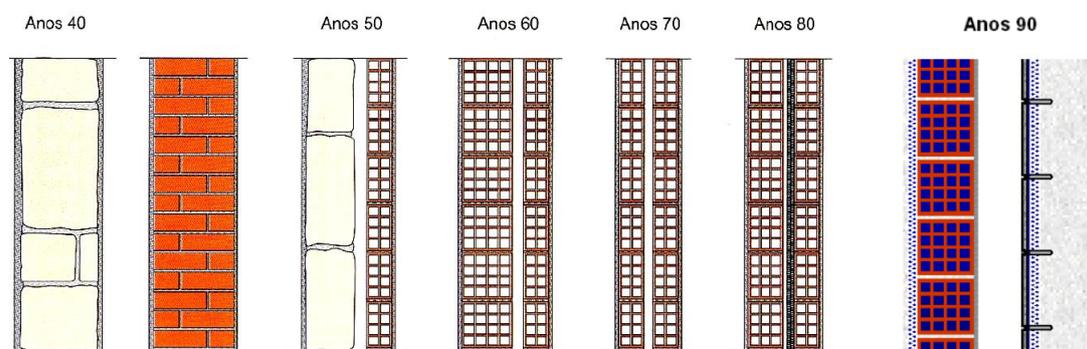


Figura 3-3 - Evolução das fachadas em Portugal (Fonte: adaptado do *Manual da alvenaria de tijolo*, 2000).

Nos anos seguintes, paralelamente aos avanços ao nível do conhecimento das propriedades dos materiais de revestimento, observa-se um progressivo aligeiramento dos paramentos e a introdução do pano duplo [21]. As exigências térmicas, acústicas e higrotérmicas foram, na altura, colmatadas com a introdução de novos materiais de isolamento, como a lã de vidro, entre os panos de alvenaria.

De facto, até aos anos 80, a inclusão de materiais com propriedades isolantes fez-se sem grandes preocupações no que diz respeito ao tratamento das pontes térmicas. Contudo, este panorama inverteu-se, dado que se concluiu que, embora se incrementasse continuamente a espessura de isolamento, o desempenho térmico da parede não apresentava nenhuma melhoria significativa [20].

Nesse sentido, nos anos 90 surge uma nova prática construtiva que, contrastando com as existentes até à época, se caracteriza pela colocação de isolamento térmico pelo exterior da parede de fachada. Esta técnica construtiva apresenta inúmeras vantagens funcionais que favorecem, particularmente, a sua utilização em obras de reabilitação. A partir deste novo conceito construtivo surgem três novos sistemas [19]:

- Sistema *ETICS* (*External Thermal Insulation Composite Systems*) – reboco delgado armado diretamente aplicado sobre o isolamento térmico;
- Sistema de fachada-cortina – revestimentos descontínuos fixados ao suporte através de uma estrutura intermédia;

- Sistema *Vêture* – componentes prefabricados constituídos por um isolamento e um paramento, fixados diretamente ao suporte.

Na Figura 3-4 apresenta-se um exemplo de uma *fachada-cortina* representativo da versatilidade arquitetónica característica deste sistema construtivo.



Figura 3-4 - Exemplo de fachada-cortina: Perry & Marty Granoff Center, Providence, Rhode Island, USA, 2011
(Fonte: *ArchDaily*)

3.1.3 Fachada Ventilada

A tecnologia de fachadas ventiladas apresenta-se como um caso particular do sistema de fachada-cortina, assumindo a presença de uma caixa de ar entre o edifício e o revestimento responsável pelo desempenho higrotérmico da envolvente. Este sistema, representado na Figura 3-5, promove a interrupção da capilaridade e forma um espaço livre para a drenagem por gravidade [19]. Por norma, trata-se de uma solução de revestimento descontínuo, fixado pontualmente ou através de uma estrutura secundária de suporte, que se encontra destacado relativamente ao edificado.



Figura 3-5 - Representação do sistema de fachada ventilada (Fonte: *Repinor – Serviços de Reabilitação*).

A utilização desta solução construtiva tem como principal objetivo a redução do gradiente de pressões entre o interior e o exterior da caixa de ar, minimizando, tanto quanto possível, a entrada de água da chuva, trazida pelo vento, na caixa de ar. De facto, a presença de humidade nos elementos de construção constitui uma das principais causas de deterioração dos materiais, na medida em que provoca uma alteração das suas propriedades físicas, potencia a sua degradação e, conseqüente, a sua disfunção [22]. Na Figura 3-6 encontra-se esquematicamente representado este processo de ventilação.

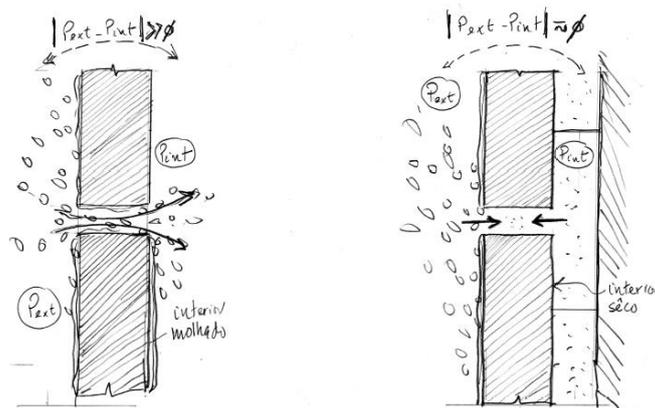


Figura 3-6 - Infiltrações devido ao gradiente de pressões entre o interior e o exterior (Fonte: adaptado de Camposinhos, R., *Fachadas-Cortina pressurizáveis*, ISEP, Porto, 2005).

3.2 Exigências Funcionais

3.2.1 Conforto, Durabilidade e Sustentabilidade das Construções

O conforto e a imagem são conceitos intimamente relacionados com o estilo de vida contemporâneo. A progressiva valorização e procura de soluções que, dadas as suas características funcionais e estéticas, se destacam das tradicionais, traduz-se num mercado inovador e renovado. De facto, nos últimos anos, estes conceitos assumiram uma importância acrescida, constituindo dois dos mais relevantes aspetos da construção moderna de edifícios.

A durabilidade, por sua vez, é um conceito que tem vindo a evoluir ao longo dos tempos. Considerada, desde sempre, como exigência primordial, constitui o principal indicativo da qualidade geral de uma edificação. Contudo, face aos desenvolvimentos tecnológicos e aos crescentes e mutáveis requisitos de desempenho, assiste-se a uma progressiva redução da durabilidade dos elementos construtivos. De facto, a “*obsolescência das soluções por desajuste exigencial*” [12] constituiu a principal razão para que, atualmente, a maioria dos edifícios sejam projetados para um tempo de vida útil de 50 anos, contrastando com a eternidade característica de algumas edificações erguidas na antiguidade.

Outro dos fatores que recentemente tem influenciado positivamente o setor da construção é a progressiva consciencialização ambiental na procura de atingir um desenvolvimento sustentável. A excessiva utilização de recursos naturais e as más práticas construtivas apresentam um impacto negativo nos ecossistemas urbanos, suscitando a urgente necessidade de adoção de novos padrões de consumo e produção.

A sustentabilidade do setor da construção civil é um conceito pluridisciplinar que, para ser implementado, exige o compromisso de todos os agentes envolvidos, desde as entidades legisladoras, que têm como função a conceção das ferramentas de planeamento, aos projetistas que devem projetar edifícios eficientes, tendo em vista uma otimização de recursos energéticos, até aos utilizadores finais que devem usufruir da habitação de forma racional [23].

3.2.2 Subdivisão dos Edifícios

Os edifícios devem ser projetados e construídos de forma a corresponderem positivamente aos requisitos inerentes ao meio em que se inserem e às atividades desenvolvidas no seu interior [24]. A sua *performance* é, essencialmente, determinada pela resposta que oferecem ao serem atuados por agentes internos, resultantes do uso dos utentes, e externos, na sua maioria por agentes climáticos. A qualidade final do edificado será, portanto, ditada pela maior ou menor correspondência entre a sua *performance* e as exigências dos utilizadores.

A determinação da *performance* do edifício é, de forma geral, realizada através de métodos que permitem prever o comportamento do conjunto através do comportamento dos vários constituintes. Para tal, é necessária a sua subdivisão em partes com identidades próprias, de forma a identificar os requisitos a cumprir por cada uma delas [12].

De forma simplificada, um edifício pode ser dividido em 4 subsistemas: 1) *estrutura portante*; 2) *sequência espacial*; 3) *serviços*; 4) *envolvente construída* [25]. O subsistema *envolvente construída*, composto pela fachada e pela cobertura, estabelece a relação entre o edifício e o meio envolvente, atuando como um filtro face às condições atmosféricas. Tendo este trabalho como base o estudo de uma solução de fachada, serão apenas indicadas as exigências funcionais relativas a este elemento.

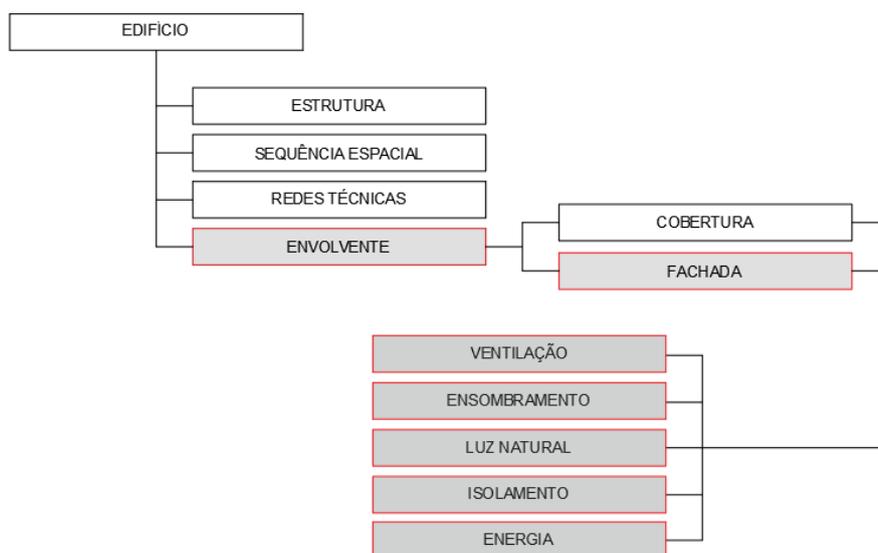


Figura 3-7 - Sistema geral do edifício (Fonte: adaptado de Schittich, C., *In Detail-Building Skins-Concepts, Layers, Materials*, Munique, 2001)

3.2.3 Exigências Funcionais das Fachadas

Dada a possibilidade de aplicação da solução em estudo numa parede de fachada ou num sistema de fachada ventilada, importa apresentar os requisitos de desempenho para ambos os casos, uma vez que, para este último, não é imposto o cumprimento de todas as exigências intrínsecas a uma parede de fachada. Nesse sentido, na Figura 3-8 diferenciam-se as exigências de desempenho de um elemento de parede e de um elemento de fachada ventilada.

De forma geral, para a livre circulação dos produtos de construção no Espaço Económico Europeu, o Regulamento dos Produtos de Construção estipula que estes devem possuir marcação CE. Para tal, os produtos têm que apresentar características funcionais que permitam o cumprimento dos requisitos essenciais aquando da sua aplicação em obra.

Exigências essenciais		Exigências de desempenho	Parede de fachada	Fachada ventilada
EE1	Resistência mecânica e estabilidade	<ul style="list-style-type: none"> Resistência mecânica e estabilidade ⁽¹⁾ / EE4⁽²⁾⁽³⁾ 	R ⁽¹⁾ / NR ⁽²⁾	NR ⁽³⁾
EE2	Segurança contra incêndio	<ul style="list-style-type: none"> Reação ao fogo Resistência ao fogo 	R R	R NR
EE3	Higiene, Saúde e Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> Estanquidade à água Permeabilidade ao vapor Condensações internas/intersticiais Libertação de substâncias perigosas 	R R R R	R NR R R
EE4	Segurança na utilização	<ul style="list-style-type: none"> Resistência mecânica e estabilidade ⁽²⁾⁽³⁾ Resistência ao impacto 	R ⁽²⁾ R	R ⁽³⁾ R
EE5	Proteção contra ruído	<ul style="list-style-type: none"> Isolamento a sons aéreos Absorção sonora 	R R	NR NR
EE6	Economia de energia e retenção de calor	<ul style="list-style-type: none"> Isolamento térmico Permeabilidade ao ar 	R R	NR NR
-	Durabilidade	<ul style="list-style-type: none"> Agentes mecânicos Agente térmico Agente eletromagnético Agentes químicos Agentes biológicos Compatibilidade entre materiais 	R R R R R R	R R R R R R
R - Relevante		NR – Não relevante		

Figura 3-8 - Exigências de desempenho da parede de fachada e da fachada ventilada (Fonte: adaptado de Sousa, R., et al, Fachadas de edifícios, Lidel – Edições Técnicas Lda., 2016)

- (1) Quando a parede de fachada é estrutural, ou seja, contribui para a estabilidade do edifício, os requisitos de desempenho mecânico enquadram-se na Exigência Essencial 1 – Resistência mecânica e estabilidade.
- (2) Quando a parede de fachada não é estrutural, ou seja, é um pano de preenchimento, os requisitos de desempenho mecânico enquadram-se na Exigência Essencial 4 – Segurança na utilização.
- (3) Como a fachada ventilada não contribui para a estabilidade do edifício, os requisitos de desempenho mecânico enquadram-se na Exigência Essencial 4 – Segurança na utilização.

A solução de revestimento estudada nesta dissertação não apresenta função estrutural, dado que não contribui para a estabilidade global do edifício. Assim, os requisitos de desempenho mecânico inserem-se na Exigência Essencial 4 – Segurança na utilização – sendo somente necessário garantir-se a estabilidade do elemento de forma isolada. Nesse sentido, está prevista a realização de uma simulação numérica no âmbito desta exigência, de forma a prever-se o seu comportamento em serviço.

4. PEDRA NATURAL

4.1 Introdução

A pedra natural, caracterizada pela sua durabilidade, versatilidade e valor estético, estabelece, desde a antiguidade, uma relação de simbiose entre o Homem e o meio ambiente, materializada tanto em objetos de uso comum, como em construções que perduram até à atualidade. A disponibilidade local e a relativa facilidade de extração fomentaram a massiva utilização deste recurso por parte das antigas civilizações, ao ponto que, até dias de hoje, seja considerado como indispensável [26].

Ao longo dos tempos, o normal aperfeiçoamento contínuo das técnicas construtivas, aliado ao desenvolvimento científico e à descoberta de novos materiais de construção (ferro, betão e vidro), durante a Revolução Industrial, levaram a que a pedra natural deixasse de possuir uma função estrutural e passasse a ser utilizada como elemento decorativo, proporcionando um aumento do valor estético da solução final.

O fenómeno de globalização que se verifica atualmente potenciou a criação de novas oportunidades de mercado dada a relativa facilidade de acesso à matéria-prima e à diversidade disponível. Contudo, a melhoria das técnicas de produção, a rapidez de transporte e a comercialização global, contrastam com graves problemas ambientais inerentes à sobre-exploração e aos desperdícios resultantes dos processos de extração e transformação.

Tendo em vista uma utilização racional deste recurso, é essencial que as empresas do setor conjuguem sinergias na procura de soluções que contribuam para a sustentabilidade do mesmo. Neste contexto, englobam-se soluções como os painéis de revestimento *PFSP* que, através do aproveitamento de placas de pedra de dimensões reduzidas, oferecem ao utilizador um produto final inovador de elevado valor estético.

4.2 Classificação da Pedra Natural

As rochas são compostos sólidos de origem natural, formadas pela agregação de um ou mais minerais, resultantes de um processo geológico característico [27]. As condições de pressão e temperatura existentes durante a sua formação condicionam a orientação dos minerais, cujas características permitem a divisão em três grandes grupos de rochas:

- As rochas ígneas formam-se por solidificação de um magma, proveniente do interior da Terra, cuja composição em sílica permite caracterizar as rochas como ácidas, intermédias ou básicas. Quando o processo de formação ocorre no interior da crosta terrestre (5-30 km de profundidade) o arrefecimento do magma procede-se de forma lenta, potenciando a cristalização dos minerais (ex.: quartzo, feldspato, biotite, moscovite), dando origem a rochas plutónicas, tais como o granito e diorito. Se a consolidação do magma acontece perto da superfície da crosta, como resultado de erupções vulcânicas, dá-se um

arrefecimento rápido, impedindo a cristalização de diversos minerais, formando-se rochas vulcânicas, tais como o basalto e o gabro [28].

- As rochas metamórficas são formadas a partir de rochas preexistentes (ígneas, sedimentares ou metamórficas) por ação dos agentes de metamorfismo (pressões e temperaturas elevadas) devido a um aprofundamento na crosta face a movimentos tectónicos ou devido à intrusão de corpos magmáticos a altas temperaturas. No conjunto das rochas metamórficas destacam-se o mármore, ardósia e o quartzito [29].

- As rochas sedimentares formam-se à superfície da crosta por sedimentação de partículas resultantes da erosão de outras rochas (rochas sedimentares detríticas – ex.: argilas e siltes), por precipitação de substâncias em solução (rochas sedimentares quimiogénicas - ex.: calcário, gesso e sal-gema) ou por deposição de materiais de origem biológica (rochas sedimentares biogénicas – ex.: calcário e carvão). Um dos principais fatores diferenciadores deste tipo de rochas é a sua deposição em estratos [30].



Figura 4-1 - Granito "Branco Almeida" (Fonte: INETI).



Figura 4-2 - Mármore "Branco" (Fonte: INETI).

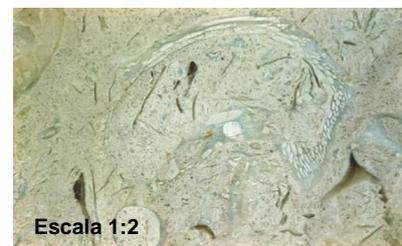


Figura 4-3 - Lioz Azulino de Maceira (Fonte: INETI).

4.3 Rochas Ornamentais em Portugal

A indústria portuguesa do setor das rochas ornamentais representa uma das atividades económicas mais antigas a nível nacional. Portugal é um dos principais produtores de rochas ornamentais do Mundo, situando-se numa posição de destaque dada a extensa variedade de pedra natural existente no país [31].

No que diz respeito a unidades de exploração e transformação, a indústria do setor é devidamente habilitada, na medida em que integra as tecnologias de produção mais modernas. Deste modo, procura assegurar a sua competitividade económica e a geração de lucros, os quais são essenciais para o desenvolvimento regional e para a economia nacional.

Como resultado de um inventário e avaliação sistemáticos dos recursos minerais do país, são conhecidos, do ponto de vista qualitativo, os tipos de recursos existentes no território nacional. Contudo, em termos quantitativos, o conhecimento atual ainda é bastante limitado. Estima-se que no território nacional existam 410 milhões de metros cúbicos de pedra natural, dos quais 274 milhões são de granito, 76 milhões de calcário, 51 milhões de mármore e 9 milhões de ardósia [31].

4.3.1 Classificação das Rochas Ornamentais

Dada a nomenclatura vulgarmente utilizada nas transações comerciais destas matérias-primas, as rochas ornamentais devem ser classificadas como granitos, mármore, calcários ou ardósias [32]. Seguidamente realiza-se uma breve descrição de cada um destes tipos.

4.3.1.1 Granitos

O norte e centro de Portugal são caracterizados por extensas áreas de afloramentos de origem granítica, da era Paleozoica, existindo dezenas de locais de elevada atividade extrativa de rochas ornamentais. Para além destas regiões, destaca-se a exploração deste recurso em zonas específicas do Alentejo e do Algarve [33]. A profundidade das pedreiras é bastante variável, excedendo, geralmente, os 30 m e podendo atingir, nalguns casos, cerca de 70 m de profundidade [34].

No território nacional existem granitos com uma extensa variedade de tonalidades e texturas [30], apresentado o granito mais comum uma tonalidade acinzentada e uma textura granular, fina a grosseira, ou porfírica [34]. Na Tabela 4-1 apresentam-se os intervalos médios das principais características associadas a este tipo de rocha ornamental.

Tabela 4-1 - Principais características físico-mecânicas dos granitos portugueses [33].

	Intervalo de valores médios	
	Granito Amarelo	Granitos Branco, Rosa e Escuros (e outras rochas silicatadas*)
Tensão de rotura à compressão [MPa]	79 - 246	131 – 262
Resistência à flexão sob carga concentrada [MPa]	3.1 – 20.1	9.4 – 29.4
Densidade aparente [kg/m ³]	2530 - 2660	2610 – 2870
Porosidade aberta [%]	0.7 – 4.2	0.1 – 1.2
Absorção de água à pressão atmosférica [%]	0.3 – 1.7	0.1 – 0.4
Coefficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	5.9 – 9.2	6.5 – 10.7

*sienito, diorito, gabro, etc.

4.3.1.2 Mármore

Os mármore são extraídos essencialmente na região do Alentejo, sendo o Anticlinal de Estremoz o principal centro de exploração [31]. A importância desta região traduz-se pelas cerca de 150 pedreiras atualmente ativas distribuídas por três concelhos (Estremoz, Borba e Vila Viçosa). Característico do Paleozoico Inferior, este tipo de rochas ornamentais encontra-se presente a profundidades que rondam os 50 m [34].

Os mármore apresentam uma textura granular fina a média e uma extensa gama de tonalidades, desde o branco, como o Mármore Branco, a cinzento escuro, como o Mármore Cinzento Anegrado de Trigaches [35]. O mármore mais comum é o creme com veios de diferentes tonalidades, e a gama de

cores mais valiosa varia entre o rosa pálido e o rosa escuro [31]. Na Tabela 4-2 apresentam-se os intervalos médios das principais características associadas a este tipo de rocha ornamental.

Tabela 4-2 - Principais características físico-mecânicas dos mármore portugueses [34].

	Intervalo de valores médios
Tensão de rotura à compressão [MPa]	52 – 141
Resistência à flexão sob carga concentrada [MPa]	4.9 – 19.3
Densidade aparente [kg/m ³]	2710 – 2790
Porosidade aberta [%]	0.2 – 0.5
Absorção de água à pressão atmosférica [%]	0.0 – 0.2
Coefficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	4.1 – 14.0

4.3.1.3 Calcários

No território nacional o principal local de extração de calcários é o Maciço Calcário Estremenho (MCE), localizado no distrito de Leiria. A exploração de calcários neste local iniciou-se nos anos 80 do século passado, verificando-se uma intensa exploração de blocos para fins ornamentais. Atualmente, os calcários são as rochas ornamentais portuguesas mais requisitadas, sobretudo no mercado chinês [34].

As rochas aflorantes no MCE distribuem-se, em termos de idade, desde o Jurássico Inferior ao Cretácico, sendo grande parte da sua extensão ocupada por unidades litostratigráficas do Jurássico Médio, nomeadamente as conhecidas por Calcários de Pé da Pedreira, Calcários de Codaçal e Calcários de Moleanos. As unidades litostratigráficas apresentam uma espessura que varia, normalmente, entre os 40 m e os 150 m, enquanto que cada estrato apresenta uma espessura que varia entre os 2 m e os 20 m [34].

As variedades ornamentais produzidas a partir destas unidades litostratigráficas adquirem designações comerciais diferenciadas atribuídas pelas várias empresas produtoras. Contudo, são genericamente denominadas por Moca Creme, Relvinha, Semi Rijo, Vidraço de Moleanos e Vidraço de Atáija [36]. Os calcários apresentam uma tonalidade creme e, consoante o processo de corte dos blocos, podem apresentar uma textura marcada por finas laminagens [31]. A granulometria, do ponto de vista comercial, varia de fina a grosseira.

A região de Pêro Pinheiro foi, no passado, um dos principais centros de produção de rochas ornamentais em Portugal, contrastando com a realidade atualmente verificada. De facto, face ao despovoamento verificado, grande parte das pedreiras encontram-se inativas [38]. Contudo, importa lembrar que no século XVIII ocorreu uma intensa atividade extrativa na região, tendo sido preponderante para a reconstrução da cidade de Lisboa após o terramoto de 1755.

As rochas ornamentais desta região são datadas da era Cretácica e correspondem, de forma geral, a rochas bioclásticas, valorizadas esteticamente pela inclusão de elementos fossilizados na matriz mineral [39]. O Lioz, característico desta região, é uma das variedades de rochas ornamentais mais valorizadas, tendo sido usado em obras como o Mosteiro dos Jerónimos ou a Torre de Belém.

Na Tabela 4-3 apresentam-se os intervalos médios das principais características associadas a este tipo de rocha ornamental.

Tabela 4-3 - Principais características físico-mecânicas dos calcários portugueses [34].

	Intervalo de valores médios
Tensão de rotura à compressão [MPa]	44 – 246
Resistência à flexão sob carga concentrada [MPa]	4.4 – 23.4
Densidade aparente [kg/m ³]	2190 – 2710
Porosidade aberta [%]	0.1 – 16.5
Absorção de água à pressão atmosférica [%]	0.1 – 8.9
Coefficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	2.7 – 5.1

4.3.1.4 Ardósias

A área aflorante de ardósias em Portugal é consideravelmente extensa, contudo, contrastante com a baixa produção de ardósias ornamentais. Os principais locais de extração localizam-se em Valongo, Vila Nova de Foz Côa e Arouca, no norte de Portugal, e em Barrancos, na região do Alentejo [34].

As variedades ornamentais originárias destas localidades são denominadas: Xisto de Valongo (Valongo e Arouca), Xisto do Poio (Vila Nova de Foz Côa) e Xisto de Barrancos (Barrancos). Cada uma destas diferencia-se, essencialmente, em termos de coloração, textura e tipo de clivagem, dadas as diferentes condições de pressão e temperatura (agentes de metamorfismo) durante a sua formação [40]. As principais características associadas a este tipo de rocha ornamental encontram-se indicadas na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Principais características físico-mecânicas das ardósias portuguesas [34].

	Intervalo de valores médios
Tensão de rotura à compressão [MPa]	114 – 217
Resistência à flexão sob carga concentrada [MPa]	29.5 – 69.6
Densidade aparente [kg/m ³]	2700 – 2830
Porosidade aberta [%]	0.4 – 1.2
Absorção de água à pressão atmosférica [%]	0.2 – 1.5
Coefficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	7.1 – 8.1

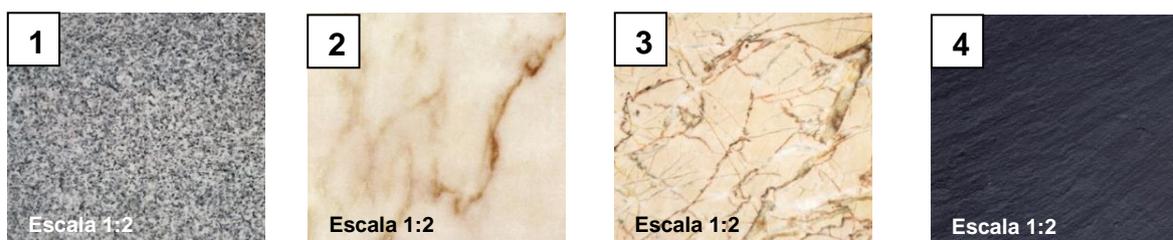


Figura 4-4: 1 - Granito: 'Cinzentos Apalhão'; 2 - Mármore: 'Branco Anilado'; 3 - Calcário: 'Alpinina Clara'; 4 - Ardósia: 'Ardósia de Canelas' (Fonte: *INETI*).

4.3.2 Produção de Rochas Ornamentais

O processo de produção de rochas ornamentais pode-se, sumariamente, dividir em duas etapas: extração e transformação. As principais operações de extração de blocos primários nas explorações de rochas ornamentais são: furação, corte, derrube, esquartejamento, extração e acabamento. Na indústria transformadora os blocos são trabalhados seguindo uma série de etapas e processos de acordo com o produto final pretendido. Na Figura 4-5 apresenta-se um exemplo de uma pedreira de Mármore Rosa (Pedreira do Rosal) localizada em Borba, no distrito de Évora.



Figura 4-5 - Operações de extração (Pedreira do Rosal).

As principais fases de transformação são a serragem (transformação do bloco em chapa), corte e polimento (transformação da chapa ou bloco em ladrilho ou mosaico) e seleção e acabamento [41]. O acabamento da superfície, obtido, por exemplo, por choque térmico ou pelo impacto mecânico de materiais abrasivos, permite realçar a beleza natural das rochas. Contudo, importa ter em conta que a aptidão das rochas para o tratamento superficial varia de acordo com as suas características litológicas.

Desde o processo de extração até ao produto final consideram-se três tipos de produtos: bloco – extraído dos recursos geológicos; chapa serrada - bloco cortado; produto em obra – produto transformado que resulta do corte da chapa, do seu acabamento, seleção e embalamento [42].



Figura 4-6 - Operações de transformação (Empresa: *Stork Composites*)

Atualmente o setor da pedra natural é caracterizado por baixos níveis de eficiência e produtividade relativos aos processos de extração e transformação. De facto, cerca de 70% do material extraído não é aproveitado, instigando uma urgente reanálise dos processos produtivos e do ciclo de vida dos produtos pétreos [35].

4.3.3. Impacto Ambiental associado aos Processos Produtivos

Atualmente o setor das rochas ornamentais apresenta inúmeros problemas energéticos e ambientais associados aos processos de extração e transformação. Deste modo, tendo em vista a reafirmação da pedra natural no mercado dos materiais de revestimento, é necessária a definição de um plano estratégico a médio-longo prazo, por parte das empresas do setor, de forma incrementar a sua competitividade [43].

Os elevados consumos energéticos e a excessiva produção de desperdícios são realidades intrínsecas às atividades extrativa e transformadora das rochas ornamentais, sugerindo uma urgente intervenção de modo a mitigar o consumo de energia. A deposição destes resíduos em áreas contíguas às frentes de exploração e de transformação é a solução geralmente utilizada, contribuindo para os elevados volumes de escombros existentes nas áreas de exploração, tal como se identifica nas Figuras 4-7 e 4-8.

Para além do impacto paisagístico que representa, acarreta diversos problemas ambientais dada a poluição atmosférica que produz. A acumulação desordenada e a inexistência de planificação e controlo das explorações apresentam inúmeras desvantagens ao nível do uso do solo e do ordenamento do território e constituem um encargo económico importante, sendo que a ocupação de áreas com potencial financeiro condiciona a racionalidade e a ampliação das explorações.



Figura 4-7 - Deposição de resíduos em áreas contíguas às frentes de exploração.



Figura 4-8 - Deposição de resíduos em áreas contíguas às áreas de transformação.

Tendo como objetivos principais contrair esta tendência e aumentar a produtividade e as receitas inerentes a esta atividade, as empresas do setor definiram um plano estratégico que teve como principais premissas a redução substancial dos desperdícios associados aos processos de transformação e a aposta em produtos inovadores e eco eficientes, utilizando a pedra natural nas mais diversas aplicações. Esta visão de desenvolvimento sustentável, auxiliada pelos avanços do conhecimento ao nível dos efeitos negativos dos poluentes, surge em decorrência da perceção da incapacidade da preservação ambiental se perpetuar e exige uma rápida e eficaz reformulação dos processos produtivos e de consumo.

4.4 Pedra Natural para Revestimento de Paredes e Fachadas

A evolução tecnológica do último século, conjugada com os avanços ao nível dos processos de produção e de utilização das rochas ornamentais, fomentou um renovado e crescente interesse pela sua aplicação no revestimento de paredes e fachadas [44]. A versatilidade que a pedra natural oferece em termos estéticos, dimensionais e de acabamento confere ao utilizador uma vasta gama de possibilidades de elevado valor estético.

As rochas ornamentais, embora apresentem inequívocos atributos estéticos e físico-mecânicos comparativamente a outros materiais alternativos, foram outrora por estes preteridas. Contudo, os elevados custos de manutenção e o fraco comportamento em serviço por estes apresentados, aliados aos avanços verificados no setor da pedra, potenciaram que as rochas ornamentais fossem reconquistando, ao longo dos anos, uma posição de destaque como material de revestimento exterior [45].

A versatilidade de utilização de rochas ornamentais nas mais diversas aplicações, por vezes, não estabelece limites à criatividade dos projetistas, podendo potenciar escolhas e utilizações inadequadas [45]. A consideração das características físico-mecânicas, determinadas a partir de uma análise petrográfica e de estudos tecnológicos padronizados, tem especial importância no processo de seleção da rocha ornamental para uma dada aplicação. Apenas assim é possível retardar ou minimizar o aparecimento de patologias associadas à degradação das rochas ou de materiais utilizados na fixação das placas em revestimentos e pavimentações [44].

O conhecimento da vida útil dos materiais e dos elementos da construção permite obter uma melhoria na sua durabilidade através da sua eficaz seleção, utilização e manutenção [46]. Para além disso, tendo por base o tipo de pedra, o acabamento e o ambiente de exposição, é recomendável uma manutenção periódica, bastando na grande maioria dos casos uma lavagem com água à pressão ou aplicação de uma cera ou similar [26].

As patologias em revestimentos exteriores de fachadas constituem, atualmente, um dos principais problemas construtivos, dados os riscos associados, por exemplo, ao destacamento ou queda de um elemento [27]. Importantes não só pelo impacto visual que introduzem na estética geral de um edifício, os revestimentos desempenham um papel fundamental ao nível da durabilidade e da proteção das fachadas [47].

Em suma, previamente à aplicação de uma pedra num determinado ambiente é recomendado obter-se uma previsão do seu comportamento e uma estimativa do custo de manutenção associado à sua utilização. Assim, tendo por base o tempo de vida útil da obra e os requisitos técnicos e estéticos desejáveis, seleciona-se o tipo de rocha que maximiza o cumprimento destas exigências sem ser necessária a realização de uma manutenção acrescida durante o período de utilização previsto [26].

4.5 Ensaio de Caracterização Físico-Mecânica

O valor de mercado de uma pedra natural traduz-se, de forma geral, por singularidades na sua tonalidade ou textura, menosprezando-se, por vezes, características físico-mecânicas fundamentais para um bom desempenho em serviço. Uma pedra natural é submetida às mais diversas solicitações físicas, químicas e mecânicas desde o momento em que são extraídas até à sua aplicação final, pelo que, de forma a viabilizar-se a sua aplicação num determinado ambiente, é fundamental a realização de ensaios laboratoriais que a caracterizem a pedra do ponto de vista da resistência e da qualidade [48]. A ideia generalizada de que a produção de rochas ornamentais passa, simplesmente, por uma fase de extração e uma fase de transformação irá, num futuro próximo, tornar-se obsoleta.

Os ensaios de caracterização físico-mecânica têm um impacto positivo na garantia de qualidade dos produtos pétreos e no preço que o mercado está disposto a pagar por uma qualidade controlada. Adicionalmente, ajudam ainda a minorar o preconceito de empirismo associado ao setor, o qual, futuramente, se espera que se desvincule da produção nacional, passando-se a usar os mecanismos apropriados para a caracterização sistemática da pedra natural [26].

O sucesso de um projeto de construção dependerá, de forma simplificada, da boa comunicação entre o arquiteto, o engenheiro, o construtor e o cliente final. Somente através do conhecimento das propriedades físico-mecânicas das rochas ornamentais se poderá atingir plenamente os objetivos de todas as partes envolvidas no projeto. Para além disso, somente assim se previne a eventual utilização de uma pedra natural em circunstâncias para as quais não é indicada, evitando-se custos acrescidos de manutenção. Considera-se uma pedra como adequada para uma dada aplicação numa situação em que conjugue os seu valores técnico, estético e comercial.

Neste caso de estudo, ao utilizar-se a pedra natural nos painéis de revestimento, deve ser realizada uma análise cuidada que avalie a matéria-prima nas seguintes três categorias [49]:

- a) Propriedades físicas e microestruturais: fornece uma primeira análise e avalia a adequação do material para uso exterior, dadas as condições ambientais a que fica sujeito após a sua aplicação;
- b) Propriedades mecânicas: os parâmetros obtidos a partir da caracterização experimental são utilizados para projetar soluções de painéis personalizados de acordo com o projeto arquitetónico; A caracterização mecânica é, igualmente, útil para comparar propriedades de materiais pétreos que apresentem um historial de sucesso no que diz respeito à sua utilização em projetos de construção em geral ou como revestimento;
- c) Durabilidade: como método de previsão do comportamento do material pétreo a longo prazo, este é submetido a uma série de condições pré-definidas tendo por base a especificação técnica do produto, por forma a determinar a perda de características após o seu envelhecimento.

No âmbito desta dissertação realizou-se a caracterização físico-mecânica da pedra calcária “Branco do Mar”, também denominada por “Semi-Rijo do Arrimal”, extraída da pedreira Vale da Moita nº1 localizada

no Arrimal, Porto-de-Mós, um dos principais núcleos de exploração do Maciço Calcário Estremenho. Esta pedra, representada na Figura 4-9, apresenta uma tonalidade que varia entre o branco e o bege claro e exibe um aspeto compacto, com grãos acastanhados de tamanho fino a médio.



Figura 4-9 - Branco do Mar ou Semi-Rijo do Arrimal (Fonte: Solancis, 2016)

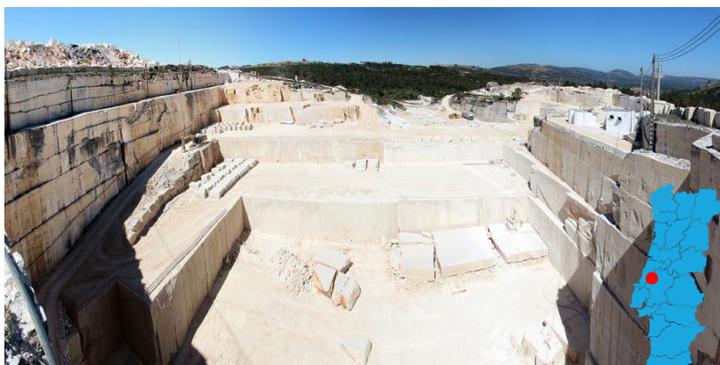


Figura 4-10 – Pedreira Vale da Moita nº1, Arrimal, Porto-de-Mós (Fonte: Solancis, 2016)

4.5.1 Propriedades Físicas e Microestruturais

Segundo a EN 12407 é possível identificar antecipadamente aspetos importantes que possam influenciar negativamente a durabilidade das pedras. A presença de alguns minerais na sua composição mineralógica, entre outros fatores, aumenta a probabilidade de falha da pedra quando esta se encontra sujeita a determinadas condições atmosféricas ou poderá provocar alterações de cor devido a uma excessiva exposição solar [49].

4.5.1.1 Massa Volúmica Aparente e Porosidade Aberta

A massa volúmica aparente de uma pedra natural é a razão entre a massa do provete seco e o seu volume aparente, correspondente ao volume limitado pela superfície externa do provete, incluindo os vazios. A porosidade aberta é a razão, sob a forma percentual, entre o volume dos poros abertos e o volume aparente do provete. Dado que a massa volúmica aparente é o parâmetro que relaciona a porosidade aberta de uma dada pedra natural com a sua absorção de água, estas três características poderiam ser determinadas em simultâneo. Contudo, uma vez que a norma europeia EN 1936 estipula que a determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta deve ser realizada sob vácuo, apenas se determinam em simultâneo estas duas características físicas.

O procedimento experimental realizado cumpriu com o procedimento descrito na EN 1936. A massa volúmica aparente calcula-se através da seguinte expressão (1), sendo o valor da massa volúmica aparente da água a 20 °C é 998 kg/m³.

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad (1)$$

A porosidade aberta calcula-se através da expressão (2):

$$\rho_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (2)$$



Figura 4-11 - Pesagem do provete.



Figura 4-12 - Pesagem imersa do provete.

Na Tabela A-1, presente no Anexo A, encontram-se indicados os valores obtidos nos ensaios para a massa volúmica aparente e para a porosidade aberta. Na Tabela A-2, presente no Anexo A, indicam-se os valores máximos esperados para a massa volúmica aparente e para a porosidade aberta.

Os valores médios obtidos para a massa volúmica aparente e para a porosidade aberta são, respetivamente, 2220 Kg/m³ e 14.7%. Sendo o valor de porosidade aberta superior a 10%, a utilização deste tipo de pedra natural em fachadas não é recomendada [30].

Comparativamente aos valores médios indicados pelo fornecedor (massa volúmica aparente: 2290 Kg/m³; porosidade aberta: 13.4%), os valores médios obtidos para a massa volúmica aparente e para a porosidade aberta são, respetivamente, inferior e superior. Contudo, para situações de dimensionamento deverão ser considerados, de forma conservativa, os valores máximos esperados para ambas as propriedades.

4.5.1.2 Absorção de Água à pressão atmosférica

A absorção de água à pressão atmosférica expressa-se, de forma percentual, através da razão entre a massa do provete saturado, após ter atingido a massa constante, e a massa do provete seco. O procedimento utilizado para a realização deste ensaio experimental encontra-se descrito na NP EN 13755. O valor da absorção de água à pressão atmosférica, para cada provete, é calculado através da expressão (3).

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (3)$$

Nas Tabelas A-3 e A-4, presentes no Anexo A, apresentam-se, respetivamente, os resultados obtidos no ensaio para os vários provetes e o valor máximo esperado para a absorção de água à pressão atmosférica. Obteve-se um valor máximo esperado de 7,9% de absorção de água à pressão atmosférica, o qual é mais elevado comparativamente com o valor indicado pelo fornecedor de 6,2%. Para situações de dimensionamento será considerado, conservativamente, o valor máximo esperado de 7.9%.

4.5.1.3 Resistência à Flexão sob carga concentrada

Este ensaio é considerado como um dos mais importantes na caracterização tecnológica de uma pedra natural. A resistência à flexão da pedra natural é determinada pela resistência das zonas tracionadas dos provetes, dada a fragilidade deste material à tração comparativamente com a sua resistência à compressão. A rotura na pedra ocorre no instante em que as tensões de tração, instaladas numa dada secção, excedem as forças de agregação das partículas constituintes do material [30].

Existem dois ensaios experimentais para a determinação da resistência à flexão de uma pedra. O primeiro, baseado na norma europeia EN 12372, corresponde à aplicação de uma carga concentrada no provete (flexão simples). O segundo, baseado na norma europeia EN 13161, corresponde à aplicação de um par simétrico de cargas (flexão pura). Para esta dissertação utilizou-se o método experimental baseado na norma europeia EN 12372.

Na Figura 4-14 está representado o equipamento *Instron 3369* utilizado para a realização do ensaio.



Figura 4-13 - Provetes de pedra "Branco Real": dimensões 300 mm x 50 mm x 50 mm.

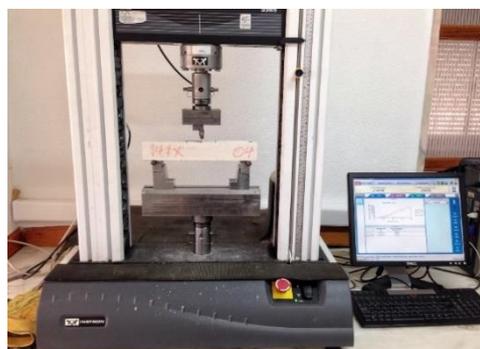


Figura 4-14 - Ensaio de flexão com carga concentrada (segundo EN 12372).



Figura 4-15 - Rotura de um provete durante o ensaio.

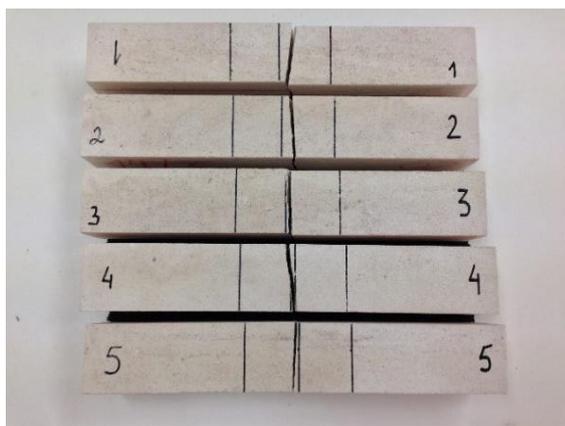


Figura 4-16 - Verificação da rotura dos provetes ao centro.

A resistência à flexão de cada provete, exprime-se em N/mm^2 (MPa), e é determinada através da expressão (4):

$$R_{tf} = \frac{3F \cdot l}{2b \cdot h^2} \quad (4)$$

Nas Tabelas A-5 e A-6, presentes no Anexo A, apresentam-se, respectivamente, a massa dos provetes utilizados no ensaio e o valor correspondente para a resistência à flexão. Na Tabela A-7, igualmente presente no Anexo A, indicam-se os valores médio e mínimo esperado para esta propriedade.

Neste ensaio obteve-se um valor médio de resistência à flexão de 9.08 MPa, o qual é superior quando comparado com o valor indicado pelo fornecedor (7,80 MPa). Este fator poderá estar associado à grande variabilidade de propriedades dentro da própria zona geológica de onde é extraído o bloco. Para situações de dimensionamento será considerado o mínimo valor esperado para a resistência à flexão desta pedra, 7.70 MPa.

5. PAINEL DE FACHADA E PAREDE EM PEDRA NATURAL

5.1 Metodologia de desenvolvimento

O principal objetivo desta dissertação é o desenvolvimento e caracterização de um sistema de revestimento prefabricado constituído por painéis de pedra natural pré-esforçados. O processo de definição do sistema inicia com uma solução base simplificada, testada experimentalmente à flexão, em regime elástico, a qual tem como fundamento a solução de revestimento apresentada no ponto 2.4, representada na Figura 2-12. Para a realização destes ensaios é essencial a criação de um mapa de quantidades, no qual se indicam todos os materiais e elementos necessários à produção dos painéis para teste. A definição de um procedimento de montagem é, igualmente, um aspeto fundamental tendo em vista um maior rigor experimental.

Através da criação de um modelo numérico deste sistema, utilizando um software de elementos finitos, comparam-se os resultados teóricos, obtidos na simulação, com os valores experimentais, procurando-se a validação deste modelo. O software de modelação geométrica e numérica utilizado foi o *SolidWorks 2017*[®]. A última fase do processo de desenvolvimento do produto prende-se com a otimização do sistema base, procurando-se colmatar possíveis debilidades aos níveis estrutural e funcional. Na Figura 5-1 representa-se, simplificadamente, as várias etapas envolvidas no processo de desenvolvimento dos painéis.

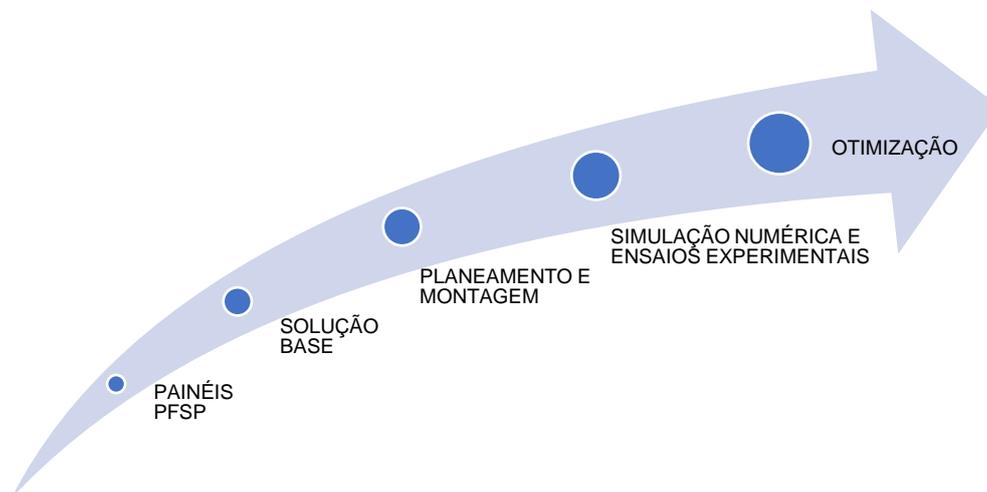


Figura 5-1 - Etapas do processo de desenvolvimento dos painéis de fachada e parede.

5.2 Solução Base

O processo de definição e conceção da solução base tem como principal premissa a união de placas de pedra de dimensões reduzidas através da ação do pré-esforço, à semelhança do que acontecia com os painéis PFSP. Sendo este um modelo otimizado, procura-se conceber uma solução que retifique ao máximo os problemas identificados no anterior sistema. Contudo, é importante referir que neste estágio do processo de desenvolvimento procura-se, de forma exclusiva, a validação do conceito através da

realização de ensaios mecânicos. A performance do painel em termos não-estruturais (ex.: térmica, acústica ou estanquidade à água) será estudada em etapas mais avançadas do seu processo de conceção.

Os principais problemas identificados no sistema PFSP, anteriormente descritos no ponto 2.4.5, prendem-se, sobretudo, com questões relacionadas com o elevado peso próprio dos painéis, com particularidades geométricas que condicionam o processo produtivo das placas e com a baixa *performance* térmica associada à existência de pontes térmicas. Nesse contexto, sendo a inclusão das placas de fecho o principal fator potenciador destes problemas, é sensata a sua exclusão do sistema.

Assim, simplifica-se a solução inicial, mantendo-se os dois panos de pedra compostos, cada um deles, por três placas interiores entremeadas por uma camada de isolamento. Para se garantir o espaçamento e o alinhamento entre as placas interiores introduzem-se duas guias de alumínio (alumínio de liga 1060), com 4 mm de espessura, ao longo dos bordos laterais, suprimindo-se as placas de espaçamento do sistema anterior. Para tal, é unicamente necessária a realização de rasgos até meia espessura nas placas interiores junto aos bordos laterais, tal como se representa nas Figuras 5-2 e 5-3.



Figura 5-2 - Placa interior com rasgos nos bordos laterais.



Figura 5-3 - Inclusão de guias metálicas para criação da caixa-de-ar.

Embora não sejam realizados ensaios experimentais de índoles térmica e acústica, tendo em vista o futuro desempenho do painel neste âmbito, incrementou-se a espessura da caixa-de-ar para 4 cm, permitindo a adição de uma maior camada de isolamento, perfazendo uma espessura total de 10 cm.

Em suma, o processo de definição da geometria das placas interiores tem como principais linhas orientadoras a possibilidade de aplicação do pré-esforço, a simplicidade dos processos de produção e montagem e a garantia de estabilidade do sistema global. Deste modo, de forma a possibilitar a aplicação do pré-esforço realizou-se um sulco nas extremidades das placas interiores de topo, representado na Figura 5-4. A transmissão de carga às placas é realizada por intermédio de uma chapa de aço, de 10 mm de espessura, que assenta nos sulcos realizados. Para ocultar parcialmente os elementos de pré-esforço e para facilitar a transmissão de tensões entre a chapa e as placas de pedra, definiu-se um sulco com as seguintes dimensões: 510 mm x 20 mm x 20 mm.

Até ao presente momento cada placa de pedra apresenta como dimensões máximas estudadas: 1000 mm x 1200 mm x 30 mm. Por sua vez, o painel, na sua globalidade, apresenta uma dimensão final aproximada de: 3000 mm x 1200 mm x 100 mm. Contudo, no âmbito desta dissertação, de forma a facilitar os processos de aquisição dos materiais, a montagem dos painéis e os ensaios mecânicos,

produziram-se painéis com as seguintes dimensões: 1500 mm x 600 mm x 100 mm (dimensão das placas: 500 mm x 600 mm x 30 mm).

Por sua vez, o processo produtivo deste sistema é facilitado dada a exclusiva necessidade de se produzirem placas de pedra com duas geometrias distintas.

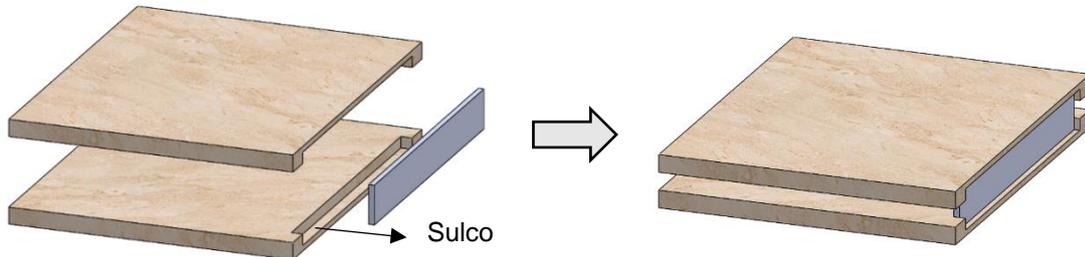


Figura 5-4 - Representação das placas interiores de topo com sulcos nas extremidades para permitir o encaixe das chapas de ancoragem.

5.2.1 Elementos de pré-esforço

O sistema de pré-esforço é composto unicamente por três tipos de elementos: cunhas, barriletes e varões de aço de 7 mm, representados na Figura 5-5. O número de varões de aço a utilizar pode variar consoante as considerações de projeto, contudo, para esta dissertação definiu-se o estudo de painéis com três varões.



Figura 5-5 - Elementos de pré-esforço (da esquerda para a direita): cunha, barrilete e varões de aço.

O princípio de atuação deste método é bastante simples, sendo condizente com a facilidade de montagem e de manuseamento do sistema de pré-esforço. Ao tracionar os varões de aço, com uma carga inferior à sua tensão de cedência, estes sofrem um alongamento em regime elástico. Aquando da etapa de paragem do tracionamento, os varões têm tendência para recuperar a sua configuração inicial, contudo, através do conjunto *cunha+barrilete*, a força de restituição é contrariada uma vez que o movimento de abertura da cunha é contraposto pelo barrilete através do seu encaixe neste. Os barriletes utilizados resistem até uma carga de tração de 55 kN.

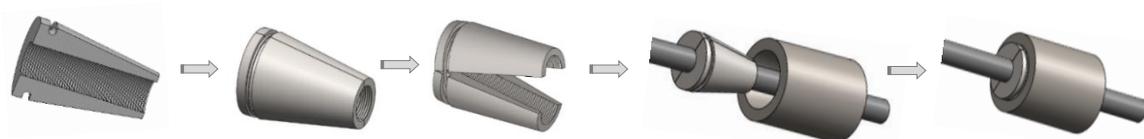


Figura 5-6 - Representação do sistema cunha + barrilete.

5.2.2 Representação do sistema global

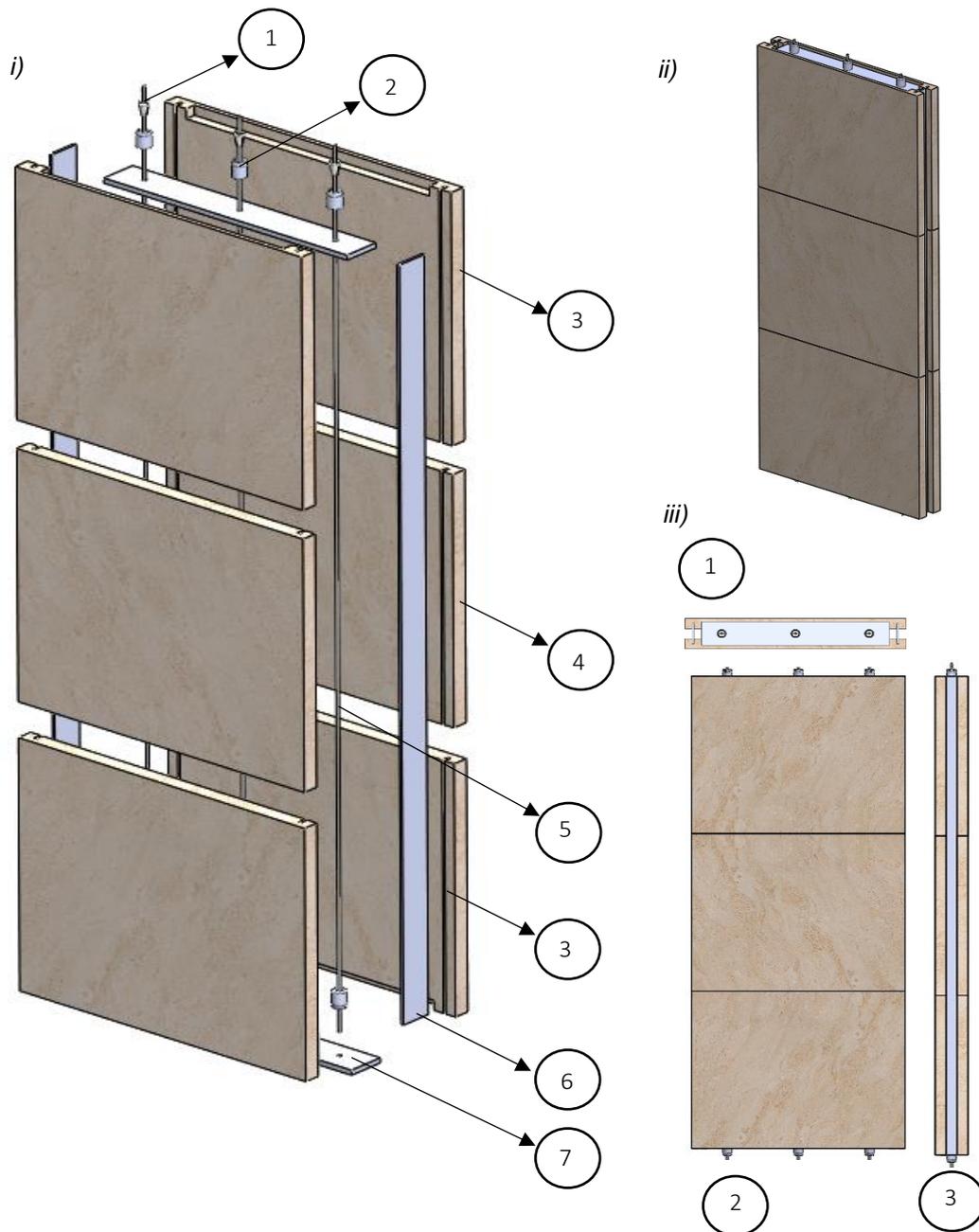


Figura 5-7 – i) Vista Explodida: 1 – cunha; 2 – barrilete; 3 – placa interior de topo; 4 – placa interior; 5 – varão de aço; 6 – guia de alumínio; 7 – placa de ancoragem; ii) Vista isométrica 3D; iii) 1 – Vista de topo; 2 – Alçado principal; 3 – Vista lateral.

5.3 Planeamento de fabrico

Esta etapa de planeamento, precedente à montagem dos painéis, possui uma importância acrescida, na medida em que engloba a definição e elaboração do procedimento de montagem e as ordens de

produção das diferentes matérias primas. Adicionalmente, um estágio importante deste processo prende-se com a conceção do *setup* de fabrico.

5.3.1 Setup de fabrico

Tendo como principal condicionante a área de implementação do *setup* de fabrico, definiu-se como fundamental a inclusão de três zonas: zona 1: zona de armazenamento de matérias-primas; zona 2: zona de montagem de painéis; zona 3: zona de armazenamento de painéis assemblados.

Na zona destinada ao armazenamento de matérias-primas, denominada por zona 1 na Figura 5-8, utilizam-se, respetivamente, caixas-paleta para o armazenamento de placas de pedra e dos elementos de pré-esforço (cunhas, barriletes e varões de aço). Estima-se que esta zona ocupe cerca de 4.6 m².

Na zona destinada à montagem dos painéis, denominada por zona 2 na Figura 5-8, inclui-se uma mesa de rolos e uma mesa de apoio à produção. Esta última encontra-se ao nível da mesa de trabalho para que, aquando da aplicação do pré-esforço, seja possível a colocação da bomba manual e dos restantes elementos necessários à produção. Estima-se que esta zona ocupe uma área de 5.0 m².

Na zona destinada ao armazenamento dos painéis, previamente assemblados, prevê-se a utilização de paletes para esse efeito. Estima-se que esta zona ocupe uma área total de 5.3 m², perfazendo uma área total de produção de, aproximadamente, 37,0 m². A área de produção foi implementada num espaço disponibilizado pela empresa Frontwave S.A.

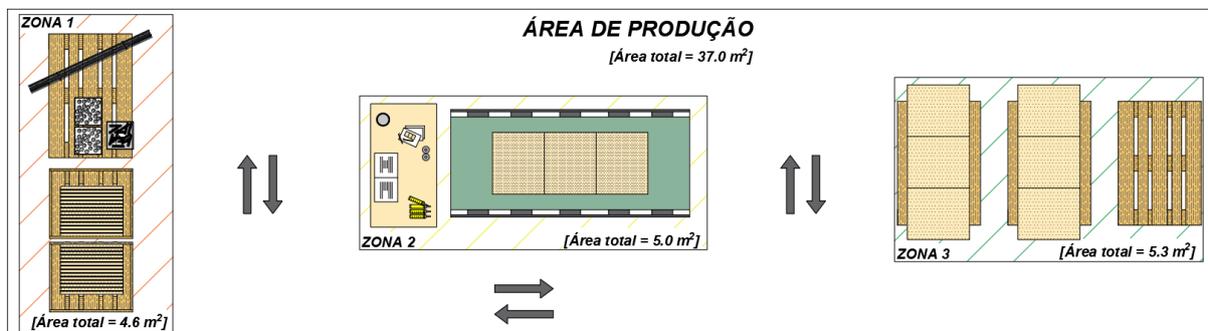


Figura 5-8 - Área de produção: zona 1 - zona de armazenamento de matérias-primas; zona 2 - zona de montagem de painéis; zona 3 - zona de armazenamento de painéis.

5.3.2 Aquisição dos materiais

Para viabilizar a análise comparativa entre a simulação numérica e o modelo real estipulou-se que se iriam testar mecanicamente, à flexão, três painéis. Nesse sentido, é necessária a aquisição das diferentes matérias primas para a sua montagem.

Para a assemblagem dos três painéis são necessárias 12 placas de topo e 6 placas interiores, perfazendo um total de 18 placas. As placas utilizadas para a montagem, exibidas na Figura 5-9, foram produzidas e disponibilizadas pela empresa Solancis. A pedra natural utilizada para a produção das placas é denominada por 'Branco Real', encontrando-se caracterizada no ponto 4.5.1.

As guias de alumínio e os elementos de pré-esforço, incluindo a bomba manual e os seus acessórios, representados nas Figuras 5-10 e 5-11, foram disponibilizados pela empresa Frontwave S.A. Para a montagem dos painéis são necessárias 6 guias de alumínio, de dimensões 1500 mm x 70 mm x 4 mm, e 6 chapas de ancoragem, de dimensões 490 mm x 70 mm x 10 mm.



Figura 5-9 - Placas de pedra.

Figura 5-10 - Elementos de pré-esforço.

Figura 5-11 - Bomba manual Enerpac P-39 Última.

5.4 Montagem dos painéis

5.4.1 Etapas prévias à montagem

Previamente à montagem dos painéis é necessária a verificação dimensional dos diferentes elementos, utilizando-se uma fita métrica ou um paquímetro nas zonas onde é necessária maior precisão. Adicionalmente, é de extrema relevância a verificação da planeza da mesa de trabalho, por forma a evitar eventuais desníveis entre placas durante a montagem.

As placas devem ser submetidas a um processo de limpeza (Figura 5-12), usando uma pistola de ar comprimido, com especial cuidado nas zonas onde será colocada a resina epóxi, tendo em vista a remoção das impurezas superficiais, maximizando a aderência nas zonas de interface. Caso as placas de pedras estejam saturadas, deve proceder-se à sua secagem previamente numa estufa, a temperatura constante de 50°C. O tempo de secagem é definido consoante o tipo de pedra e dimensões das placas.

Nas guias metálicas é necessária a realização de uma furação (Figura 5-13) de forma a permitir a passagem dos fios condutores soldados aos extensómetros. A utilização destes elementos é fundamentada mais adiante no ponto 5.4.3.1. Os varões de aço utilizados não devem apresentar qualquer tipo de singularidade que comprometa o seu comportamento em serviço.

A resina epóxi utilizada, Akepox 2030, representada na Figura 5-14, é composta por dois componentes (razão 2:1). Segundo a recomendação do fabricante, durante o processo de mistura das componentes da resina a temperatura deve ser superior a 18 °C. Para a assemblagem de um painel são utilizados 75 gramas de componente A e 37,5 gramas de componente B.



Figura 5-12 - Limpeza das placas de pedra com recurso a pistola de ar comprimido.



Figura 5-13 – Realização da furação na guia metálica.



Figura 5-14 – Pesagem da mistura epóxi bi-componente.

5.4.2 Procedimento de montagem

O procedimento de montagem inicia com a colocação das placas de pedra do pano inferior sobre a mesa de rolos, previamente nivelada, tal como se representa na Figura 5-15. Nas interfaces de contacto entre as placas aplica-se uma fina camada uniforme de resina epóxi, com cerca de 0,5 mm de espessura, utilizando uma espátula (Figura 5-16). Após a colocação da resina unem-se as placas, verificando-se o alinhamento do sistema. No fim desta etapa remove-se a resina epóxi em excesso, podendo esta ser reaproveitada.

Concluído o processo de colagem do pano inferior de pedra, introduzem-se as guias de alumínio nas ranhuras das placas de pedra (Figura 5-17), e as chapas de ancoragem nos sulcos das placas de topo (Figura 5-18). No final desta etapa inserem-se os varões de pré-esforço nos orifícios das placas de ancoragem.

O processo de colocação das placas do pano de pedra superior é igual ao anteriormente descrito, aplicando-se uma fina camada de resina epóxi na interface de contacto entre as placas. As placas são inseridas sobre as guias metálicas, facilitando o seu alinhamento. A última etapa do processo de montagem prende-se com a aplicação das cargas de pré-esforço, encontrando-se esta descrita seguidamente no ponto 5.4.3.



Figura 5-15 - Colocação das placas do pano de pedra inferior.



Figura 5-16 - Aplicação e espalhamento da resina.



Figura 5-17 - Introdução das guias de alumínio.



Figura 5-18 - Introdução das chapas de ancoragem e dos varões



Figura 5-19 - Introdução do pano de pedra superior.

5.4.3 Aplicação do pré-esforço

Para a aplicação da carga de pré-esforço utilizou-se uma bomba manual (Enerpac P-39 Última), representada na Figura 5-11, a qual possui uma pressão nominal máxima de 700 bar (10 000 psi). De notar que os procedimentos descritos no manual de utilização da bomba, fornecido pelo fabricante, relativos à colocação do óleo hidráulico, bem como todas as precauções indicadas associadas ao processo de aplicação da carga, foram tidos em conta durante a sua utilização.

Dado que os painéis são compostos por três varões de aço, para que a aplicação da carga se realize em simultâneo, são necessárias três mangueiras hidráulicas de alta pressão (Enerpac C-604) e três cilindros hidráulicos de ação simples. Este sistema requer, igualmente, a inclusão de um *manifold* para realizar a conexão em paralelo das três mangueiras hidráulicas ao circuito principal. As conexões entre os diversos elementos fazem-se por encaixes do tipo macho-fêmea (Enerpac C-604). Estes elementos encontram-se exibidos na Figura 5-20.

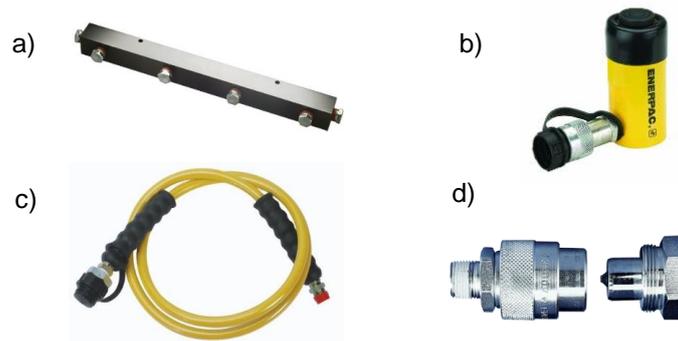


Figura 5-20 - a) *Manifold*; b) Cilindro hidráulico; c) Mangueira hidráulica; d) Encaixe macho-fêmea (Fonte: *Enerpac*).

Para o tracionamento de cada varão são necessários três conjuntos *cunha + barrilete*. Na Figura 5-21 encontra-se esquematizado o sistema de aplicação do pré-esforço, identificando-se os conjuntos *cunha + barrilete*. O *conjunto 3*, situado na extremidade oposta do painel àquela em que se introduzem os cilindros hidráulicos, funciona como ancoragem passiva. Uma vez que a cunha se encontra encaixada no barrilete, o conjunto restringe a reentrada do varão aquando da aplicação da carga.

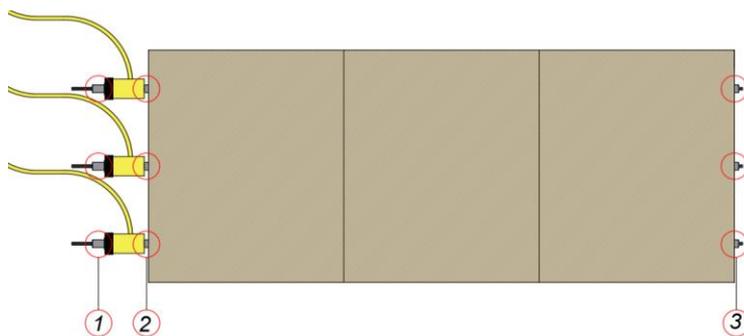


Figura 5-21 - Conjuntos *cunha + barrilete*



Figura 5-22 - Conjunto *cunha + barrilete*

O *conjunto 1*, situado junto à face exterior do cilindro hidráulico, apresenta um carácter provisório. De facto, quando ocorre a bombagem do sistema, os pistões dos cilindros hidráulicos expandem (Figura 5-23), atuando contra este, verificando-se um alongamento do varão entre os *conjuntos 1* e *3*. Os cilindros ao serem atuados fazem reação contra o *conjunto 2*, facilitando o encaixe da cunha no barrilete pertencentes a esse conjunto. Quando se atinge o tensionamento desejado nos varões de aço, procede-se à abertura da válvula de alívio da bomba manual.

A força instalada nos varões seria, à partida, controlada através do manómetro instalado à saída da bomba. Contudo, tendo em vista uma maior precisão na determinação da carga aplicada e a obtenção de uma estimativa para as perdas de carga instantâneas e a longo prazo, recorreu-se à utilização da extensometria elétrica, a qual foi concretizada através da aplicação de *strain gauges* (*sg*) nos varões de aço de modo a monitorizar o sistema, ou seja, as extensões registadas nos varões aquando da aplicação de carga.



Figura 5-23 - Expansão dos cilindros hidráulicos



Figura 5-24 - Conjunto *cunha* + *barrilete* 3



Figura 5-25 - Aplicação da carga de pré-esforço

5.4.3.1 Extensometria elétrica

Uma das principais incógnitas deste sistema prende-se com a quantificação das perdas de carga de pré-esforço instantâneas e diferidas. Este assunto, pouco estudado no anterior sistema, revela-se de extrema importância na garantia de uma adequada *performance* em serviço. De facto, quanto maior for o rigor na monitorização da carga de pré-esforço, mais aproximada será a simulação numérica ao modelo real, sendo possível afinar o sistema de carregamento a aplicar durante as etapas de simulação.

A utilização de *sg* nos varões de aço será, contudo, uma solução provisória, apenas utilizada até se obter uma curva de calibração do sistema de carregamento manual e uma estimativa adequada para as perdas de pré-esforço instantâneas e diferidas. Durante as fases de montagem do sistema, cada um dos painéis produzidos possui um varão instrumentado com *sg*, cujas propriedades se encontram indicadas na Tabela 5-1. Os processos de preparação da superfície e de aplicação dos extensómetros seguiram os procedimentos descritos em [50].



Figura 5-26 – *Strain Gauge* (*sg*)



Figura 5-27 - Varão com *sg*

Tabela 5-1 - Propriedades do *sg*

Manufacturer	Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.
Type	FLA-6-11
Gauge Length	6 mm
Gauge Factor	2.12 ± 1%
Gauge Resistance	120 ± 0.3 Ω
Temp. Compensation for	11 x 10⁻⁶/°C
Transverse sensitivity	0.1%

A determinação da força de pré-esforço a atuar em cada varão pode ser calculada através da expressão (5), a qual relaciona o módulo de elasticidade do material com a deformação e com a área da secção do varão. Por simplicidade, poder-se-ia assumir que o módulo de elasticidade do aço utilizado seria 200 GPa, contudo, foi realizado um ensaio de tração a um varão de aço por forma a confirmar esta propriedade.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{\varepsilon \times A} \quad (5)$$



Figura 5-28 - *Clip Gauge*

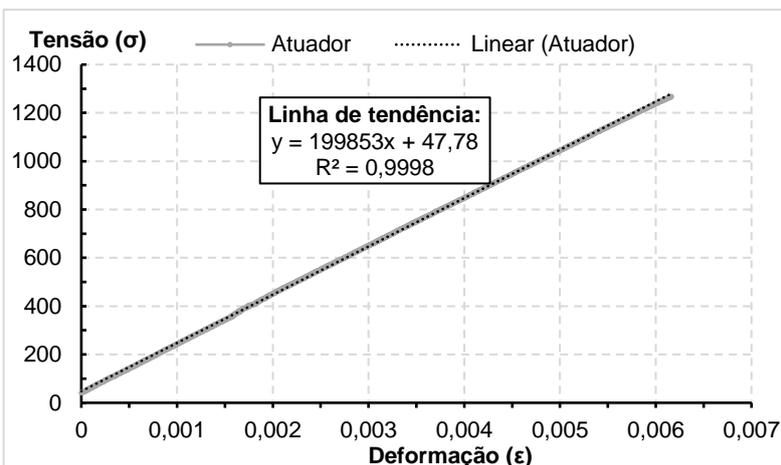


Figura 5-29 – Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração ao varão de aço

O ensaio de tração ao varão de aço foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos e de Materiais do Instituto Superior Técnico, num equipamento Instron 5969, utilizando-se um *clip gauge* para a obtenção das deformações, cujas propriedades encontram-se indicadas na Tabela 5-2. Na Figura 5-29 representa-se o gráfico tensão-deformação obtido no ensaio, correspondendo o declive da reta de tendência ao módulo de elasticidade do aço. O módulo de elasticidade obtido para o aço foi 199,85 GPa, o qual se encontra dentro da incerteza associada aos valores espectáveis.

Tabela 5-2 - Propriedades do *clip gauge*.

Type	STATIC
Gauge Length	25 mm
Travel	+12,5 mm/-2,5 mm

5.4.3.2 Carga de pré-esforço nos varões

Para a medição do nível de pré-esforço em cada painel recorreu-se, tal como foi anteriormente indicado, à extensometria elétrica através da instalação de um *sg*, por painel, no varão central. Para este estudo assume-se que não existem variações significativas de carga entre os três varões do painel.

O sistema de aquisição de dados é composto por um sensor, por hardware de aquisição e medição de dados e por um computador com *software* programável (Figura 5-30). Neste caso particular, o *sg* corresponde ao sensor, sendo responsável pela medição da deformação. A resistência elétrica de um *sg* varia proporcionalmente com o valor da deformação do varão. O hardware DAQ (NI 9237) atua como

a interface entre o *sg* e o computador, na medida em que digitaliza sinais analógicos de entrada de modo a que o computador possa interpretá-los. Por sua vez, utilizando um computador é possível o controlo do dispositivo DAQ, bem como o processamento, a visualização e o armazenamento dos dados de medição. O software utilizado foi o *Measurement and Automation Explorer (NI-Max)* da *National Instruments™*.



Figura 5-30 - Esquemática do sistema de aquisição de dados (Fonte: *National Instruments*).

O sistema de aquisição de dados utilizado encontra-se representado na Figura 5-31, sendo possível identificar os elementos anteriormente descritos. De notar que foi necessária a furação de uma das guias metálicas para permitir a passagem dos fios condutores desde o *sg*, colocado no varão central do painel, e o bloco de terminais (NI 9949) que permite a conexão ao dispositivo DAQ.



Figura 5-31 - Sistema de aquisição de dados: 1 – *sg* colocado no interior do painel; 2 – *sg* de compensação; 3 – bloco de terminais; 4 – dispositivo DAQ.

Para a medição de pequenas variações de resistência, tal como acontece neste caso, as configurações de *sg* são baseadas no conceito de ponte de *Wheatstone* [51], tal como se representa na Figura 5-32. A ponte consiste em dois ramos de circuito, contendo, cada um, duas resistências e uma tensão de excitação, V_{EX} , aplicada na ponte. Tendo como referência o número de elementos ativos na ponte de *Wheatstone*, a orientação dos *sg* e o tipo de deformação que está a ser medida, define-se o tipo de configuração de *sg*: ponte completa, meia ponte ou quarto de ponte.

Para este caso, dado que se pretende, de forma exclusiva, a medição das extensões segundo uma única direção, optou-se por uma configuração do tipo quarto de ponte. Contudo, dada a variabilidade das medições em função da temperatura, utiliza-se um *sg* adicional na ponte (*sg* de compensação), não ligado ao varão, de forma a minimizar este efeito. Como as variações de temperatura são idênticas nos dois *sg*, a relação entre as suas resistências não é alterada, a tensão de saída (V_0) não é alterada

e os efeitos de temperatura são minimizados. A este caso particular de configuração dá-se o nome de quarto de ponte do tipo II.

Na Figura 5-32 representa-se o esquema de conexão dos fios condutores ligados aos *sg* ativo (resistência R_4) e ao *sg* de compensação (resistência R_3). De notar que as características (*gauge length*, *gauge resistance* e *gauge factor*) dos *sg* ativo e de compensação têm que ser as mesmas.

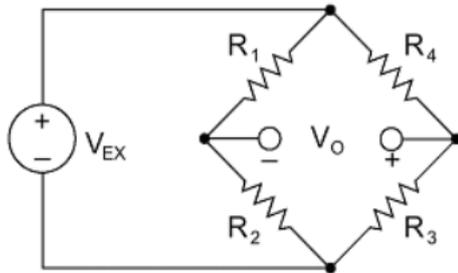


Figura 5-32 - Ponte de *Wheatstone*

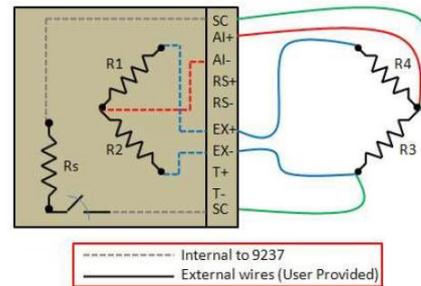


Figura 5-33 - Quarto de ponte do tipo II

Para cada painel foi medida a extensão do varão em sete momentos distintos, os quais se encontram indicados aquando da apresentação dos resultados. Previamente a estas medições é essencial a calibração do sistema de medição, pelo que, após a introdução das propriedades dos *sg* (*gauge length* e *gauge factor*) no software, se aplicou uma função de *Strain Offset Calibration*.

Nas Tabelas B-1, B-2 e B-3, presentes no Anexo B, apresentam-se, respetivamente, as cargas de pré-esforço registadas em cada instante para os painéis 1, 2 e 3. Adicionalmente, estimam-se, sob a forma percentual, as perdas de carga entre cada momento de medição. Na Figura 3-34 representa-se o gráfico que traduz a evolução no tempo (em dias) da carga de pré-esforço para cada um dos painéis.

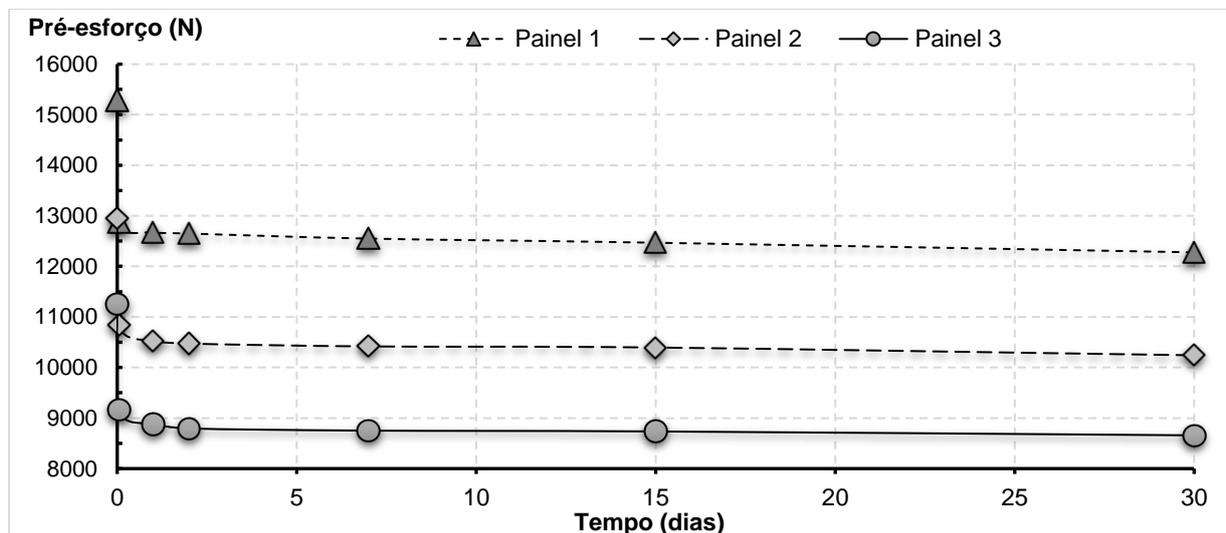


Figura 5-34 - Evolução no tempo da carga de pré-esforço.

O nível de pré-esforço aplicado em cada um dos painéis foi variável de modo a obter-se uma estimativa das perdas de pré-esforço para diferentes níveis de carga. Embora bastante próximos, verificou-se que quanto maior for a carga, menores são as perdas de carga instantâneas. De facto, face ao método de

assemblagem utilizado, a inserção das cunhas nos barriletes é maior para níveis de carga superiores, impedindo-se a reentrada dos varões de aço após o término do tracionamento.

De forma conservativa, em termos de dimensionamento, deve considerar-se que este sistema assume uma perda de pré-esforço total de 30%. Contudo, futuramente, é possível otimizar este valor através da utilização de um macaco de reação (Figura 5-35) durante o processo de aplicação do pré-esforço. Este equipamento faz reação durante o tracionamento dos varões e, após ter chegado à carga máxima, introduz as cunhas nos barriletes quando acionado, reduzindo as perdas de carga instantâneas.



Figura 5-35 - Macaco de reação.

Os painéis foram ensaiados mecanicamente à flexão 30 dias após a sua assemblagem, pelo que, a carga registada nesse instante será considerada para cada um dos painéis na simulação numérica.

5.5 Ensaio Mecânico

5.5.1 Descrição do Ensaio

A realização do ensaio mecânico aos painéis tem como principais objetivos a caracterização do seu comportamento à flexão e a validação da simulação numérica realizada no *SolidWorks*® através de uma análise comparativa com o modelo real. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, sendo a metodologia de ensaio adotada uma adaptação da utilizada em [52].

Durante a realização do ensaio os painéis foram submetidos a duas cargas verticais lineares, aplicadas transversalmente nas zonas de interface entre as placas de pedra, resultando numa flexão pura na placa de pedra central. Foram testados três painéis prefabricados de dimensões 1.5 m x 0.6 m x 0.1 m.

Para a realização do ensaio cada painel foi apoiado, ao nível dos cantos (50 mm desde as extremidades de topo e lateral), sobre quatro peças metálicas semiesféricas (Figura 5-36), as quais não impedem a sua rotação. Para a aplicação do sistema de cargas lineares utilizaram-se duas barras de aço com 70 mm de diâmetro soldadas a dois perfis metálicos IPE 100, os quais se encontram ligados através de uma viga de grande rigidez (IPE 500) que, por sua vez, está ligada ao atuador.

Durante o ensaio procedeu-se ao registo da força em cada um dos apoios com o objetivo de assegurar uma distribuição uniforme da carga aplicada. Para tal, instalou-se uma célula de carga em cada um dos apoios, com capacidade máxima de 200 kN, a qual se encontra assente sobre perfis metálicos que transmitem as reações à laje de reação, em betão armado.



Figura 5-36 – Apoio com célula de carga



Figura 5-37 - Sistema de carregamento

A medição dos deslocamentos verticais relativamente a um referencial fixo realizou-se através da utilização de cinco transdutores de deslocamento (TML CDP 50) fixados com bases magnéticas a um apoio metálico (Figura 5-38), registando-se os deslocamentos na secção de meio vão de cada uma das placas de pedra e nas secções de aplicação das cargas lineares, ou seja, nas interfaces pedra-pedra.



Figura 5-38 - Transdutores de deslocamento.

Na Figura 5-39 encontra-se indicada a posição de medição dos transdutores (LVDT's), esquematizando-se e identificando-se a deformada em cada um destes pontos. O espaçamento entre transdutores é de 250 mm. A carga P representada corresponde à carga aplicada pelo atuador.

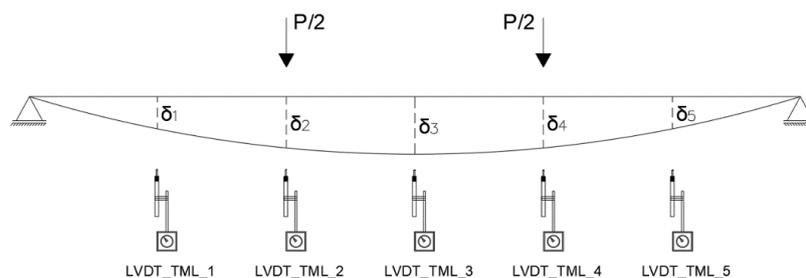


Figura 5-39 - Identificação da posição dos LVDT's durante o ensaio mecânico.

A carga é transmitida ao painel por intermédio do atuador hidráulico, fixado ao pórtico de ensaio, o qual apresenta uma capacidade máxima de 300 kN. Este atuador possui um transdutor interno de deslocamento e uma célula de carga, como parâmetros de medição e controlo. A aplicação da ação é controlada por software próprio, instalado no computador, podendo ser definidas, entre outras variáveis, o tipo de controlo (força ou deslocamento) e a velocidade de aplicação da carga. O pórtico de reação utilizado para a realização dos ensaios é composto por perfis metálicos HEB 300, ligados mecanicamente por parafusos. Nas Figura 5-40 e 5-41 encontram-se, respetivamente, esquematizados o *setup* de instrumentação do ensaio à flexão do painel e o pórtico de reação utilizado.

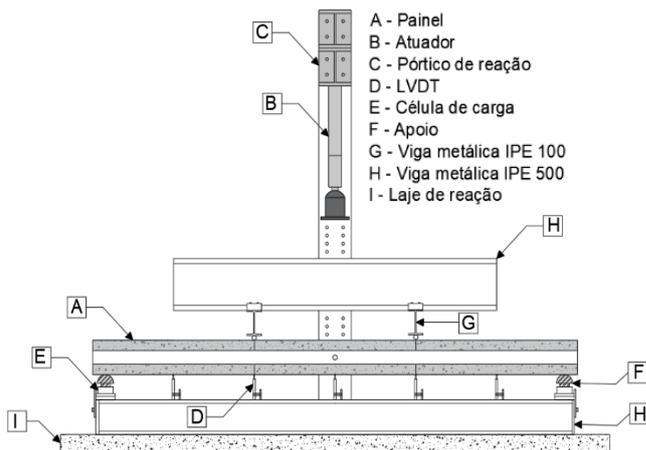


Figura 5-40 - Setup e instrumentação do ensaio à flexão do painel (adaptado de [51])



Figura 5-41 - Pórtico de reação.

De modo a amplificar o estudo do comportamento mecânico do painel, a tipologia de ensaio adotada variou entre painéis, tendo-se optado, para o painel 1, por uma aplicação de carga por controlo de deslocamento até à rotura, com uma velocidade de aplicação de 0.02 mm/s. A aquisição de dados foi realizada à velocidade de 1 ponto/s. Com este ensaio foi possível obter uma estimativa do nível de carga para o qual se verifica a rotura.

Para os painéis 2 e 3, previamente à aplicação de carga por controlo de deslocamento até à rotura, optou-se por uma aplicação de carga por controlo de força, definindo-se um patamar de carga inferior à carga de rotura obtida para o primeiro painel. Deste modo, é possível estudar o comportamento do painel em regime elástico. Por forma a observar-se a variação da carga de pré-esforço durante o ensaio, procedeu-se ao registo desta carga, de forma pontual, através do sistema de extensometria elétrica instalado no varão de aço central de cada painel.

5.5.2 Apresentação e Análise de resultados

5.5.2.1 Painel 1

Nas Figuras 5-42 e 5-43 encontram-se, respetivamente, representadas as curvas carga-tempo e deslocamento-tempo referentes ao ensaio mecânico ao painel 1. Juntamente com as curvas apresenta-se a evolução da carga de pré-esforço durante o ensaio.

Em ambas as curvas é possível realizar uma divisão em duas fases distintas: (i) 0-50 segundos: comportamento não linear correspondente a eventuais reajustes dimensionais do sistema atuador-painel; (ii) 50-315 segundos: comportamento linear até à rotura. A carga de pré-esforço mantém-se aproximadamente constante para os níveis de carga de ensaio, verificando-se exclusivamente um aumento substancial aquando da rotura dos painéis. Nesse instante, o deslocamento segundo a direção principal do painel, provocado pelo destacamento das placas relativamente ao plano do painel, induz um incremento de tensão nos varões, registando-se valores de carga superiores.

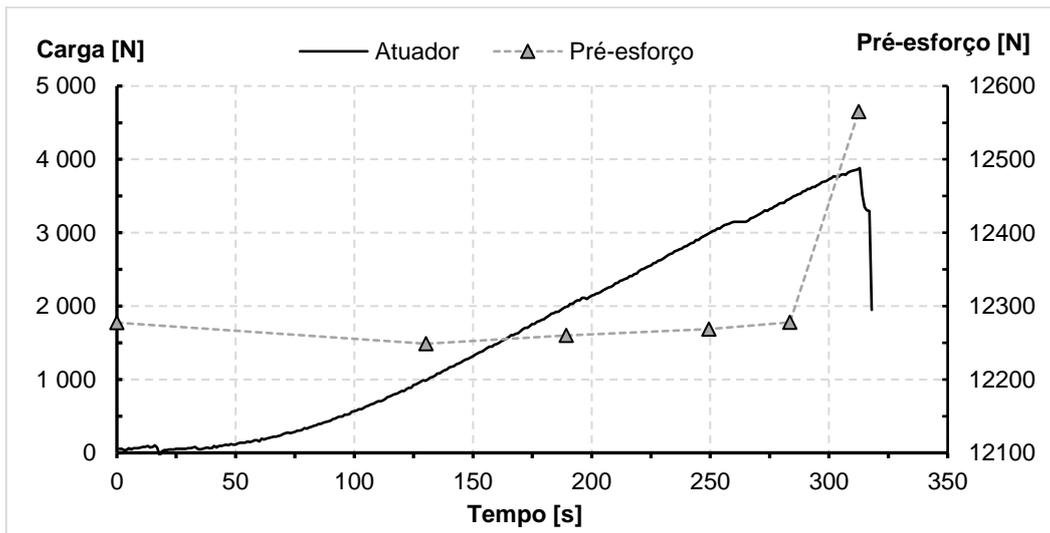


Figura 5-42 - Gráfico carga-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 1.

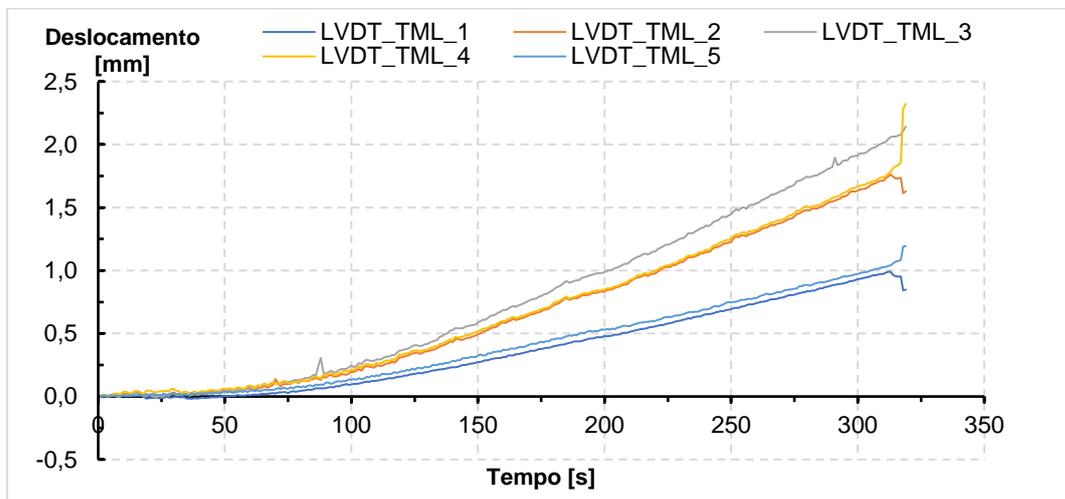


Figura 5-43 - Gráfico deslocamento-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 1.

No gráfico deslocamento-tempo apura-se que, à semelhança do que seria espectável, o máximo deslocamento se registou a meio vão do painel (LVDT_TML_3), verificando-se valores de deslocamento cada vez menores à medida que o ponto de medição se aproxima da secção de extremidade. De facto, os valores registados nas secções de interface pedra-pedra (LVDT_TML_2 e LVDT_TML_4) são bastante próximos e superiores aos aferidos para o deslocamento a meio vão das placas de extremidade (LVDT_TML_1 e LVDT_TML_5).

Para a determinação da rigidez nos vários pontos de medição considerou-se o intervalo de carga de 2000-3000 N e os deslocamentos relativos correspondentes. Neste intervalo as curvas força-deslocamento, presentes na Figura 5-44, apresentam um comportamento linear, pelo que foi traçada uma linha de tendência linear para cada uma destas, apresentando-se as equações e os coeficientes de correlação respetivos.

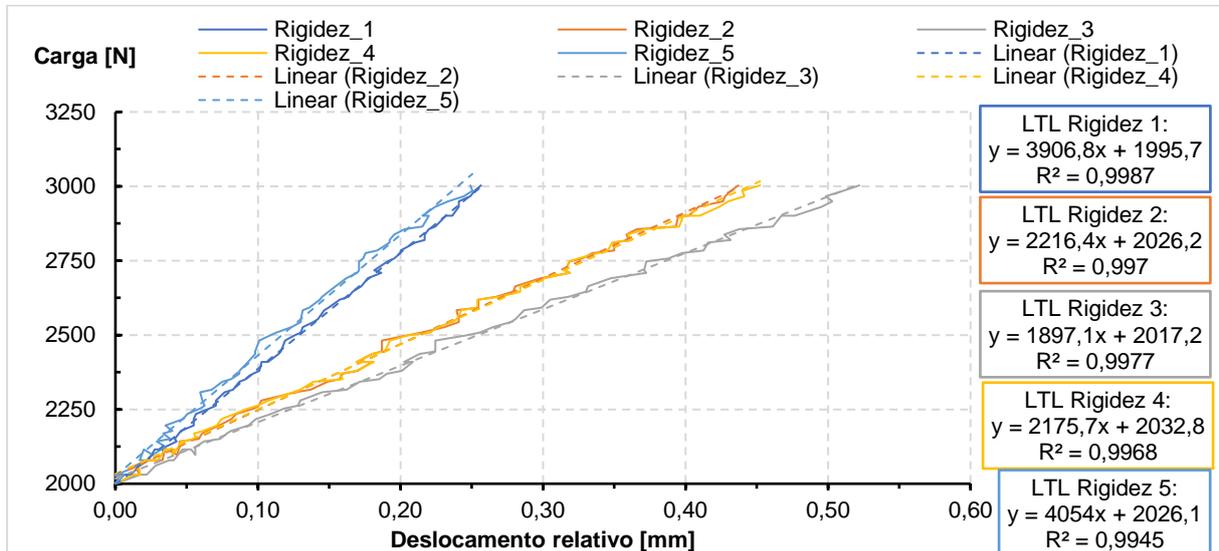


Figura 5-44 - Gráfico carga-deslocamento relativo do ensaio à flexão do painel 1.

Posteriormente, tendo em vista a validação do modelo numérico, o comportamento das curvas força-deslocamento e os correspondentes valores de rigidez serão comparados com os valores teóricos retirados da simulação. Tal como seria espectável, o menor valor de rigidez associa-se à secção de meio-vão uma vez que esta corresponde à secção de deslocamento máximo.

A rotura no painel 1 ocorreu na placa de pedra central inferior, junto a uma das interfaces pedra-pedra, tal como se identifica na Figura 5-45. A rotura verificou-se para um nível de carga de 3882 N, o qual pode ser considerado como baixo, contudo, espectável. De facto, de modo a que o painel apresente uma maior resistência à flexão é necessário que responda monoliticamente às ações externas, aspeto que não se verificou face à inexistência de uma ligação química ou mecânica entre os panos de pedra.



Figura 5-45 - Modo de rotura relativo ao ensaio à flexão do painel 1.

Como se observa na Figura 5-45, ocorreu um destacamento do pano de pedra inferior relativamente ao plano do painel, condição que compromete o seu comportamento em serviço face ao risco de queda de uma placa. Deste modo, na próxima iteração do sistema este é um fator primordial a corrigir. Contudo, para este estudo, por forma a evitar a introdução de mais variáveis ao sistema, a opção escolhida é a mais adequada pois permite uma análise mais direta do papel do sistema de pré-esforço.

5.5.2.2 Painel 2

Para o ensaio ao painel 2, tal como foi anteriormente referido, optou-se, numa fase inicial, por uma aplicação de carga por controlo de força seguida de uma aplicação de carga com controlo de deslocamento até à rotura. Verificando-se a rotura do painel 1 para uma carga de 3882 N, considera-se que para um nível de carga de 2000 N o painel ainda apresenta um comportamento elástico. Nesse sentido, programou-se o *software* de ensaio para carregar o painel até um nível de carga de 2000 N, por controlo de força, ocorrendo a descarga total após atingir este patamar. Este ensaio foi realizado três vezes, de forma sucessiva, sucedendo-se o ensaio até à rotura.

Durante a aplicação de força com controlo de deslocamento até à rotura optou-se por uma velocidade de aplicação de 0,1 mm/s, superior à adotada para o painel 1. De facto, de forma conservativa, para o ensaio inicial definiu-se uma velocidade de aplicação de 0,02 mm/s, inferior à comumente utilizada nos ensaios de caracterização mecânica à pedra natural. Deste modo, face aos resultados obtidos, conclui-se que o painel apresenta capacidade de reajuste dimensional suficiente que justifique este incremento.

Nas Figuras 5-46 e 5-47 encontram-se, respetivamente, representadas as curvas carga-tempo e deslocamento-tempo referentes ao ensaio mecânico ao painel 2. Juntamente com a curva força-tempo apresenta-se a evolução da carga de pré-esforço durante o ensaio.

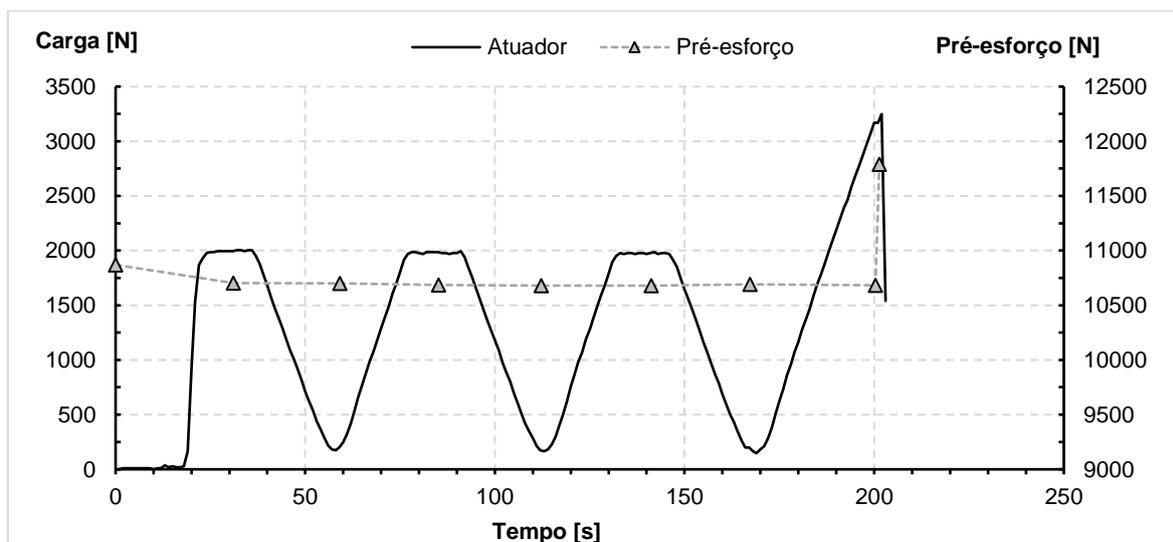


Figura 5-46 - Gráfico carga-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 2.

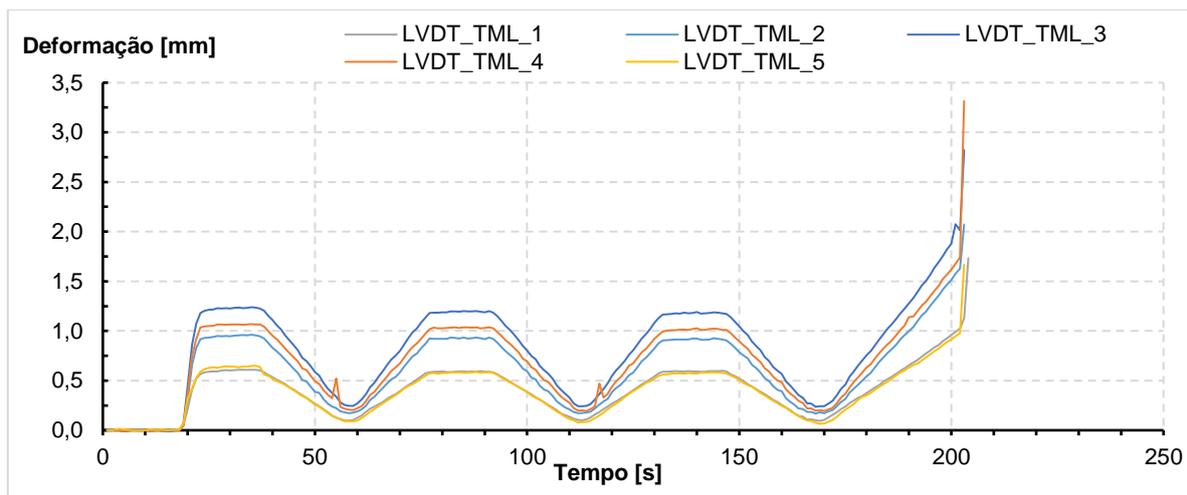


Figura 5-47 - Gráfico deslocamento-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 2.

Na Figura 5-46 verifica-se que, após se atingir o nível de carga elástico, contrariamente ao programado, não ocorre uma descarga total de carga face à incerteza de medição da célula de carga do atuador. Na Figura 5-47 apura-se que, tal como seria espectável, o máximo deslocamento se registou a meio vão do painel (LVDT_TML_3) em ambos os ensaios. Os valores de deslocamento são cada vez menores à medida que o ponto de medição se aproxima da secção de extremidade. Deste modo os valores registados nas secções de interface pedra-pedra (LVDT_TML_2 e LVDT_TML_4) são bastante próximos e superiores aos valores obtidos para o deslocamento a meio vão das placas de extremidade (LVDT_TML_1 e LVDT_TML_5).

As curvas força-deslocamento para cada um dos LVDT's encontram-se representadas na Figura 5-48, tendo-se considerado o intervalo de carga de 2000-3066 N, em regime de controlo de deformação, e os respetivos deslocamentos relativos. Para cada uma das curvas força-deslocamento foi traçada a linha de tendência linear, apresentando-se as equações e os coeficientes de correlação correspondentes.

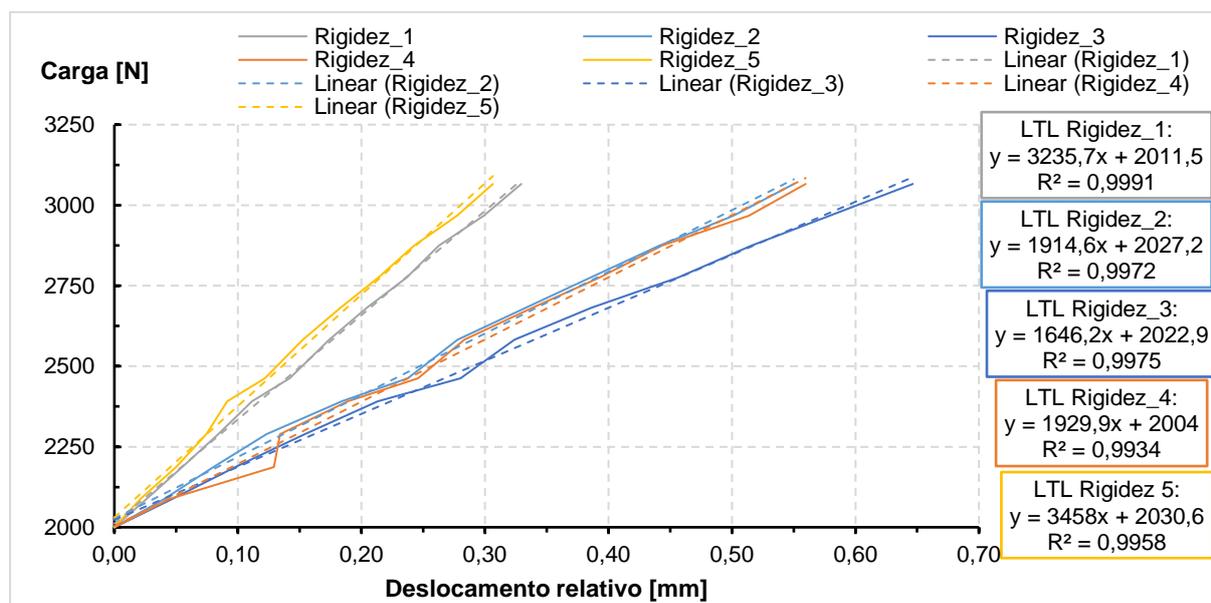


Figura 5-48 - Gráfico carga-deslocamento relativo ao ensaio à flexão do painel 2.

Comparando os valores de rigidez obtidos para os painéis 1 e 2, conclui-se que o painel 1 apresenta uma maior rigidez global uma vez que se encontra sujeito a uma maior carga de pré-esforço. De facto, é possível concluir que, utilizando a mesma tipologia de painel e metodologia de montagem, quanto maior for a carga de pré-esforço aplicada maior será a rigidez do painel, podendo este balanço ser determinado a partir de ensaios da natureza dos que foram desenvolvidos no presente trabalho.

A rotura no painel 2, representada na Figura 5-49, ocorreu na interface pedra-pedra, ao nível da ligação química entre as placas, evidenciando uma deficiente colagem entre estas. A descolagem verificou-se para um nível de carga de 3249 N, ocorrendo, tal como esperado, para um patamar de carga inferior ao registado para o painel 1 sendo que a carga de pré-esforço aplicada era inferior.

À semelhança do sucedido para o painel 1, verificou-se um destacamento do pano inferior de pedra relativamente ao plano do painel, reforçando a necessidade da existência de uma ligação química ou mecânica entre os panos de pedra face aos requisitos de segurança exigidos.



Figura 5-49 - Modo de rotura relativo ao ensaio à flexão do painel 2.

5.5.2.3 Painel 3

A metodologia e o procedimento de ensaio utilizados para o painel 3 são iguais aos adotados para o painel 2, contudo, uma rotura precoce do painel inviabilizou a sua completa realização. A rotura verificou-se para uma carga de 1950 N no primeiro ciclo do regime de ensaio com controlo de carga.

Nas Figuras 5-50 e 5-51 encontram-se, respetivamente, apresentadas as curvas carga-tempo e deslocamento-tempo referentes ao ensaio mecânico ao painel 2. Juntamente com a curva carga-tempo apresenta-se a evolução da carga de pré-esforço durante o ensaio.

De acordo com a Figura 5-50 a carga de pré-esforço aumenta gradualmente de forma lenta até à rotura, verificando-se um incremento brusco nesse instante devido à extensão dos varões de aço provocada pelo destacamento do pano de pedra inferior, tal como se verifica na Figura 5-53. Por sua vez, no gráfico deslocamento-tempo, à semelhança do que ocorreu nos ensaios aos painéis 1 e 2, o máximo deslocamento ocorreu a meio vão (LVDT_TML_3), onde se registaram valores semelhantes de deslocamento nas interfaces pedra-pedra (LVDT_TML_2 e LVDT_TML_4) e a meio vão das placas de extremidade (LVDT_TML_1 e LVDT_TML_5).

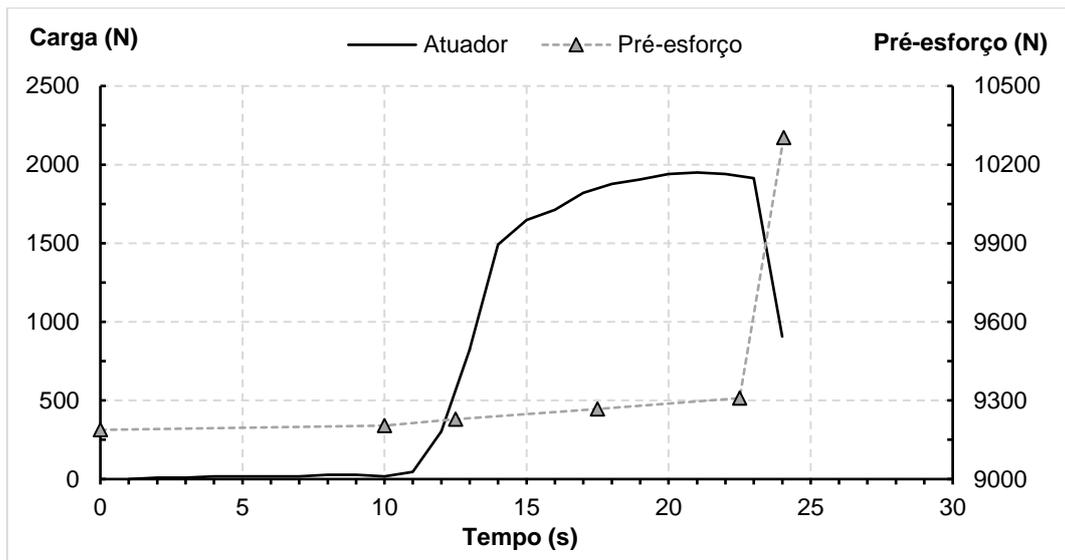


Figura 5-50 - Gráfico carga-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 3.

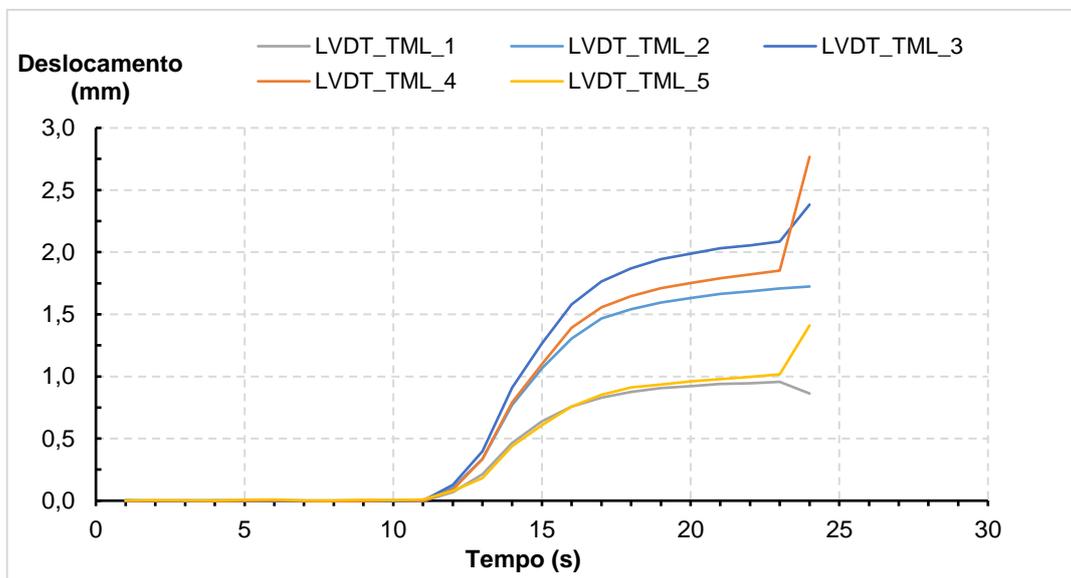


Figura 5-51 - Gráfico deslocamento-tempo relativo ao ensaio à rotura do painel 3.

As curvas carga-deslocamento registadas em cada uma das posições de medição encontram-se representadas na Figura 5-52, tendo-se considerado o intervalo de carga de 300-1500 N e os respetivos deslocamentos relativos. Para cada uma das curvas carga-deslocamento foi traçada a linha de tendência linear, apresentando-se as equações e os coeficientes de correlação correspondentes. De notar que, contrariamente ao apresentado para os painéis 1 e 2, face à rotura precoce do painel, a estimativa da rigidez efetua-se em regime de aplicação de carga com controlo de força.

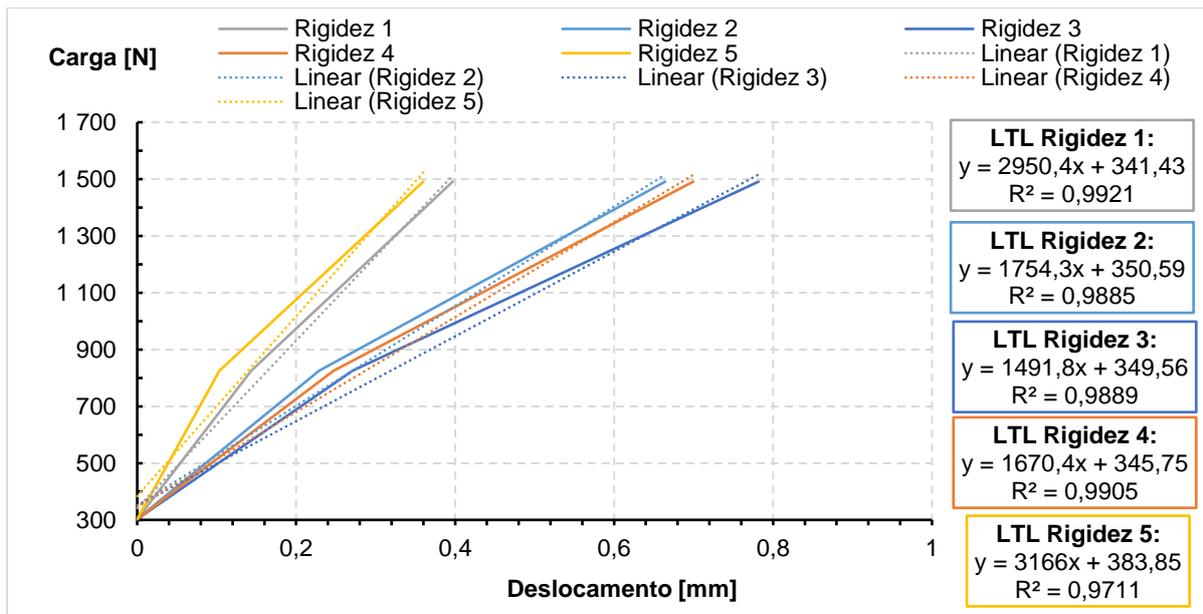


Figura 5-52 - Gráfico carga-deslocamento relativo ao ensaio à flexão do painel 3.

Os valores de rigidez obtidos para este painel foram inferiores aos determinados para os painéis 1 e 2 sendo que: 1) Como a rotura se verificou para um regime de ensaio em controlo de força, a velocidade de aplicação de carga é consideravelmente superior quando comparada com a velocidade característica de ensaio em regime de controlo de deformação. Deste modo, a capacidade de reajuste geométrico e/ou resposta estrutural por parte dos elementos pétreos fica condicionada, induzindo uma rotura precoce; 2) A carga de pré-esforço aplicada ao painel 3 é inferior à aplicada aos restantes, pelo que seria espectável que este painel apresentasse valores de rigidez inferiores.

A rotura no painel 3 ocorreu, à semelhança do que aconteceu com o painel 2, no pano inferior ao nível de uma das interfaces pedra-pedra na zona de colagem entre as placas. Apesar da preparação da mistura epóxi ter sido realizada em condições idênticas de temperatura e humidade para os três casos e mesmo tendo em consideração que a aplicação foi realizada com um espalhamento uniforme por todas as interfaces, o facto deste processo não ocorrer de forma simultânea durante todo o período da montagem, implica que a resina aplicada pode perder parte da sua viscosidade aquando da colocação. De facto, se a resina, no momento de aplicação, já iniciou o seu processo de cura, não ocorre o embebimento necessário nas faces da pedra, potenciando uma rotura precoce.



Figura 5-53 - Modo de rotura relativo ao ensaio à flexão do painel 3.

6. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

6.1 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) possui, no âmbito da engenharia de estruturas, um importante papel na determinação dos estados de tensão e deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores [53].

Acompanhando a evolução do Homem, o nível de complexidade arquitetônica das construções foi aumentando, implicando um processo de análise estrutural cada vez mais exigente e complexo. Tendo como objetivo acelerar este processo, a utilização do MEF apresenta-se como uma alternativa bastante vantajosa dada a simplificação e celeridade que introduz ao nível destes processos. Caracterizado pela sua versatilidade, o MEF tende a ser cada vez mais aceite e reconhecido como uma ferramenta de extrema utilidade por parte dos projetistas.

O MEF baseia-se na subdivisão do domínio de sistemas físicos, discretos ou contínuos, em subdomínios denominados por elementos finitos. Cada elemento finito é definido por um determinado número de nós que dão forma ao elemento, sendo as formas 2D mais comuns os triângulos e os quadriláteros [54]. Os vários nós que constituem o elemento são ligados entre si para que o elemento seja fechado, formando uma fronteira.

6.2 Criação de um Modelo de Elementos Finitos

Para o estudo isolado de cada elemento finito utiliza-se o método clássico de cálculo que tem por base as condições de equilíbrio e contorno dos nós, permitindo uma análise estrutural baseada em equações lineares independentes da complexidade geométrica da estrutura e das condições de carga [54]. Quanto maior for o número de elementos e, conseqüentemente, o número de nós, maior será o número de operações matemáticas e o tempo de cálculo da simulação numérica. Contudo, todo este procedimento é acelerado dada a natureza repetitiva do processo cálculo.

Sendo o método de cálculo com elementos finitos uma aproximação ao modelo real, quanto maior for o número de subdivisões, até um limite ótimo, maior será a precisão dos dados obtidos da simulação face ao caso real. Em modelos geométricos mais complexos, que apresentem, ao nível da sua geometria, zonas angulosas, é essencial garantir-se uma maior subdivisão dos elementos por forma a obter uma solução final satisfatória, na medida em que se trata de zonas sujeitas a elevadas concentrações de tensões.

6.2.1 Tipos de Análise

Uma correta utilização do MEF no estudo de uma determinada estrutura implica uma prévia avaliação do tipo de análise a realizar, dado que a sua aplicação depende, em grande escala, das simplificações

consideradas. Deste modo, consideram-se os seguintes tipos de análise: análise dinâmica; análise estática; análise linear; análise não linear.

As principais ações consideradas no dimensionamento de estruturas são de natureza dinâmica, sendo necessária a consideração das forças de inércia inerentes às acelerações a que cada um dos elementos fica sujeito [53]. Um dimensionamento desadequado de um elemento face a estas ações pode potenciar situações de risco para a segurança dos utilizadores do edifício, revelando a importância que este tipo de estudo apresenta.

Assim, seria de prever que a simulação numérica deste tipo de estruturas teria forçosamente que considerar os efeitos dinâmicos destas ações. Contudo, dada sua extensa amplitude temporal de atuação, na maioria dos casos, é admissível desprezar-se as forças de inércia, adotando-se um modelo que tenha por base uma análise estática.

6.2.2 Descrição do software *SolidWorks 2017*[®]

Previamente à apresentação das simulações numéricas realizadas, importa realizar uma descrição sumária do *software* de elementos finitos utilizado nesta dissertação, *SolidWorks 2017*[®], tornando mais fácil a compreensão dos modelos implementados mais adiante.

O *SolidWorks*[®], sendo um dos principais softwares de modelação geométrica 3D, consegue, através da sua ferramenta de simulação, conjugar todos os instrumentos necessários à realização de uma análise estrutural aos painéis em estudo. Uma análise completa realizada em *SolidWorks 2017*[®] está geralmente dividida em três estágios distintos: pré-processamento, solução e pós-processamento.

- **Pré-processamento (“Preprocessor”):**

- **Modelação geométrica:** define-se o modelo do problema físico, isto é, realiza-se a modelação geométrica dos diversos constituintes (*parts*) e procede-se, posteriormente, à montagem do modelo, definindo-se as zonas de contacto entre estes. Para a modelação geométrica de cada *part* utilizou-se a ferramenta *Sketch* para a criação de um esboço num plano 2D e, através de funções (*features*) como o *Extruded Boss*, faz-se a sua extrusão segundo a direção normal ao plano do esboço. Com o auxílio de outras ferramentas como o *Extruded Cut* é possível a criação de orifícios e rasgos num dado plano. O sistema possui inúmeras ferramentas que permitem uma definição quase real de qualquer componente, conjunto ou sistema integrado com elementos elétricos ou mecânicos.
- **Caracterização dos materiais:** define-se o tipo de material das diversas *parts* do modelo através da utilização da sua base de dados, a qual associa de forma imediata às suas propriedades mecânicas.
- **Definição da malha:** tendo em conta a geometria da estrutura em estudo e o nível de precisão pretendido, define-se o tipo de malha a utilizar.

- **Solução (“Solution”):**

- **Carregamento:** tendo em conta as ações a que o elemento se encontra sujeito em serviço define-se, com base num sistema de cargas pontuais e de pressão, as solicitações a considerar na simulação numérica.
- **Condições de fronteira:** com base no modelo real que se pretende simular define-se os constrangimentos de translação e rotação a considerar num determinado ponto, linha ou superfície do painel.
- **Definição do contacto:** estabelece-se o contacto entre as várias *parts* de acordo com o modelo real. O *software* permite considerar os seguintes tipos de contacto:
 - **No penetration** – permite que duas ou mais faces se afastem ou entrem em contacto e desenvolvam pressões ou forças de contacto. Contudo, não permite que duas *parts* ocupem o mesmo espaço, ou seja, não ocorre penetração entre *parts* durante a análise.
 - **Allow penetration** – permite que duas *parts* ocupem o mesmo espaço, ou seja, poderá ocorrer penetração segundo as faces em que se encontra definido este tipo de contacto.
 - **Bonded** - os elementos atuam como se estivessem soldados, agindo como um só.
- **Pós-processamento (“Postprocessor”):** nesta etapa processa-se e visualiza-se os resultados obtidos na resolução da simulação numérica. Esta avaliação é realizada interactivamente usando a interface de visualização do *software*, através, por exemplo, de animações, da representação da deformada e de cortes em secções cujas tensões e deslocamentos se pretendam estudar mais detalhadamente.

6.3 Criação do modelo numérico

6.3.1 Modelação geométrica

A modelação geométrica deste sistema base já foi anteriormente apresentada no ponto 5.2. Contudo, importa realçar que, tendo em vista uma simplificação do modelo numérico, omitiram-se alguns elementos do sistema de pré-esforço. Nesse sentido, os varões de aço e as cunhas de pré-esforço foram suprimidos, aplicando-se as cargas de pré-esforço diretamente sobre os barriletes. Na Figura 6-1 encontra-se representado o modelo geométrico utilizado para a realização do modelo numérico.

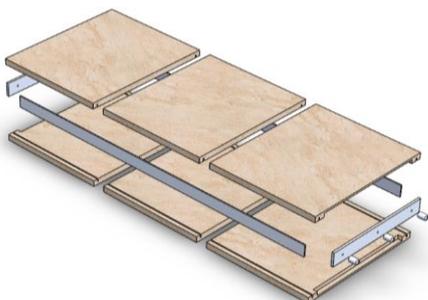


Figura 6-1 – Vista explodida do modelo geométrico utilizado na simulação numérica.



Figura 6-2 - Modelo geométrico utilizado na simulação numérica (dimensões do painel: 1500 x 600 x 120 [mm])

Ao nível dos resultados futuros obtidos da simulação numérica, é espectável que a omissão destes elementos não interfira com a validade do modelo global. De facto, a única variável em causa é a variação da carga de pré-esforço durante o ensaio. Todavia, uma das principais conclusões retiradas dos ensaios mecânicos foi o facto de não se verificarem variações significativas de carga de pré-esforço durante a sua realização, não justificando, portanto, a consideração desta variável.

6.3.2 Caracterização dos materiais

As propriedades físicas e mecânicas, consideradas no modelo numérico, referentes às várias *parts* encontram-se indicadas na Tabela 6-1. Tal como foi especificado no ponto 4.5 do capítulo 4, foram realizados ensaios de caracterização físico-mecânica ao tipo de pedra natural utilizado, considerando-se a resistência à tração igual à resistência à flexão obtida face à tipologia de ensaio adotada. Para os restantes elementos, dado que se tratam de materiais correntes, o *software* de simulação possui, por defeito, as informações necessárias à sua caracterização.

Tabela 6-1 – Propriedades dos materiais consideradas na simulação numérica.

Elemento	Material	Módulo de Young	Módulo de cisalhamento	Densidade aparente	Resistência à tração	Resistência à compressão	Tensão de cedência
---	---	GPa	GPa	Kg/m ³	MPa	Kg/cm ²	MPa
Placas de pedra	Pedra Calcária "Branco Real"	30*	---	2278	7,7	530	---
Barriletes	Aço S235	200	79,3	7850	400,0	---	250,00
Placa de ancoragem	Aço S235	200	79,3	7850	400,0	---	250,00
Guias de alumínio	Alumínio de liga 1060	69	25,5	2700	27,6	---	27,57

*retirado de [23]

6.3.3 Definição da malha

A definição da malha é um dos processos mais importantes na criação de um modelo em elementos finitos, na medida em que, consoante o tipo e a densidade de malha utilizados, os campos de tensões e deslocamentos obtidos podem variar.

O *software* de elementos finitos utilizado permite a criação de três tipos de malha distintos: *Standard mesh*, *Curvature-based mesh* e *Blended curvature-based mesh*. Cada um destes tipos de malha apresenta um algoritmo específico. Para esta dissertação utilizou-se uma malha do tipo *Curvature-based mesh* para a definição do modelo numérico, explicando-se, de seguida, detalhadamente o seu método de criação e as razões pelas quais se optou por este tipo de malha.

6.3.3.1 Curvature based mesh

No processo de criação da *Curvature based mesh*, tendo em conta os valores máximo e mínimo para a dimensão global do elemento introduzidos pelo utilizador e o número mínimo de elementos que se

pretende que caibam num “círculo hipotético”, o *software* determina automaticamente a dimensão global de cada elemento.

Caso o número mínimo de elementos for oito, tal como se indica na Figura 6-3, no semicírculo vermelho têm que caber pelo menos dois elementos. Aumentando este valor para o dobro, o número mínimo de elementos no semicírculo vermelho terá que ser quatro, desde que o valor h esteja entre os valores mínimo e máximo indicados pelo utilizador.

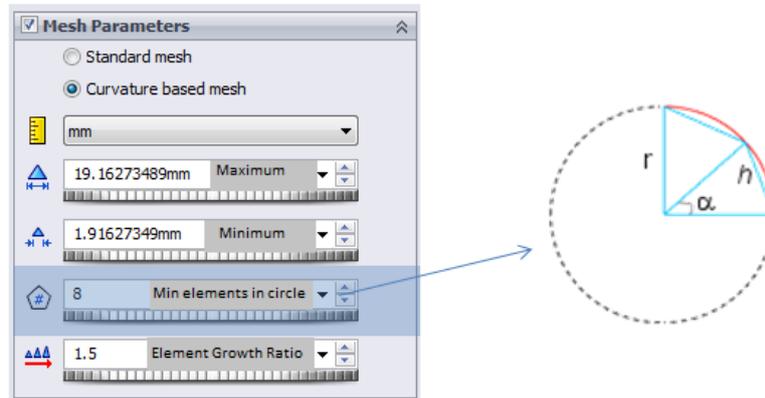


Figura 6-3 - Parâmetros para a definição da *Curvature based mesh*.

Globalmente, a capacidade de definição dos valores máximo e mínimo permite uma melhor adaptação da malha à geometria das *parts* quando a curvatura é considerável. Particularizando para este modelo, optou-se pela *Curvature based mesh* dado que este tipo de malha exige um menor controlo em modelos que apresentem uma grande variância dimensional entre as várias *parts*. De facto, a *Curvature-based mesh* não apresenta controlo nos vértices, ou seja, os vértices inseridos em círculos adjacentes não necessitam de coincidir, adequando-se assim para modelos com *parts* diferentes nos quais se utiliza malhas incompatíveis [55].

Os parâmetros considerados para a criação desta malha encontram-se apresentados na Tabela 6-3. Os valores máximo e mínimo para a dimensão global do elemento foram sugeridos pelo *software* para um nível de refinamento elevado.

Mesh Details	
Study name	Ensaio flexão (-Default)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature-based mesh
Jacobian points	4 points
Mesh Control	Defined
Max Element Size	41.8093 mm
Min Element Size	8.36185 mm
Mesh quality	High
Total nodes	244450
Total elements	145199
Maximum Aspect Ratio	31.828
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	94.7
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.663
% of distorted elements (Jacobian)	0
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:16

Figura 6-4 - Propriedades consideradas para a malha do tipo *Curvature-based mesh*

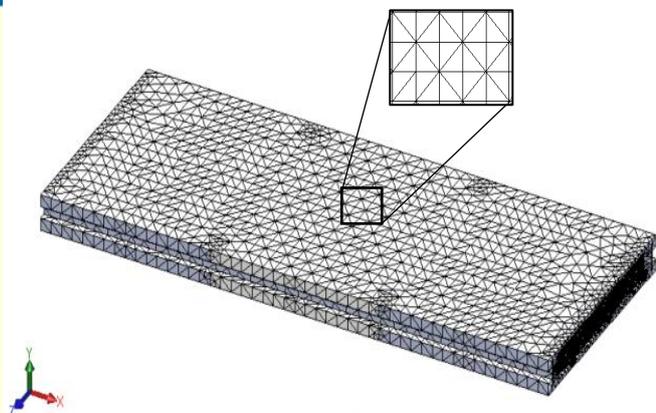


Figura 6-5 - Representação do modelo numérico utilizando uma malha do tipo *Curvature-based mesh*

6.3.3.2 Refinamento da malha

As zonas de aplicação de carga correspondem a zonas de grande concentração de tensões, pelo que, tendo em vista um maior rigor na obtenção do campo de tensões, é fundamental um refinamento da malha nestas regiões. Existem diversos tipos de refinamento, tendo-se optado, para este modelo numérico, por um refinamento do *tipo h*, permanecendo constante a ordem polinomial das funções de interpolação dos elementos, enquanto que o tamanho dos mesmos é reduzido. Nesse sentido, no *software* de elementos finitos, utilizando a ferramenta *Mesh Control*, definiu-se um refinamento da malha em três *parts*: barriletes, placa de ancoragem e nas placas de pedra de extremidade.

Para o caso dos barriletes, correspondendo estes aos elementos de aplicação de carga e sendo estes os elementos de menor dimensão do modelo, é de extrema importância o seu refinamento. Assim, considerou-se uma malha com uma dimensão global de elemento de 2 mm em todas as faces exteriores do elemento. Este refinamento é apresentado na Figura 6-6.

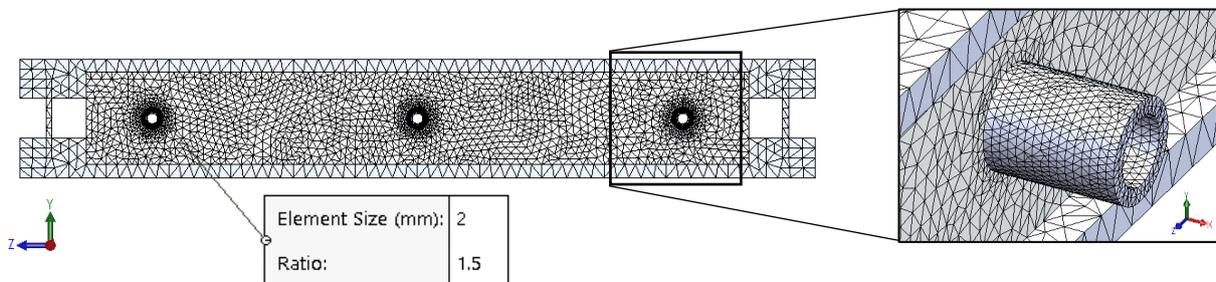


Figura 6-6 - Refinamento h nos barriletes utilizando *Curvature-based mesh*.

O refinamento das placas de ancoragem, representado na Figura 6-7, é essencial dado que estes elementos são responsáveis pela transmissão de cargas entre os barriletes e as placas de pedra. Deste modo, considerou-se uma malha com uma dimensão global de elemento de 5 mm em todas as faces exteriores do elemento. Nas zonas de contacto com os barriletes, o *software* reduz automaticamente a dimensão dos elementos de malha para 2 mm, assegurando-se a correta transmissão de tensões.

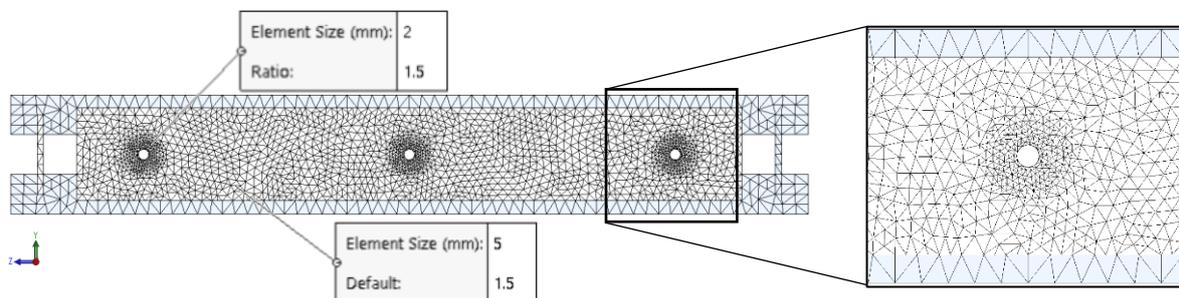


Figura 6-7 - Refinamento h nas placas de ancoragem utilizando *Curvature-based mesh*.

Ao nível das superfícies dos sulcos das pedras de topo que se encontram em contacto com as placas de ancoragem considerou-se, igualmente, um refinamento da malha, representado na Figura 6-8, dado que correspondem a zonas de elevada concentração de tensões. Em conformidade com o refinamento

de malha considerado para a placa de ancoragem, considerou-se uma malha com uma dimensão global de elemento de 5 mm.

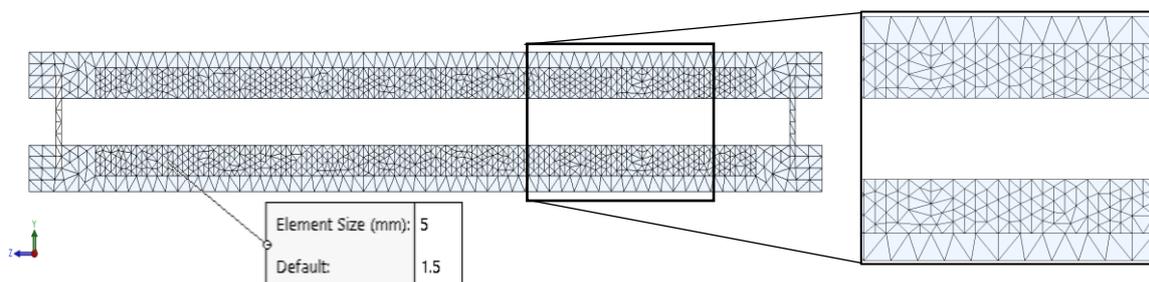


Figura 6-8 - Refinamento h no sulco das placas de pedra utilizando uma *Curvature-based mesh*.

6.3.4 Sistema de carregamento

6.3.4.1 Carga de pré-esforço

A carga de pré-esforço a aplicar no painel está dependente das ações de serviço, tais como do vento, do sismo e do seu peso próprio. Nesse sentido, para cada aplicação é necessário efetuar-se um cálculo prévio das ações de dimensionamento para se determinar o nível de pré-esforço a introduzir. Contudo, no âmbito desta dissertação, e tendo como único objetivo a presente validação do modelo numérico, não serão realizados cálculos de dimensionamento para nenhum caso particular, utilizando-se na simulação a carga medida no modelo real através dos *sg* instalados nos varões. De salientar que, a aplicação da carga de pré-esforço utilizando uma bomba manual dificulta a precisão na aplicação da carga, pelo que, para a validação do modelo, o método acima indicado será o mais rigoroso.

A carga de pré-esforço é aplicada na superfície exterior dos barriletes de uma das extremidades do painel, tal como se representa na Figura 6-9. Através da introdução das condições de fronteira na extremidade oposta, apresentadas mais adiante, a carga de pré-esforço será repartida de igual forma.

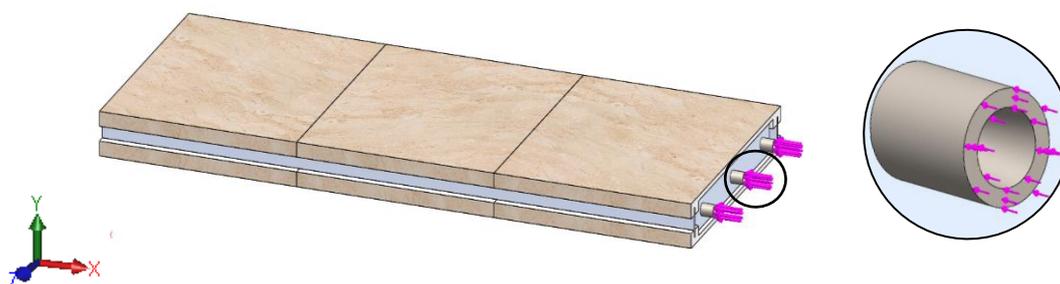


Figura 6-9 - Aplicação das cargas de pré-esforço na superfície exterior dos barriletes. (Dimensões do painel: 1500 x 600 x 120 mm)

6.3.4.2 Cargas de vão

Tendo como objetivo simular o ensaio à flexão, com momento constante, são aplicadas duas cargas lineares, nas interfaces pedra-pedra, no pano de pedra superior. Durante a simulação aplicam-se diferentes patamares de carga, registando-se a deformada no pano de pedra inferior, para cada um

deles, no centro do painel, nas interfaces pedra-pedra e a meio vão das placas de extremidade. Adicionalmente às cargas de vão, considera-se o peso próprio do painel através da consideração da aceleração da gravidade ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$). Este sistema de carregamento encontra-se representando na Figura 6-10.

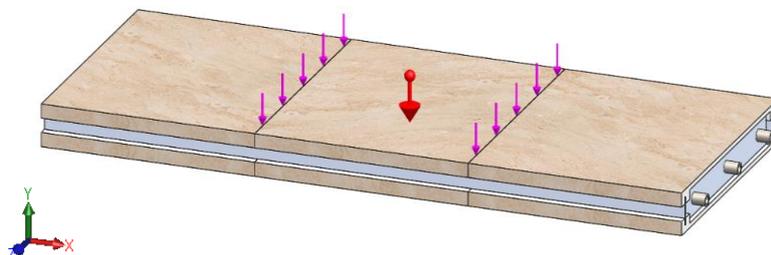


Figura 6-10 - Cargas de vão (Dimensões do painel: 1500 x 600 x 120 mm)

6.3.5 Condições de fronteira

À semelhança do que acontece com a criação da malha, a definição das condições de fronteira constitui uma das etapas mais relevantes na conceção de um modelo de elementos finitos. Pretendendo-se simular o ensaio de flexão do painel, as restrições introduzidas no modelo devem ir de encontro com o caso em estudo. Nesse sentido, introduziu-se as seguintes restrições ao modelo numérico:

1. Em cada um dos pontos pertencentes à superfície exterior dos barriletes, da extremidade oposta àquela em que é aplicada a carga de pré-esforço, considerou-se como nulo o deslocamento segundo as três direções principais ($u_x = 0$; $u_y = 0$; $u_z = 0$). Através desta restrição é criada uma reação de apoio de intensidade igual e de sentido oposto à carga de pré-esforço, criando-se o seu efeito de compressão característico.

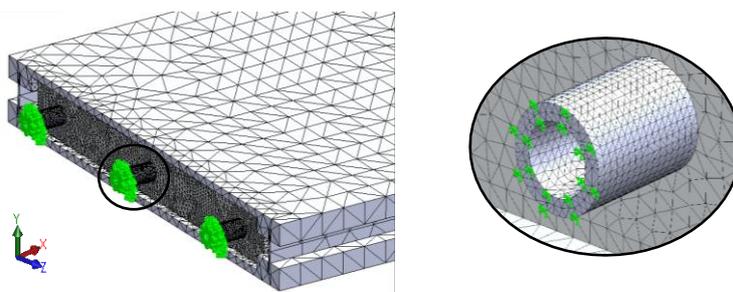


Figura 6-11 - Condições de fronteira: apoio fixo.

2. Em ambas as extremidades do painel introduziu-se um apoio móvel segundo a aresta de extremidade inferior, restringindo-se unicamente o deslocamento vertical ($u_y = 0$). Deste modo, o deslocamento segundo x, desde o ponto de aplicação da carga até à extremidade oposta, é permitido.

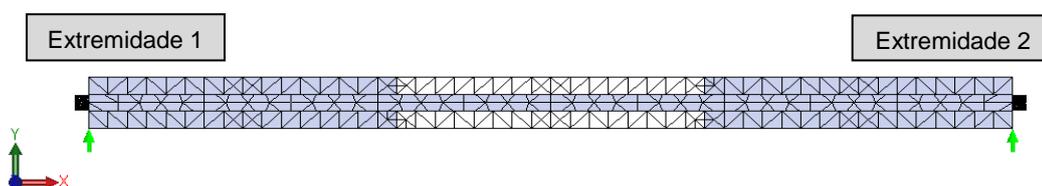


Figura 6-12 - Condições de fronteira: apoios móveis.

6.3.6 Definição do contacto

O último estágio deste estudo prende-se com a definição do contacto entre as diferentes *parts*. As opções de contacto são definidas no software segundo diferentes níveis: *Global Contact*, *Component Contact* e *Contact Set*. De notar que os três tipos principais de contacto passíveis de serem considerados já foram previamente apresentados no ponto 6.2.2.

O *Global Contact* encontra-se pré-definido pelo *software* como *bonded* e define as condições de contacto global entre as várias *parts*. O *Component Contact* funciona como uma restrição de contacto, sobrepondo-se à condição inicialmente definida no *Global Contact*. Esta opção permite individualizar o contacto entre duas *parts*. Por último, o *Contact Set* utiliza-se caso exista uma exceção ao nível dos elementos de contacto (faces, linhas ou nós) entre duas *parts*, sobrepondo a condição previamente estabelecida no *Global Contact* e/ou no *Component Contact*.

Nos modelos numéricos todas as *parts* têm que apresentar alguma condição de fixação, quer seja pela definição de condições de apoio na sua fronteira quer seja pela consideração de condições de contacto do tipo *bonded* a outros elementos que possuam alguma restrição de deslocamento e/ou rotação. Nesse sentido, a definição das condições de contacto deve ser iniciada pelas *parts* que apresentam condições de apoio na sua fronteira, ou seja, pelas placas de pedra de extremidade do pano inferior e pelos barriletes presentes na extremidade 1, indicada na Figura 6-12, para este caso.

O contacto entre a placa de ancoragem e os barriletes acima indicados pode, por simplicidade do modelo numérico, assumir-se como *bonded*, não sendo necessário introduzir-se alguma condição adicional. No caso real, embora não exista qualquer tipo de ligação entre estes elementos, as forças de reação promovem o monolitismo entre estes, pelo que este tipo de contacto é o que mais se adequa.

A ligação entre as placas de pedra do pano inferior, para além das forças de pré-esforço, é realizada por intermédio de uma ligação química utilizando uma resina epóxi, pelo que, um contacto do tipo *bonded* será o que melhor simula esta situação. O mesmo acontece com as placas do pano superior, contudo, pelo facto de estas não apresentarem nenhuma condição de fronteira, o contacto entre estas e a placa de ancoragem da extremidade 1 terá que ser do tipo *bonded*.

O contacto entre a placa de ancoragem da extremidade 2, indicada na Figura 6-12, e a placa de pedra de extremidade do pano superior terá, igualmente, que ser do tipo *bonded*, dado que a placa de ancoragem não possui nenhuma condição de fronteira. Pela mesma razão, o contacto entre esta e os barriletes da extremidade 2 será também do tipo *bonded*.

O contacto entre as placas de ancoragem e o pano de pedra inferior foi definido como *no penetration* dado que ambas as *parts* já possuem condições de fixação. Por último, a definição do contacto entre as guias metálicas e as placas de pedra constitui a condição de contacto mais complexa deste modelo. Durante a assemblagem dos painéis, não se introduziu qualquer tipo de ligação entre estes elementos, o que se refletiu nos ensaios mecânicos pelo destacamento do pano de pedra inferior. Deste modo, a condição mais racional seria a consideração de um contacto do tipo *no penetration* entre os panos de pedra e as guias metálicas. No entanto, para que o modelo funcione, é necessário que as guias

metálicas se encontram fixas, quer seja pela introdução de um apoio fixo em alguma das faces destes elementos ou pela consideração de um contacto de tipo *bonded* a um dos panos de pedra. Desse modo, considerou-se, respetivamente, um contacto do tipo *bonded* e do tipo *no penetration* entre as guias metálicas nas faces de contacto com o pano de pedra superior e inferior.

6.4 Apresentação de resultados e validação do modelo numérico

Tendo em vista a validação do modelo numérico adotaram-se as seguintes metodologias:

- 1) Obtenção dos gráficos carga-deslocamento relativos à simulação do ensaio à flexão aos painéis. Para tal, procede-se à aplicação de cargas de vão normalizadas e ao registo do respetivo deslocamento nos cinco pontos de medição considerados nos ensaios mecânicos. Por último, traçando uma linha de regressão linear para cada um dos pontos de medição, obtêm-se os valores teóricos de rigidez, os quais serão posteriormente comparados com os valores de rigidez experimentais.
- 2) Observação e análise crítica dos campos de deslocamento e tensão resultantes da simulação do ensaio de flexão ao painel considerando a carga de rotura registada nos ensaios mecânicos.

6.4.1 Metodologia 1

Para a definição dos gráficos carga-deslocamento referentes à simulação dos ensaios dos painéis à flexão, dado que o *software* não permite a sua obtenção de forma automática, consideram-se diferentes patamares de carga de vão, intervalados em 500 N (painéis 1 e 2) ou 250 N (painel 3), até se atingir a carga de rotura verificada nos ensaios mecânicos. Para cada patamar regista-se o respetivo deslocamento nos cinco pontos de medição previamente mencionados. Na Figura 6-13 apresenta-se e quantifica-se sistema de carregamento utilizado para cada um dos painéis.

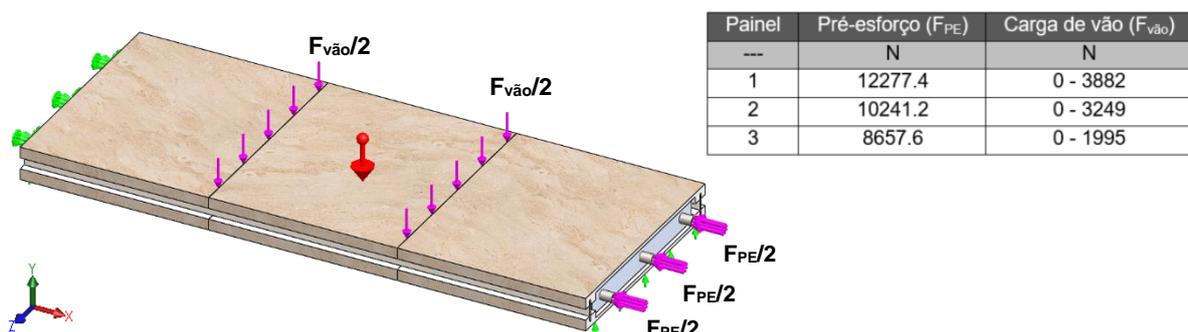


Figura 6-13 - Sistema de carregamento para a simulação ao painel 1 (Dimensões do painel: 1500 x 600 x 120 mm).

De forma a viabilizar uma análise comparativa com os modelos reais, face ao deslocamento segundo y induzido pela carga de pré-esforço para um carregamento de vão nulo, é necessária a consideração de deslocamentos relativos, nos quais não se contabilize este incremento. De facto, dada a entropia que esta etapa introduziria no procedimento de assemblagem, não se procedeu ao registo do deslocamento segundo o eixo y aquando da aplicação do pré-esforço. Assim, considerando um sistema

de carregamento composto, de forma exclusiva, pelas cargas de pré-esforço e pelo peso próprio do painel, simulou-se o modelo numérico e anotaram-se os deslocamentos nos vários pontos de medição.

Nas Tabelas D-1, D-2 e D-3, presentes no Anexo D, apresentam-se, respetivamente, os valores de deslocamento registados para os painéis 1, 2 e 3, considerando o sistema de cargas descrito. Por sua vez, nas Figuras 6-14, 6-15 e 6-16 representam-se, respetivamente, os gráficos carga-deslocamento relativo referentes às simulações dos painéis 1, 2 e 3. De modo a facilitar uma análise visual comparativa entre gráficos adotou-se a mesma escala de eixos para os três casos. Juntamente com os gráficos listam-se as equações e os coeficientes de determinação relativos às linhas de regressão linear traçadas para cada ponto de medição.

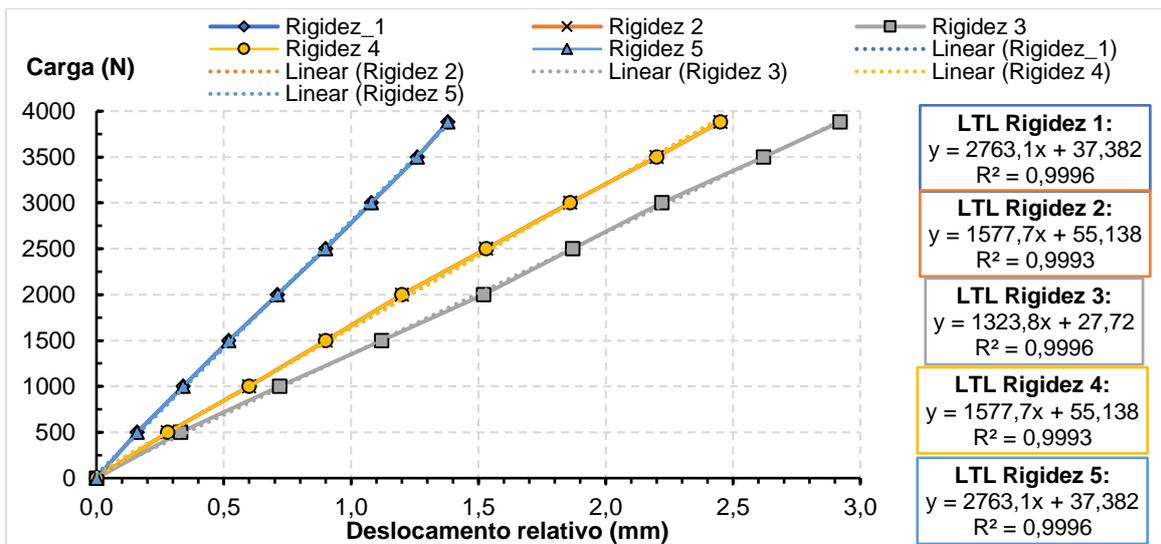


Figura 6-14 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação do ensaio à flexão do painel 1.

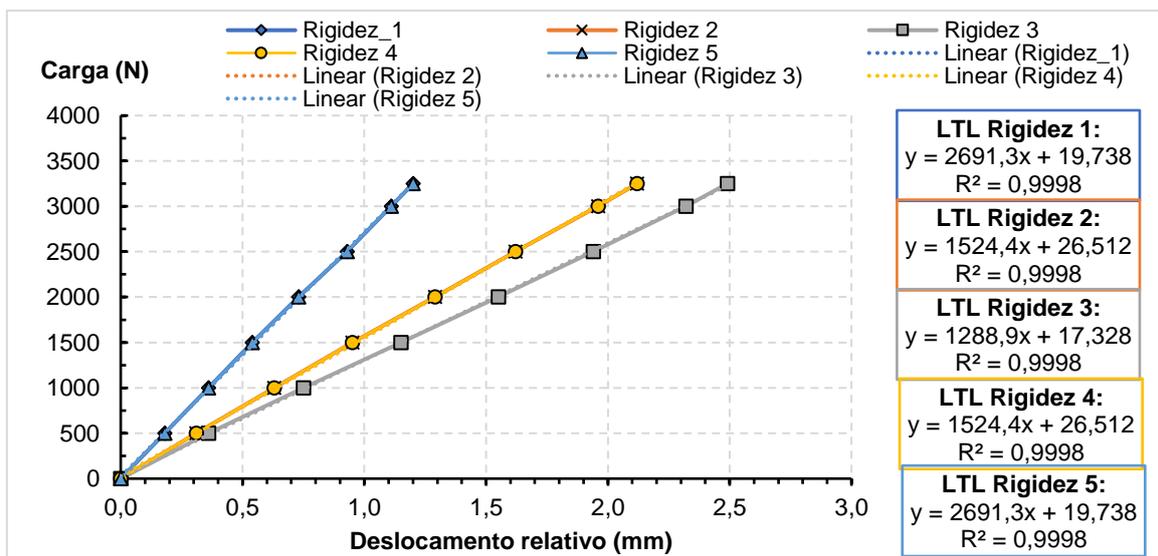


Figura 6-15 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação do ensaio à flexão do painel 2.

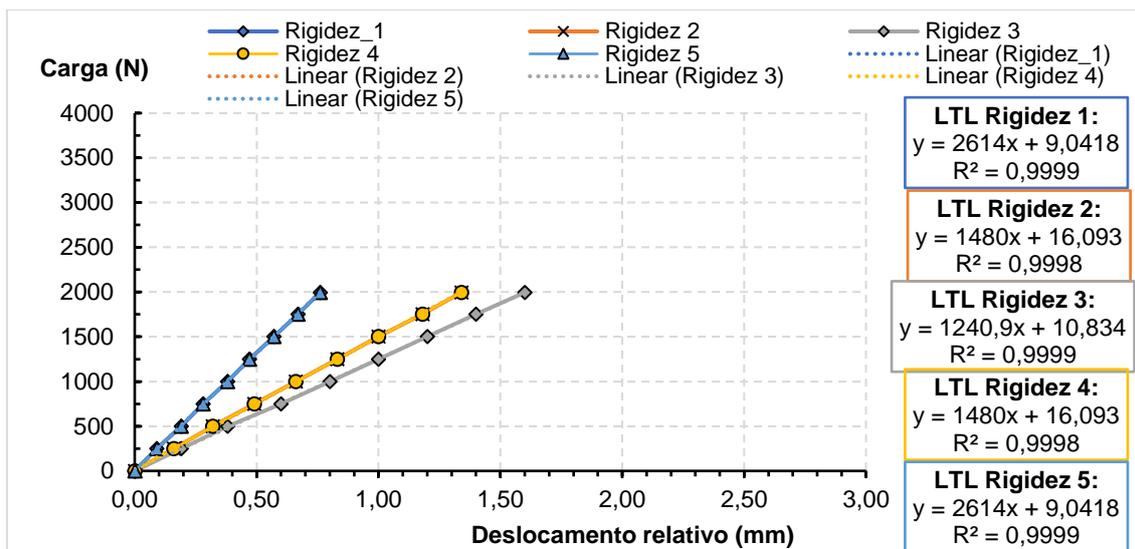


Figura 6-16 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação do ensaio à flexão do painel 3.

Observando os gráficos conclui-se que os modelos apresentam um comportamento marcadamente linear, semelhante ao verificado experimentalmente durante o regime elástico, tendo-se registado o valor máximo de deslocamento na secção de meio vão. Tratando-se de um modelo numérico com dois eixos de simetria seria espectável que secções simétricas apresentem o mesmo deslocamento, tal como se verifica para os pares 1-5 e 2-4, identificadas na Figura 5-39. Através de uma análise comparativa entre os três gráficos verifica-se que, numericamente, quanto maior for a carga de pré-esforço maior será a rigidez global do painel, aspeto este igualmente verificado por via experimental.

Contrariamente ao realizado na análise aos resultados obtidos nos ensaios mecânicos, dada a linearidade característica do gráfico carga-deslocamento relativo, não é necessária a delimitação do gráfico para a determinação de uma estimativa da rigidez dos painéis. De forma geral, os valores de deslocamento obtidos na simulação numérica são ligeiramente superiores aos verificados nos ensaios mecânicos, pelo que, por oposição, os valores experimentais de rigidez são superiores.

Adicionalmente às restrições assumidas na elaboração do modelo numérico, tais como as condições de fronteira e de contacto, a consideração de um módulo de elasticidade aproximado, face à inviabilidade de realização de ensaios de validação experimental nesse âmbito, condiciona os resultados obtidos para os campos de tensão e deformação. Contudo, é possível concluir que o modelo numérico estima de forma credível e conservativa o comportamento e os deslocamentos característicos do ensaio à flexão aos painéis.

6.4.2 Metodologia 2

No Anexo D representam-se os campos de deslocamento, segundo o eixo y, e tensão, segundo o eixo x, referentes à simulação dos ensaios à flexão para os três painéis. Estes campos são os que possuem uma maior relevância no âmbito do estudo em curso.

Em concordância com os ensaios mecânicos verificou-se o deslocamento máximo na secção de meio vão do pano de pedra inferior em todos os ensaios, observando-se igualmente o destacamento deste

último relativamente ao plano do painel, tal como se exemplifica na Figura 6-17 através de uma comparação visual entre os modelos real e numérico do painel 1. De notar que o deslocamento máximo representado nas Figuras D-1, D-3 e D-5, presentes no Anexo D, contempla, para além do deslocamento incitado pelas cargas de vão, a parcela relativa à ação do pré-esforço. Nesse sentido, nas Tabelas D-1, D-3 e D-5, presentes no Anexo D, procura-se quantificar a contribuição do peso próprio, do pré-esforço e da carga de vão para o deslocamento total registado.

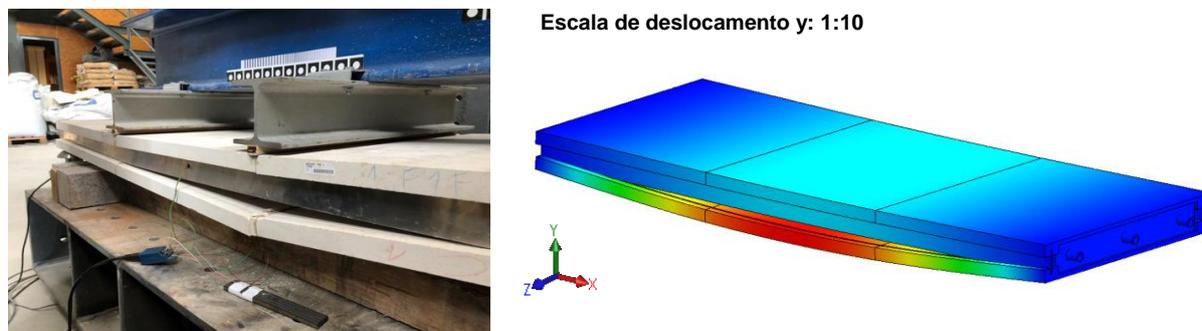


Figura 6-17 - Destacamento do pano de pedra inferior nos modelos real e numérico relativos do painel 1.

Nos ensaios mecânicos verificaram-se dois modos de rotura distintos: rotura na pedra e rotura na interface de colagem entre as placas. Nas Figuras D-3, D-6 e D-9, presentes no Anexo D, indicam-se as tensões segundo o eixo x, relativas à carga de rotura, registadas a meio-vão da placa central e nas interfaces de colagem na face exterior do pano de pedra inferior dos painéis 1, 2 e 3, respetivamente. As tensões máximas nos três pontos de medição registaram-se para o painel 1 face à aplicação de um nível de carregamento superior comparativamente com os restantes.

Comparando as tensões registadas nos painéis 1 e 2 observa-se que, embora as obtidas para o painel 1 sejam superiores, essa diferença é pouco considerável. Nesse sentido, importa perceber-se se esta se justifica por uma colagem deficiente, face à colocação de uma quantidade reduzida de resina epóxi ou devido a uma perda prévia de viscosidade da resina justificada pelo tempo excessivo empregue nessa etapa, ou se o patamar de resistência à tração da resina foi atingido. Segundo indicação do fabricante a resina apresenta um intervalo de resistência à tração de 20-30 MPa, sendo, portanto, bastante superior à gama de valores em estudo. Nesse sentido, tendo-se utilizado a mesma quantidade de resina para os três painéis, conclui-se que a capacidade adesiva da resina epóxi no painel 2 foi comprometida pelo período de tempo excessivo desde a sua preparação até à sua colocação. Por analogia, conclui-se que esta também terá sido a razão para os problemas de colagem registados no painel 3. De qualquer modo, futuramente, seria relevante a realização de um ensaio de carácter experimental tendo em vista a validação desta propriedade para futuras iterações do sistema.

Relativamente ao ensaio ao painel 1, tal como foi anteriormente referido, atingiu-se o limite de resistência à tração na pedra. Nos ensaios de caracterização físico-mecânica realizados ao tipo de pedra natural utilizado, determinou-se um valor mínimo esperado de resistência à flexão de 7.70 MPa, superior à tensão máxima verificada no modelo numérico de 6.14 MPa. Contudo, um aspeto a ter em conta neste tipo de pedra natural é a sua porosidade. De facto, este calcário apresenta uma porosidade elevada e, como consequência, é espectável que as suas propriedades mecânicas sofram uma redução

considerável para níveis de humidade superiores. Nesse sentido, não tendo ocorrido uma secagem prévia aos ensaios mecânicos, é possível que, no momento de teste, as placas não estivessem totalmente secas, afetando, portanto, esta propriedade mecânica.

Adicionalmente, as variáveis inerentes ao sistema de ensaio, tais como os desníveis entre placas, a heterogeneidade característica da pedra natural ou a assimetria nas deformações, induzem estados de tensão de corte que incitam igualmente a redução da resistência do material, fatores estes que não se refletem no modelo numérico.

7. SOLUÇÃO OTIMIZADA

7.1 Otimizações ao Sistema Base

A última etapa do processo de desenvolvimento de produto prende-se com a otimização do sistema global tendo por base todos os estudos e ensaios realizados. Para a definição desta solução estabeleceram-se como premissas alguns requisitos estruturais e funcionais não considerados na conceção da solução base.

A interligação entre os painéis constitui um dos principais desafios desta etapa, tendo em vista a possibilidade de um conjunto de painéis ser fixado a uma parede de betão ou a uma alvenaria pré-existente, atuando como elemento de revestimento, ou de substituir uma parede de alvenaria, atuando como elemento de parede. O método de fixação dos painéis constitui, igualmente, um fator a considerar no processo de modelação geométrica da solução otimizada.

Assim, de modo a revestir um piso comum, com um pé direito de 3,0 m, definiu-se como dimensões nominais de painel: 3,00 m x 1,00 m x 0,12 m. De notar que, à semelhança do que acontecia com a solução base, este sistema deverá respeitar todos os requisitos técnicos e funcionais inerentes a um elemento de parede exterior, possuir um elevado valor estético e demonstrar características físicas, mecânicas e de durabilidade compatíveis com as várias aplicações pretendidas.

Embora na sua génese se trate de um sistema modular com soluções normalizadas, cada obra terá as suas particularidades associadas ao sistema estrutural utilizado e à estereotomia da fachada. Assim sendo, torna-se fundamental que se possa contemplar o máximo de adaptabilidade e escalabilidade, ao nível produtivo, de modo a ir ao encontro das necessidades específicas de cada aplicação.

7.2 Placas de pedra

O processo produtivo das placas de pedra do sistema base pressupunha a realização de duas ranhuras, para encaixe das guias de alumínio, junto às extremidades laterais das placas, e a realização de um sulco, para encaixe da placa de ancoragem nas placas de extremidade. De forma a reduzir a quantidade de pedra desbastada optou-se por uma simplificação da geometria das placas. Nesse sentido, omitindo as ranhuras laterais, substitui-se o sulco de extremidade por três cavidades que viabilizam a aplicação do pré-esforço e permitem a ocultação dos elementos de pré-esforço.

As dimensões das placas de pedra são incrementadas para que, tal como já foi referido, um único painel possa ser utilizado para revestir um piso comum. Desta forma, as placas apresentam como dimensões *standard*: 1,00 m x 1,00 m x 0,03 m. A placa de topo e a placa interior encontram-se representadas nas Figuras 7.1 e 7.2, respetivamente.

À semelhança do sistema anterior, a ligação entre as placas de pedra realiza-se por intermédio da ação do pré-esforço e por colagem, utilizando uma resina epóxi, na interface de contacto entre as placas.



Figura 7-1 - Placa de topo
(Dimensões: 100 x 100 x 30 mm)



Figura 7-2 - Placa interior
(Dimensões: 100 x 100 x 30 mm)

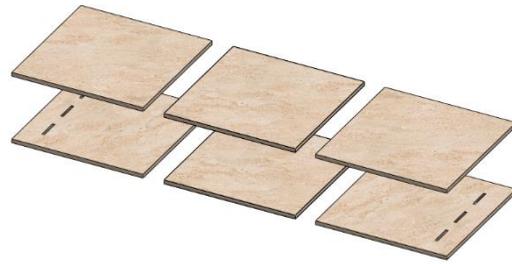


Figura 7-3 - Esquemática global - placas de pedra

7.3 Pré-esforço

O princípio de pré-esforço é idêntico ao utilizado na solução base (*conjunto cunha + barrilete + varão de aço*), diferenciando-se unicamente no modo de transferência das tensões. Para a transmissão da carga de pré-esforço concebeu-se uma peça metálica que, através do encaixe nas ranhuras das placas de pedra, induz um estado de compressão no painel aquando da aplicação do pré-esforço. Para a sua conceção foram soldadas 3 chapas metálicas a um perfil UPN 60, realizando-se três furações para permitir a passagem dos varões de pré-esforço.

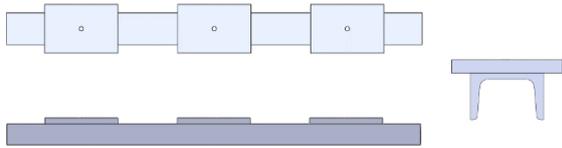


Figura 7-4 – Placa de ancoragem: 1 - vista de topo;
2 – alçado principal; 3 - vista lateral.

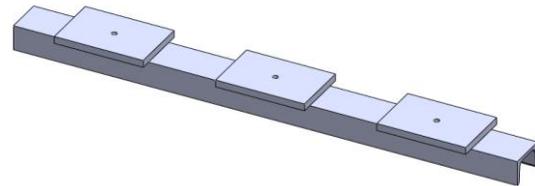


Figura 7-5 - Placa de ancoragem: vista 3D isométrica

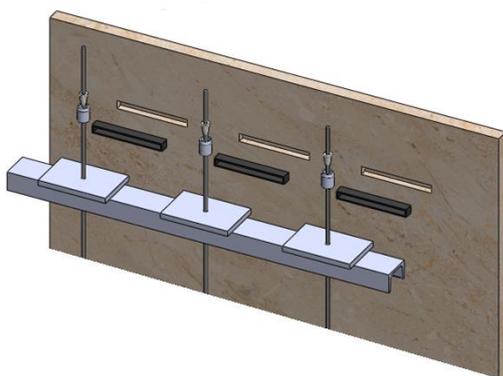


Figura 7-6 – Vista Explodida do sistema de pré-esforço

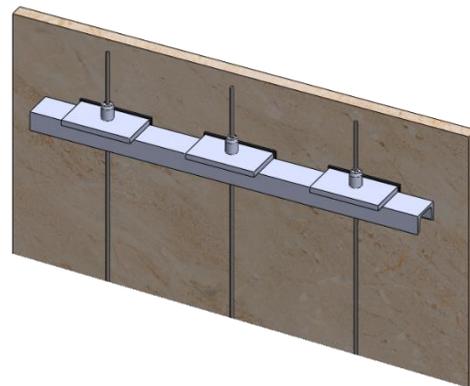


Figura 7-7 - Sistema de aplicação do pré-esforço

Na interface de contacto entre as chapas metálicas e as ranhuras das placas de pedra introduzem-se capas de ABS, visíveis na Figura 7-6, de forma a preservar as arestas da pedra, uma vez que se reduz o atrito entre as chapas e a pedra. Desta forma, a carga de pré-esforço aplicada a cada varão é repartida pelos dois panos de pedra.

7.4 Aro de periferia

Tendo como principal função garantir a estanquidade do sistema através da ligação entre painéis adjacentes, incorporou-se, na solução otimizada, um aro de periferia, cuja geometria facilita o encaixe entre painéis através de um sistema do tipo macho-fêmea. Visando uma maior valorização estética da solução final, procurou-se conceber um aro que, aquando da junção de vários painéis, permaneça oculto, ficando visível, de forma exclusiva, a pedra natural.

Fatores como a celeridade e a facilidade de montagem, o custo e o nível de complexidade do processo de fabrico do aro de periferia constituem, igualmente, aspetos preponderantes a ter em conta na definição e na modelação geométrica deste sistema. Contudo, a *performance* em serviço da solução final será, indispensavelmente, o fator mais relevante, não podendo ser comprometida em detrimento da utilização de materiais de qualidade inferior.

Nesse sentido, definiu-se um sistema de aro composto por quatro perfis, o qual se encontra representado na Figura 7-8. A ligação entre os perfis e as placas de pedra realiza-se por colagem com resina epóxi das faces laterais dos perfis na periferia das placas, tal como se esquematiza nas Figuras 7-9 e 7-10, utilizando-se uma resina epóxi.

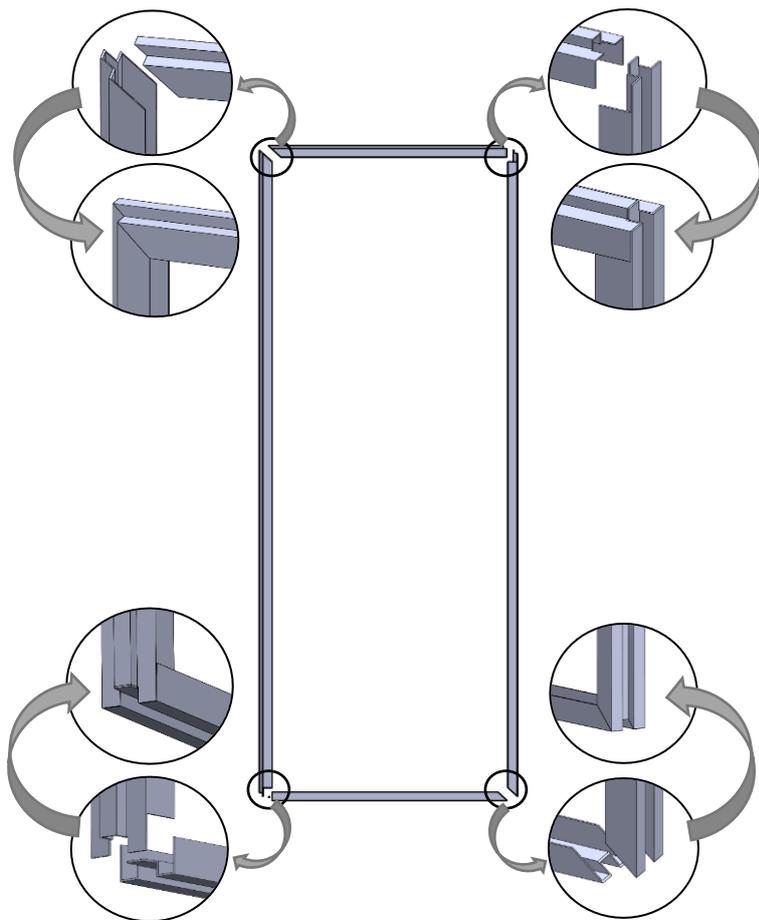


Figura 7-8 – Aro de periferia



Figura 7-9 - Exploded View do sistema



Figura 7-10 – Colagem do aro de periferia nas placas de pedra

Todos os materiais utilizados em obras de engenharia estão sujeitos a algum tipo de degradação ambiental. Contudo, com a evolução das tecnologias de construção procura-se utilizar materiais que apresentam maiores níveis de resistência face aos agentes atmosféricos. Deste modo, definindo como principais premissas a resistência à corrosão e a integridade estrutural do sistema de fachada e parede, optou-se pela utilização de perfis pultrudidos.

Os perfis pultrudidos, compostos por fibras e resinas termoendurecidas, são produzidos segundo um processo de fabrico contínuo, denominado de pultrusão. Neste processo, as fibras, embebidas na resina, são puxadas através de uma fieira com a forma da secção desejada. O aquecimento da fieira provoca a polimerização do compósito durante a passagem no seu interior. A percentagem de fibra varia entre os 40% e os 80%, consoante a aplicação pretendida para o perfil.

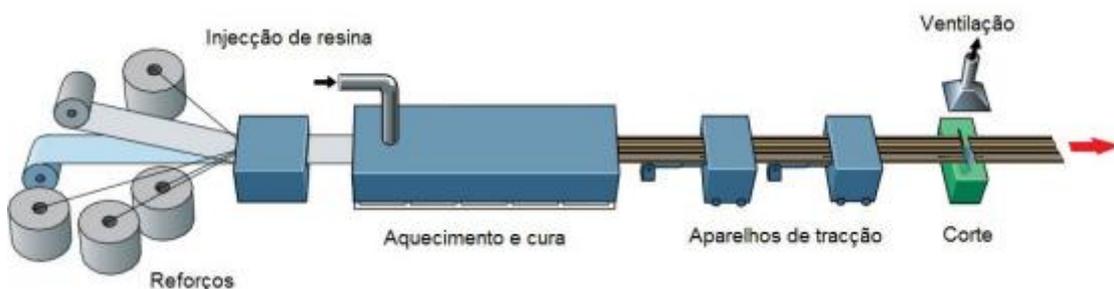


Figura 7-11 - Processo de fabrico de perfis pultrudidos (Fonte: adaptado de Hi-Six – Projects & Foundation Solutions, 2009)

Este tipo de material destaca-se pela grande resistência à corrosão, baixa densidade (cerca de quatro vezes mais leve que o aço) e excelente relação resistência/peso. Para além disso, conjuga um excelente isolamento elétrico, térmico e magnético à estabilidade dimensional, traduzindo-se num coeficiente de dilatação térmico baixo.

7.5 Sistema de fixação

A definição do sistema de fixação corresponde a uma das etapas mais complexas e morosas do processo de definição geométrica do painel. A necessidade de conceber um sistema que cumpra com os requisitos estruturais exigidos e, simultaneamente, não comprometa o aspeto final da solução, incrementa a importância desta etapa.

Existem diversas soluções de fixação disponíveis no mercado, pelo que, optando por um sistema de fixação pontual com ancoragens, procurou-se identificar uma solução compatível com o sistema em estudo. Tratando-se de uma solução de revestimento de fachada é importante que a solução de fixação utilizada permita eventuais ajustes geométricos face a potenciais desníveis na subestrutura portante.

Tendo em conta os aspetos acima indicados, adaptou-se uma solução de ancoragem para sistemas de fachada ventilada da empresa Halfen®. Esta solução, representada nas Figuras 7-12 e 7-13, permite o ajuste geométrico segundo os planos paralelo e perpendicular relativamente ao plano de fixação.

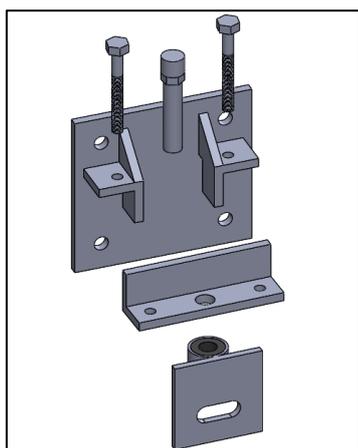


Figura 7-12 – Vista Explodida do sistema de fixação

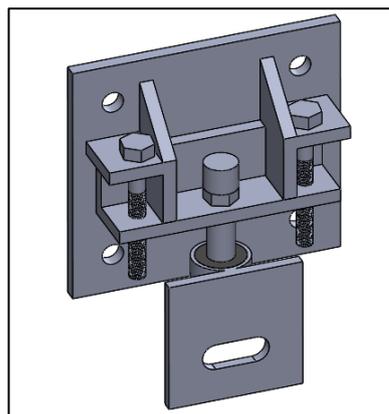


Figura 7-13 - Sistema de fixação

Para a ligação entre o painel e a ancoragem foi necessário proceder-se a pequenos reajustes na geometria das placas de ancoragem. Nesse sentido, foi soldado um cilindro vazado roscado às placas de ancoragem laterais, de modo a viabilizar a introdução de um parafuso M20, o qual assegura a ligação ao sistema de fixação. Na Figura 7-14 representa-se esta ligação.

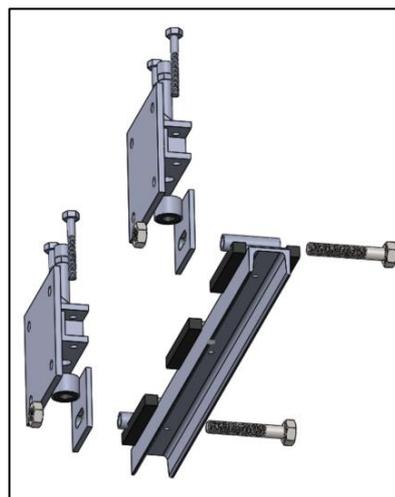
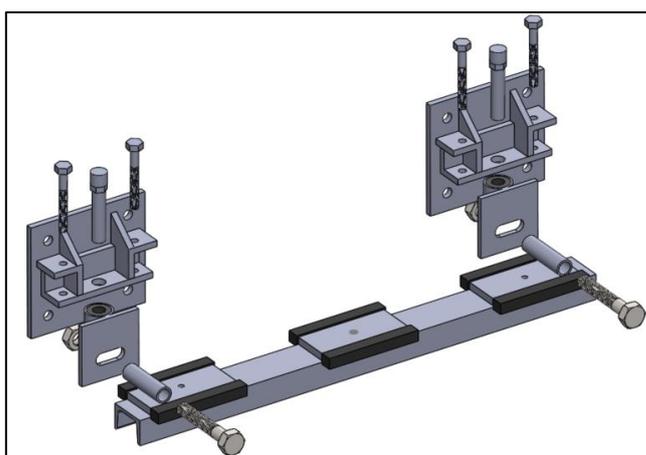


Figura 7-14 – Vista Explodida da ligação entre o sistema de fixação e a placa de ancoragem

Ao nível das placas de pedra é necessária a realização de furações no pano secundário, nas placas de topo, para permitir a passagem dos parafusos. Deste modo, é possível ocultar este sistema de fixação, não se comprometendo o aspeto final da solução de revestimento.

O sistema de fixação de uma solução normalizada é composto por quatro ancoragens, estando, as duas ancoragens inferiores, encarregues de suportar o peso próprio dos painéis. As ancoragens superiores, por sua vez, impedem o deslocamento transversal do painel relativamente ao plano de fixação.

8. Considerações Finais

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma solução prefabricada de painel de fachada e parede em pedra natural pré-esforçada. O seu estudo incluiu, de forma prévia, uma recolha teórica relativa aos seguintes tópicos:

- Contextualização histórica de soluções prefabricadas;
- Identificação de exemplos de aplicação de soluções prefabricadas em Portugal;
- Apresentação de uma solução prefabricada de fachada em pedra natural;
- Evolução histórica do elemento *fachada* em Portugal;
- Identificação das exigências funcionais requeridas a elementos de fachada e parede;
- Análise global ao setor da pedra natural;
- Princípios de classificação da pedra natural e de rochas ornamentais;

De modo a iniciar-se o desenvolvimento desta solução de painel procedeu-se à realização de ensaios laboratoriais para caracterização das matérias-primas. Nesse sentido, realizaram-se ensaios experimentais de índole físico-mecânica a um tipo de pedra calcária e um ensaio à tração aos varões de aço.

O sistema de revestimento teve como fundamento uma solução de painel (Painel *PFSP*) desenvolvida no âmbito de um projeto I&DT, funcionando, portando, como uma otimização relativamente a esse sistema. O seu processo de definição iniciou com a modelação geométrica de uma nova solução base, a qual viria a ser testada, posteriormente, mecanicamente à flexão. Para a montagem dos painéis de ensaio foram necessárias a implementação de um *setup* de assemblagem e a definição de um procedimento de montagem tendo em vista um maior rigor experimental.

Um aspeto que se tornou preponderante durante o processo de assemblagem, mais especificamente aquando da aplicação das cargas de pré-esforço, foi a instalação de extensometria elétrica (*strain gauges*) nos varões de aço. De facto, esta sensorização permitiu a monitorização dos deslocamentos e a obtenção de uma estimativa credível das perdas de cargas instantâneas e, a longo prazo, das perdas de carga diferidas.

Como resultado dos ensaios mecânicos retiraram-se conclusões importantes no que diz respeito a futuras iterações do sistema base, e dados de ensaio que, posteriormente, permitiram uma validação do modelo numérico. Para a criação deste último utilizaram-se os resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização das matérias-primas.

A validação do modelo numérico foi verificada utilizando duas metodologias diferentes: 1. Comparação dos valores experimentais de rigidez com os valores obtidos da simulação numérica; 2. Análise dos campos de deslocamento e tensão obtidos e comparação entre os valores de deslocamento experimentais e teóricos.

A última etapa do processo de desenvolvimento correspondeu à otimização do sistema de painel tendo por base os *outputs* teóricos retirados dos ensaios experimentais, relativos às debilidades mecânicas apresentadas pelo painel, e a inclusão de requisitos estruturais e funcionais não considerados na conceção da solução base. Nesse contexto, foi realizada uma modelação geométrica, na qual se inclui uma solução normalizada para o sistema de fixação.

Para uma futura abordagem, será interessante uma continuação do desenvolvimento da solução otimizada a qual poderá ser caracterizada utilizando uma metodologia idêntica à adotada para a solução base. Deve ser, contudo, dada uma ênfase especial à *performance* energética do painel. Este modelo de painel assume a existência de uma camada de isolamento térmico e acústico no seu interior, pelo que, a realização de ensaios que caracterizem este sistema do ponto de vista energético apresenta uma importância acrescida tendo em vista a conceção de uma solução de revestimento eco eficiente. Adicionalmente, seria igualmente interessante a realização de uma análise comparativa entre esta solução e as soluções de alvenaria tradicionais, tendo por base uma perspetiva custo-benefício (custo de matérias-primas, processo produtivo, custos de construção, manutenção e demolição).

Referências Bibliográficas

- [1] *Dicionário Priberam da Língua Portuguesa*. Disponível em: <https://www.priberam.pt/dlpo/prefabrica%C3%A7%C3%A3o>, acessado a 02/03/2018.
- [2] Branco, J. P., *Algumas notas sobre prefabricação*, LNEC, Lisboa, 1997.
- [3] Santiago, A., *Pré-fabricação aberta e pré-fabricação fechada*, 3ª Jornadas de Estruturas de Betão, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1999.
- [4] Greven, H., Baldauf, A., *Introdução à coordenação modular da construção no Brasil*, ANTAC, Porto Alegre, 2007.
- [5] Peterson, F., *Homes in the Heartland: Ballon frame farmhouses of the upper Midwest*, University of Minnesota Press, 2008.
- [6] Fernandes, A., *Habitação (coletiva) modular pré-fabricada: considerações, origens e desenvolvimento*, Tese de Mestrado em Arquitetura, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2009.
- [6*] Entrevista ao Arquiteto Reaes Pinto presente na tese [6]
- [7] Samúdio, J., *Revestimento de fachadas com painéis reforçados com fibra de vidro (GRC)*, Tese de Mestrado em Arquitetura, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.
- [8] Palermo, H., *O Sistema Dom-ino*, Tese de Mestrado em Arquitetura. Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- [9] Pinto, A., *A pré-fabricação na indústria da construção*, 1º Congresso nacional da indústria da pré-fabricação em betão, pp 59-68, ANIPC, Porto, 2000.
- [10] Valentim, P., *Espaço Plurifuncional*, Tese de Mestrado em Design de Interiores, Escola Superior de Artes e Design de Matosinhos, Matosinhos, 2016.
- [11] Techbuilt Renovation, <http://www.techbuiltrenovation.com/the-techbuilt-house/>, acessado a 05/08/2017.
- [12] Sousa, R., Sousa, H., Silva, F., Sousa, F., *Fachadas de edifícios*, Lidel – Edições Técnicas Lda., 2016.
- [13] Mondragão, L., *Sistemas Industrializados de betão armado para a construção de armazéns*, Tese de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [14] Camposinhos, R., Lello, J., *Prestressed Façade Stone Panels*, Politécnico do Porto, Porto, 2010.
- [15] Costa, J., *Construção prefabricada – análise da utilização da prefabricação nas várias etapas do processo construtivo*, Tese de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [16] Allen, E., *How buildings work*, 2nd edition, Oxford University Press, New York, USA, 1995.
- [17] Silva, A., Brito, J., Gaspar, P., *Methodologies for service life prediction of buildings*, Springer, Lisboa, 2016.
- [18] Kirkham, R. J., Boussabaine, H., *Forecasting the residual service life of NHS hospital buildings: a stochastic approach*, Construction Management and Economics, 23, nº5, pp 521–529, 2005.
- [19] Cunha, M., *Desenvolvimento de um sistema construtivo para fachadas ventiladas*, Tese de Mestrado em Construção de Edifícios, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2006.

- [20] Sousa, F., *Fachadas ventiladas em edifícios. Tipificação de soluções e interpretação do funcionamento conjunto suporte/acabamento*, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [21] Brito, M., *Reabilitação de fachadas e o seu contributo energético. Caso de estudo de um hotel em Lisboa*, Dissertação de Mestrado em Arquitetura, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.
- [22] Camposinhos, R., *Fachadas-cortina pressurizáveis*, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2005.
- [23] Mendonça, P., *Habitar sob uma segunda pele. Estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados*, Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2005.
- [24] Silva, S., *A Sustentabilidade e o Conforto das Construções*, Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, 2009.
- [25] Schittich, C., *In Detail-Building Skins-Concepts, Layers, Materials*, Birkhäuser / Detail, Munique, 2001.
- [26] Pinto, A., *Manual da Pedra Natural para a Arquitectura*, Cedintec – Centro para Desenvolvimento Tecnológico, Lisboa, 2006.
- [27] Costa, M., *Manual de Controlo de Qualidade para Revestimentos de Fachadas em Pedra*, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2011.
- [28] Press, F., Siever, R., *Understanding Earth*, 3rd edition, W. H. Freeman and Company, New York, 2002.
- [29] Silva, A., *Previsão da vida útil de revestimentos de pedra natural de paredes*, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.
- [30] Camposinhos, R., *Revestimentos em Pedra Natural com Fixação Mecânica – Dimensionamento e projecto*, 1^a edição, Edições Silabo, Lisboa, 2009.
- [31] Carvalho, J. M., Lisboa, J., Moura, A., Carvalho, C., Sousa, L., Leite, M., *Evaluation of the Portuguese Ornamental Stone Resources*, Key Engineering Materials, 548, n^o1, pp. 3-9, 2013.
- [32] Langer, W. H., *Construction Materials, Dimension Stone*, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 1st edition, Elsevier, Oxford, 2001.
- [33] Moura, A. C., *Granitos e rochas similares de Portugal*, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 2000.
- [34] Carvalho, J. M., Carvalho, C., Lisboa, J., Moura, A., Leite, M., *Portuguese ornamental stones*, Global Stone Congress 2012, Borba, Portugal, 2012.

- [35] Carvalho, J., Henriques, P., Falé, P., Luís, G., *Decision criteria for the exploitation of ornamental-stone deposits: Application to the marbles of the Portuguese Estremoz Anticline*, Rock Mechanics and Mining Sciences, 45, pp 1306-1319, 2008.
- [36] Carvalho, J. M., *Rochas Ornamentais do Maciço Calcário Estremenho: Breve Caracterização dos Recursos, dos Centros de Produção e Delimitação Preliminar de Áreas Potenciais*, Boletim de Minas nº 47, volume 1, pp. 5–26, 2012.
- [37] Carvalho, J. M., *Calcários Ornamentais e Industriais da Área de Pé da Pedreira (Maciço Calcário Estremenho) – Carta de Aptidão*, Estudos, Notas e Trabalhos do Instituto Geológico e Mineiro, volume 39, pp 71-89, 1997.
- [38] Coelho, C., *Estudo preliminar da pedreira romana e outros vestígios identificados no sítio arqueológico de Colaride*, Revista Portuguesa de Arqueologia, volume 5, nº2, pp 277-323, 2002.
- [39] Martins, R., *Estudo dos calcários ornamentais da região de Pero-Pinheiro*, Estudos Notas e Trabalhos do Serv. Fom. Min. 33, pp. 105-163. Porto, 1991.
- [40] Búrcio, M., *Controle Estrutural da Localização de Pedreiras de Esteios de Xisto para Vinha em Vila Nova de Foz Côa*, Universidade de Évora, Évora, 2004.
- [41] Rodrigues, F., Correia, A., *Guia Técnico – Sector da pedra natural*, INETI – Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Lisboa, 2001.
- [42] Cruz, I., *Avaliação de volume de blocos e sua correlação com a recuperação em pedreiras de mármore*, Dissertação de mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2015.
- [43] González-Penella, V., Berenguer, F., Verdú, J., López, C., López-Buendía, A., Navarro, J., *Energy Analysis in the Natural Stone Manufacturing Process*, Global Stone Congress, 2013.
- [44] Gama, H. B., *Principais patologias associadas ao uso de rochas ornamentais*, I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais / II Seminário das Rochas Ornamentais do Nordeste, Anais do Museu Geológico da Bahia, pp 20-23, 2001.
- [45] Ferrari, C., *O uso das rochas ornamentais em projetos urbanos e arquitetônicos*, Curso integrado no I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais / II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, Anais do Museu Geológico da Bahia, pp 143-145, 2001.
- [46] Masters, L.W., *Prediction of service life of building materials and components*, Materials and Structures, volume 19, issue 6, pp 417-422, 1986.
- [47] Nakamura, J., *Projeto de fachadas* – Revista Técnica 92, 2004
- [48] Vidal, F., *Aproveitamento de rejeitos de rochas ornamentais e de revestimentos*, CETEM/MCT, 2014.

- [49] Amaral, P., Camposinhos, R., Lello, J., *Natural Stone Testing Specification for a New Facade System*, Key Engineering Materials, 2013.
- [50] Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Universidade Federal de Santa Catarina. Aplicação de extensómetros. [Online] [Consultado em 02/02/2018]: <http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Aplicac%CC%A7a%CC%83o.pdf>
- [51] Martins, R., *Circuito para leitura e aquisição de dados de um sensor químico*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores, Universidade do Minho, 2013.
- [52] Ferreira, L., *Painéis de Fachada Prefabricados em Betão Eco-Eficiente Ativado Alcalinamente. Formulação, Caracterização e Produção*, Dissertação elaborada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2015.
- [53] Azevedo, A., *Método dos Elementos Finitos*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [54] Gonçalves, N., *Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Matemática, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2007.
- [55] Curvature Based Mesh Advantages in SolidWorks Simulation, <https://hawkridgesys.com/blog/curvature-based-mesh-advantages>, acedido a 07/01/2018.

ANEXOS

ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DA PEDRA NATURAL

Tabela A-1 - Valores de massa volúmica aparente e de porosidade aberta obtidos nos ensaios.

Ref ^a Provete	Massa do Provete (g)			Volume (ml)		Massa Volúmica Aparente (Kg/m ³)		Porosidade Aberta (%)
	Seco	Imerso	Saturado	V ₀	V _b	Cálculo	Arredondado à Dezena	
21	275,740	169,508	294,650	18,95	125,39	2199	2200	15,1
22	274,986	169,004	293,158	18,21	124,40	2210	2210	14,6
23	282,540	174,218	300,306	17,80	126,34	2236	2240	14,1
24	277,532	171,408	294,550	17,05	123,39	2249	2250	13,8
25	277,628	171,420	297,282	19,69	126,11	2201	2200	15,6
Média (x)						2220	2220	14,7
Desvio-padrão (s)						22	23	0,7
Média + 2*Desvio Padrão						2263	2267	16,1
Média – 2*Desvio Padrão						2176	2173	13,2
Valor Máximo Esperado						2275	2278	16,6

Tabela A-2 - Valores obtidos para a absorção de água à pressão atmosférica.

Ref. ^a do Provete	Massa do Provete (g)					Absorção de Água à Pressão Atmosférica (%)
	Seco	Saturado				
		Data: 07/09/17 Hora: 12:00	Data: 08/09/17 Hora: 12:00	Data: Hora:	Final	
16	277,656	294,970	295,098	---	295,098	6,3
17	280,670	298,831	298,930	---	298,930	6,5
18	277,424	296,739	296,740	---	296,740	7,0
19	274,406	294,330	294,410	---	294,410	7,3
20	273,588	292,831	292,964	---	292,964	7,1

Tabela A-3 - Valor máximo esperado para a absorção de água à pressão atmosférica.

Média (x)	6,8
Desvio-padrão (s)	0,4
Média + 2Desvio Padrão	7,7
Média – 2*Desvio Padrão	6,0
Valor máximo esperado	7.9

Tabela A-4 - Registo da massa dos provetes para ensaio.

Ref. ^a Provete	1ª Pesagem		2ª Pesagem		3ª Pesagem	
	Data	Hora	Data	Hora	Data	Hora
	01/08/2017	15:00	02/08/2017	15:20	03/08/2017	15:00
	Massa (g)	Massa (g)	Diferença de massa (%)	Massa (g)	Diferença de massa (%)	
1	1869.750	1781.124	4.74	1781.110	0.00	
2	1896.230	1800.850	5.03	1800.740	0.01	
3	1832.240	1756.752	4.12	1756.741	0.00	
4	1779.540	1697.325	4.62	1697.282	0.00	
5	1773.460	1692.590	4.56	1692.540	0.00	
6	1827.550	1739.214	4.83	1739.212	0.00	
7	1790.610	1697.332	5.21	1697.252	0.00	
8	1818.160	1734.782	4.59	1734.768	0.00	
9	1848.900	1773.082	4.10	1773.022	0.00	
10	1792.060	1714.060	4.35	1714.044	0.00	

Tabela A-5 - Valores de resistência à flexão obtidos do ensaio.

Ref. ^a Provete	Dimensões (mm)		Vão (mm)	Força de rotura (N)		Rotura ao centro	Resistência à flexão (MPa)
	b	h	l	F	Arredondado à dezena		R _{tf}
1	50.34	50.05	250.0	2856.37	2860	ok	8.49
2	50.22	50.10	250.0	3032.052	3030	ok	9.02
3	50.38	50.09	250.0	2965.021	2970	ok	8.80
4	50.11	50.03	250.0	3201.22	3200	ok	9.57
5	50.02	49.98	250.0	2987.69	2990	ok	8.97
6	50.66	50.05	250.0	3008.27	3010	ok	8.89
7	50.01	49.96	250.0	2833.58	2830	ok	8.51
8	50.10	50.11	250.0	3445.81	3450	ok	10.27
9	50.69	50.04	250.0	3404.02	3400	ok	10.06
10	49.97	49.94	250.0	2651.05	2650	ok	7.98
	Média (\bar{x})			3038.57	3039		9.06
	Desvio-padrão (s)			236.68	236.70		0.68
	Média + 2Desvio Padrão			3511.93	3512.41		10.42
	Média - 2Desvio Padrão			2565.22	2565.59		7.70
	Valor Mínimo Esperado			2565.22	2565.59		7.70

ANEXO B – REGISTO DAS EXTENSÕES, DETERMINAÇÃO DAS CARGAS DE PRÉ-ESFORÇO E ESTIMATIVA DAS PERDAS DE PRÉ-ESFORÇO

Tabela B-1 - Registo das extensões e determinação das cargas e perdas de pré-esforço do painel 1.

Momento de medição	Strain	Área da secção do varão	Módulo de Young	Força	Perdas de PE	Perdas de PE acumuladas
	---	mm ²	MPa	N	%	%
Calibração	3,753E-07	38,5	199 853	2,9	---	---
Carga máxima de pré-esforço	1,987E-03	38,5	199 853	15288,7	---	---
Instante após o cesso do tracionamento	1,673E-03	38,5	199 853	12872,6	15,80	15,80
24h após o cesso do tracionamento	1,647E-03	38,5	199 853	12672,6	1,55	17,36
48h após o cesso do tracionamento	1,644E-03	38,5	199 853	12649,5	0,18	17,54
7 dias após o cesso do tracionamento	1,631E-03	38,5	199 853	12549,5	0,79	18,33
15 dias após o cesso do tracionamento	1,620E-03	38,5	199 853	12468,0	0,65	18,98
30 dias após o cesso do tracionamento	1,596E-03	38,5	199 853	12277,4	1,53	20,51

Tabela B-2 - Registo das extensões e determinação das cargas e perdas de pré-esforço do painel 2.

Momento de medição	Strain	Área da secção do varão	Módulo de Young	Força	Perdas de PE	Perdas de PE acumulada
	---	mm ²	MPa	N	%	%
Calibração	2,858E-07	38,5	199 853	2,2	---	---
Carga máxima de pré-esforço	1,683E-03	38,5	199 853	12949,6	---	---
Instante após o cesso do tracionamento	1,408E-03	38,5	199 853	10833,6	16,34	16,34
24h após o cesso do tracionamento	1,368E-03	38,5	199 853	10525,9	2,84	19,18
48h após o cesso do tracionamento	1,361E-03	38,5	199 853	10472,0	0,51	19,69
7 dias após o cesso do tracionamento	1,354E-03	38,5	199 853	10416,6	0,53	20,22
15 dias após o cesso do tracionamento	1,351E-03	38,5	199 853	10395,1	0,21	20,43
30 dias após o cesso do tracionamento	1,331E-03	38,5	199 853	10241,2	1,48	21,91

Tabela B-3 - Registo das extensões e determinação das cargas e perdas de pré-esforço do painel 3.

Momento de medição	Strain	Área da secção	Módulo de Young	Força	Perdas de PE	Perdas de PE acumulada
	---	mm ²	MPa	N	%	%
Calibração	3,264E-07	38,5	199 853	2,5	---	---
Carga máxima de pré-esforço	1,463E-03	38,5	199 853	11256,7	---	---
Instante após o cesso do tracionamento	1,191E-03	38,5	199 853	9160,7	18,62	18,62
24h após o cesso do tracionamento	1,154E-03	38,5	199 853	8882,1	3,04	21,66
48h após o cesso do tracionamento	1,143E-03	38,5	199 853	8794,6	0,99	22,65
7 dias após o cesso do tracionamento	1,137E-03	38,5	199 853	8751,6	0,49	23,14
15 dias após o cesso do tracionamento	1,135E-03	38,5	199 853	8735,4	0,19	23,32
30 dias após o cesso do tracionamento	1,125E-03	38,5	199 853	8657,6	0,89	24,21

ANEXO C – ENSAIOS MECÂNICOS

- PAINEL 1**

Tabela C-1 - Valores de deslocamento retirados do ensaio mecânico à flexão do painel 1.

PAINEL 1					
Atuador	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
N	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,08	0,16	0,21	0,18	0,12
1000	0,20	0,36	0,43	0,38	0,24
1500	0,31	0,58	0,69	0,60	0,37
2000	0,44	0,79	0,92	0,80	0,50
2500	0,56	0,99	1,17	1,01	0,61
3000	0,69	1,22	1,45	1,25	0,75
3500	0,86	1,50	1,77	1,52	0,91
3882	0,99	1,76	2,06	1,78	1,04

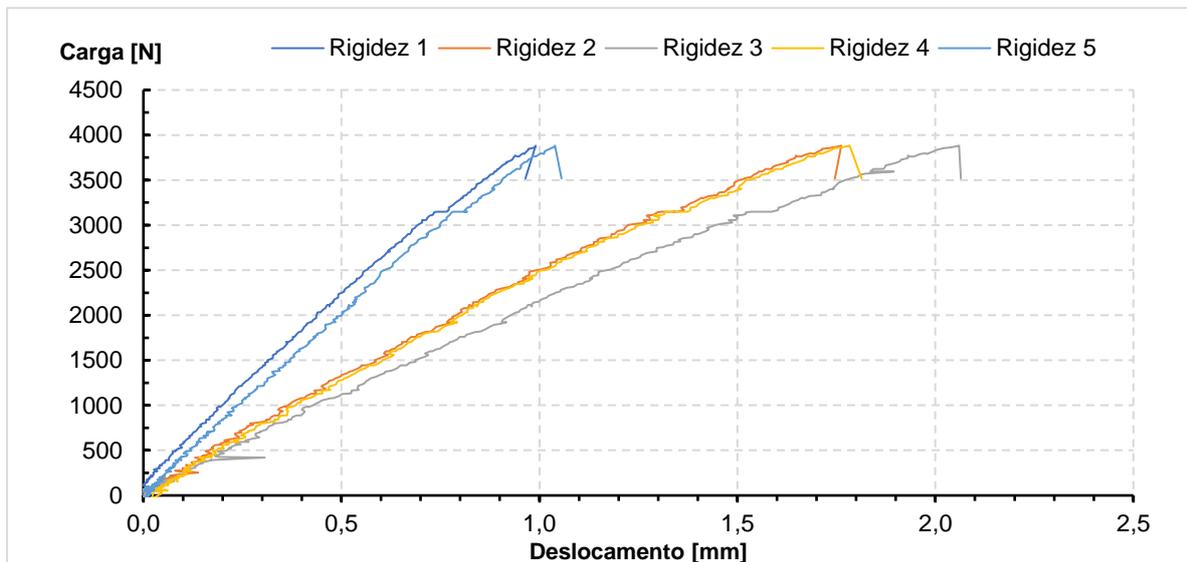


Figura C-1 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação ao ensaio à flexão do painel 1.

- PAINEL 2**

Tabela C-2 - Valores de deslocamento retirados do ensaio mecânico à flexão do painel 2.

PAINEL 2					
Atuador	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
N	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,21	0,28	0,42	0,33	0,17
1000	0,33	0,46	0,65	0,53	0,31
1500	0,46	0,69	0,91	0,78	0,44
2000	0,60	0,92	1,18	1,01	0,58
2500	0,74	1,15	1,46	1,26	0,70
3000	0,90	1,42	1,76	1,52	0,86
3249	1,02	1,63	2,01	1,74	0,98

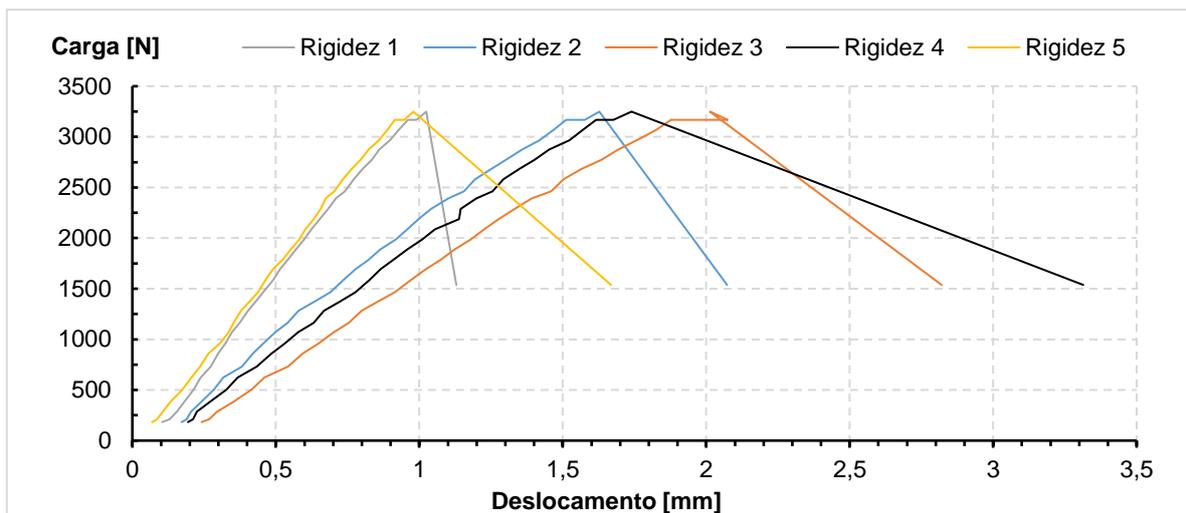


Figura C-2 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação ao ensaio à flexão do painel 2.

- **PAINEL 3**

Tabela C-3 - Valores de deslocamento retirados do ensaio mecânico à flexão do painel 3.

PAINEL 3					
Atuador	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
N	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,05	0,08	0,10	0,07	0,07
500	0,14	0,22	0,26	0,21	0,13
750	0,19	0,30	0,36	0,30	0,17
1000	0,28	0,45	0,53	0,46	0,25
1250	0,37	0,61	0,72	0,63	0,35
1500	0,48	0,79	0,93	0,81	0,45
1750	0,78	1,36	1,64	1,45	0,79
1995	0,94	1,67	2,03	1,79	0,98

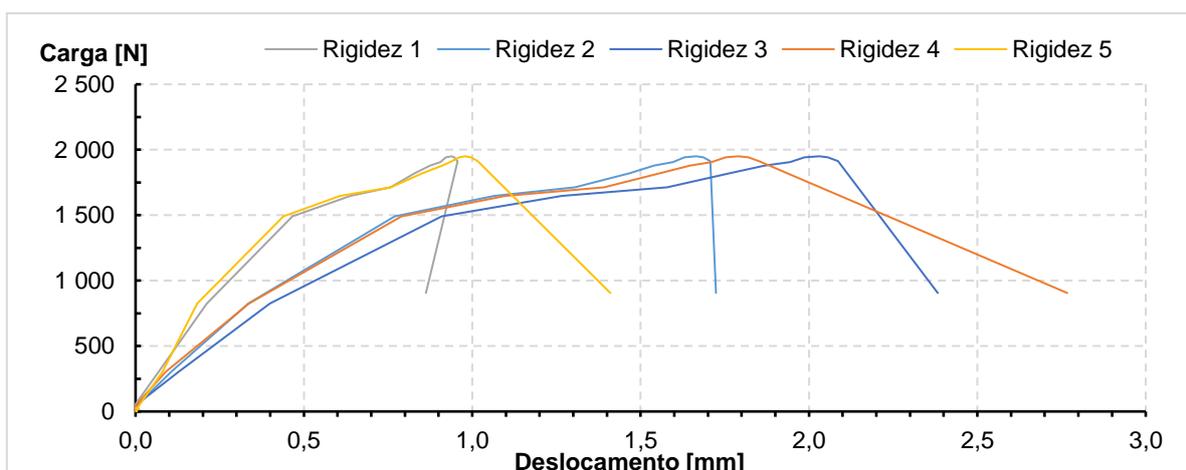


Figura C-3 - Gráfico carga-deslocamento relativo à simulação ao ensaio à flexão do painel 3.

ANEXO D – SIMULAÇÃO NUMÉRICA

- **PAINEL 1**

Tabela D-1 - Valores de deslocamento registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 1.

PAINEL 1						
Fvão	FPE	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
N	N	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,0	0,32	0,55	0,62	0,55	0,32
0	12277,4	0,23	0,40	0,48	0,40	0,23
500	12277,4	0,39	0,68	0,81	0,68	0,39
1000	12277,4	0,57	1,00	1,20	1,00	0,57
1500	12277,4	0,75	1,30	1,60	1,30	0,75
2000	12277,4	0,94	1,60	2,00	1,60	0,94
2500	12277,4	1,13	1,93	2,35	1,93	1,13
3000	12277,4	1,31	2,26	2,70	2,26	1,31
3500	12277,4	1,49	2,60	3,10	2,6	1,49
3882	12277,4	1,61	2,85	3,40	2,85	1,61

Tabela D-2 - Valores de deslocamento relativo registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 1.

PAINEL 1						
Fvão	FPE	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
N	N	mm	mm	mm	mm	mm
0	12277,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	12277,4	0,16	0,28	0,33	0,28	0,16
1000	12277,4	0,34	0,60	0,72	0,60	0,34
1500	12277,4	0,52	0,90	1,12	0,90	0,52
2000	12277,4	0,71	1,20	1,52	1,20	0,71
2500	12277,4	0,90	1,53	1,87	1,53	0,90
3000	12277,4	1,08	1,86	2,22	1,86	1,08
3500	12277,4	1,26	2,20	2,62	2,20	1,26
3882	12277,4	1,38	2,45	2,92	2,45	1,38

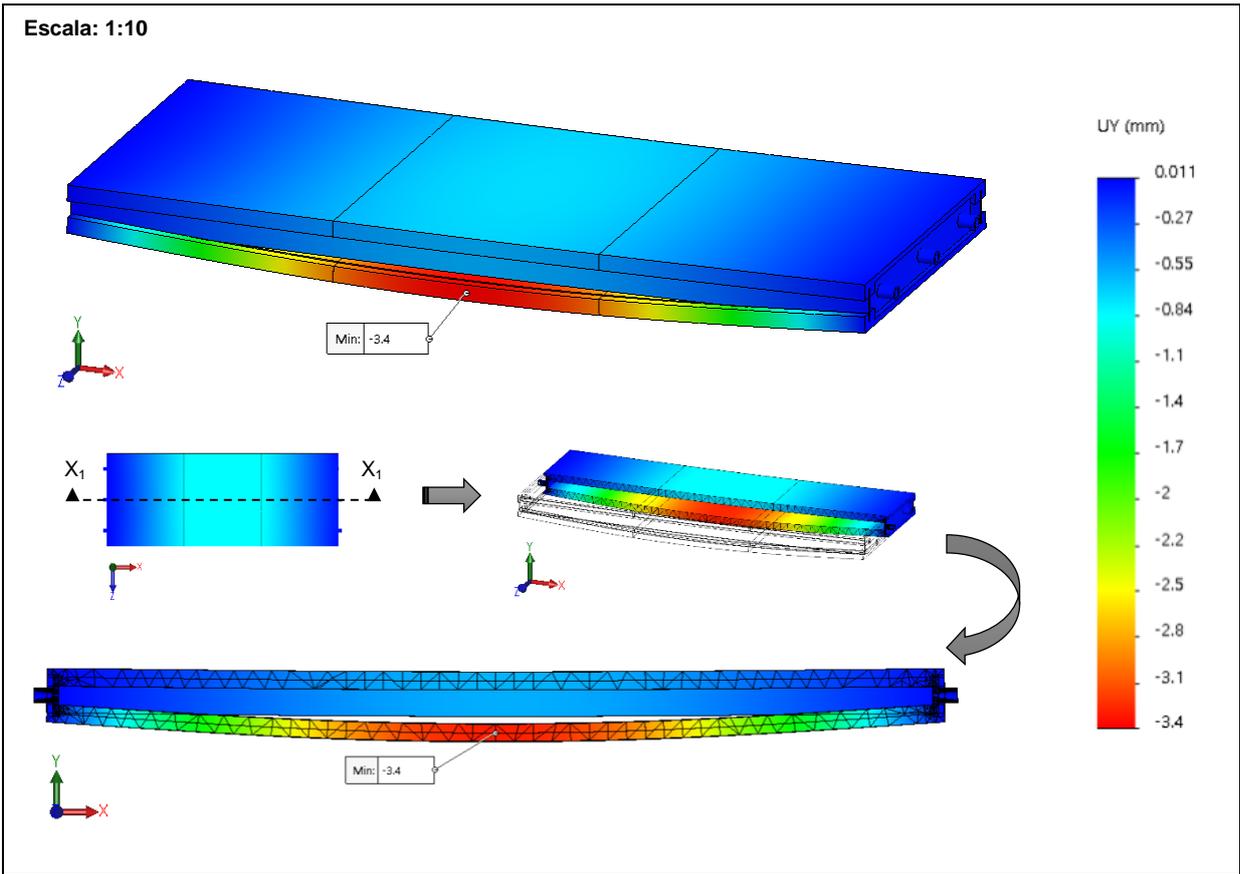


Figura D-1 - Campo de deslocamento segundo o eixo y referente ao ensaio à flexão do painel 1.

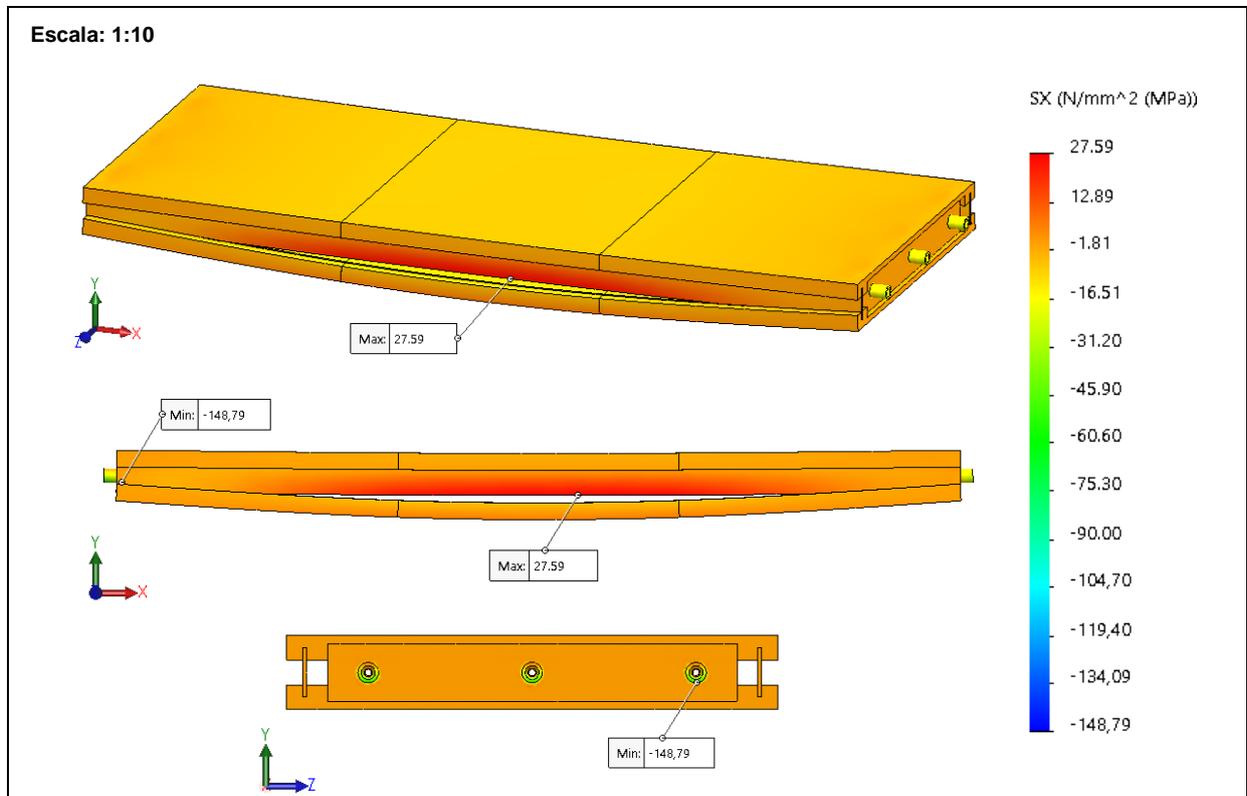


Figura D-2 - Campo de tensão segundo o eixo x referente ao ensaio à flexão do painel 1.

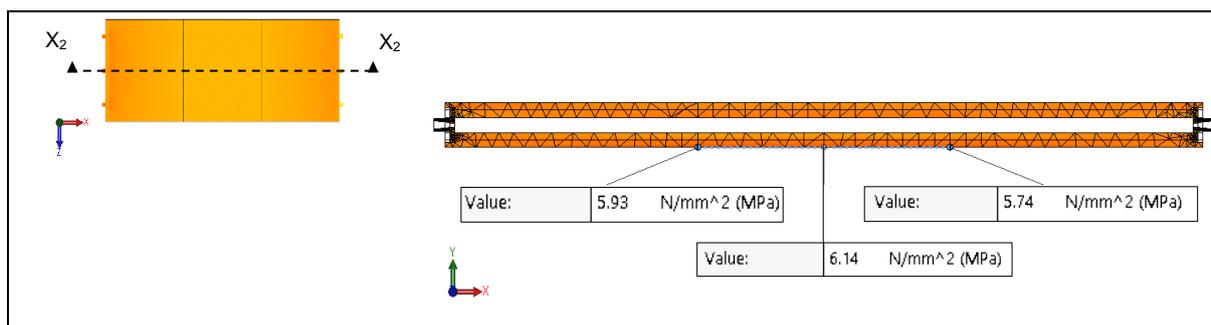


Figura D-3 - Campo de tensão segundo o eixo x no plano x-y definido pelo plano de corte X_2 - X_2 .

- **PAINEL 2**

Tabela D-3 - Valores de deslocamento registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 2.

PAINEL 2						
$F_{v\tilde{a}o}$	F_{PE}	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
N	N	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,0	0,32	0,55	0,62	0,55	0,32
0	10241,2	0,24	0,41	0,50	0,41	0,24
500	10241,2	0,42	0,72	0,86	0,72	0,42
1000	10241,2	0,60	1,04	1,25	1,04	0,60
1500	10241,2	0,78	1,36	1,65	1,36	0,78
2000	10241,2	0,97	1,70	2,05	1,70	0,97
2500	10241,2	1,17	2,03	2,44	2,03	1,17
3000	10241,2	1,35	2,37	2,82	2,37	1,35
3249	10241,2	1,44	2,53	3,00	2,53	1,44

Tabela D-4 - Valores de deslocamento relativo registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 2.

PAINEL 2						
$F_{v\tilde{a}o}$	F_{PE}	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
N	N	mm	mm	mm	mm	mm
0	10241,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	10241,2	0,18	0,31	0,36	0,31	0,18
1000	10241,2	0,36	0,63	0,75	0,63	0,36
1500	10241,2	0,54	0,95	1,15	0,95	0,54
2000	10241,2	0,73	1,29	1,55	1,29	0,73
2500	10241,2	0,93	1,62	1,94	1,62	0,93
3000	10241,2	1,11	1,96	2,32	1,96	1,11
3249	10241,2	1,20	2,12	2,50	2,12	1,20

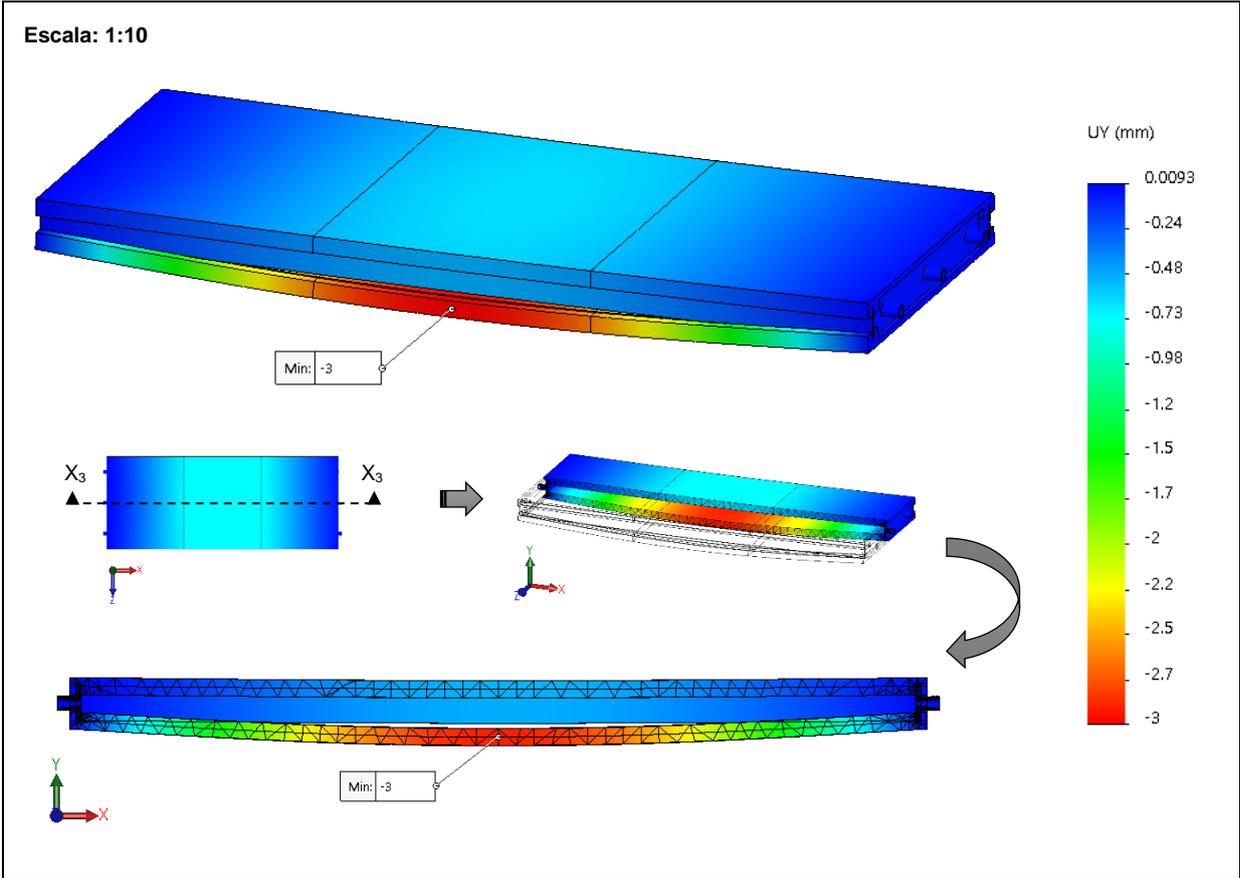


Figura D-4 - Campo de deslocamento segundo o eixo y referente ao ensaio à flexão do painel 2.

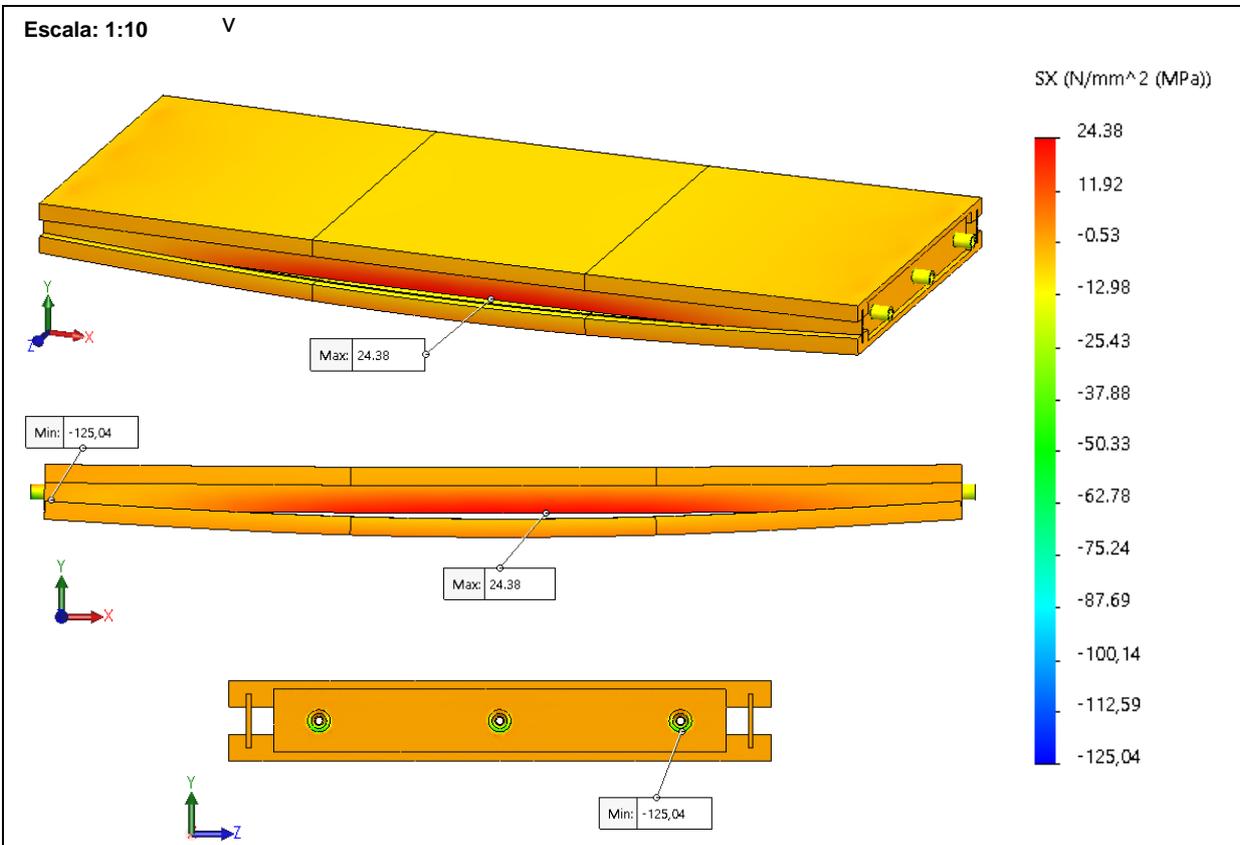


Figura D-5 - Campo de tensão segundo o eixo x referente ao ensaio à flexão do painel 2.

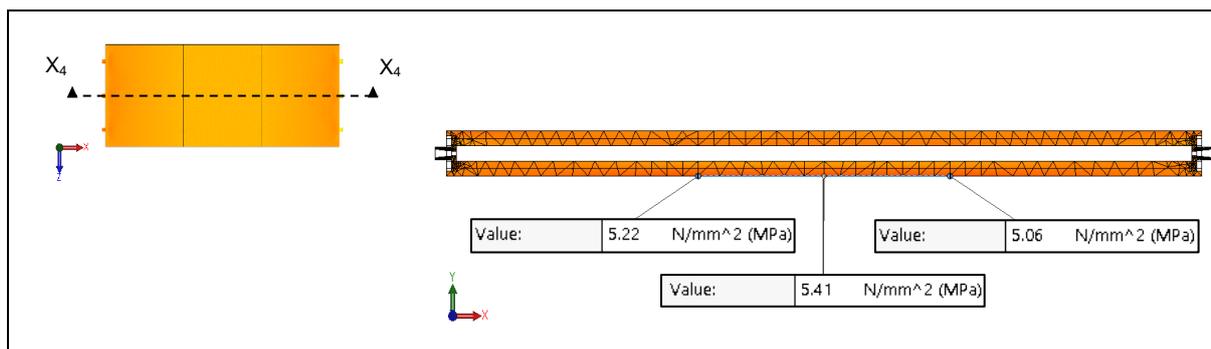


Figura D-6 - Campo de tensão segundo o eixo x no plano x-y definido pelo plano de corte X₄-X₄.

• **PAINEL 3**

Tabela D-5 - Valores de deslocamento registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 3.

PAINEL 3						
Fvão	FPE	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
N	N	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,0	0,32	0,55	0,62	0,55	0,32
0	8657,6	0,25	0,42	0,52	0,42	0,25
250	8657,6	0,34	0,58	0,71	0,58	0,34
500	8657,6	0,44	0,74	0,9	0,74	0,44
750	8657,6	0,53	0,91	1,12	0,91	0,53
1000	8657,6	0,63	1,08	1,32	1,08	0,63
1250	8657,6	0,72	1,25	1,52	1,25	0,72
1500	8657,6	0,82	1,42	1,72	1,42	0,82
1750	8657,6	0,92	1,60	1,92	1,6	0,92
1995	8657,6	1,01	1,76	2,10	1,76	1,01

Tabela D-6 - Valores de deslocamento relativo registados no pano inferior de pedra relativos à simulação do painel 3.

PAINEL 3						
Fvão	FPE	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
N	N	mm	mm	mm	mm	mm
0	8657,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	8657,6	0,09	0,16	0,19	0,16	0,09
500	8657,6	0,19	0,32	0,38	0,32	0,19
750	8657,6	0,28	0,49	0,60	0,49	0,28
1000	8657,6	0,38	0,66	0,80	0,66	0,38
1250	8657,6	0,47	0,83	1,00	0,83	0,47
1500	8657,6	0,57	1,00	1,20	1,00	0,57
1750	8657,6	0,67	1,18	1,40	1,18	0,67
1995	8657,6	0,76	1,34	1,58	1,34	0,76

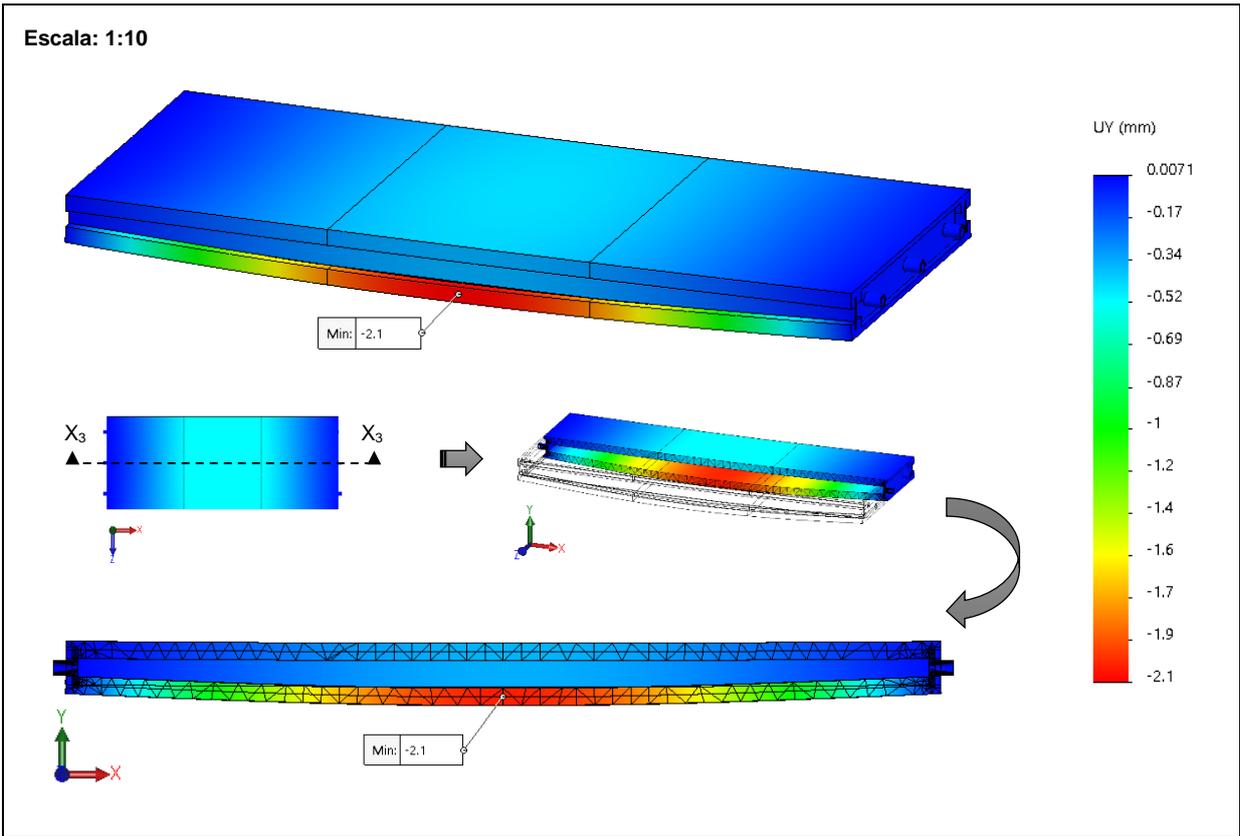


Figura D-7 - Campo de deslocamento segundo o eixo x relativo ao ensaio à flexão do painel 3.

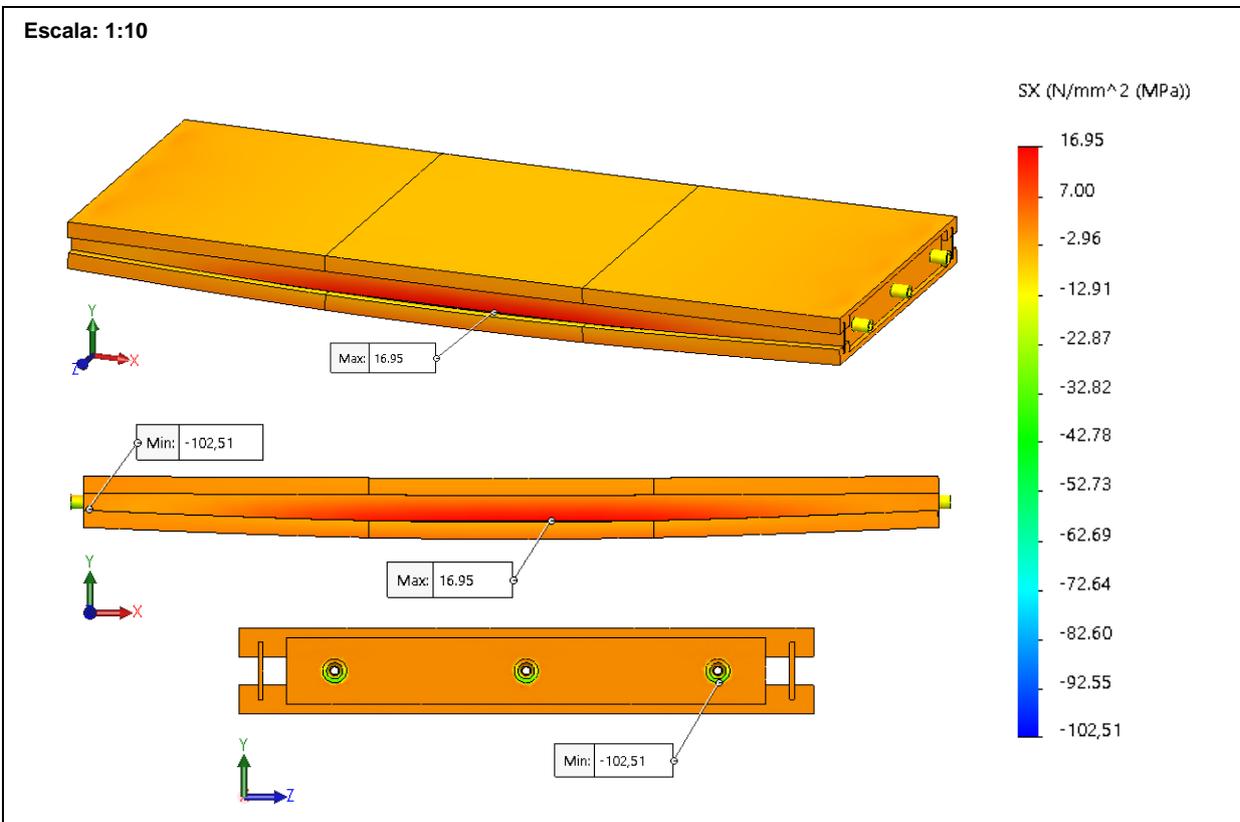


Figura D-8 - Campo de tensões segundo o eixo y relativo ao ensaio à flexão do painel 3.

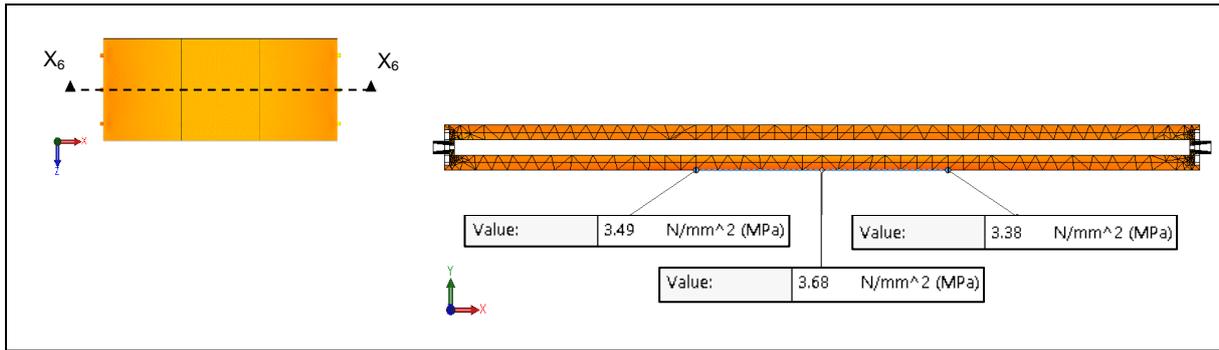


Figura D-9 - Campo de tensão segundo o eixo x no plano x-y definido pelo plano de corte X₆-X₆.