



Desenvolvimento de painéis de fachada e parede eco-eficientes em pedra e betão pré-esforçados

João Carlos Revés Pereira da Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Orientadores: Professor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio e Professor Pedro Miguel Gomes Abrunhosa Amaral

Júri:

Presidente: Professor António Manuel Figueiredo Pinto da Costa

Orientador: Professor Pedro Miguel Gomes Abrunhosa Amaral

Vogal: Professor José Manuel De Matos Noronha da Câmara

Maio de 2019

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

Para a realização desta dissertação, contei com a ajuda e contributo de várias pessoas e entidades. Gostaria de expressar o meu agradecimento:

Ao meu orientador, professor Pedro Amaral, por todos os conhecimentos transmitidos, pelo apoio dado ao longo da dissertação e pela oportunidade concedida de poder trabalhar num projeto da *Frontwave*.

Ao meu orientador, professor Eduardo Júlio, por todos os conhecimentos transmitidos, pelo apoio dado ao longo da dissertação e pela disponibilidade demonstrada.

Ao professor Hugo Costa do ISEC, pelo tempo dispensado na minha dissertação, nomeadamente nas fases de produção e realização de ensaios laboratoriais nas instalações do ISEC, e por todos os conhecimentos transmitidos, indispensáveis à realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

Ao professor Ricardo Carmo do ISEC, pelo tempo dispensado na minha dissertação, nomeadamente na fase de realização dos ensaios laboratoriais nas instalações do ISEC, e por todos os conhecimentos transmitidos, o meu sincero agradecimento.

Ao Sr. João Américo, por ter tido a gentileza de me receber na *URMAL* e de me ajudar na concretização de uma das etapas desta dissertação.

À *SOLANCIS* que teve sempre um contributo importante no desenvolvimento do projeto, nomeadamente no fornecimento de placas de pedra.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas do ISEC e do Laboratório de Construção do IST, que se mostraram sempre disponíveis para me auxiliar na realização de várias etapas desta dissertação.

Aos meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo deste percurso académico.

Aos meus pais, à minha irmã e à minha avó, por me apoiarem em todos os momentos.

À Susana, por estar sempre do meu lado.

Resumo

Atualmente, o setor da construção procura não só a adoção de soluções construtivas que permitam uma significativa poupança de tempo e de custos, mas que cumpram também com uma componente de ecoeficiência.

A presente dissertação foi desenvolvida no seguimento do projeto “*INOVWALL*”, com colaboração da *Frontwave*, que tem como finalidade a criação de um sistema de painel de fachada/parede, que seja funcional e que procure também cumprir com o requisito de ecoeficiência.

No processo do corte de pedra em fábrica (após extração em campo), estima-se que se originem desperdícios significativos, na ordem dos 60%. Tendo em vista o aproveitamento de resíduo de pedra calcária numa empresa transformadora de pedra, produzir-se-á agregado de origem calcária, a ser usado para fabricar betão, que será posteriormente utilizado na produção de painéis de fachada/parede.

O conceito de painel híbrido passa por criar um sistema de duas faces, no qual a face exterior será composta por placas de pedra (solução mais nobre) e a face interior será realizada em betão, produzido com desperdício resultante do corte da pedra. A formulação deste betão tem como finalidade criar uma solução mais competitiva do ponto de vista económico, sendo simultaneamente uma solução com menor impacte ambiental.

O pré-esforço será utilizado, tanto ao nível das placas de pedra, como ao nível da placa de betão, como forma de solidarizar ambas as faces.

Palavras-chave

Fachada, Painel, Eco-eficiente, Híbrido, Pré-esforço

Abstract

Nowadays, the construction sector seeks, not only the adoption of constructive solutions that allow a significant saving of time and costs, but that also comply with an eco-efficiency component.

This dissertation was developed following the "*INOVWALL*" project, with the cooperation of *Frontwave*, whose purpose is to create a facade panel system that is functional and also seeks to comply with the eco-efficiency requirement.

In the process of cutting natural stone in the factory (after extraction in the field), it is estimated that significant wastes are originated, circa of 60%. In order to value the limestone waste from a stone processing company, it will be incorporated in concrete as aggregate, which will later be used in the production of facade panels.

The hybrid panel concept involves creating a two-face system in which the outer face will be composed by stone plates (higher quality solution) and the inner plate will be made with the concrete produced, in order to recycle the waste originated by the stone industry. The formulation of this concrete has the purpose of creating an economically competitive solution, being simultaneously a solution with less environmental impact.

The prestress will be applied both on the stone plate and on the concrete plate, as a way to connect both faces.

Key-words

Facade, Panel, Eco-efficient, Hybrid, Pre-stress

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Palavras-chave	v
Abstract.....	vii
Key-words.....	vii
Índice	ix
Índice de figuras	xi
Índice de tabelas	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização.....	2
2. Estado da Arte	3
2.1. Breve historial.....	3
2.2. Tipos de painéis.....	4
2.3. Pré-esforço	7
2.3.1. Painéis de fachada em pedra pré-esforçada – O “ <i>PRESSTONE</i> ”	8
2.4. Betão	12
2.5. Pedra	14
3. Conceito.....	15
3.1. Modelo	15
3.2. Alumínio e Aço	17
3.3. Pedra	18
3.4. Betão	19
3.5. Pré-esforço	21
4. Caracterização experimental.....	31
4.1. Produção de agregado	31
4.1.1. Britagem	31
4.1.2. Peneiração.....	33
4.2. Produção de betão	36
4.3. Produção dos painéis	38
4.4. Ensaios à flexão	40

4.4.1.	Estimativa dos modos de rotura	43
4.4.2.	Carregamento na pedra – Painel 1	48
4.4.3.	Carregamento na pedra – Painel 2	49
4.4.4.	Carregamento no betão – Painel 3.....	51
4.4.5.	Carregamento no betão – Painel 1*	52
4.4.6.	Estimativa da rigidez à flexão	53
5.	Análise de resultados	57
5.1.	Produção de betão	57
5.1.1.	Ensaio de compressão simples.....	57
5.1.2.	Ensaio de compressão diametral	57
5.1.3.	Ensaio para o módulo de <i>Young</i>	58
5.1.4.	Encurtamento diferencial.....	59
5.2.	Ensaio à flexão	60
5.2.1.	Carregamento na pedra	61
5.2.2.	Carregamento no betão.....	65
5.2.3.	Avaliação da rigidez à flexão	68
6.	Conclusões e desenvolvimentos futuros	73
6.1.	Conclusões.....	73
6.2.	Desenvolvimentos futuros	75
	Referências	77
	Anexos.....	79

Índice de figuras

Figura 2.1 – (a) Painel em pedra natural; (b) Painel em vidro (Lithodecor, 2017).....	4
Figura 2.2 - (a) Painel em betão; (b) Painel em cerâmicos.....	5
Figura 2.3 – Montagem dos componentes do painel (em pedra)	8
Figura 2.4 – (a) Esquema do sistema de pré-esforço; (b) Ancoragem ativa em serviço (R. D. S. Camposinhos <i>et al.</i> 2013).....	9
Figura 2.5 – Acabamento final do painel (R. S. Camposinhos e Lello, 2010)	10
Figura 2.6 – (a) Isolamento com EPS; (b) Sistema de fixação (R. S. Camposinhos e Lello, 2010).....	10
Figura 2.7 – Fixação dos painéis à estrutura: (a) na horizontal; (b) na vertical	11
Figura 2.8 – Ciclo de vida da pedra natural	14
Figura 3.1 – Apresentação do painel híbrido em vista explodida	15
Figura 3.2 – Representação do painel híbrido em planta, alçado principal, alçado lateral e tardo	16
Figura 3.3 – Ensaio de tração ao alumínio: provete (a) e gráfico (b).....	17
Figura 3.4 – Ensaio de tração ao aço: provete (a) e gráfico (b).....	17
Figura 3.5 – Disposição das placas integrantes da face exterior do sistema	18
Figura 3.6 – (a) Fios de pré-esforço $\Phi 6$ e placa de ancoragem; (b) Macaco hidráulico	21
Figura 3.7 – Sistema barrilete-cunha	21
Figura 3.8 – Vista explodida do esquema de montagem do sistema de pré-esforço.....	22
Figura 3.9 – Diagrama de tensões normais ao nível da secção transversal	22
Figura 3.10 – Tensões normais provocadas pela acção do pré-esforço	24
Figura 3.11 – Esquema de aplicação do pré-esforço	25
Figura 3.12 – Diagrama de extensões normais ao nível da secção transversal	27
Figura 4.1 – (a) Britadeira; (b) Amostra de calcário moca creme (b).....	31
Figura 4.2 – Mistura resultante da primeira britagem	32
Figura 4.3 – Sequência de peneiros: grossos (a) e finos (b)	33
Figura 4.4 – Curva de <i>Faury</i> vs Curva do agregado.....	35
Figura 4.5 – Rotura dos provetes aos ensaios: (a) compressão simples; (b) compressão diametral ..	37
Figura 4.6 – Cofragem em madeira	38
Figura 4.7 – Produção das placas de betão: (a) produção do betão; (b) fase de betonagem	38
Figura 4.8 – Placas de betão após descofragem.....	39
Figura 4.9 – <i>Setup</i> dos ensaios a realizar (adaptado de Luis Ferreira, 2015).....	40
Figura 4.10 – Instrumentação do <i>setup</i> : (a) célula de carga; (b) LVDT	41
Figura 4.11 – Painel pronto a ser ensaiado	41
Figura 4.12 – Deformada do painel em cada ensaio	42
Figura 4.13 – Identificação dos modos de rotura para cada ensaio	43
Figura 4.14 – Perímetro de controlo utilizado	45
Figura 4.15 – Diagrama de tensões tangenciais na ligação pedra-perfil.....	46
Figura 4.16 – Gráfico do ensaio ao Painel 1	48
Figura 4.17 – Rotura do betão nas secções de apoio: (a) destacamento dos perfis laterais; (b) superfícies de rotura	49

Figura 4.18 – Gráfico do ensaio ao Painel 2	50
Figura 4.19 – Gráfico do ensaio ao Painel 3	51
Figura 4.20 – Rotura da pedra por corte na secção de colagem	52
Figura 4.21 – Gráfico do ensaio ao Painel 1*	53
Figura 4.22 – Modelo de viga simplesmente apoiada solicitada pontualmente	54
Figura 5.1 – Ciclos de carga-descarga do Painel 1	61
Figura 5.2 – Ciclos de carga-descarga do Painel 2	63
Figura 5.3 – Análise do comportamento do Painel 1 durante o ensaio	64
Figura 5.4 – Ciclos de carga-descarga para o Painel 3	66
Figura 5.5 – Análise do comportamento do Painel 3 durante o ensaio	67
Figura 5.6 – Fraturação da pedra por corte ao longo da secção de colagem	67
Figura 5.7 – Flexão da placa de betão	68

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Tabela comparativa de painéis de fachada e/ou parede existentes no mercado.....	6
Tabela 3.1 – Caracterização da pedra exterior	19
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas da resina	19
Tabela 3.3 – Designação do betão de acordo com a norma NP EN 206-1	19
Tabela 4.1 – Resultados da primeira peneiração	34
Tabela 4.2 – Parâmetros A e B para definição da curva de <i>Fairy</i>	34
Tabela 4.3 – Composição do betão autocompactável	36
Tabela 4.4 – Caracterização do betão de acordo com a NP EN 206-1	37
Tabela 4.5 – Cálculo das cargas para os modos de rotura B, C, D, E, F e G	44
Tabela 4.6 – Cargas que originam o corte da pedra e do betão nas secções de colagem.....	47
Tabela 4.7 – Avaliação das cargas para cada modo de rotura.....	47
Tabela 4.8 – Leituras de deslocamentos em regime elástico (Painel 1)	48
Tabela 4.9 – Leituras de deslocamentos em regime elástico (Painel 2)	50
Tabela 4.10 – Leituras de deslocamentos em regime elástico (Painel 3)	51
Tabela 4.11 – Leituras de deslocamentos em regime elástico (Painel 1*)	52
Tabela 4.12 – Cálculo dos deslocamentos esperados em cada LVDT por cada carga em faca	54
Tabela 4.13 – Deslocamentos teóricos finais vs experimentais	55
Tabela 5.1 – Deformações verificadas em cada placa	59
Tabela 5.2 – Cargas analíticas vs experimentais	60
Tabela 5.3 – Regressões lineares nos ciclos de carga-descarga do Painel 1	62
Tabela 5.4 – Regressões lineares nos ciclos de carga-descarga do Painel 2	63
Tabela 5.5 – Regressões lineares nos ciclos de carga-descarga do Painel 3	66
Tabela 5.6 – Deslocamentos teóricos corrigidos vs experimentais	69

Simbologia

Siglas

EC2	- Eurocódigo 2
ELS	- Estado Limite de Serviço
ELU	- Estado Limite Último
EPS	- Poliestireno Expandido
ISEP	- Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISEC	- Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
IST	- Instituto Superior Técnico
LVDT	- <i>Linear Variable Differential Transformer</i>

Letras latinas

A_1	- Área da secção transversal de uma placa
A_c	- Área da secção transversal da placa de betão
A_s	- Área da secção transversal dos fios de pré-esforço
C_f	- Coeficiente de redução da resistência do betão
e	- Excentricidade
E	- Módulo de <i>Young</i>
E_c	- Módulo de <i>Young</i> do betão
E_{cm}	- Módulo de <i>Young</i> médio do betão
E_{cm}^*	- Módulo de <i>Young</i> médio do betão
E_p	- Módulo de <i>Young</i> da pedra
E_{pf}	- Módulo de <i>Young</i> do alumínio
E_r	- Módulo de <i>Young</i> da resina <i>epoxy</i>
E_s	- Módulo de <i>Young</i> do aço
f_c	- Resistência à compressão do betão
f_{ck}	- Resistência à compressão característica do betão em provetes cilíndricos
f_{ctm}	- Resistência axial à tração do betão
f_{ctf}	- Resistência à tração por flexão do betão
$f_{ct,sp}$	- Resistência à tração do betão obtida pelo ensaio de compressão diametral
f_{cm}	- Resistência à compressão média do betão em provetes cilíndricos
$f_{cm,cube}$	- Resistência à compressão média do betão em provetes cúbicos
$f_{c,j}$	- Resistência da pasta cimentícia para uma idade de j dias
f_{pk}	- Resistência característica do aço de pré-esforço
F_y	- Força de cedência dos fios de pré-esforço
h_0	- Tamanho nominal da secção transversal de betão
I_{mista}	- Inércia da secção mista segundo o seu eixo fraco
I_{placa}	- Inércia de uma placa segundo o seu eixo fraco

I_{pf}	- Inércia do perfil de alumínio segundo o seu eixo forte
I_r	- Inércia da "lâmina" de resina segundo o seu eixo fraco
k_1	- Coeficiente de redução da tensão uniforme de pré-esforço
$k_{1,j}$	- Coeficiente de <i>Feret</i> para uma idade de j dias
K_c	- Rigidez axial relativa da placa de betão
K_p	- Rigidez axial relativa da placa de pedra
L_0	- Comprimento inicial
L_{cr}	- Comprimento de encurvadura
M	- Momento fletor
N	- Esforço normal
P_{cr}	- Carga crítica de encurvadura
q	- Carga distribuída
S_i	- Momento estático do elemento i
t	- Espessura
T_c	- Temperatura na placa de betão
T_p	- Temperatura na placa de pedra
u	- Perímetro da secção de betão exposto
u_1	- Perímetro de controlo
V	- Esforço transversal
$V_{abs,i}$	- Volume absoluto do agregado i
v_{min}	- Resistência mínima ao punçoamento do betão não armado
$V_{Rd,c}$	- Resistência da lage ao punçoamento
V_{sd}	- Reacção de apoio
V_{sd}	- Esforço de corte solicitante
w_1	- Módulo de flexão de uma placa
w_2	- Módulo de flexão da secção mista
z_c	- Centro de gravidade da placa de betão
z_p	- Centro de gravidade da placa de pedra
z_{pf}	- Centro de gravidade dos perfis de alumínio
z_r	- Centro de rigidez da secção mista
z_{rs}	- Centro de gravidade da "lâmina" de resina
$z_{máx.}$	- Distância da fibra mais tracionada ao centro de rigidez da secção mista

Letras gregas

α_c	- Coeficiente de dilatação térmica linear do betão
α_p	- Coeficiente de dilatação térmica linear da pedra
β	- Fator de majoração do esforço de corte solicitante
$\beta_{as}(t)$	- Coeficiente de redução da retração endógena do betão aos t dias
β_{ds}	- Coeficiente de redução da retração de secagem

β_{RH}	- Coeficiente de redução da retração de secagem básica por influência da humidade relativa
γ	- Compacidade da pasta de ligante
Δ	- Variação
δ_i	- Flecha medida no LVDT da secção i
ϵ	- Extensão axial
ϵ_s	- Extensão no aço
ϵ_c	- Extensão no betão
ϵ_{ca}	- Extensão no betão devida à retração endógena
ϵ_{cc}	- Extensão no betão devida à fluência
ϵ_{cd}	- Extensão no betão devida à retração de secagem
$\epsilon_{cd,0}$	- Extensão no betão devida à retração de secagem básica
ϵ_{cs}	- Extensão no betão devida à retração hídrica
ϵ_p	- Extensão na pedra
μ	- Relação entre a tensão de pré-esforço após perdas instantâneas e a resistência característica do aço
ρ	- Massa volúmica
ρ_l	- Percentagem geométrica de armadura
$\rho_{p0,i}$	- Massa volúmica seca do agregado i
σ	- Tensão normal
$\sigma_{m\acute{a}x.}$	- Tensão normal máxima
$\sigma_c(t_{\infty})$	- Tensão normal máxima no betão após perdas de pré-esforço
σ_e	- Tensão normal provocada pela excentricidade
σ_f	- Tensão normal provocada pelas ações exteriores
σ_N	- Tensão normal uniforme provocada pelo pré-esforço
σ_p	- Tensão normal máxima na pedra
$\sigma_p(t_{\infty})$	- Tensão normal máxima na pedra após perdas de pré-esforço
σ_s	- Tensão normal nos fios de pré-esforço
$\sigma_s(t_0)$	- Tensão normal nos fios de pré-esforço após perdas instantâneas
$\Delta\sigma_{sr}$	- Perda de tensão no aço por relaxação
τ_i	- Resistência ao corte do material i
φ_c	- Coeficiente de fluência do betão
Φ	- Diâmetro dos fios de pré-esforço

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O revestimento de fachadas é adotado na construção de muitos edifícios. Atualmente, são muito variadas as soluções que se podem adotar para o revestimento de fachadas. O revestimento das mesmas deve cumprir, não só com os requisitos que se prendem com a estética, nomeadamente no que diz respeito à identidade desse edifício, e ao seu respetivo enquadramento paisagístico, como também com os requisitos de natureza técnica e económica. Um dos aspetos que é inerente à construção de qualquer obra é, sempre que possível, a conjugação destes fatores, ou seja, a procura de uma solução viável, com o menor custo possível.

Para esta temática, e dentro das várias soluções disponíveis atualmente, poder-se-ão destacar o revestimento de edifícios com painéis de fachada concebidos com diferentes tipos de materiais. Os painéis de fachada são uma das soluções mais versáteis, na medida em que existe uma vasta gama de materiais que podem ser utilizados no fabrico dos mesmos, desde a pedra, cerâmicos, vidro, até ao betão.

O projeto “*INOVWALL*” (ITeCons 2018), para o desenvolvimento de painéis de fachada/parede, teve início num desenvolvimento (“*PRESSTONE*”) criado pelo ISEP em colaboração com a empresa de engenharia e desenvolvimento tecnológico em pedra natural, *Frontwave*. O “*PRESSTONE*” consiste em estudar e desenvolver um novo sistema de painéis em pedra natural pré-esforçada para revestir a envolvente exterior das edificações. O projeto atual (“*INOVWALL*”), consiste num melhoramento do primeiro, criando para o efeito um revestimento duplo feito à base de pedra natural que inclui, entre outros aspetos, a possibilidade de incorporar no interior (entre 2 placas de pedra), isolamento térmico e acústico. No entanto, devido ao facto de conter apenas pedra natural em ambos os painéis, exterior (visível na sua componente ornamental), e interior, limita muito o seu uso, uma vez que incrementa a quantidade de pedra de alto valor numa das faces que não se encontra visível.

Assim, no âmbito desta dissertação, pretende-se verificar se o desperdício proveniente no corte da pedra em fábrica é viável à produção de agregado, para o fabrico de betão. Este betão será posteriormente utilizado para o fabrico de painéis que permitem a substituição do painel interior não valorizado ornamentalmente. A pedra será utilizada para a placa exterior, ao passo que o betão será utilizado para a placa interior. Assim, obtém-se uma solução agradável do ponto de vista estético, conseguindo-se um painel de fachada eco-eficiente. A introdução de desperdícios de pedra no fabrico destes painéis vem promover o produto ao nível da eco-eficiência. Com a utilização do desperdício proveniente do corte da pedra, é possível valorizar o desperdício da pedra como agregado, para desenvolver um produto que, à partida, terá um custo de fabrico global mais baixo, do que o inicialmente esperado. O painel de fachada é classificado como híbrido, na medida em que utiliza duas placas, cada uma com materiais distintos.

1.2. Objetivos

O trabalho aqui descrito teve apenas os seguintes dois objetivos:

- i. A valorização de desperdício de pedra, como agregado reciclado, para produção de betão;
- ii. O desenvolvimento de um produto híbrido fachada/parede, estruturalmente viável, economicamente vantajoso e ambientalmente mais sustentável.

1.3. Organização

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento do tema a desenvolver. Apresentam-se ainda, sumariamente, os objetivos que se pretende cumprir com o desenvolvimento desta dissertação. Por último, é apresentada uma breve explicação da estrutura adotada ao longo do documento.

O segundo capítulo é dedicado ao desenvolvimento do Estado da Arte. Primeiramente, é apresentado um breve historial relativamente aos painéis de fachada, nomeadamente à sua origem e ao aparecimento deste mercado. Tendo em conta que um dos objetivos desta dissertação passa por desenvolver uma alternativa viável ao “*INOVWALL*”, o Estado da Arte procura também fazer referência a alguns dos produtos existentes no mercado de painéis de fachada, que se assemelham ao painel que irá ser desenvolvido. De seguida, é feita uma abordagem ao conceito de betão eco-eficiente, sendo feitas referências a alguns projetos que já foram desenvolvidos nesse contexto.

O terceiro capítulo é dedicado à prova de conceito do novo produto. Para o desenvolvimento deste painel híbrido, há três elementos que são fundamentais na sua definição: pedra, betão e pré-esforço. Neste terceiro capítulo, é feito um resumo do papel que cada um desses elementos irá desempenhar no painel. É também feita uma caracterização sumária da resistência dos fios de aço e dos perfis de alumínio. É também apresentado um esquema, no qual são especificadas algumas das dimensões mais relevantes à definição geométrica do painel.

No quarto capítulo é feita uma abordagem a toda a componente laboratorial desenvolvida, que pode ser dividida nas seguintes etapas: produção de agregado, produção de betão, ensaios e caracterização do betão, produção de painéis, aplicação de pré-esforço e ensaios dos painéis.

O quinto capítulo é dedicado à análise e discussão de resultados. Pretende-se analisar em detalhe os resultados obtidos nos ensaios experimentais, para a produção de agregado, para a caracterização do betão e para os ensaios à flexão dos painéis, como forma de caracterizar o painel a nível estrutural.

No último capítulo, apresentam-se algumas conclusões relativamente aos trabalhos que foram desenvolvidos ao longo da dissertação. Sugerem-se ainda alguns desenvolvimentos futuros relativamente a esta temática.

2. Estado da Arte

Um dos aspetos que interessa na definição do tipo de solução a adotar para o revestimento das fachadas dos edifícios é a forma de evitar eventuais patologias futuras na própria fachada (Gripp, 2008). As fachadas dos edifícios e a forma como estas se apresentam são um elemento chave, do ponto de vista da caracterização do próprio edifício, pelo que é fundamental que as soluções adotadas para o seu revestimento cumpram com um conjunto de requisitos, nomeadamente requisitos de natureza arquitetónica e estética. Atualmente há uma preocupação crescente com a adoção de soluções construtivas que visem, não só um bom desempenho, mas que tenham um custo reduzido e que sejam eco-eficientes, permitindo um melhor aproveitamento dos recursos que se encontram à disposição.

2.1. Breve historial

Inicialmente (até meados do século XX), a estrutura dos edifícios passava pela construção de paredes exteriores. Essas paredes desempenhavam um papel estrutural importante no edifício. Adicionalmente, a fachada do edifício era apresentada como a própria parede estrutural. Só mais tarde, com o aparecimento de novas formas de estruturas de betão (tipicamente porticadas), começaram a surgir novas formas de revestimento das fachadas. As paredes exteriores começaram a ter um papel cada vez menos importante na função estrutural do edifício, passando as fachadas a ser concebidas autonomamente com o único objetivo de revestimento do edifício. Como refere Samúdio (2015), o facto da fachada passar a desempenhar apenas um papel de revestimento (sem apresentar elementos estruturais) permitiu uma maior liberdade da sua conceção, nomeadamente no desenho das mesmas, tornando-se uma componente importante do projeto global do edifício.

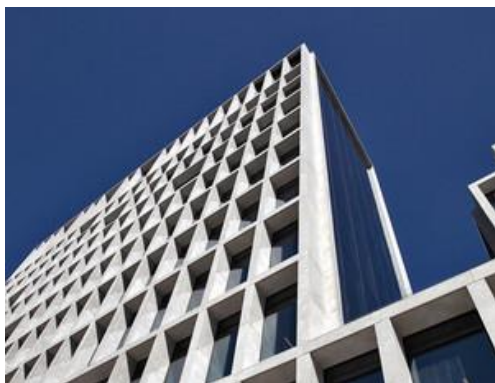
Ao longo da história, materiais pétreos como o granito, o mármore ou o calcário, têm sido amplamente utilizados no revestimento de fachadas de edifícios (R. D. S. Camposinhos *et al.* 2013). Até há 60 anos aproximadamente, o revestimento de fachadas de edifícios era um processo com algumas limitações, tendo em conta que o equipamento disponível para apoio à construção não era tão vasto como hoje em dia. O conceito de painéis de fachada pré-fabricados começou a ser desenvolvido após alguns marcos importantes da história mundial, como a Guerra Civil Russa (Duarte 2014), onde se verificou uma urgente necessidade de reconstrução. Segundo Mendonça (2005), o conceito de revestimento de fachadas com painéis era difícil de pôr em prática, uma vez que as dimensões dos painéis estavam limitadas à capacidade de manuseamento e de transporte dos trabalhadores. Com o aparecimento de diversos equipamentos mecânicos de elevação, como é o caso das gruas, tornou-se mais fácil a elevação desse tipo de materiais pesados, algo que potenciou bastante o crescimento deste mercado de painéis.

Segundo Samúdio (2015), os painéis de fachada eram inicialmente utilizados com o objetivo de obter uma solução esteticamente agradável para o revestimento da fachada. Com a evolução desta indústria, começou a haver uma preocupação crescente com o isolamento térmico e/ou acústico. Os painéis de fachada passaram também a desempenhar um papel importante no cumprimento das exigências de conforto dos edifícios. Para acompanhar esta necessidade, foi necessária a integração de novos materiais na execução dos painéis de fachada, para cumprir com os requisitos de natureza térmica e/ou acústica.

A ideia de um procedimento de revestimento de fachadas de edifícios com recurso a painéis passa por conseguir realizar todo o processo de revestimento de fachada num menor tempo possível. Para apoiar essa filosofia, o mercado de painéis pré-fabricados tem ganho um espaço importante no revestimento das fachadas. Os painéis são produzidos em fábrica (de acordo com as características pretendidas a aplicar em obra) e levados para obra para serem montados. A utilização destes painéis pré-fabricados permite que o único tempo gasto no revestimento da fachada seja na montagem das várias unidades em obra, e respetiva fixação das mesmas à estrutura. A evolução desta indústria de painéis pré-fabricados verificou-se em diversos países que, no período pós 2ª Guerra Mundial, tinham grandes necessidades de reconstrução de habitações, como referem Oliveira (2002) e Marques (2012), o que levou conseqüentemente a uma procura de soluções construtivas (nomeadamente, de revestimento de fachadas) que dessem uma resposta rápida a essas necessidades.

2.2. Tipos de painéis

Os painéis de fachada são formas muito versáteis de revestir as fachadas dos edifícios. Além da sua facilidade de transporte e montagem, é possível a sua conceção com vários tipos de materiais, cores e texturas. As imagens que se apresentam nas Figuras Figura 2.1 e Figura 2.2 (Lithodecor, 2017) ilustram as várias possibilidades de fabrico de painéis de fachada. Na Figura 2.1, encontram-se representadas duas soluções de revestimento, com recurso a painéis de fachada em pedra natural e vidro (a) e vidro (exclusivamente) (b). Na Figura 2.2, encontram-se representadas duas soluções de revestimento, com recurso a painéis de fachada em betão (a) e cerâmicos (b).



(a)

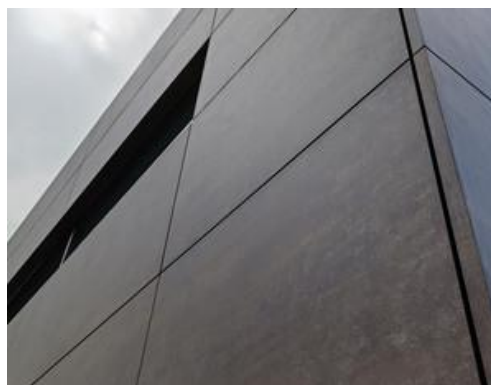


(b)

Figura 2.1 – (a) Painel em pedra natural; (b) Painel em vidro (Lithodecor, 2017)



(a)



(b)

Figura 2.2 - (a) Painel em betão; (b) Painel em cerâmicos

No âmbito desta dissertação, importa destacar os revestimentos de fachada em pedra e em betão. Com base nessas duas soluções, foi possível desenvolver um painel que utiliza esses dois materiais, sendo introduzido também o conceito de betão eco-eficiente. De seguida, apresenta-se na Tabela 2.1 um conjunto de painéis atualmente existentes no mercado que partilham algumas características com o produto que se pretende desenvolver nesta dissertação. Algumas destas soluções utilizam exclusivamente pedra na sua constituição, enquanto outras utilizam betão. No final, apresentam-se também algumas características do painel que foi produzido (representadas a laranja), com o intuito de comparar com as soluções de revestimentos de fachada ou de parede já existentes. As designações comerciais dos painéis, assim como todas as características apresentadas foram retiradas dos catálogos das empresas que produzem estes painéis. Os painéis que não apresentam resistência à compressão do betão são painéis produzidos exclusivamente em pedra (com exceção do *Equitone*, produzido em fibrocimento).

Tabela 2.1 – Tabela comparativa de painéis de fachada e/ou parede existentes no mercado

Painel	Dimensões (mm)			Resistência à compressão do betão (MPa)	Função		Utilização de pré-estorço
	Comprimento	Largura	Espessura		Parede	Fachada	
JP Concrete	Até 6500	500 a 1500	100 a 180	60	✓	X	✓
FP McCann	Não especificado	1000 a 1500	80 a 240	55	✓	X	✓
O'REILLEY	1000 a 2400	Não especificado	140	50	✓	X	✓
MOORE	600 a 1500	100 a 250	Não especificado	50	✓	X	✓
Painel (*)	3000	1200	70 a 90	-	X	✓	✓
Arcis	4000 a 4600	2400	19 a 51	35	X	✓	✓
Airtec Stone	Até 4050	Até 1300	24 a 29	-	X	✓	X
Litho Betoshell	1200 a 2400	600 a 1200	20 a 40	Não especificado	X	✓	X
Viroc	1500 a 3000	1250	12 a 16	-	X	✓	X
Viroclin	2440	300	15	-	X	✓	X
Equitone	Até 3000	1250	Não especificado	-	X	✓	X
Painel (**)	1430 a 3000	1000 a 1180	80	Não especificado	X	✓	X
Inowall	1500	600	90	-	✓	✓	✓
Painel Híbrido Pré-esforçado	1500	600	90	50	✓	✓	✓

(*) Painéis de fachada desenvolvidos por R. S. Camposinhos e Lello (2010)

(**) Painéis de fachada ecoeficientes, desenvolvidos por Ferreira *et al.* (2013)

2.3. Pré-esforço

Segundo Appleton (1999), “O pré-esforço é uma deformação imposta a uma estrutura que introduz um estado de tensão que, em geral, contraria os efeitos associados às ações permanentes”. A introdução do pré-esforço numa estrutura de betão, pode ser feita com vista a alcançar vários objetivos, tais como:

- i. Aumento da resistência mecânica da estrutura;
- ii. Controlo de deformações;
- iii. Controlo de fendilhação;
- iv. Reduzir a área de armadura ordinária;
- v. Rapidez de execução.

No campo da Engenharia Civil, a adoção de soluções com recurso ao pré-esforço permite efetuar um controlo eficiente de flechas, permitindo criar elementos estruturais (vigas e/ou lajes) com maiores vãos, por comparação com as mesmas estruturas concebidas apenas em betão armado. Adicionalmente, a instalação de um estado de compressão axial prévio à utilização da estrutura permite controlar melhor a fendilhação nas secções com as fibras mais tracionadas. Tomando como referência os aços de alta resistência utilizados no pré-esforço, é possível também desenvolver estruturas, materializando uma área de aço aproximadamente quatro vezes menor à que seria necessária em armadura ordinária. A aplicação do pré-esforço em obra 2 a 7 dias após a betonagem permite também proceder a descofragens e remoção de escoramentos mais cedo, agilizando os processos construtivos (Appleton 1999).

Adicionalmente, a introdução de pré-esforço em estruturas de betão permite aumentar a resistência desses mesmos elementos. À semelhança da generalidade das rochas, o betão apresenta uma boa resistência à compressão, pelo que a instalação de um estado de compressão prévio à utilização da estrutura, permite um aumento da resistência à flexão, na qual as tensões de tração das fibras mais condicionantes serão compensadas pela força de compressão oferecida pelo pré-esforço. No contexto de painéis de parede, são muitas as soluções comerciais que existem atualmente no mercado que utilizam o pré-esforço na sua concepção, como se pode observar na Tabela 2.1. No contexto de painéis de parede, verifica-se que apenas uma das soluções apresentadas na Tabela 2.1 utiliza pré-esforço. No entanto, esse painel é constituído exclusivamente por betão. Para contextualizar a introdução de pré-esforço em revestimentos de fachada em pedra, apresenta-se de seguida o sistema pré-esforçado para revestimento de fachada, que serviu de base ao conceito do “*INOVWALL*”.

2.3.1. Painéis de fachada em pedra pré-esforçada – O “PRESSTONE”

Segundo Amaral *et al.* (2013), comparando com os sistemas convencionais de revestimento em pedra natural, a utilização de painéis de fachada em pedra pré-esforçada apresenta algumas vantagens, tais como a redução dos tempos de fabrico/produção, a valorização da pedra com baixo valor de mercado e a redução dos custos no revestimento de fachadas, a nível de mão-de-obra.

Ao nível do revestimento de fachada, o conceito de pré-esforço já foi aplicado por R. S. Camposinhos e Lello (2010). Os autores desenvolveram uma solução de painéis de fachada, os quais serviram de base para o desenvolvimento do produto “*INOVWALL*”. A solução já se encontra patenteada, com a referência Camposinhos, R., Portugal, Patente nº104770, 2017. O “*PRESSTONE*” consiste num sistema de painel para revestimento de fachada em pedra pré-esforçada, com dimensões de 3 metros de comprimento, por 1,5 metros de largura (4,5 m²). As faces do painel são constituídas por placas que possuem uma espessura variável, entre 20 a 30 mm, sendo separadas por uma caixa de ar com uma espessura que pode variar dos 30 aos 50 mm. Na sua globalidade, a espessura do painel pode adotar valores entre 70 a 90 mm, consoante a escolha das placas, com as dimensões descritas acima. Para a montagem dos painéis, são coladas três placas de pedra (com um comprimento de 800 mm cada) em cada face, através de resina *epoxy*. Estas placas são posteriormente coladas a duas placas nas extremidades. Estas duas placas (com um comprimento de 300 mm) possuem três furos, com o intuito de introduzir os fios de pré-esforço. Por último, são coladas novamente mais três placas de pedra, para formar a outra face do painel. Como as duas placas de extremidade acompanham a espessura do painel, a sua espessura também pode variar, consoante as soluções escolhidas para a espessura das placas nas duas faces. Na Figura 2.3, apresenta-se o esquema de montagem deste painel.



Figura 2.3 – Montagem dos componentes do painel (em pedra)

Esta solução destaca-se pela introdução de pré-esforço em placas de pedra natural, ao contrário dos painéis pré-esforçados, apresentados na Tabela 2.1 (todos em betão). Estas placas são pré-esforçadas através de fios de pré-esforço de 7 mm, concebidos com aço de alta resistência, com uma tensão de cedência de 1860 MPa (R. D. S. Camposinhos *et al.*, 2013). Na Figura 2.4 apresenta-se a ancoragem utilizada para introduzir o pré-esforço nas placas de pedra (Figura 2.4 (a)) e o sistema de pré-esforço em funcionamento, com uma ancoragem ativa de pré-esforço fixada numa das extremidades do painel (Figura 2.4 (b)).



Figura 2.4 – (a) Esquema do sistema de pré-esforço; (b) Ancoragem ativa em serviço (R. D. S. Camposinhos *et al.* 2013)

Os fios de pré-esforço são colocados nos furos já executados nas placas de extremidade, atravessando todo o comprimento da caixa de ar do painel. Posteriormente à sua colocação e montagem da segunda face do painel, os fios são fixos nas duas extremidades, através das ancoragens (funcionando uma delas como ancoragem ativa). Para introduzir o pré-esforço, aplica-se uma rotação à porca, no sentido horário, de forma a encostar a anilha à placa de ancoragem (de aço S355). Estando o parafuso impedido de rodar, a rotação da porca leva a que o parafuso se afaste da extremidade da placa, juntamente com a cunha e o barrilete cilíndrico, instalando o pré-esforço no fio de aço. Verifica-se que o pré-esforço é instalado em placas separadas das placas que servem o vão do painel. Segundo Camposinhos e Lello, a instalação de uma ancoragem ativa numa das extremidades permite controlar o pré-esforço aplicado e testar diferentes valores, permitindo também que a sua monitorização seja feita em laboratório. A ancoragem possui dimensões de 80x50 (4000 mm²) e uma espessura de 10 mm, permitindo uma distribuição adequada da força de compressão resultante do pré-esforço e evitando possíveis problemas ao nível do esmagamento da pedra (R. D. S. Camposinhos *et al.* 2013). Após montagem de todas as placas, respetiva colagem e introdução do pré-esforço, chega-se à solução final do painel de revestimento de fachada, em pedra pré-esforçada. Na Figura 2.5, representa-se um esquema com o acabamento final que se pretende no painel.

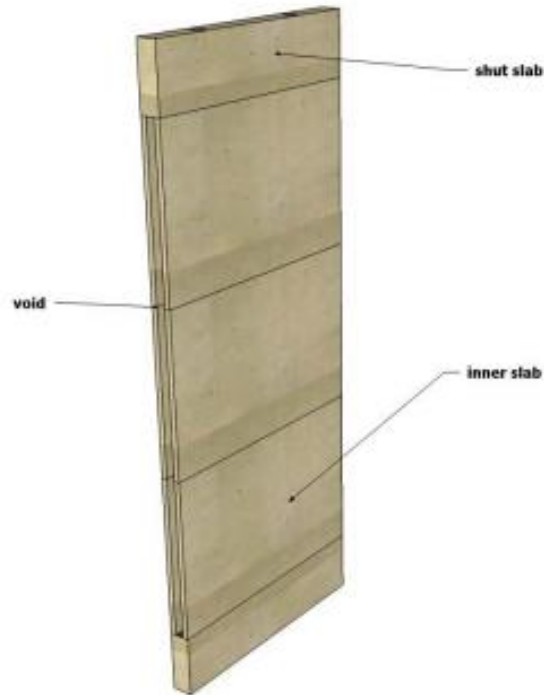
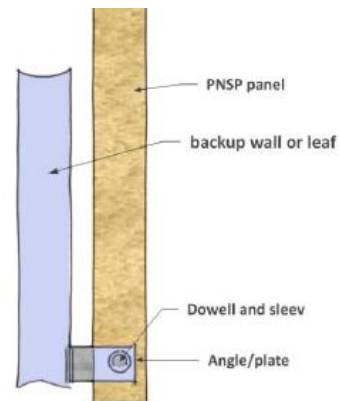


Figura 2.5 – Acabamento final do painel (R. S. Camposinhos e Lello, 2010)

Se for desejado, pode ainda introduzir-se um material na caixa de ar do painel, como forma de melhorar o seu desempenho térmico e/ou acústico. Para tal, o painel pode funcionar num esquema de “painel sanduíche”, no qual é feito um enchimento entre as faces, através de um material de isolamento como poliestireno extrudido ou poliestireno expandido, como se pode observar na Figura 2.6 (a). Deve sempre ser garantida uma solução de revestimento dos fios de pré-esforço, para poder garantir a sua durabilidade. Para efetuar a fixação do painel à estrutura, uma peça metálica faz a ligação entre a estrutura e uma cavilha, que é inserida lateralmente nas placas de extremidade dos painéis, de forma a suportar o peso dos mesmos. Na conceção deste sistema, foi importante criar uma ligação que permitisse que o painel estivesse o mais próximo da estrutura, de forma a evitar grandes excentricidades do peso próprio. Na Figura 2.6 (b), é possível observar o pormenor de fixação do painel à estrutura.



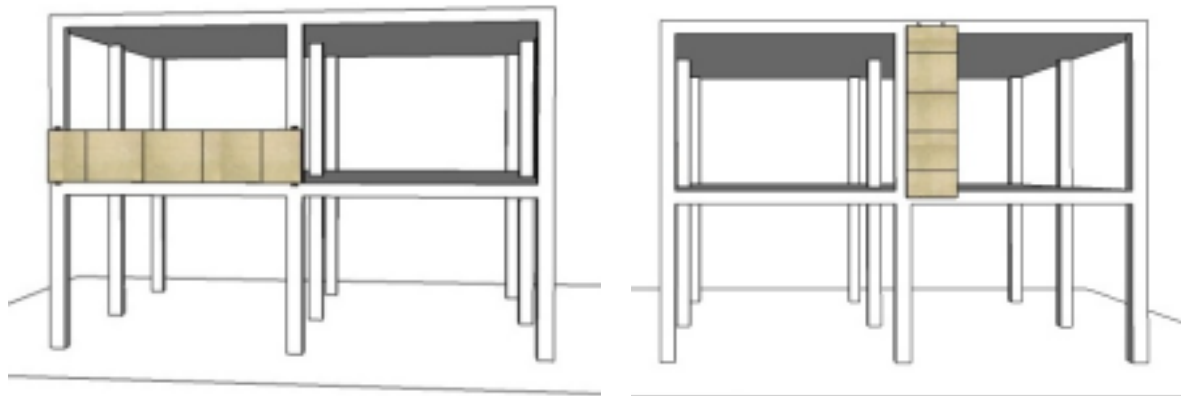
(a)



(b)

Figura 2.6 – (a) Isolamento com EPS; (b) Sistema de fixação (R. S. Camposinhos e Lello, 2010)

Por último, refere-se ainda que os painéis de fachada em pedra pré-esforçada aqui descritos são passíveis de ser fixados com duas orientações distintas. Assim, consoante a geometria da estrutura na qua será feita a fixação, é possível decidir se o painel será montado na horizontal (Figura 2.7 (a)) ou na vertical (Figura 2.7 (b)).



(a) (b)
Figura 2.7 – Fixação dos painéis à estrutura: (a) na horizontal; (b) na vertical

Segundo R. S. Camposinhos e Lello (2010), a utilização de painéis em pedra pré-esforçada para revestimento das fachadas trás algumas vantagens, por comparação com as soluções já conhecidas deste mercado:

- i. O painel pode ser utilizado para revestimento da fachada, revestindo a parede interior, ou mesmo sem parede (tapando apenas o interior do edifício), através das ligações à estrutura porticada, como representado na Figura 2.7. Neste último caso, é importante adotar uma solução com isolamento na sua caixa de ar;
- ii. À semelhança de outros revestimentos em pedra, este painel reduz significativamente as emissões de CO₂ para a atmosfera que se verificam nas soluções em betão (inerência à produção de cimento);
- iii. Os custos de manutenção são muito reduzidos, já que não existe uma ligação metálica incorporada na pedra. As placas de extremidade encontram-se apenas apoiadas através do sistema de cavilha anteriormente descrito.

2.4. Betão

Em termos de impacte ambiental, existem dois problemas inerentes ao fabrico de betão, associados à utilização de cimento e de agregado, respetivamente. No panorama atual, existe uma crescente preocupação com a redução das emissões de gases com efeito de estufa. Segundo Antunes (2013), o CO₂ é um dos gases que tem maior expressão no efeito de estufa, sendo 30% das suas emissões provenientes do sector da construção. Nesses 30%, o betão é responsável pela emissão de 5 a 7% dessas emissões, maioritariamente relacionadas com a produção de cimento (Anjos e Camões 2014; Antunes 2013; Ferreira *et al.* 2015). Estima-se que é emitida cerca de uma tonelada de CO₂, por cada tonelada de cimento *Portland* produzido (Ferreira *et al.* 2015). Como tal, torna-se evidente a necessidade de criar soluções que consigam reduzir de forma eficaz esta emissão de gases com efeito de estufa. Adicionalmente à emissão de CO₂, a produção de betão requer a utilização de grandes quantidades de agregado. O agregado constitui uma fração significativa do volume de betão, pelo que a produção de grandes quantidades de agregado requer consequentemente uma extração de pedra que faça frente a essas necessidades.

Segundo Coutinho (2011), prevê-se que o consumo/produção de betão per capita continue a crescer nas próximas três décadas, pelo que é necessário desenvolver políticas sustentáveis para combater esse consumo crescente. Para conseguir um desenvolvimento sustentável, é imprescindível praticar a Ecologia na Indústria, que consiste na reciclagem de desperdícios produzidos por esta para substituir matérias-primas necessárias a outra indústria, reduzindo assim o impacte ambiental de ambas (Coutinho 2011). Como forma de reduzir o impacte ambiental provocado por esta problemática, têm sido levados a cabo estudos no sentido de desenvolver soluções eco-eficientes de betão, nos quais se propõem alternativas ao cimento *Portland*, para produção do betão. Outra solução passa pela utilização de agregados reciclados, que tem ganho um espaço importante. Os agregados são considerados de origem natural se forem resultado da extração de pedra na natureza. Se forem resultado de algum processo industrial, os agregados são classificados como industriais. Adicionalmente, os agregados podem ainda ser classificados como reciclados, quando resultam da britagem de betão pré-existente, ou quando têm origem no aproveitamento de desperdícios de pedra, provenientes de outras indústrias. No contexto de painéis de fachada, foram já desenvolvidos painéis em betão com vista à obtenção de soluções eco-eficientes. Apresentam-se de seguida dois exemplos de betões produzidos para aplicação em painéis de fachada, com vista à obtenção de uma solução eco-eficiente.

i. Projeto ECO-FACHADA

Ferreira *et al.* (2013) desenvolveram o projeto “Eco-fachada”. Este projeto teve como finalidade a produção de painéis em betão geopolimérico, sem cimento *Portland*. A substituição deste material na composição do betão por um material eco-eficiente permitiu reduzir substancialmente as emissões de CO₂ por metro cúbico de betão, inerentes à produção de cimento, constituindo-se assim como uma solução com menor impacte ambiental. Neste projeto, foi feito o desenvolvimento de ligantes geopoliméricos, como forma de ir ao encontro da “necessidade de encontrar uma alternativa ecologicamente eficiente ao cimento *Portland*, garantindo as mesmas, ou melhores, propriedades no produto final” (Ferreira *et al.* 2013). O facto deste painel utilizar subprodutos industriais para substituir o cimento *Portland* promove ainda a reciclagem de resíduos, indo ao encontro do conceito de Ecologia na Indústria, anteriormente enunciado.

ii. Painéis de Fachada Prefabricados em Betão Eco-Eficiente Ativado Alcalinamente

Ferreira *et al.* (2015) desenvolveram painéis de fachada prefabricados em betão eco-eficiente ativado alcalinamente. À semelhança do projeto anterior, este projeto teve como objetivo a substituição do cimento *Portland* no betão por outro material, pelas razões já conhecidas. Este betão destaca-se por utilizar cinzas volantes, que se revelam um substituto eficaz do cimento, na formulação do betão.

No âmbito desta dissertação, foi produzido um betão eco-eficiente. No entanto, não foi proposta uma alternativa ao cimento *Portland*, como no caso dos painéis acima descritos. O betão foi produzido com agregados resultantes dos desperdícios da indústria transformadora de pedra. Assim, a solução final constituirá um betão com menor impacte ambiental, na medida em que não foram inicialmente mobilizados recursos para a extração da pedra, com vista exclusivamente à produção desse agregado. A produção de betão com agregados reciclados de betão já foi posta em prática por vários autores, como Silva *et al.* (2015), Etxeberria *et al.* (2007) ou Tabsh e Abdelfatah (2009), que estudaram a utilização de agregados dessa natureza em betão estrutural. Em todos estes estudos, verifica-se que a utilização de agregados reciclados contribui para uma diminuição das resistências do betão à compressão e à tração. Por outro lado (e no âmbito desta dissertação), importa destacar a utilização de agregado reciclado proveniente da britagem de desperdícios de pedra de calcário moca-creme, que foi utilizado na produção de betão. A viabilidade da utilização de agregado calcário foi estudada por Aquino *et al.* (2010), que conclui que a utilização de um elevado teor de finos de calcário contribui para um aumento da resistência e do módulo de *Young* do betão.

2.5. Pedra

Atualmente, a indústria que se ocupa da extração da pedra como material de construção pode dividir-se em dois setores: produção de agregado ou pedras com um fim ornamental e/ou decorativo (Carvalho, 2007). Em termos estéticos, a pedra tem ganho muita importância no revestimento de fachadas, devido à durabilidade que este material apresenta e também ao seu grande valor ornamental (Veiga e Malanho, 2009). Atualmente, o mercado de painéis de fachada utiliza a pedra como material de revestimento, permitindo dar um acabamento às fachadas dos edifícios que tire proveito desse valor ornamental, tal como são exemplo algumas das soluções apresentadas na Tabela 2.1. Em Portugal existe uma indústria da pedra muito ativa, na qual se explora principalmente o mármore, o granito (Monteiro, 2014) e o calcário (Gonçalves, 2013). Além do seu excelente desempenho a nível estético, a escolha deste material tem também outras vantagens. Segundo Pinto (2015), a escolha de produtos em pedra natural permite:

- i. um melhor aproveitamento dos recursos naturais pétreos, resultante das novas tecnologias que reduzem o impacto ambiental da exploração deste material;
- ii. obter soluções não poluentes e com um longo ciclo de vida;
- iii. uma redução das anomalias e dos custos de manutenção durante esse ciclo de vida;
- iv. uma reutilização e reciclagem do produto no fim do ciclo de vida.

Este último aspeto é particularmente importante. Um dos grandes problemas associados à indústria da pedra prende-se com o elevado desperdício que é originado nos processos de corte deste material, desde a sua extração na natureza, até à sua aplicação final. A possibilidade de reciclagem deste material permite uma valorização extra do mesmo, podendo ser aproveitado para o sector de produção de agregado. De seguida, representa-se de forma sucinta na Figura 2.8 as etapas que constituem o ciclo de vida da pedra natural, enquanto material de construção utilizado para revestimentos.

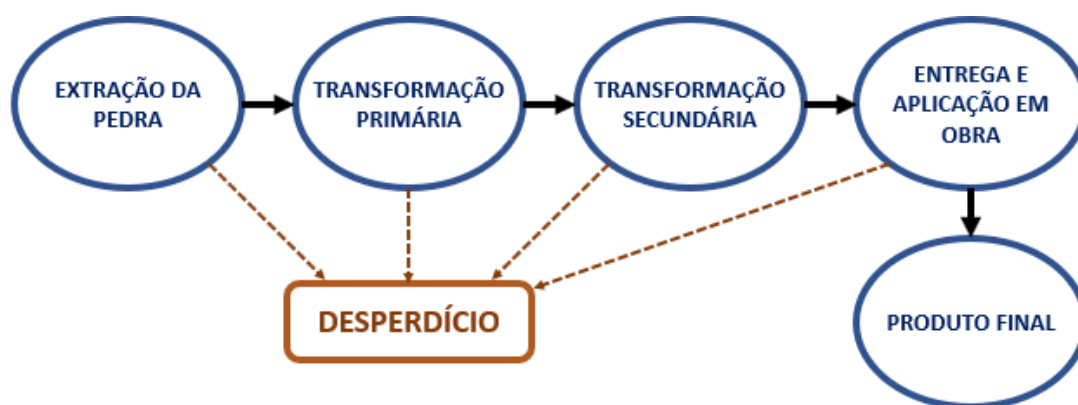


Figura 2.8 – Ciclo de vida da pedra natural

Como forma de colmatar o elevado desperdício que é originado nesta indústria, propõe-se a produção dum betão, com vista ao aproveitamento do desperdício originado nas fases de transformação primária e secundária.

3. Conceito

O projeto “*INOVWALL*” tem por objectivo desenvolver um produto que seja simultaneamente uma parede interior e um painel de fachada, este último baseado no produto resultante do projecto “*PRESSTONE*”. Com a presente dissertação pretende-se fazer a prova de conceito de uma alternativa ao produto “*INOVWALL*”, a qual consiste na valorização de desperdício da indústria da pedra, através da sua incorporação, como agregado reciclado, no betão constituente da parede interior. Neste capítulo, procura-se descrever a função que cada componente desempenha no sistema do painel de fachada.

3.1. Modelo

Como forma de apresentar uma ideia inicial daquele que será o produto a desenvolver, apresenta-se na Figura 3.1 um modelo 3D do painel de fachada híbrido. Este modelo apresenta-se em vista explodida, de modo a tornar mais perceptível a forma como cada componente encaixa no painel final.

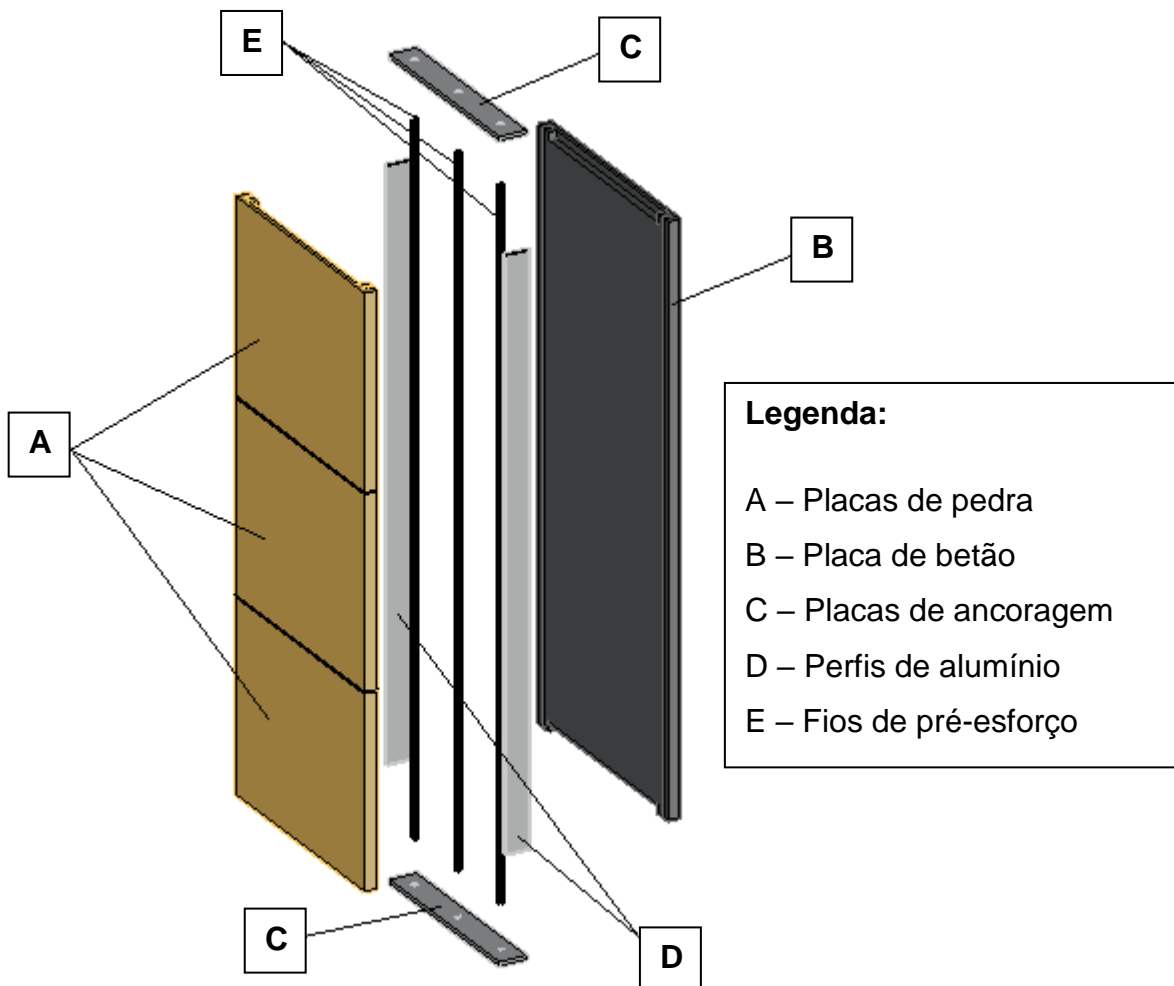


Figura 3.1 – Apresentação do painel híbrido em vista explodida

As placas de pedra (painel de fachada) e de betão (parede interior) são dispostas de forma a criar uma caixa de ar com 30 mm de espessura. A face exterior tem dimensões de 1,5x0,6 m² e é composta por três placas de pedra, e a face interior é composta por uma única placa de betão, também de dimensões 1,5x0,6 m². Nas extremidades são colocadas placas de ancoragem. Nos orifícios das ancoragens, é feita a fixação dos fios de pré-esforço, através de barriletes e de cunhas cónicas. Entre as placas de pedra e de betão, têm lugar dois perfis metálicos com 1,5 m de comprimento, que garantem a assemblagem entre os dois materiais, impedindo deslocamentos relativos entre o betão e a pedra. Esses perfis encaixam em duas reentrâncias, com 5 mm de espessura, que acompanham o desenvolvimento em altura do painel (na pedra e no betão). Na sua totalidade, o painel deve apresentar dimensões em alçado de 1,5x0,6 m².

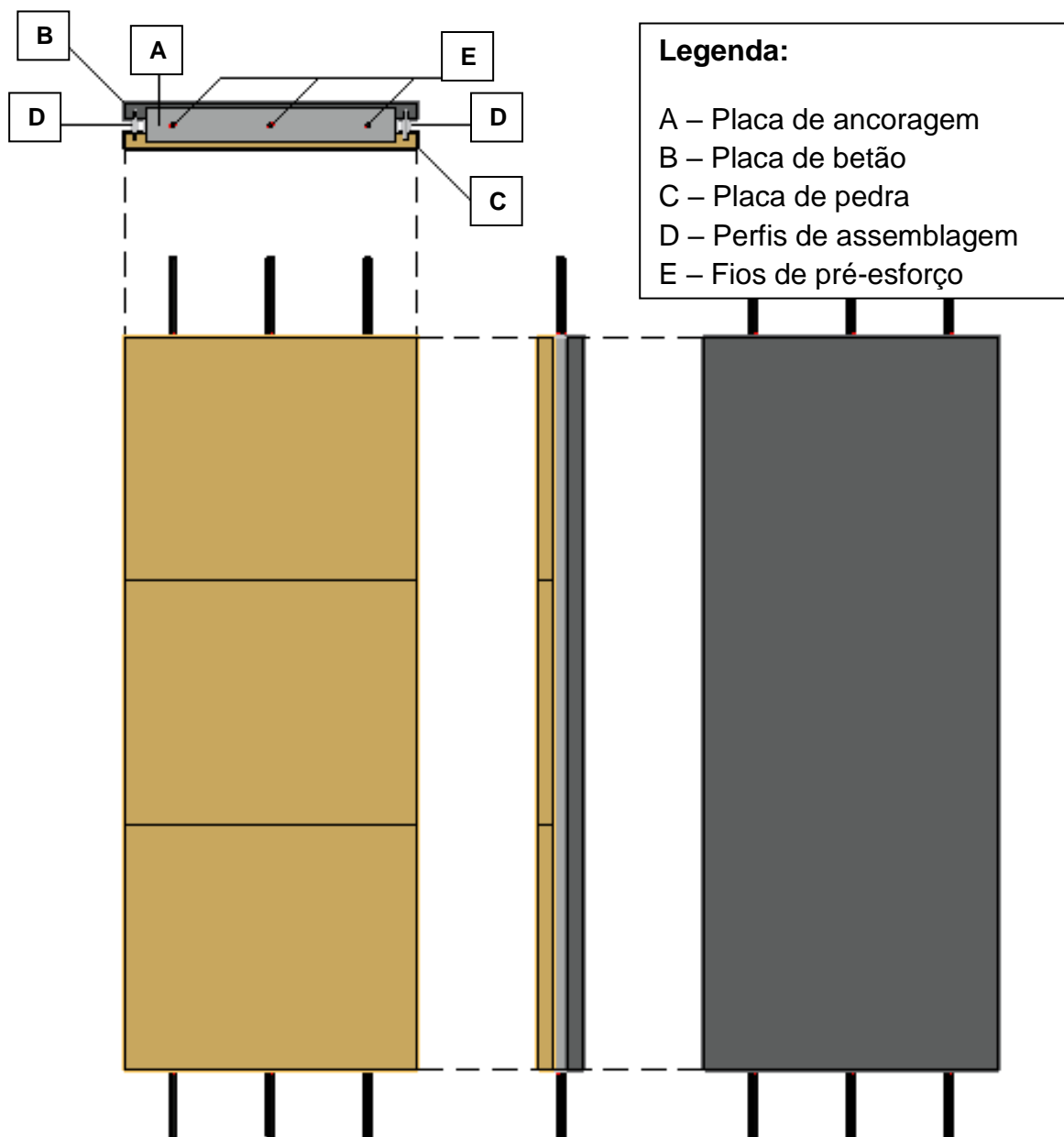


Figura 3.2 – Representação do painel híbrido em planta, alçado principal, alçado lateral e tardo

Todas as dimensões relevantes à definição geométrica das placas de pedra e de betão são apresentadas no Anexo 1 e Anexo 2, respetivamente. As dimensões relevantes à definição geométrica da placa de ancoragem e perfil de assemblagem são apresentadas no Anexo 3. Após a assemblagem do painel, todos os componentes começam a trabalhar solidariamente, formando-se uma “estrutura” única, o painel híbrido.

3.2. Alumínio e Aço

Para a caracterização mecânica dos metais a utilizar nos perfis de assemblagem e nos fios de pré-esforço, foram efectuados dois ensaios à tração a provetes de alumínio (secção 3x60 mm²) e de aço de alta resistência ($\Phi 6$). Nas Figuras 3.3 e 3.4, apresentam-se os gráficos para esses ensaios, realizados com controlo de força.

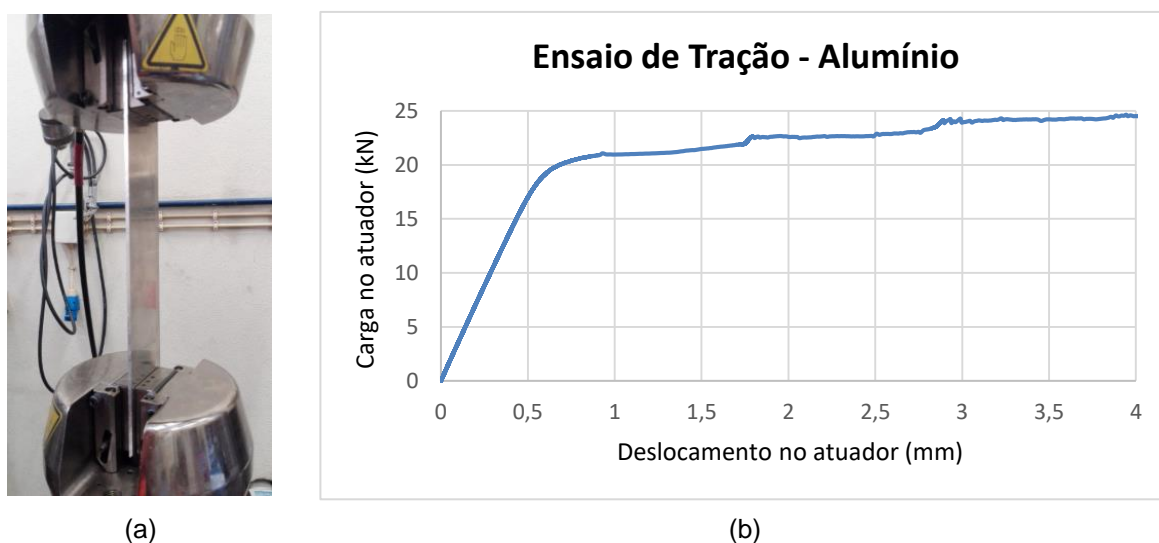


Figura 3.3 – Ensaio de tração ao alumínio: provete (a) e gráfico (b)

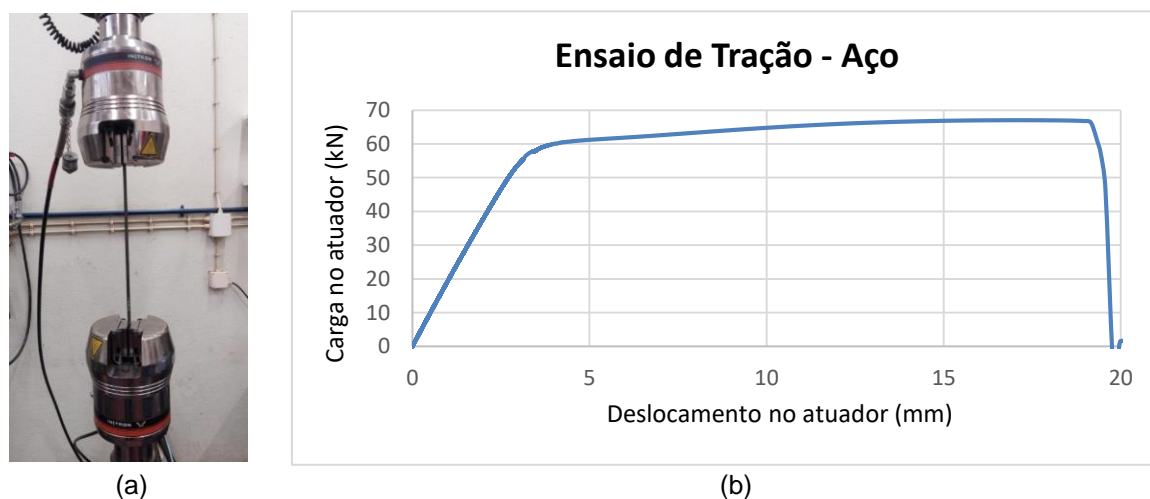


Figura 3.4 – Ensaio de tração ao aço: provete (a) e gráfico (b)

Observando ambos os gráficos, é possível verificar um comportamento elástico linear até uma carga de 18 kN e 50 kN para o alumínio e para o aço, respetivamente.

Embora estes materiais sejam metais que não apresentam um patamar de cedência (ao contrário do aço comum), considerou-se a tensão máxima admissível como o maior valor de tensão em regime elástico, para garantir que ambos os materiais estão apenas a trabalhar em regime elástico linear.

3.3. Pedra

Nestes painéis híbridos, apenas uma das faces apresenta placas de pedra (face exterior). Essa face tem três placas de pedra, cada uma com dimensões de secção transversal $0,6 \times 0,5 \text{ m}^2$. Relativamente à espessura destas placas, foram produzidas com uma espessura de 30 mm. Na Figura 3.5, apresentam-se duas placas de topo e uma placa intermédia, cuja assemblagem constitui a face exterior do painel (placas limitadas a vermelho).

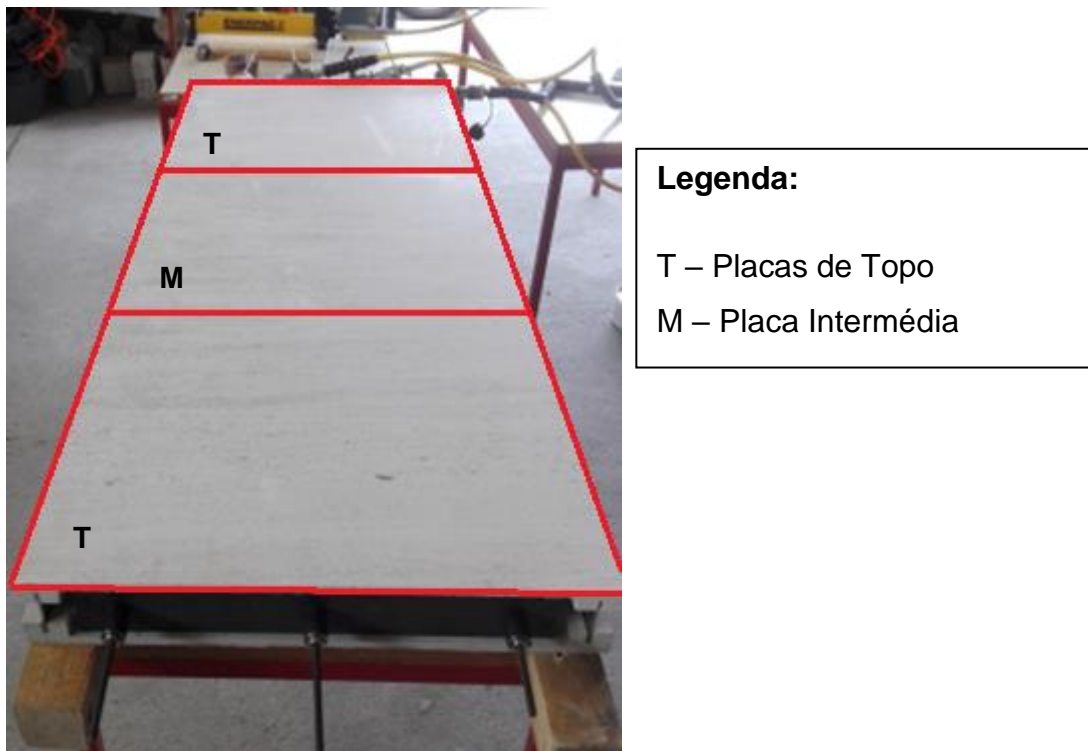


Figura 3.5 – Disposição das placas integrantes da face exterior do sistema

Na separação de cada placa, estão juntas preenchidas por uma resina *epoxy*, de forma a promover uma boa aderência entre placas e um monolitismo da face exterior. A utilização de três placas de pedra na face exterior, em vez de uma única, oferece algumas vantagens, nomeadamente na fase de montagem. A separação da face exterior em três placas independentes permite que haja uma maior facilidade na montagem dos painéis, com placas mais leves, de fácil manuseamento. A face exterior é um elemento do sistema que deve cumprir com requisitos de natureza estética ou ornamental. Como tal, é muito importante que o tipo de pedra utilizado seja esteticamente apelativo, mas que também tenha condições para resistir a condições meteorológicas mais adversas, às quais poderá vir a estar sujeito, assim como a outros fatores que influenciem a durabilidade da própria pedra. Para esta placa exterior, a pedra utilizada foi um calcário moca creme.

As placas de pedra exteriores foram fornecidas já com a geometria final, pela *Solancis*. Na Tabela 3.1, apresentam-se as principais especificações desta pedra que será utilizada na produção das placas exteriores.

Tabela 3.1 – Caracterização da pedra exterior

Designação	Calcário Moca Creme
Resistência à compressão (MPa)	93
Resistência à tração (MPa)	9,4
Massa volúmica (kg/m³)	2430
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	45

Na caracterização da pedra, o valor da resistência à tração é calculado através do ensaio à flexão. O valor para o módulo de *Young* de calcários moca creme correntes foi obtido através da caracterização física e mecânica de rochas ornamentais (Amaral, Fernandes, e Rosa 2007). Para a colagem das placas de pedra, foi utilizada uma resina *epoxy*. As propriedades mecânicas dessa resina encontram-se descritas na Tabela 3.2 (no Anexo 4, apresenta-se a ficha técnica deste material).

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas da resina

Resistência à tração por flexão (MPa)	50 a 60
Resistência à tração (MPa)	20 a 30
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	5,5

3.4. Betão

O betão é o material a utilizar na produção do elemento interior (parede). Pretende-se valorizar o desperdício da indústria da pedra (que produz o painel exterior), incorporando-o como agregado reciclado e desenvolvendo uma placa de betão com as mesmas dimensões das placas de pedra. Na Tabela 3.3 apresenta-se a especificação técnica do betão a produzir.

Tabela 3.3 – Designação do betão de acordo com a norma NP EN 206-1

Norma	NP EN 206-1
Classe de resistência	C40/50
Classe de exposição ambiental	X0(P)
Máximo teor em cloretos	Cl 1,0
Máxima dimensão do agregado mais grosso	D _{máx} 10
Classe de consistência	Autocompactável (S5)

De acordo com a norma portuguesa, a designação do betão a produzir será a seguinte: **NP EN 206-1 C40/50 , X0(P) , Cl 1,0 , D_{máx} 10 , S5**.

Tendo em conta que se pretende produzir painéis com uma espessura reduzida, a operação de vibração seria difícil de pôr em prática, pois não haveria condições para acomodar a agulha do vibrador. Como tal, a produção de um betão autocompactável resolve o problema da vibração do betão, promovendo uma boa compacidade do mesmo.

Na concepção do painel híbrido, pretende-se que as duas placas sejam compatíveis uma com a outra a nível de deformações. Para o controlo de deformações entre ambas as placas, é importante que ambos os materiais tenham valores de módulo de Young na mesma ordem de grandeza, assim como os valores para o coeficiente de dilatação térmica. O EC2 preconiza que um betão com uma classe de resistência C90/105, apresenta um módulo de *Young* de 44 GPa (o mais próximo do calcário). Para produzir um betão com uma resistência característica de 90 MPa, seriam necessárias altas dosagens de cimento, o que implicaria um aumento significativo do custo de produção. Assim sendo, foi produzido um betão com metade da resistência indicada (C40/50), para o qual corresponde um módulo de *Young* de 35 GPa. Verificar-se-á mais adiante que, em função do pré-esforço instalado, o encurtamento diferencial entre ambas as faces é muito reduzido, permitindo validar esta escolha de betão.

Relativamente ao controlo de deformações por um gradiente térmico, a pedra e o betão apresentam coeficientes de dilatação térmica linear iguais a $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{-1}$ e $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{-1}$, respetivamente. Comparando os dois valores, conclui-se que para a mesma variação térmica, a placa de betão apresenta o dobro das deformações da placa de pedra. Apesar desta diferença de deformações ser indesejável, a pedra estará sujeita a uma variação de temperatura superior, por se encontrar na face exterior.

As deformações elásticas provocadas pela ação do pré-esforço podem ser calculadas em função do módulo de *Young* e da área de secção de cada fio, através da lei de *Hooke*, enunciada na Equação (3.1). Para alcançar deformações iguais em ambas as placas a longo prazo, é necessário contabilizar todas as deformações instaladas nas placas a longo prazo pelo pré-esforço, assim como as deformações da placa de betão por fluência e por retração hídrica. Apresenta-se na Equação (3.2) o cálculo da relação entre as variações de temperatura em cada material, num cenário de iguais deformações nas placas.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_c \Leftrightarrow \Delta T_p \times \alpha_p + \frac{\sigma_p t(\infty)}{E_p} = \Delta T_c \times \alpha_c + \frac{\sigma_c t(\infty)}{E_c} + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs} \quad (3.2)$$

Não sendo possível controlar as deformações na pedra e no betão por ação de um gradiente térmico, dificilmente se conseguem alcançar deformações no betão iguais às da pedra. Como tal, foram apenas calculadas as restantes componentes, relativas às deformações elásticas de ambos os materiais e deformações por fluência e por retração no betão.

3.5. Pré-esforço

No sistema de painel híbrido, o pré-esforço desempenha um papel importante ao nível das placas de pedra (face exterior), permitindo melhorar as condições de colagem. Adicionalmente, a instalação de um estado de compressão inicial nas duas faces permite solidarizar todas as partes do painel, fazendo com que estas trabalhem como um todo. A aplicação do pré-esforço é uma etapa que sucede à montagem dos painéis. Como forma de introduzir o pré-esforço no sistema do painel, serão pré-esforçados três fios, $\Phi 6$, compostos por um aço de alta resistência.

Para tracionar os fios, será utilizada uma bomba com três macacos hidráulicos. A transmissão da força às placas será feita através das placas de ancoragem. Na Figura 3.6 representam-se estes três elementos intervenientes no sistema de pré-esforço.



Figura 3.6 – (a) Fios de pré-esforço $\Phi 6$ e placa de ancoragem; (b) Macaco hidráulico

A manutenção da força de pré-esforço em cada fio será feita com recurso a barriletes e a cunhas cónicas, que impedem o retorno do fio à sua posição inicial, após o seu tensionamento. Apresentam-se os dois componentes na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Sistema barrilete-cunha

A colocação da cunha é feita com o auxílio de um martelo, aplicando-se uma força em cada cunha, até que toda ela esteja no interior de cada barrilete. De seguida, colocam-se os cilindros dos macacos hidráulicos em cada extremidade. Após colocação dos macacos, coloca-se novamente um barrilete e uma cunha em cada extremidade e repete-se o mesmo procedimento de encaixe da cunha no interior do barrilete. Por último, aplica-se o pré-esforço nos fios, de acordo com a força desejada, por observação do indicador. Na Figura 3.8, encontra-se esquematizada em vista explodida a montagem do sistema de pré-esforço. Os barriletes estão representados a vermelho, as cunhas estão representadas a cinzento e os macacos hidráulicos estão representados a laranja.

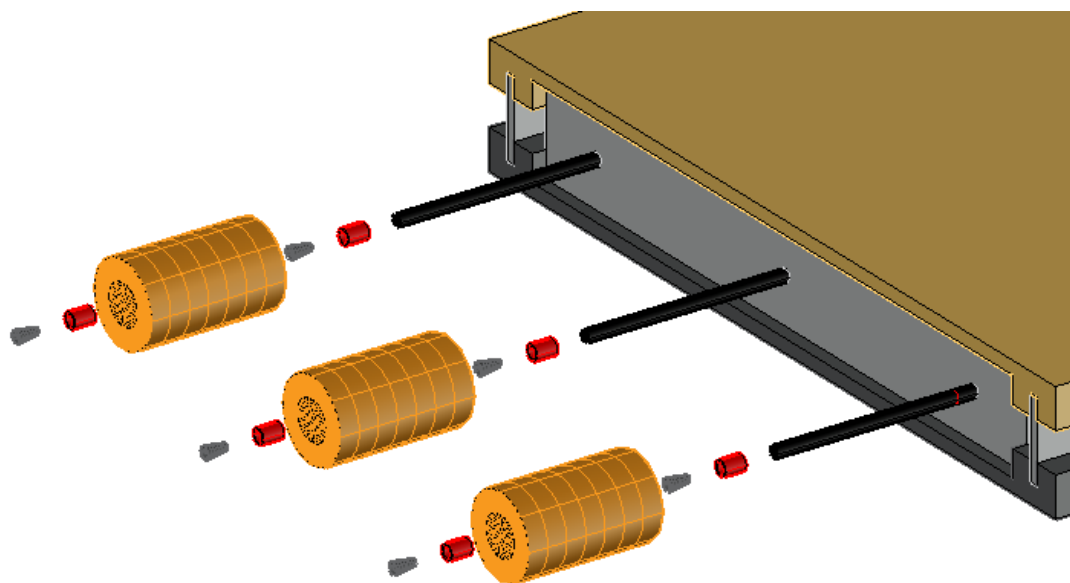


Figura 3.8 – Vista explodida do esquema de montagem do sistema de pré-esforço

A nível estrutural, o encaminhamento das cargas será feito em vários elementos. Primeiramente, os fios de pré-esforço serão tracionados através dos macacos hidráulicos. A transmissão da força para as placas de ancoragem dá-se por ação das cunhas cónicas, que irão impedir o retorno dos fios à sua posição original após o seu tensionamento. As placas de ancoragem, irão transmitir essa força até às placas de pedra e de betão, instalando-se uma compressão em todo o seu comprimento. Esta compressão não será uniforme, visto que o ponto de aplicação da força apresenta uma ligeira excentricidade em cada placa. Para avaliar o efeito do pré-esforço na secção, representa-se na Figura 3.9 o diagrama de tensões normais do painel.

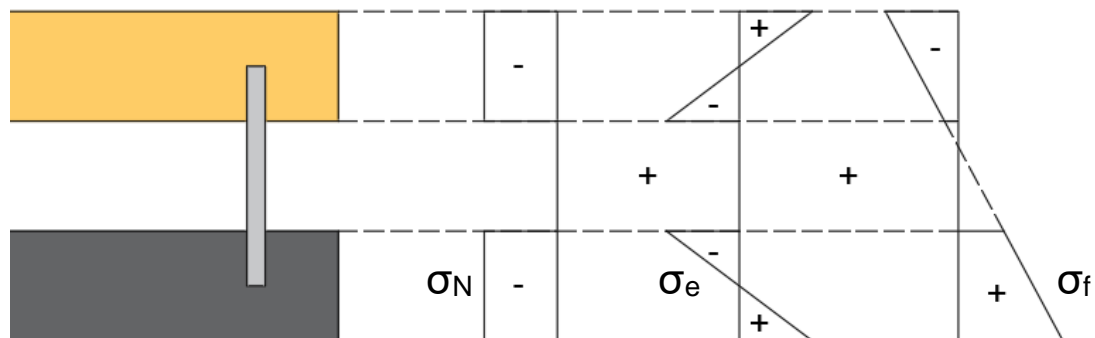


Figura 3.9 – Diagrama de tensões normais ao nível da secção transversal

$$\sigma = -\sigma_N + \sigma_e + \sigma_f = -\frac{N^*}{A} + \frac{N^* \times e}{w_1} + \frac{M}{w_2} \quad (3.3)$$

Para calcular as tensões normais na fibra mais condicionante (Equação (3.3)), é necessário considerar uma primeira parcela σ_N relativa à componente uniforme de tensões. De seguida, adiciona-se uma segunda parcela σ_e relativa à componente de flexão do pré-esforço excêntrico. Por último, adiciona-se uma terceira parcela σ_f relativa à flexão do painel, provocada pelas ações exteriores. A resultante do pré-esforço é aplicada a 8 mm do centro de rigidez da secção mista. No entanto, como o painel é composto por uma caixa de ar de 30 mm de espessura, esse vazio implica que a flexão provocada pelo pré-esforço se dê em sentidos opostos, para ambas as placas. É necessário considerar essa flexão de forma independente em cada placa. Como tal, a parcela σ_e é calculada com o módulo de flexão de apenas uma placa (w_1). A parcela σ_f é calculada com o módulo de flexão da secção total (w_2), após a montagem dos painéis e respetiva aplicação do pré-esforço, visto que a partir desse momento, todo o painel passa a trabalhar solidariamente. O valor N^* indica o pré-esforço instalado em cada face do painel. De seguida, apresenta-se o cálculo de cada parâmetro geométrico relevante.

$$A = 600 \times 30 = 18000 \text{ mm}^2$$

$$w_1 = \frac{I_{\text{placa}}}{z^*} = \frac{600 \times 30^3}{12 \times 15} = 90000 \text{ mm}^3$$

$$w_2 = \frac{I_{\text{mista}}}{z^*} ; z_r = \frac{A \times E_c \times z_c + A \times E_p \times z_p}{A \times E_c + A \times E_p} = \frac{26 \times 15 + 45 \times 75}{26 + 45} \approx 53 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{mista}} &= I_{\text{placa}} + A \times (z_r - z_c)^2 + I_{\text{placa}} + A \times (z_p - z_r)^2 + 2 \times (I_{\text{pf}} + A_{\text{pf}} \times (z_r - z_{\text{pf}})^2) = \\ &= \frac{600 \times 30^3}{12} + 18000 \times 38^2 + \frac{600 \times 30^3}{12} + 18000 \times 22^2 + 2 \times \left(\frac{3 \times 60^3}{12} + 60 \times 3 \times 8^2 \right) \approx \\ &\approx 2,73 \times 10^7 + 1 \times 10^7 + 1,31 \times 10^5 \approx 3,74 \times 10^7 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\text{Carregamento na face de pedra: } w_2 = \frac{I_{\text{mista}}}{z_r} = \frac{3,74 \times 10^7}{53} \approx 7,06 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$\text{Carregamento na face de betão: } w_2 = \frac{I_{\text{mista}}}{90 - z_r} = \frac{3,74 \times 10^7}{37} \approx 1,01 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Substituindo todos os valores relevantes na Equação (3.3), obtém-se uma expressão que permite calcular o momento fletor no instante em que teoricamente ocorre cada modo de rotura.

$$\sigma = -\frac{N^*}{18000} + \frac{N^* \times 5}{90000} + \frac{M}{w_2}$$

Avaliando apenas as duas componentes de tensão provocadas pelo pré-esforço (σ_N e σ_e), verifica-se que, independentemente do valor da força, o pré-esforço introduz sempre um diagrama de tensões que permite a descompressão da secção, com tensões normais nulas na fibra mais condicionante. O cálculo dessa tensão é descrito de seguida.

$$-\sigma_N + \sigma_e = -\frac{N^*}{18000} + \frac{N^* \times 5}{90000} = N^* \times \left(\frac{-1}{18000} + \frac{5}{90000} \right) = N^* \times 0 = 0 \text{ MPa}$$

O estado de tensões autoequilibrado provocado apenas pelo pré-esforço não permite o aumento de resistência do painel à flexão. Ao contrário do que acontece nas estruturas de betão pré-esforçado, a componente excêntrica de pré-esforço introduz tensões de tração na fibra mais condicionante que, para o caso deste painel, se anulam com as tensões uniformes de compressão. O diagrama de tensões resultante da acção do pré-esforço encontra-se representado na Figura 3.10.

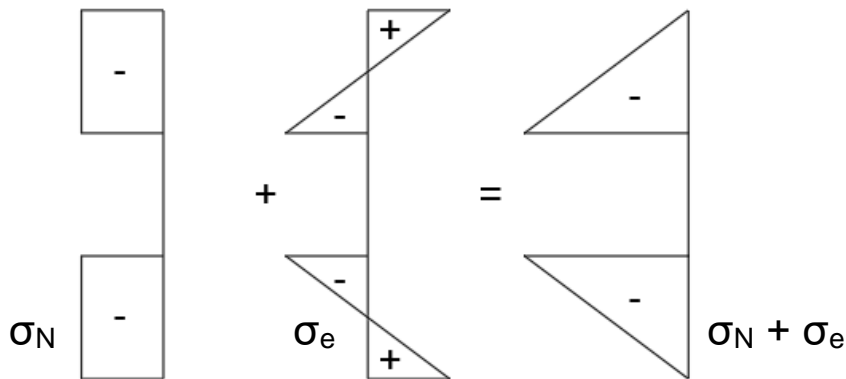


Figura 3.10 – Tensões normais provocadas pela acção do pré-esforço

Apesar das tensões provocadas pelo pré-esforço serem nulas nas fibras exteriores, a sua utilização continua a ser importante para a solidarização de todos os painéis e para introduzir um ganho importante na resistência à flexão do painel. No entanto, a aplicação de um estado de compressão do painel poderá provocar problemas de encurvadura. Como tal, a força de pré-esforço deverá garantir que não ocorra encurvadura nas placas, nem cedência dos fios de pré-esforço. Para avaliar essas duas condicionantes, apresenta-se de seguida o cálculo da carga de encurvadura para cada placa e a carga de cedência dos fios.

Cedência do aço: $F_y \approx 50 \text{ kN}$ (valor obtido através do ensaio à tração do provete em 3.2.)

Importa referir que, como as duas placas do painel são constituídas por materiais diferentes, embora a geometria das suas secções seja igual, o valor diferente do módulo de *Young* irá originar um sistema em que as duas faces possuem rigidez axial diferente. Como tal, é necessário ter em conta o valor de pré-esforço que será distribuído para a pedra e para o betão. Esse valor de pré-esforço pode ser obtido através de um coeficiente que traduz a rigidez axial relativa da placa de betão. O cálculo dessa rigidez é descrito em seguida.

$$K_c = \frac{E_c \times A_1}{E_c \times A_1 + E_p \times A_1} = \frac{E_c}{E_c + E_p} = \frac{26}{26 + 45} \approx 36,6\% ; K_p = (100 - 36,6) \approx 63,4\%$$

Considerando que o pré-esforço se reparte proporcionalmente à rigidez axial das placas e que a força em cada placa é resultante do pré-esforço de três fios, calcula-se de seguida o valor do pré-esforço em cada fio, necessário para provocar a encurvadura de cada placa.

$$\text{Carga de encurvadura da placa de betão: } P_{Cr} = \frac{\pi^2 E_c I_{placa}}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 26 \times \frac{600 \times 30^3}{12}}{1460^2} \approx 162,5 \text{ kN}$$

$$\text{Pré-esforço em cada fio que conduz à encurvadura do betão: } \frac{162,5}{3 \times 0,366} \approx 148 \text{ kN}$$

$$\text{Carga de encurvadura da placa de pedra: } P_{Cr} = \frac{\pi^2 E_p I_{placa}}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 45 \times \frac{600 \times 30^3}{12}}{1460^2} = 281,3 \text{ kN}$$

$$\text{Pré-esforço em cada fio que conduz à encurvadura da pedra: } \frac{281,3}{3 \times 0,634} \approx 148 \text{ kN}$$

Comparando as três cargas calculadas, verifica-se que a carga condicionante é a que leva à cedência dos fios de pré-esforço, não se verificando qualquer fenómeno de encurvadura. Para garantir a solidarização de todos os elementos do painel, aplicou-se uma força de tração em cada macaco correspondente a aproximadamente metade da força de cedência dos fios, ou seja, uma força de 25 kN. Através de cada um dos macacos hidráulicos (acoplados às extremidades de cada fio de pré-esforço), é possível aplicar em simultâneo uma força de 25 kN em cada fio. Na Figura 3.11, apresenta-se um esquema de montagem do macaco hidráulico, para posterior aplicação do pré-esforço.

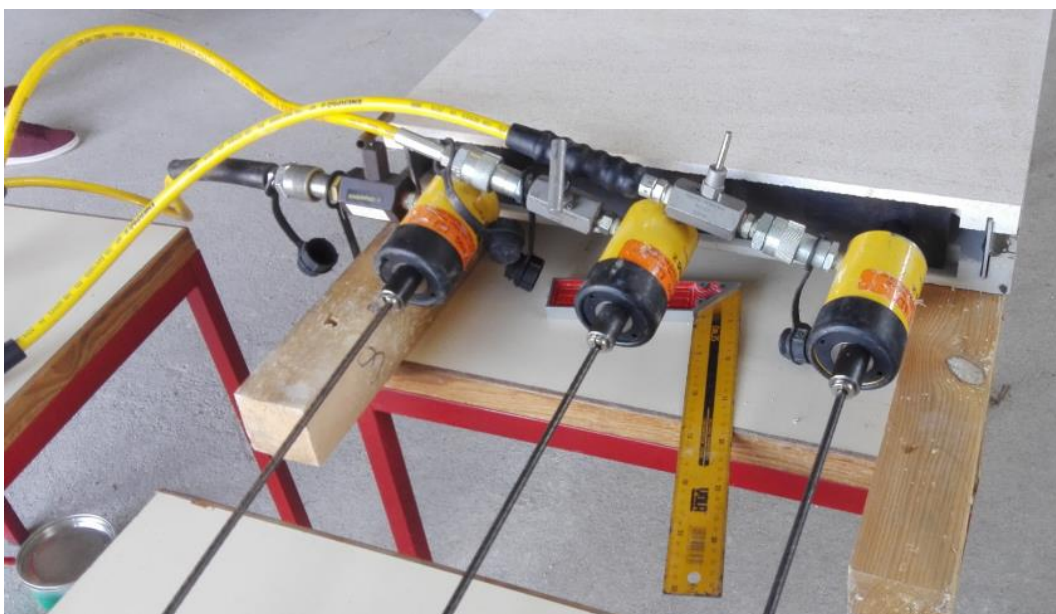


Figura 3.11 – Esquema de aplicação do pré-esforço

Neste sistema, verifica-se a existência de perdas instantâneas de pré-esforço. Essas perdas estão associadas à reentrada das cunhas nos barriletes. A utilização de uma bomba com três macacos hidráulicos permite tensionar as três extremidades dos fios em simultâneo, permitindo que o pré-esforço seja aplicado uniformemente em todo o painel. Apesar do painel apresentar uma deformação elástica, a aplicação do pré-esforço em simultâneo nos três fios, impede que a peça apresente perdas de pré-esforço por encurtamento diferencial dos fios. Como forma de monitorizar as perdas de pré-esforço, uma solução seria a aplicação de extensómetros nos fios, após a aplicação da força. Por medição da deformação axial de um fio (e conhecendo o módulo de *Young* do aço), é possível relacionar essa deformação com a perda de tensão em cada fio, através da lei de *Hooke*, anteriormente enunciada. Com as perdas de tensão, é possível obter a perda de pré-esforço, através da área de secção de cada fio. Nos painéis “*INOVWALL*” exclusivamente em pedra pré-esforçada, foi aplicado o método de extensometria em fios de aço $\Phi 6$, para estimar as perdas de pré-esforço instantâneas na aplicação do pré-esforço. Após aplicar uma força de pré-esforço e desligar os macacos hidráulicos do sistema, verificaram-se perdas de força instantâneas na ordem de 20%. Tendo em conta que se irá aplicar uma força de tração de 25 kN, tomando como referência perdas de 20%, o pré-esforço instalado nos fios, após perdas instantâneas, é de aproximadamente 20 kN. Aplicando a lei de *Hooke* e a expressão para o cálculo da deformação axial em função do encurtamento da peça (Equação (3.4)), é possível relacionar esta perda de força com o encurtamento que ocorreu nos fios de pré-esforço.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.4)$$

$$\sigma_s = E_s \times \varepsilon_s \Leftrightarrow \varepsilon_s = \frac{N}{E_s \times A_s} \Leftrightarrow \varepsilon_s = \frac{5000}{195 \times 10^3 \times \pi \times 3^2} = 9,07 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta L}{L_0} \Leftrightarrow \Delta L = \varepsilon_s \times L_0 \Leftrightarrow \Delta L = 9,07 \times 10^{-4} \times 1460 \approx 1,3 \text{ mm}$$

Este encurtamento dos fios está associado à forma como o pré-esforço foi instalado. No esquema representado na Figura 3.8, as cunhas exteriores “mordem” os fios, permitindo a sua tração, por ação do macaco hidráulico. Após desligar os macacos de cada fio, as cunhas interiores que se encontram na sua totalidade dentro dos barriletes encostados às placas de ancoragem (e que até esse instante não desempenhavam qualquer papel de fixação) passam a agarrar os fios, verificando-se uma reentrada dos fios de 1,3 mm. Relativamente às perdas diferidas, a presença de uma placa de betão implica perdas causadas pela fluência e retração do betão. O fenómeno de relaxação também introduz perdas diferidas. Para obter as perdas resultantes da fluência, é necessário conhecer as deformações impostas por esse fenómeno. Apresenta-se de seguida o cálculo das deformações do betão por fluência, obtidas através da Equação (3.5). Segundo a norma EN 1992-1-1 [1], é possível considerar aos sete dias de idade um coeficiente de fluência φ_c aproximadamente igual a 2,5 para betões produzidos com cimento de secagem rápida (e considerando um ambiente com uma humidade relativa de 50%).

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\sigma_c \times \varphi_c}{E_c} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\sigma_c \times \varphi_c}{E_c} = \frac{\left(\frac{60000 \times 0,366}{18000} + \frac{60000 \times 0,366 \times 5}{90000} \right) \times 2,5}{26 \times 10^3} \approx 2,35 \times 10^{-4}$$

Apesar do betão apresentar deformações por fluência, considerou-se que na pedra não se verifica o mesmo fenómeno. Como tal, as deformações axiais em todo o painel provocadas pelo pré-esforço (a longo prazo) vão ser diferentes, consoante o material que se encontra comprimido. Como os vãos comprimidos na placa de betão e na pedra têm exactamente o mesmo comprimento inicial que o comprimento dos fios que se encontra tracionado, é possível observar uma variação linear de extensões ao longo da secção, desde a fibra mais comprimida de betão, até à placa de pedra. Na Figura 3.12 representa-se a evolução das extensões ao longo da secção do painel, provocadas pelo pré-esforço.

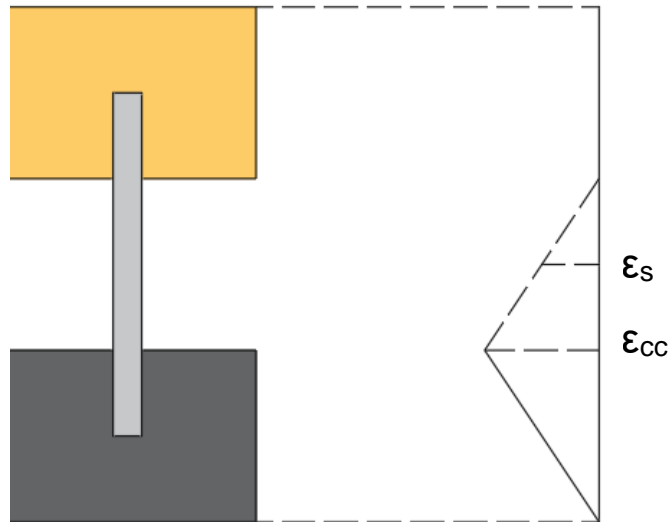


Figura 3.12 – Diagrama de extensões normais ao nível da secção transversal

Tendo em conta esta variação linear de extensões, é possível concluir que a extensão observada nos fios de pré-esforço pelo efeito da fluência do betão corresponde a metade do valor da extensão por fluência, na fibra mais comprimida. Através dessa extensão e aplicando a lei de *Hooke*, é possível calcular as perdas de pré-esforço por fluência em cada fio.

$$\Delta\sigma_s = E_s \times \varepsilon_s \Leftrightarrow \Delta P = E_s \times \frac{\varepsilon_{cc}}{2} \times A_s \Leftrightarrow \Delta P = 195 \times \frac{2,35 \times 10^{-4}}{2} \times \pi \times 3^2 \approx 0,65 \text{ kN}$$

Perdas por fluência: $\frac{0,65}{25} \times 100\% = 2,6 \%$

O cálculo das perdas por relaxação do aço implica o conhecimento do comportamento do aço, quando sujeito a uma deformação a longo prazo. Apresenta-se de seguida a Equação (3.6) para o cálculo das perdas de pré-esforço do aço por relaxação.

$$\Delta\sigma_{sr} = 0,8 \times 5,39\rho_{1000}e^{6,7\mu} \times \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \times \sigma_s(t_0) \times 10^{-5} ; \mu = \frac{\sigma_s(t_0)}{f_{pk}} \quad (3.6)$$

O aço utilizado pertence à Classe 1 para aços de relaxação normal. O parâmetro ρ_{1000} representa a perda por relaxação às 1000 horas de um provete tensionado a 70% da rotura e mantido a uma temperatura de 20°C (Cruz e Azenha, 2013). Para aços de Classe 1, adota-se para este parâmetro um valor de 8%. Para calcular as perdas a longo prazo, definiu-se um período t de 500000 horas (equivalente a 57 anos) (Cruz e Azenha, 2013). De seguida, apresenta-se o cálculo das perdas de pré-esforço por relaxação.

$$\mu = \frac{\sigma_s(t_0)}{f_{pk}} = \frac{2 \times 10^4 / \pi \times 3^2}{1860} \approx 0,38$$

$$\Delta\sigma_{sr} = 0,8 \times 5,39 \times 8 \times e^{6,7 \times 0,38} \times \left(5 \times 10^5 / 1000\right)^{0,75(1-0,38)} \times \frac{2 \times 10^4}{\pi \times 3^2} \times 10^{-5} \approx$$

$$\approx 56 \text{ MPa} \Rightarrow \Delta P_{sr} = \Delta\sigma_{sr} \times \pi \times 3^2 \times 10^{-3} \approx 1,6 \text{ kN}$$

Perdas por relaxação: $\frac{1,6}{25} \times 100\% = 6,4 \%$

Regista-se que estas perdas de relaxação calculadas são muito superiores ao que seria expectável, para este nível de carga aplicado em cada fio. Para colmatar estas perdas, poder-se-ia ter utilizado um aço de classe 2. Relativamente ao fenómeno da retração do betão, apesar deste se verificar a partir do instante em que é feita a betonagem, só constituem um problema para as perdas de pré-esforço, os valores de deformação por retração que se verificam após a montagem da placa de betão no sistema do painel. Segunda a norma EN 1992-1-1 [1], o cálculo das deformações por retração a longo prazo implica o cálculo de dois tipos de retração hídrica: retração endógena (ϵ_{ca}) e retração de secagem (ϵ_{cd}) (Equação (3.7)). Estes dois fenómenos ocorrem ao longo do tempo, com tendência a estabilizar a longo prazo. Apresenta-se na Equação (3.8), a expressão para o cálculo da retração endógena a longo prazo. Nas Equações (3.9) e (3.10), apresentam-se as expressões para o cálculo das retrações endógena e de secagem, em função do tempo t , em dias.

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{ca} + \epsilon_{cd}(t) \quad (3.7)$$

$$\epsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \times 10^{-6} \quad (3.8)$$

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t)\epsilon_{ca}(\infty) \quad (3.9)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2t^{0,5}}$$

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s)k_h\epsilon_{cd,0} \quad (3.10)$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{t - t_s + 0,04 \sqrt{h_0^3}} ; h_0 = \frac{2A_c}{u}$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110\alpha_{ds1}) \times e^{\left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right)} \right] \times 10^{-6} \times \beta_{RH} ; \beta_{RH} = 1,55 \times \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right]$$

Tendo em conta que o painel foi montado sete dias após a produção das placas de betão, existem valores de extensão por retração hídrica que não influenciam as perdas de pré-esforço. De seguida apresenta-se o cálculo da retração endógena, após a montagem dos painéis.

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \times 10^{-6} = 2,5 \times (40 - 10) \times 10^{-6} \approx 7,5 \times 10^{-5}$$

$$\beta_{as}(7) = 1 - e^{-0,2 \times 7^{0,5}} \approx 0,41$$

$$\varepsilon_{ca}(7) = \beta_{as}(7) \varepsilon_{ca}(\infty) = 0,41 \times 7,5 \times 10^{-5} \approx 3,08 \times 10^{-5}$$

Para o cálculo da retração de secagem, considerou-se um ambiente com uma humidade relativa de 50%. O coeficiente k_h (segundo a norma) pode tomar um valor unitário para $h_0 < 100$. Para o cálculo da retração de secagem básica $\varepsilon_{cd,0}$ (sem restrições de deslocamento da peça), a norma permite considerar coeficientes α_{ds1} e α_{ds2} iguais a 6 e 0,11, respetivamente (para um tipo de cimento de secagem rápida). De seguida, apresenta-se o cálculo da retração de secagem aos sete dias.

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 \times 600 \times 30}{600} = 60 \text{ mm} \implies k_h = 1$$

$$\beta_{ds}(7,1) = \frac{7 - 1}{7 - 1 + 0,04 \times \sqrt{60^3}} \approx 0,24$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \times \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] = 1,55 \times \left[1 - \left(\frac{50}{100} \right)^3 \right] \approx 1,36$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \times 6) \times e^{\left(-0,11 \times \frac{48}{10}\right)} \right] \times 10^{-6} \times 1,36 \approx 6 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{cd}(7) = \beta_{ds}(7,1) k_h \varepsilon_{cd,0} = 0,24 \times 1 \times 6 \times 10^{-4} \approx 1,44 \times 10^{-4}$$

Para calcular a retração de secagem a longo prazo (a partir do instante em que o painel é montado), deve ser feita a diferença entre a retração de secagem total e a retração de secagem da peça aos sete dias. Com as duas componentes de retração calculadas anteriormente, é possível calcular a retração hídrica total da placa de betão, após a sua montagem no sistema. Para a retração de secagem a longo prazo, considerou-se um período de 57 anos para o cálculo do coeficiente β_{ds} (o mesmo período considerado nas perdas por relaxação).

$$\beta_{ds}(\infty, 1) = \frac{365 \times 57 - 1}{365 \times 57 - 1 + 0,04 \times \sqrt{60^3}} \approx 1 \implies \varepsilon_{cd}(\infty) = 6 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{cs} = (\varepsilon_{ca}(\infty) + \varepsilon_{cd}(\infty)) - (\varepsilon_{ca}(7) + \varepsilon_{cd}(7)) \approx 5 \times 10^{-4}$$

Tendo em conta a variação linear de extensões anteriormente representada na Figura 3.12, foi possível concluir que a extensão no aço corresponde a metade do valor da extensão máxima no betão. Através da retração hídrica total, calculou-se as perdas de pré-esforços causadas por esse fenómeno. O seu cálculo apresenta-se de seguida.

$$\Delta\sigma_s = E_s \times \varepsilon_s \Leftrightarrow \Delta P = E_s \times \frac{\varepsilon_{cs}}{2} \times A_s \Leftrightarrow \Delta P = 195 \times \frac{5 \times 10^{-4}}{2} \times \pi \times 3^2 \approx 1,38 \text{ kN}$$

$$\text{Perdas por retração: } \frac{1,38}{25} \times 100\% = 5,5 \%$$

$$\text{Perdas diferidas: } 2,6 + 6,4 + 5,5 = 14,5 \% \implies 25 \times 0,145 \approx 3,6 \text{ kN}$$

$$\text{Pré-esforço útil: } 25 - 5 - 3,6 \approx 16,4 \text{ kN}$$

Através do valor da força de pré-esforço útil, é possível calcular as deformações finais em cada placa, através da Equação (3.2). Para o cálculo das deformações, considerou-se uma ausência de gradiente térmico.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_c \Leftrightarrow \Delta T_p \times \alpha_p + \frac{\sigma_p t(\infty)}{E_p} = \Delta T_c \times \alpha_c + \frac{\sigma_c t(\infty)}{E_c} + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs}$$

$$\sigma_p t(\infty) = -\frac{16400 \times 3 \times 0,634}{16400} - \frac{16400 \times 3 \times 0,634 \times 5}{90000} \approx -3,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_c t(\infty) = -\frac{16400 \times 3 \times 0,366}{16400} - \frac{16400 \times 3 \times 0,366 \times 5}{90000} \approx -2,1 \text{ MPa}$$

$$\text{Deformações na pedra: } \varepsilon_p = \frac{\sigma_p t(\infty)}{E_p} = \frac{3,6}{45 \times 10^3} = 8 \times 10^{-5}$$

$$\begin{aligned} \text{Deformações no betão: } \varepsilon_p &= \frac{\sigma_c t(\infty)}{E_c} + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs} = \frac{2,1}{26 \times 10^3} + 2,35 \times 10^{-4} + 5 \times 10^{-4} = \\ &= 8,16 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Comparando os dois valores, verifica-se que a deformação ao nível do betão aproximadamente dez vezes superior à deformação da pedra.

4. Caracterização experimental

A componente experimental do presente trabalho incluiu as seguintes quatro fases:

- i. Produção de agregado;
- ii. Produção e caracterização do betão;
- iii. Produção dos painéis;
- iv. Ensaio aos painéis;

4.1. Produção de agregado

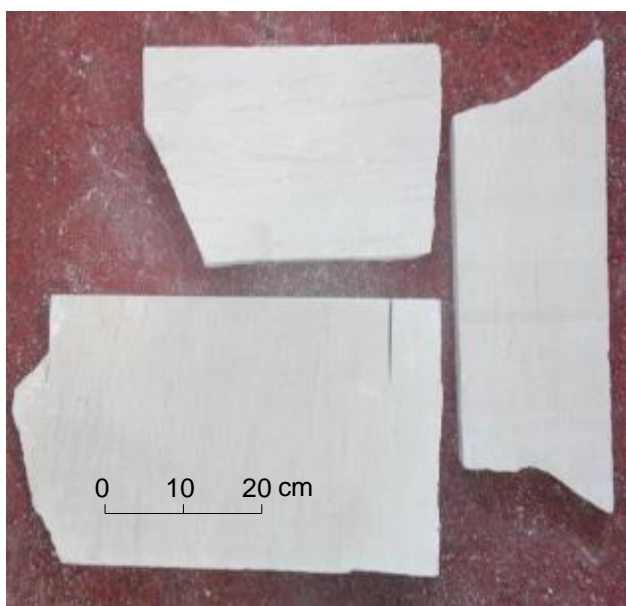
A produção de agregado foi uma das atividades laboratoriais mais morosas. Numa fase inicial, foi necessário fazer o transporte do desperdício da pedra (calcário moca creme). De seguida, foi necessário britar o desperdício e proceder à peneiração da mistura, de forma a obter uma mistura com material dentro da gama de granulometrias desejada. Nas secções seguintes, são descritas com mais pormenor essas duas fases distintas.

4.1.1. Britagem

Na Figura 4.1 (a) apresenta-se a britadeira utilizada para britar os desperdícios de placas de calcário moca creme (Figura 4.1 (b)).



(a)



(b)

Figura 4.1 – (a) Britadeira; (b) Amostra de calcário moca creme (b)

Para proceder à britagem da pedra, é necessário definir inicialmente uma dimensão máxima para o agregado a produzir. A dimensão máxima do agregado deve corresponder a um terço da espessura do painel de betão, ou seja, 10 mm. Com base nesta dimensão máxima, ajustou-se a abertura da britadeira, de forma a que o material resultante da britagem apresentasse as dimensões pretendidas. Na Figura 4.2, apresenta-se uma amostra do material resultante da britagem dos desperdícios das placas de calcário moca creme.



Figura 4.2 – Mistura resultante da primeira britagem

Importa referir que neste material resultante da britagem, encontra-se uma fração significativa de agregados grossos, com dimensão superior a 10 mm. A análise da granulometria da brita encontra-se descrita na secção 4.1.2.

Para evitar desperdícios significativos de material, os agregados grossos foram sujeitos a uma segunda britagem. Como resultado da segunda britagem, todas as partículas com dimensão inferior a 10 mm foram reaproveitadas como agregado a utilizar no betão. Os agregados mais grossos que se mantiveram com uma dimensão superior a 10 mm na segunda britagem não foram aproveitados.

4.1.2. Peneiração

A partir de uma inspeção visual ao material britado, é possível observar que o teor em finos presente na mistura é relativamente elevado. Numa fase inicial, foi feita uma peneiração de uma pequena amostra de 2 kg, para perceber quais as granulometrias presentes na mistura britada e em que proporções. A peneiração foi realizada com recurso a um peneiro elétrico, como se pode observar na Figura 4.3. Para fazer a peneiração de agregados com dimensão superior a 4 mm, utilizou-se o da Figura 4.3 (a). Para a peneiração de agregados com granulometria inferior a 4mm, utilizou-se o equipamento da Figura 4.3 (b).



(a)



(b)

Figura 4.3 – Sequência de peneiros: grossos (a) e finos (b)

Para realizar a peneiração foi utilizada uma sequência de peneiros pertencente à série europeia de peneiros, segundo a norma europeia EN 933-1. A sequência de peneiros utilizada, assim como os resultados da peneiração, encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados da primeira peneiração

Peneiro # (mm)	Massa passada (g)	Massa retida (g)	%	% Retida Acumulada
12,5	1714	286	14,30	100
10	1529	185	9,25	85,70
8	1313	216	10,80	76,45
6,3	1119	194	9,70	65,65
4	883	236	11,80	55,95
2	640	243	12,15	44,15
1	507	133	6,65	32
0,5	427	80	4,00	25,35
0,25	325	102	5,10	21,35
0,125	140	185	9,25	16,25
0,063	30	110	5,50	7,00
0	0	30	1,50	1,50

A realização desta peneiração permitiu posteriormente traçar a curva granulométrica da mistura de agregados. Através de uma curva de referência de *Faury* para um betão autocompactável, é possível concluir se é necessário ou não adicionar agregado à mistura e de que granulometria. O método da curva de *Faury* permite ajustar a distribuição granulométrica dos agregados aos parâmetros de qualquer betão, desde um betão com consistência seca, até ao autocompactável. A curva é traçada através de dois segmentos de reta, num gráfico com a escala de abcissas proporcional a $\sqrt[5]{D}$ (sendo D a abertura da malha dos peneiros). Através do cálculo das ordenada do ponto de abcissa $D/2$, é possível traçar dois segmentos de reta que definem a curva de referência de *Faury*. O cálculo desse ordenada é feito através da Equação (4.1). O parâmetro B da curva pode ser obtido através da Tabela 4.2 (A. Sousa Coutinho, Vol. II).

Tabela 4.2 – Parâmetros A e B para definição da curva de *Faury*

Trabalhabilidade	Valores de A			Valores de B
	Areia rolada		Areia britada	
	Inerte grosso rolado	Inerte grosso britado		
Terra húmida	<= 18	<= 19	<= 20	1.0
Seca	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	28.0	30.0	32.0	2.0
Fluída	32.0	34.0	38.0	2.0

$$P_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{R/D - 0,75} \quad (4.1)$$

Os parâmetros A e B da curva contêm informação acerca do tratamento da superfície dos agregados para um betão autocompactável e acerca da consistência do betão, respetivamente. Como se produziu um betão autocompactável, adotou-se um valor de $B = 2$ igual ao de um betão corrente com uma trabalhabilidade fluída. Relativamente ao parâmetro A , como a Tabela 4.2 indica apenas os parâmetros da curva de *Faury* para betões correntes, no caso de betões autocompactáveis é possível utilizar um parâmetro A superior. Para este parâmetro, utilizou-se um valor de $A = 43$.

De seguida apresenta-se o cálculo da ordenada do ponto D/2. Para a dimensão máxima do agregado, considerou-se $D = 11,2$ mm (malha do último peneiro onde pelo menos 90% do material britado passou). Para o valor de R (raio médio do molde a encher), considerou-se conservativamente um valor de 11,2 mm (igual a D).

$$P_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{R/D - 0,75} = 43 + 17 \times \sqrt[5]{11,2} + \frac{2}{1 - 0,75} \approx 78,6\%$$

Todas as partículas finas com dimensões inferiores a 0,125 mm não são consideradas na curva de referência. Considerando que se utilizam apenas agregados com dimensões inferiores a 11,2 mm e que não existem partículas de dimensão inferior a 0,125 mm na mistura de agregado, assinalou-se no gráfico o ponto de abscissa D/2 e traçou-se a curva de referência de *Faury*, para um betão autocompactável. Posteriormente foi sobreposta no mesmo gráfico a curva da distribuição granulométrica real. Na Figura 4.4 representam-se as duas curvas. A curva de *Faury* encontra-se representada a vermelho e a curva da distribuição granulométrica encontra-se representada a castanho.

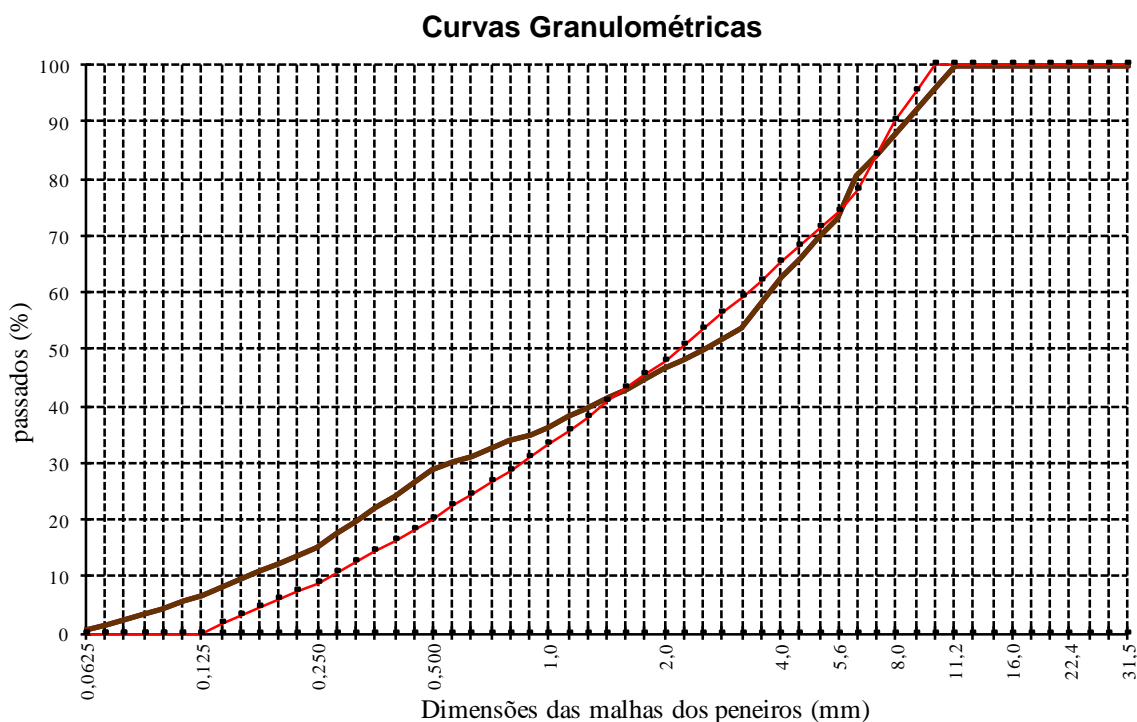


Figura 4.4 – Curva de *Faury* vs Curva do agregado

Por observação do gráfico na Figura 4.4, verifica-se que a curva do agregado calcário se ajusta ao andamento da curva de referência para um autocompactável. O teor em finos é superior na curva de agregado, até partículas de dimensão $D = 2$ mm. Para dimensões superiores, verifica-se que a distribuição granulométrica nas duas curvas é muito similar.

4.2. Produção de betão

Tal como referido na secção 3.4., pretende-se que o betão a produzir seja da classe de resistência C40/50. De seguida, é feita uma descrição da metodologia utilizada na definição da composição do betão, através dos seguintes passos:

- i. Especificação do comportamento do betão autocompactável, a nível de resistência e densidade e seleção dos componentes, intervenientes na mistura final;
- ii. Previsão da compacidade do betão autocompactável. Este valor depende do cimento e dos tipos de adjuvantes e adições utilizados e respetivas dosagens, assim como da forma e tamanho dos agregados;
- iii. Quantificação da pasta de ligante no betão, através das dosagens de pós ligantes (cimento e adições) e estimativa da compacidade e do volume de ar dessa pasta;
- iv. Verificação do ajuste da distribuição granulométrica de agregados à curva de referência de *Faury* para um betão autocompactável (como descrito na secção 4.1.2);
- v. Previsão da resistência à compressão ($f_{c,j}$) da pasta ligante, através da expressão de *Feret* (ver Equação (4.2)), que relaciona essa resistência com a compacidade da pasta (γ) e com um coeficiente de *Feret* experimental ($K_{1,j}$) para uma idade de j dias, que depende do tipo de cimento e do tipo e dosagem de adjuvantes;

$$f_{c,j} = k_{1,j} \times \gamma^2 \quad (4.2)$$

- vi. Previsão da resistência à compressão do betão, através dum coeficiente (C_f) que tem em conta o efeito do tipo de agregados utilizados (e respetiva dosagem) na diminuição da resistência à compressão da pasta. Essa previsão foi feita através da Equação (4.3);

$$f_c = f_{c,j} \times C_f ; C_f = \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{V_{abs,i}}{100} \times 0,20 \times 0,51^{\rho_{p0,i}^{2,9}} \right) \quad (4.3)$$

- vii. Definição final das dosagens de cada componente na mistura de betão. Essa composição da mistura encontra-se descrita na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Composição do betão autocompactável

Componente	Designação	Fornecedor	ρ (g/cm ³)	Fração (kg/m ³)
Agregado	AR Moca creme	URMAL	2,55	1616
Cimento	CEM I 52,5R	Secil-Maceira	3,15	300
Adição	Filer Calcário FC	Omya	2,70	270
Superplastificante	Master Glenium 526	BASF	1,06	5,3
Água	-	-	1,00	155
Água de absorção	-	-	1,00	40

Como forma de validar a composição adotada para o betão, procedeu-se ao fabrico de provetes para serem posteriormente sujeitos a diferentes ensaios de caracterização do betão, de acordo com a norma NP EN 206-1, indicando-se os resultados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Caracterização do betão de acordo com a NP EN 206-1

Parâmetro	Provete (cm)	Idade do betão	Valor
ρ	-	-	2360kg/m ³
$f_{cm,cube}$	15x15x15	7 dias	51,6 MPa
	15x15x15	28 dias	60,6 MPa
$f_{ct,sp}$	10x10	28 dias	3,27 MPa
f_{ctf}	4x4x16	1 dia	5,6 MPa
	4x4x16	7 dias	7,7 MPa
	4x4x16	28 dias	8,9 MPa
	10x10x40	28 dias	6,3 MPa
E_{cm}	10x10x40	28 dias	26 GPa

De seguida, apresentam-se duas figuras que ilustram o modo de rotura ocorrido em dois provetes distintos, para o betão produzido. Para obter a resistência à compressão do betão, foi realizado um ensaio à compressão simples. Na Figura 4.5 (a), observa-se o provete cúbico utilizado e respetivas superfícies de rotura, após a realização deste ensaio. Para se obter a resistência à tração do betão, foi realizado um ensaio de compressão diametral. Na Figura 4.5 (b), observa-se o provete utilizado e a respetiva superfície de rotura, após a realização deste ensaio.

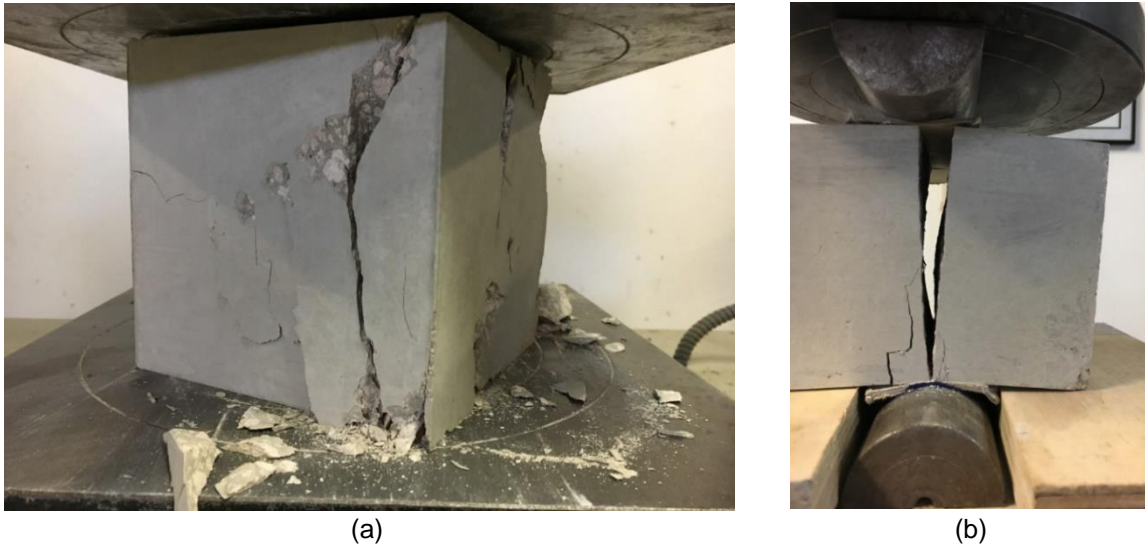


Figura 4.5 – Rotura dos provetes aos ensaios: (a) compressão simples; (b) compressão diametral

4.3. Produção dos painéis

Para a produção dos painéis, pretende-se criar uma placa de betão que tenha as mesmas dimensões da face exterior composta por três placas de pedra. A produção desse betão deverá seguir a formulação descrita na secção 3.4. As placas de betão produzidas têm uma das suas faces com acabamento cofrado. Pretende-se realizar no total quatro ensaios à flexão aos painéis híbridos. Para tal, foram produzidas quatro placas de betão, com as dimensões descritas em 3.1. Na fase de ensaios, dois dos painéis foram levados à rotura. Na Figura 4.6 apresenta-se uma das cofragens utilizada na betonagem.



Figura 4.6 – Cofragem em madeira

A produção dos painéis foi feita em duas betonagens distintas, devido à existência de apenas dois moldes. Na Figura 4.7 (a), observa-se a operação de produção do betão autocompactável, com recurso a uma misturadora. Na Figura 4.7 (b) observa-se a betonagem de um painel.



(a)



(b)

Figura 4.7 – Produção das placas de betão: (a) produção do betão; (b) fase de betonagem

Apesar do acabamento das faces de qualquer painel de fachada ser um aspeto importante, para a produção das placas de betão, apenas uma das faces possui um acabamento cofrado. A opção de ter apenas uma face cofrada foi tomada de forma a tornar o esquema de cofragem mais simples, apresentando apenas uma placa de fundo. Adicionalmente, o processo de betonagem torna-se mais simples, sendo feita a betonagem com a cofragem na horizontal. A face não cofrada apresentará, não obstante, um acabamento bastante satisfatório, devido às propriedades autocompactáveis do betão, que não permite a existência de grandes irregularidades nessa face. Na Figura 4.8 representam-se duas das placas de betão, já descofradas.



Figura 4.8 – Placas de betão após descofragem

As placas (após descofragem) são dispostas na horizontal. De seguida, são colocados dois perfis de assemblagem em alumínio em cada ranhura (com 5 mm de espessura), como se pode observar nos dois lados da placa, na Figura 4.8. Em simultâneo, foi preparada a mistura de resina *epoxy*, para ser usada nas juntas entre placas de pedra, bem como ao longo dos perfis. Para garantir uma colagem dos perfis de alumínio à pedra e ao betão, definiram-se pontos de colagem (a cada 25 cm), nos quais a resina foi introduzida nas ranhuras das placas, para posteriormente aderirem ao perfil. Após colocação dos perfis, colocaram-se as placas de ancoragem nas extremidades do painel, assim como os fios de pré-esforço. De seguida, colocaram-se as placas de pedra por cima, encaixando as zonas ranhuradas com o perfil de alumínio. Em cada junta de placas, foi aplicada uma camada de resina *epoxy*. Por último, introduziram-se as cunhas e os barriletes nas extremidades de cada fio, de acordo com o esquema de montagem apresentado em vista explodida, na Figura 3.8. Após a montagem de todos estes elementos, foi aplicado o pré-esforço desejado em cada fio, tal como já foi apresentado na Figura 3.11.

4.4. Ensaio à flexão

Os ensaios à flexão foram realizados com duas cargas em faca, com o intuito de avaliar a resistência à flexão do painel num troço de momento fletor constante. Para a sua realização, foi montado o *setup* do ensaio com recurso a quatro apoios pontuais, cada um localizado a uma distância de 4 cm dos bordos mais próximos do painel. Como forma de aplicar duas cargas em faca em cada secção do painel a 1/3 e 2/3 do vão, foi primeiramente acoplado um perfil HEB 240 ao atuador. Esse perfil foi posteriormente aparafusado a dois perfis HEB 100 na direção perpendicular. Estes perfis permitiram a aplicação de cargas em faca, com recurso a duas réguas de madeira, colocadas à superfície de cada secção de carregamento. Na Figura 4.9, representa-se o *setup* do ensaio.

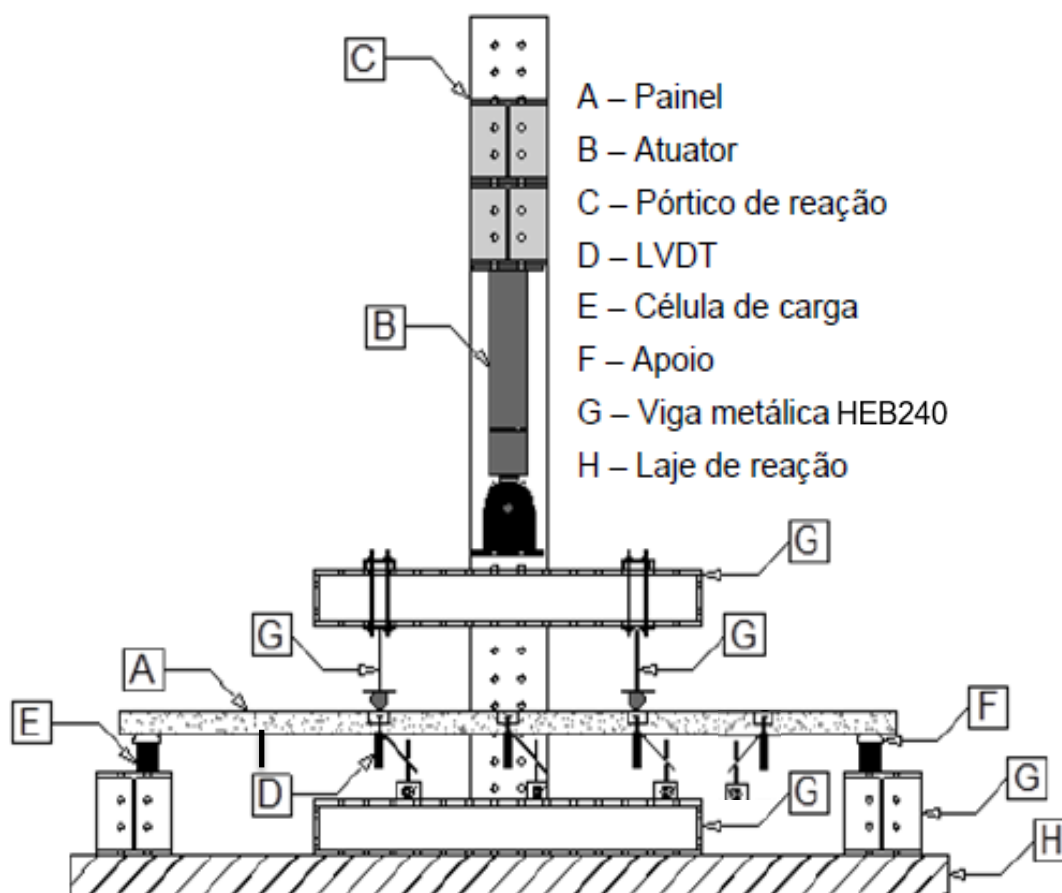


Figura 4.9 – *Setup* dos ensaios a realizar (adaptado de Luis Ferreira, 2015)

Ao nível da instrumentação, foram utilizados transdutores de deslocamento vertical, LVDT, em secções do painel espaçadas de 25 cm (ver Figura 4.9). Os LVDT permitem medir deslocamentos com um grau de precisão elevado (na ordem da centésima de milímetro), que serão úteis para estimar a deformada do painel. Cada um dos apoios foi instrumentado com uma célula de carga. As leituras das células de carga permitem monitorizar os valores das reações de apoio ao longo dos ensaios. Através dessas leituras de reações, é possível verificar se existe uma distribuição simétrica do carregamento ao longo do ensaio.

Na Figura 4.10, apresenta-se a instrumentação de um apoio com uma célula de carga (Figura 4.10 (a)) e a distribuição dos LVDT no *setup* do ensaio (Figura 4.10 (b)).

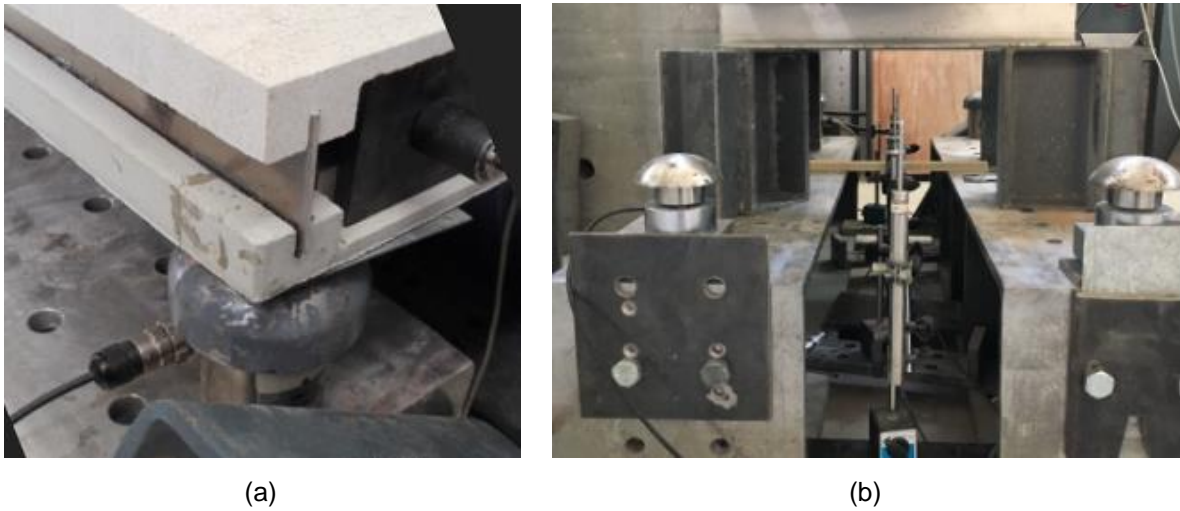


Figura 4.10 – Instrumentação do *setup*: (a) célula de carga; (b) LVDT

O próprio atuador também possui uma célula de carga e um transdutor de deslocamento vertical. Os ensaios podem ser realizados com controlo de força ou de deslocamento. As leituras das reações e dos deslocamentos medidos ao longo dos ensaios foram obtidas com recurso ao *datalogger DynaTester*. As duas cargas em faca foram aplicadas com recurso a duas régua em madeira, tal como se apresenta na Figura 4.11.

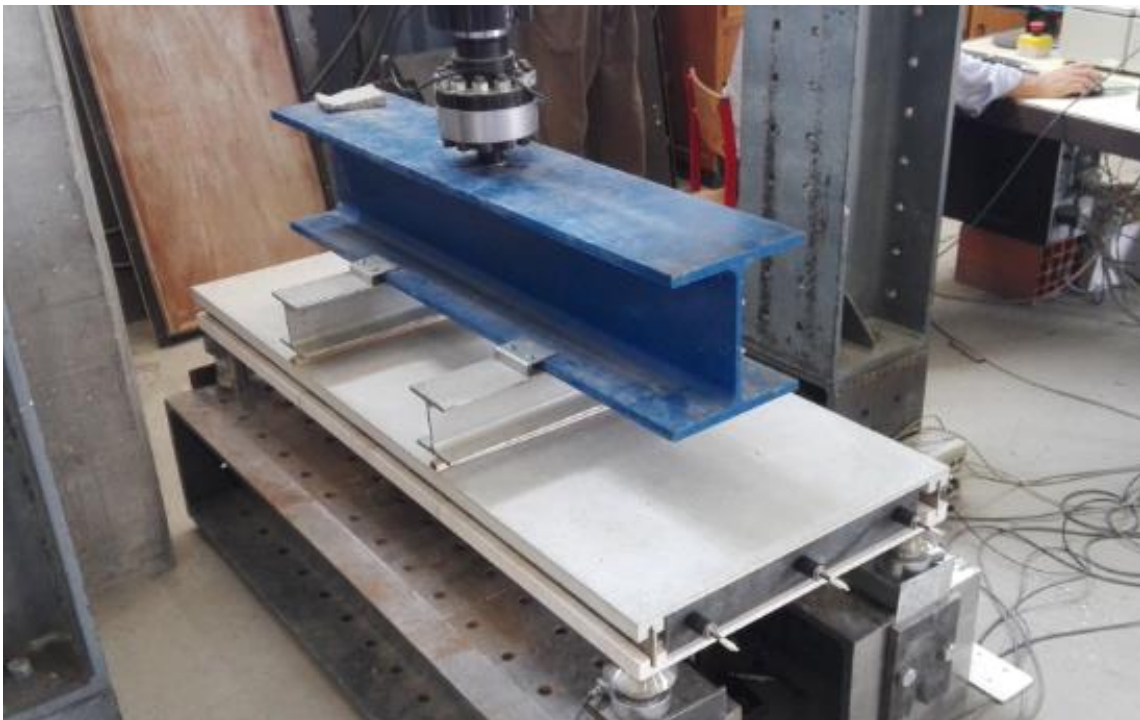


Figura 4.11 – Painel pronto a ser ensaiado

As ações a que os painéis estão sujeitos em serviço são ações que provocam a flexão do painel segundo a sua inércia mais fraca, produzindo momentos fletores positivos ou negativos para ações de pressão ou de sucção, respetivamente. Como tal, deve ser avaliada a resistência dos painéis para esses dois cenários de pressão e de sucção. Para simular as ações de pressão, dois painéis serão carregados na face na pedra. Seguindo a mesma metodologia, para simular as ações de sucção, os restantes painéis serão carregados na face do betão. Para cada ensaio, pretende-se testar diferentes níveis de carga em regime elástico, para estimar a rigidez à flexão do painel. Em cada cenário, um dos painéis foi ensaiado até à rotura e outro foi ensaiado apenas em regime elástico. Embora dois painéis sejam uma amostra relativamente pequena para estimar o seu comportamento na fase de rotura, é possível conjugar os resultados dos quatro ensaios para estimar o comportamento do painel em regime elástico.

Para os painéis ensaiados à rotura, foram testados diferentes níveis de carga. Para cada uma dessas cargas, foi realizado um total de três ciclos de carga-descarga. Nestas condições, os ensaios foram realizados com controlo de força. Após obter as leituras para esses patamares, submeteu-se o painel à flexão até à rotura. Os ensaios à rotura foram conduzidos com controlo de deslocamento. Em todos os ensaios, a velocidade de aplicação de carga do atuador foi de 0,03 mm/s. Tendo em conta que o *datalogger DynaTester* permite fazer leituras de reações e de deslocamentos a cada segundo, é recomendável realizar os ensaios a uma velocidade baixa, como forma de adquirir o maior volume de dados possível. Na Figura 4.12, é feita a representação genérica da deformada do painel.

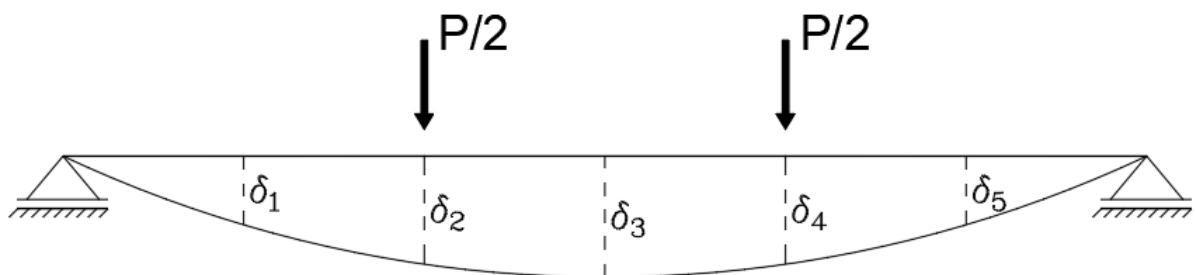


Figura 4.12 – Deformada do painel em cada ensaio

Importa referir que, como cada extremidade é apoiada em dois pontos e não num apoio contínuo, o painel irá apresentar uma pequena flexão na sua menor dimensão em planta. Para colmatar o enviesamento dos deslocamentos medidos na maior dimensão pelos LVDT, seria necessário subtrair o valor dessa flecha na menor direção. A medição dessa flecha poderia ser feita através da montagem de mais um LVDT em cada extremidade do painel. Tendo em conta que essa flecha será muito pequena, por comparação com os restantes deslocamentos medidos, e que o ensaio estava limitado a cinco LVDT, consideraram-se nulos (por simplificação), os deslocamentos verticais em ambas as extremidades. Como os apoios pontuais se situam a 4 cm de cada canto do painel, os deslocamentos medidos nos ensaios foram adaptados a um modelo de viga simplesmente apoiada com um vão de 1,42 metros. De seguida, apresenta-se o cálculo da carga que corresponderá à previsão de cada modo de rotura.

4.4.1. Estimativa dos modos de rotura

Como o painel será ensaiado à rotura para dois cenários diferentes (carregamento na face da pedra e do betão), pretende-se obter uma estimativa da carga antes da realização dos ensaios, analisando os diferentes modos de rotura possíveis para cada caso. Essa estimativa será confrontada mais adiante com a carga obtida no ensaio experimental. De seguida, representa-se na Figura 4.13, os diferentes modos de rotura que poderão ocorrer (e em que secções), para os ensaios à flexão com carregamento na face da pedra e na face do betão, respetivamente.

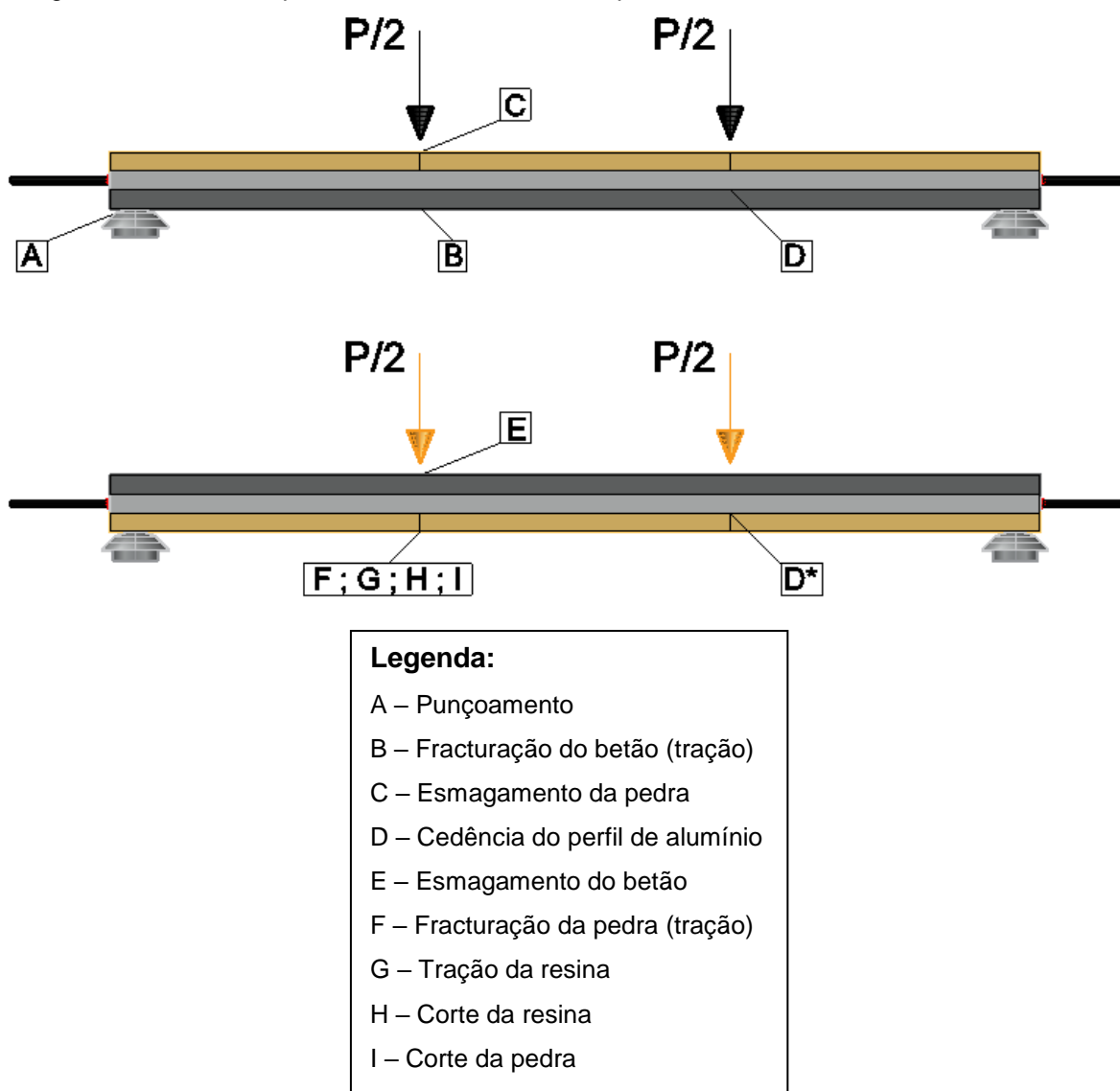


Figura 4.13 – Identificação dos modos de rotura para cada ensaio

Para calcular a carga de cada modo de rotura, foi adotado um cálculo elástico. Este cálculo permite que, através do estudo das tensões normais, se identifique a carga que irá originar cada um desses modos de rotura, em função das resistências dos materiais. Apresenta-se na seguinte equação a expressão que permite o cálculo da carga que origina os modos de rotura B, C, D, E, F e G, identificados na Figura 4.13. Uma vez que as duas componentes de tensão provocadas pelo pré-esforço resultam em tensões normais nulas nas fibras exteriores, a evolução das tensões normais nas fibras mais condicionantes será apenas avaliada através da última componente de tensão, σ_f .

$$\sigma = -\sigma_N + \sigma_e + \sigma_f = -\frac{N^*}{A} + \frac{N^* \times e}{w_1} + \frac{M}{w_2} = \frac{M}{w_2}$$

Para os modos de rotura considerados, é possível obter o momento fletor na secção mais esforçada, através dum modelo de viga simplesmente apoiada, com um vão de 1,42 metros e duas cargas pontuais, aplicadas a cada terço de vão. Em função da resistência de cada material e da face que se encontra carregada, apresenta-se na Tabela 4.5, o momento fletor máximo e a carga P, para cada modo de rotura. A carga P* será a carga no atuador, depois de descontar as reações de apoio que se verificam mesmo antes do início dos ensaios (pelo efeito do peso próprio). Apresenta-se de seguida o cálculo da reação de apoio provocada pelo peso próprio do painel.

Tabela 4.5 – Cálculo das cargas para os modos de rotura B, C, D, E, F e G

Modo de rotura	Tensão $\sigma_{\text{máx.}}$ (MPa)	w_2 (mm ³)	M (kN.m)	P (kN)	P* (kN)
B	3,3	$7,06 \times 10^5$	2,3	5,1	10,1
C	93	$7,06 \times 10^5$	65,7	142	284
D	100	$9,84 \times 10^5$	98,4	213,3	426,6
D*	100	$1,7 \times 10^6$	170	368,9	737,8
E	40	$1,01 \times 10^6$	40,4	87,2	174,4
F	9,4	$1,01 \times 10^6$	9,5	20	40
G	20	$1,01 \times 10^6$	20,2	43,3	86,6

$$\text{Reação de apoio: } \frac{0,6 \times 0,03 \times 1,5 \times (24,3 + 23,6)}{4} \approx 0,32 \text{ kN}$$

$$\text{Carga no atuador: } P^* = \left[\left(\frac{\sigma_{\text{máx.}} \times w_2}{460} \right) \times 10^{-3} - 2 \times 0,32 \right] \times 2$$

Para o caso do perfil de alumínio, como as suas fibras mais condicionantes não se encontram em nenhuma face do painel, foram calculados novos módulos de flexão para esses elementos, para o carregamento na pedra (modo de rotura D) e no betão (modo de rotura D*), respetivamente. Apresenta-se de seguida o cálculo desses módulos de flexão. Importa referir que este material não apresenta rotura frágil (ao contrário do restantes materiais), verificando-se um patamar de cedência na Figura 3.3.

$$\text{Carregamento na face de pedra: } w_2 = \frac{I_{\text{mista}}}{z_g - 15} = \frac{3,74 \times 10^7}{53 - 15} \approx 9,84 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$\text{Carregamento na face de betão: } w_2 = \frac{I_{\text{mista}}}{90 - z_g - 15} = \frac{3,74 \times 10^7}{90 - 53 - 15} \approx 1,7 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Para o modo de rotura A, foi calculada a carga de punçoamento, assumindo o modelo de cálculo de uma laje. De seguida apresenta-se na Equação (4.4) a expressão que conduz ao cálculo da resistência ao punçoamento para lajes pré-esforçadas sem armadura específica de punçoamento:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \geq v_{\text{min}} + k_1 \sigma_{cp} \quad (4.4)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2f_{cd} \quad ; \quad v_{min} = 0,035k^{3/2}f_{ck}^{1/2}$$

A parcela ρ_l refere-se à percentagem geométrica de armadura presente no betão. Tendo em conta que o betão não é armado, esta percentagem será nula, pelo que a condição descrita na equação impõe que a resistência ao punçoamento será necessariamente igual a $v_{min} + k_1\sigma_{cp}$, que corresponde à resistência mínima ao punçoamento do betão pré-esforçado não armado. Para o cálculo de v_{min} , foi necessário calcular previamente o valor de k :

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2, \text{ com } d \text{ em mm}; \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{30}} \approx 3,58 > 2 \Rightarrow k = 2$$

$$v_{min} = 0,035 \times 2^{3/2} \times 40^{1/2} \approx 0,626 \text{ MPa}$$

Utilizando um valor recomendado para k_1 de 0,1 (Cruz e Azenha, 2013) e o valor da tensão de compressão provocada pelo esforço axial (após perdas instantâneas), obtém-se o valor da resistência ao punçoamento.

$$\sigma_{cp} = \frac{20000 \times 3 \times 0,366}{600 \times 30} = 1,22 < 0,2 \times \frac{40}{1,5} \approx 5,3$$

$$v_{Rd,c} = v_{min} + k_1\sigma_{cp} = 0,035 \times 2^{3/2} \times 40^{1/2} + 0,1 \times 1,22 = 0,748 \text{ MPa}$$

De seguida, para obter a carga de punçoamento, utilizou-se a expressão que conduz ao cálculo do esforço de corte solicitante, numa situação de punçoamento excêntrico, num apoio de canto numa laje (Equação (4.5)):

$$v_{sd} = \beta \frac{V_{sd}}{u_1 d} \quad (4.5)$$

Para este cálculo, inclui-se um fator de majoração β que tem em conta a excentricidade da carga e o perímetro de controlo considerado (u_1). A parcela V_{sd} refere-se ao esforço transversal da secção (reação do apoio). Tendo em conta que os apoios são pontuais, considerou-se parte do perímetro de controlo com uma direção radial, a convergir para o ponto apoiado, com um raio igual a $2d$. Na Figura 4.14, representa-se a secção apoiada e o perímetro de controlo a tracejado.

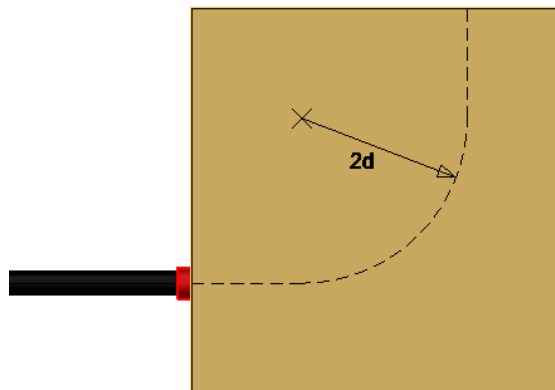


Figura 4.14 – Perímetro de controlo utilizado

$$\text{Perímetro de controlo: } u_1 = 2 \times 40 + \frac{2\pi \times 30 \times 2}{4} = 174,2 \text{ mm}$$

Em situações em que se adotam pórticos e/ou paredes para resistirem a ações horizontais, como vento ou sismos, e em que os vãos adjacentes não diferem mais do que 25%, o EC2 permite considerar um fator de majoração β de 1,5 para cantos apoiados. De seguida, apresenta-se o cálculo da carga de punçoamento. Igualando o esforço de corte solicitante à resistência ao punçoamento, é possível obter a reação de apoio no instante em que ocorre o punçoamento.

$$v_{Rd,c} = \beta \frac{V_{sd}}{u_1 d} \Leftrightarrow V_{sd} = \frac{v_{Rd,c} u_1 d}{\beta} \Leftrightarrow V_{sd} = \frac{0,748 \times 174,2 \times 30}{1,5} \times 10^{-3} = 2,61 \text{ kN}$$

Como o painel é bi-simétrico e o carregamento também é simétrico, a carga de punçoamento pode ser obtida somando quatro vezes a reação de apoio. Deve ainda ser descontado o valor das reações de apoio. Apresenta-se de seguida o cálculo da carga no atuador, para o punçoamento.

$$\text{Carga no atuador: } P^* = (2,61 - 0,32) \times 4 \approx 9,2 \text{ kN}$$

Para calcular a carga que provoca os modos de rotura H e I, foi necessário calcular as tensões tangenciais atuantes ao nível das faces nas juntas de colagem entre as placas de pedra. Apresenta-se na Equação (4.6) a expressão para o cálculo das tensões tangenciais numa secção mista. Na Figura 4.15, representa-se o diagrama de tensões tangenciais, para o qual foi feito esse cálculo.

$$\tau_i = \frac{V \times \sum_{i=1}^n E_i S_i}{t \times \sum_{j=1}^n E_j I_j} \Leftrightarrow V = \frac{\tau_i \times t \times \sum_{j=1}^n E_j I_j}{\sum_{i=1}^n E_i S_i} \quad (4.6)$$

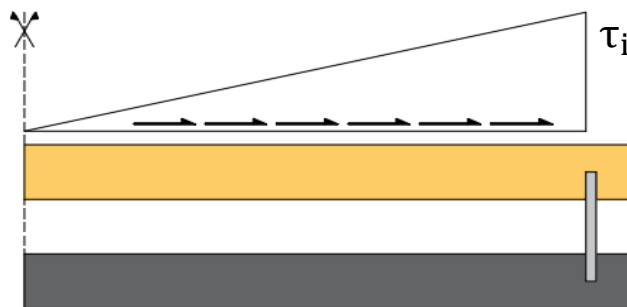


Figura 4.15 – Diagrama de tensões tangenciais na ligação pedra-perfil

Em função da resistência dos materiais ao corte (pedra e resina) e das propriedades geométricas da secção, calculou-se através da Equação (4.6) as cargas que levam à rotura de cada material. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.6. O valor da força no atuador corresponde ao dobro de cada carga em face e é representada por P (kN). Apresenta-se também o cálculo dos momentos estáticos para cada placa. Sendo o momento estático um parâmetro que depende apenas da geometria (e assumindo que toda a secção das juntas ficou preenchida com resina epoxy), o valor do momento estático para cada um destes materiais será o mesmo.

$$S_1 = S_2 = 275 \times 30 \times \left(\frac{275}{2}\right) \approx 1,1 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Tabela 4.6 – Cargas que originam o corte da pedra e do betão nas secções de colagem

Material	τ (MPa)	E (GPa)	I (mm ⁴)	S (mm ³)	V (kN)	P (kN)	P* (kN)
Alumínio	-	70	$1,31 \times 10^5$	-	-	-	-
Betão	-	26	$2,73 \times 10^7$	-	-	-	-
Pedra	5,5	45	1×10^7	$1,1 \times 10^6$	3,9	7,8	7,2
Resina	17	5,5	-	$1,1 \times 10^6$	32,1	64,2	63,6

Observando os resultados obtidos, verifica-se que para ocorrerem os modos de rotura H e I, é necessária uma carga P* no atuador de 63,6 kN e 7,2 kN, respetivamente (após descontar o valor das reacções de apoio de uma extremidade). Após avaliar todos os modos de roturas possíveis de ocorrer, apresenta-se na Tabela 4.7, o conjunto de todas as cargas calculadas. A carga expectável de se observar em cada ensaio corresponderá ao menor valor de entre todas as cargas para cada modo de rotura.

Tabela 4.7 – Avaliação das cargas para cada modo de rotura

Face carregada	Modo de rotura	Carga (kN)
Pedra	A	9,2
	B	10,1
	C	284
	D	426,6
Betão	D*	737,8
	E	174,4
	F	40
	G	86,6
	H	64,2
	I	7,2

Observando as cargas apresentadas na Tabela 4.7, prevê-se que o ensaio com carregamento na face de pedra resulte numa rotura por punção, para uma carga de 9,2 kN. Para o ensaio com carregamento na face de betão, prevê-se um modo de rotura por corte da pedra, para uma carga de 7,2 kN. De seguida, são descritos cada um dos ensaios realizados aos painéis.

4.4.2. Carregamento na pedra – Painel 1

Para este ensaio, foram feitos dois ciclos de carga-descarga, para dois níveis diferentes de carga. Pretende-se numa primeira fase avaliar o comportamento do painel em regime elástico. Como se prevê uma carga de rotura de 9,2 kN, foram definidos dois patamares de força de valor inferior (2 kN e 4 kN). Definindo patamares com diferentes níveis de carga, os ensaios realizaram-se inicialmente com controlo de força. Na Tabela 4.8, apresentam-se os diferentes patamares de carga utilizados e os respetivos deslocamentos medidos pelos LVDT para o Painel 1. Como o *datalogger* permite uma leitura por segundo, na fase final de aquisição de dados, o volume de dados é considerável. Para considerar apenas um valor de deslocamento em cada secção, e havendo vários valores ligeiramente diferentes (para os mesmos níveis de carga), os deslocamentos apresentados de seguida correspondem à média aritmética de todos os deslocamentos medidos a cada segundo, no nível de carregamento desejado.

Tabela 4.8 – Leituras de deslocamentos em regime elástico (Painel 1)

Força P (kN)	Deslocamentos (mm)				
	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
2	0,13	0,19	0,23	0,15	0,14
	0,12	0,19	0,23	0,17	0,15
	0,12	0,19	0,22	0,17	0,15
4	0,22	0,35	0,43	0,32	0,28
	0,21	0,35	0,42	0,37	0,29
	0,21	0,35	0,42	0,37	0,29

Após aplicar dois níveis de carga diferentes em regime elástico, o painel foi ensaiado até atingir a rotura. Até à rotura, a carga foi aplicada com a mesma velocidade que nos patamares anteriores. Na Figura 4.16 apresenta-se o gráfico com a evolução da carga aplicada pelo atuador, em função da média dos deslocamentos obtidos nas secções de carregamento, para o Painel 1.

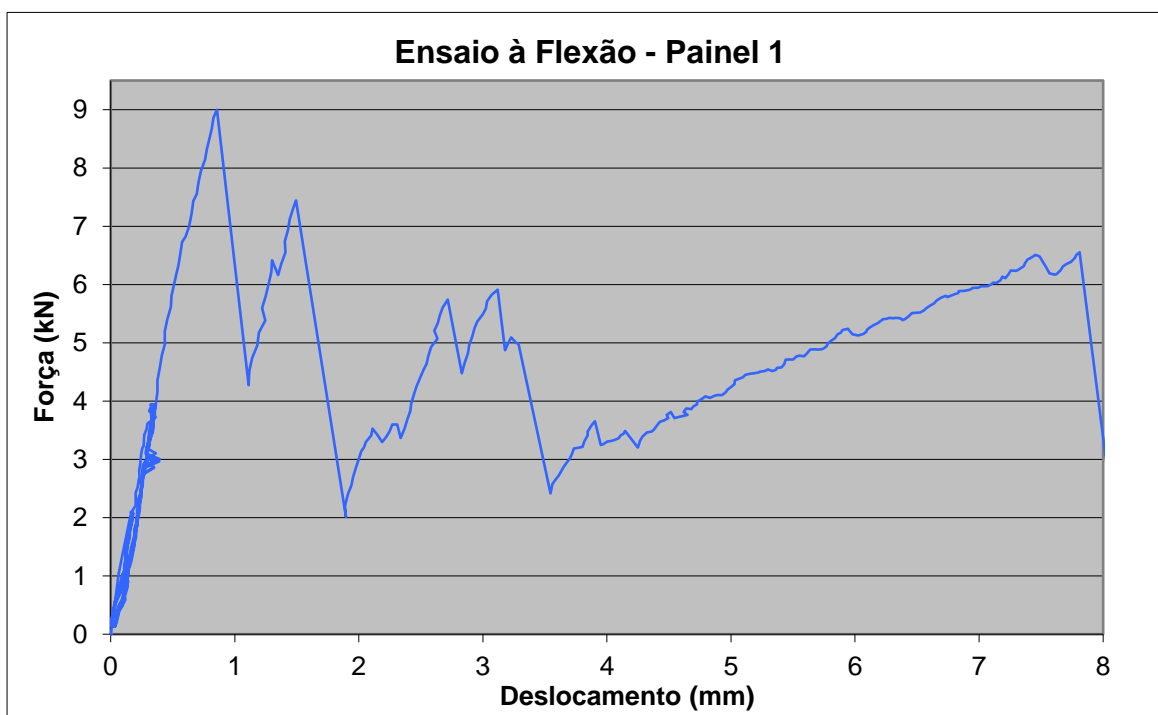


Figura 4.16 – Gráfico do ensaio ao Painel 1

Observando o gráfico da Figura 4.16 é possível identificar inicialmente um andamento linear (em regime elástico) até uma carga de 9 kN, correspondente a um deslocamento médio das secções carregadas (δ_2 e δ_4) de 0,86 mm. Atingindo esse patamar, verificam-se de seguida novas perdas de rigidez com conseqüente incremento de carga nos patamares de 7,4 kN, 5,7 kN e 5,9 kN. A partir deste último patamar, verifica-se uma quebra de rigidez mais acentuada, até se atingir uma carga de 6,5 kN. Apresenta-se de seguida o painel, após o ensaio à rotura. Na Figura 4.17 (a), verifica-se o destacamento do perfil de alumínio em dois apoios. Observando a face de betão na Figura 4.17 (b), verifica-se uma rotura por punçoamento.

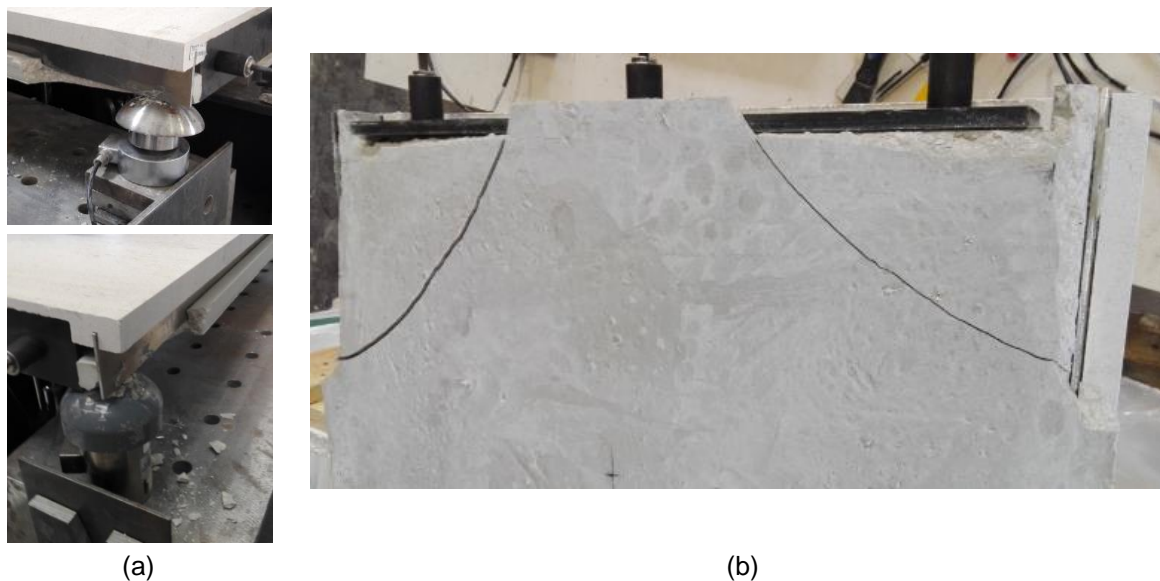


Figura 4.17 – Rotura do betão nas secções de apoio: (a) destacamento dos perfis laterais; (b) superfícies de rotura

4.4.3. Carregamento na pedra – Painel 2

No segundo ensaio, pretende-se ensaiar o painel apenas em regime elástico. Tendo em conta os dois primeiros ensaios, pretende-se comparar os resultados obtidos em cada painel, como forma de definir com alguma exatidão a rigidez à flexão dos painéis. Relativamente ao ELU, como foi realizado apenas um ensaio à rotura, é possível apenas ter uma estimativa da carga de punçoamento, sem ter um termo de comparação experimental. A nível analítico, essa carga prevista será confrontada com o valor obtido no ensaio.

Definindo patamares com níveis de carga diferentes, o ensaio ao Painel 2 realizou-se também com controlo de força. Importa referir que para este ensaio foram definidos três patamares de carga, ao contrário do que sucedeu no Painel 1. A realização do ensaio com um novo patamar de carga (de 6 kN) prende-se com o facto do painel ter ainda alguma folga para explorar a sua resistência em regime elástico, até se atingir a rotura anteriormente observada, para uma carga de 9 kN. Na Tabela 4.9, apresentam-se os diferentes patamares de carga utilizados e respetivos deslocamentos medidos pelos LVDT para o Painel 2.

Tabela 4.9 – Leituras de deslocamentos em regime elástico (Painel 2)

Força P (kN)	Deslocamentos (mm)				
	$\bar{\delta}_1$	$\bar{\delta}_2$	$\bar{\delta}_3$	$\bar{\delta}_4$	$\bar{\delta}_5$
2	0,29	0,35	0,36	0,32	0,28
	0,28	0,34	0,36	0,34	0,28
	0,28	0,34	0,36	0,34	0,28
4	0,43	0,54	0,58	0,55	0,42
	0,43	0,55	0,58	0,55	0,42
	0,43	0,55	0,58	0,56	0,43
6	0,56	0,73	0,77	0,72	0,53
	0,56	0,73	0,78	0,73	0,54
	0,57	0,73	0,78	0,74	0,54

Na Figura 4.18 encontra-se o gráfico com a evolução da carga aplicada pelo atuador, em função da média dos deslocamentos obtidos nas secções de carregamento, para o Painel 2.

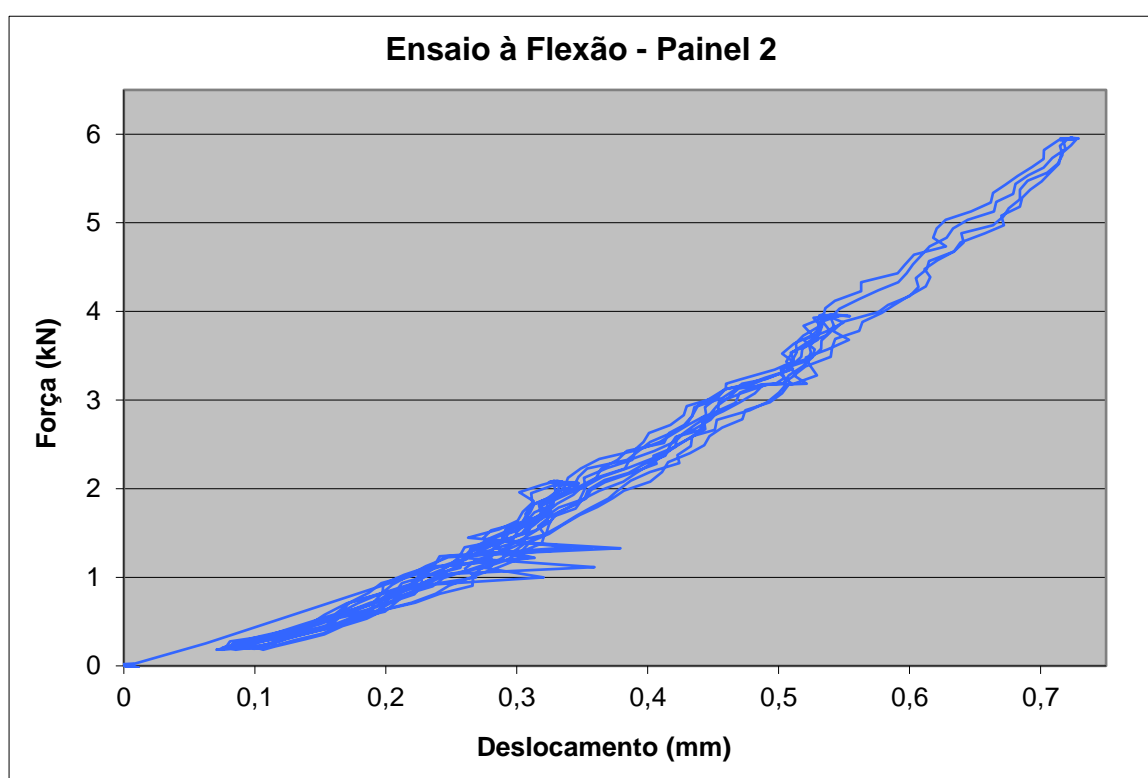


Figura 4.18 – Gráfico do ensaio ao Painel 2

Observando o gráfico da Figura 4.18, é possível verificar que o ensaio parte com deslocamento nulo nas secções de carregamento, até atingir uma carga de 2 kN, no primeiro ciclo carga-descarga. Após o primeiro ciclo, as fases de descarga levam sempre o painel a apresentar deslocamentos residuais, de valor 0,08 mm (nas mesmas secções de carregamento). A partir do segundo ciclo de carga-descarga, o painel apresenta sempre o mesmo comportamento em regime elástico, pela sobreposição dos gráficos de cada ciclo carga-descarga, para os três patamares de carga definidos.

4.4.4. Carregamento no betão – Painel 3

Para a flexão do painel com carregamento na face de betão, foi adotada a mesma metodologia dos ensaios anteriores. De acordo com o modelo de cálculo analítico, prevê-se a rotura para uma carga de 7,2 kN. Tomando como referência esta carga, foram definidos dois patamares de força em regime elástico, de valor inferior (2 kN e 4 kN) e registaram-se os deslocamentos num ensaio à flexão por controlo da força. Na Tabela 4.10, apresentam-se os diferentes patamares de carga utilizados e os respetivos deslocamentos medidos pelos LVDT para o Painel 3.

Tabela 4.10 – Leituras de deslocamentos em regime elástico (Painel 3)

Força P (kN)	Deslocamentos (mm)				
	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
2	0,16	0,1	0,13	0,11	0,1
	0,15	0,1	0,14	0,11	0,1
	0,14	0,11	0,15	0,11	0,1
4	0,24	0,24	0,31	0,25	0,18
	0,23	0,24	0,3	0,26	0,18
	0,23	0,26	0,31	0,26	0,16

Após aplicar dois níveis de carga diferentes em regime elástico, o painel foi ensaiado até atingir a rotura. A carga será aplicada com a mesma velocidade que os ensaios anteriores. Na Figura 4.19 encontra-se o gráfico com a evolução da carga aplicada pelo atuador, em função dos deslocamentos obtidos nas secções de carregamento, para o Painel 3.

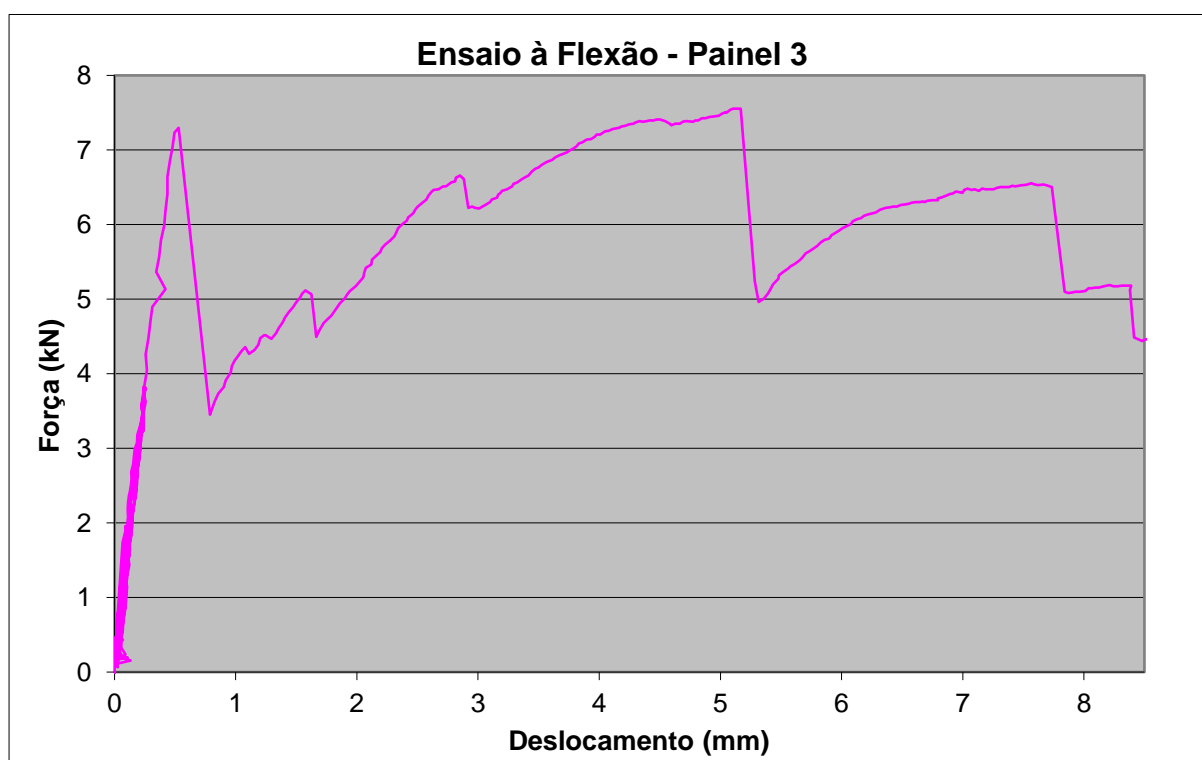


Figura 4.19 – Gráfico do ensaio ao Painel 3

Observando o gráfico da Figura 4.19 é possível identificar inicialmente um andamento linear (em regime elástico) até uma carga de 7,3 kN, correspondente a um deslocamento das secções carregadas (δ_2 e δ_4) de 0,53 mm. Atingindo esse patamar, verificam-se de seguida novas perdas de rigidez com conseqüente incremento de carga nos patamares de 5,1 kN, 6,6 kN e 7,5 kN. A partir deste último patamar, verifica-se uma quebra de rigidez mais acentuada, até se atingir a carga de 6,5 kN. Apresenta-se de seguida o painel, após o ensaio à rotura. Na Figura 4.20 encontra-se representada a rotura por corte de uma das placas de pedra de topo, nas extremidades da junta de colagem com a placa intermédia.

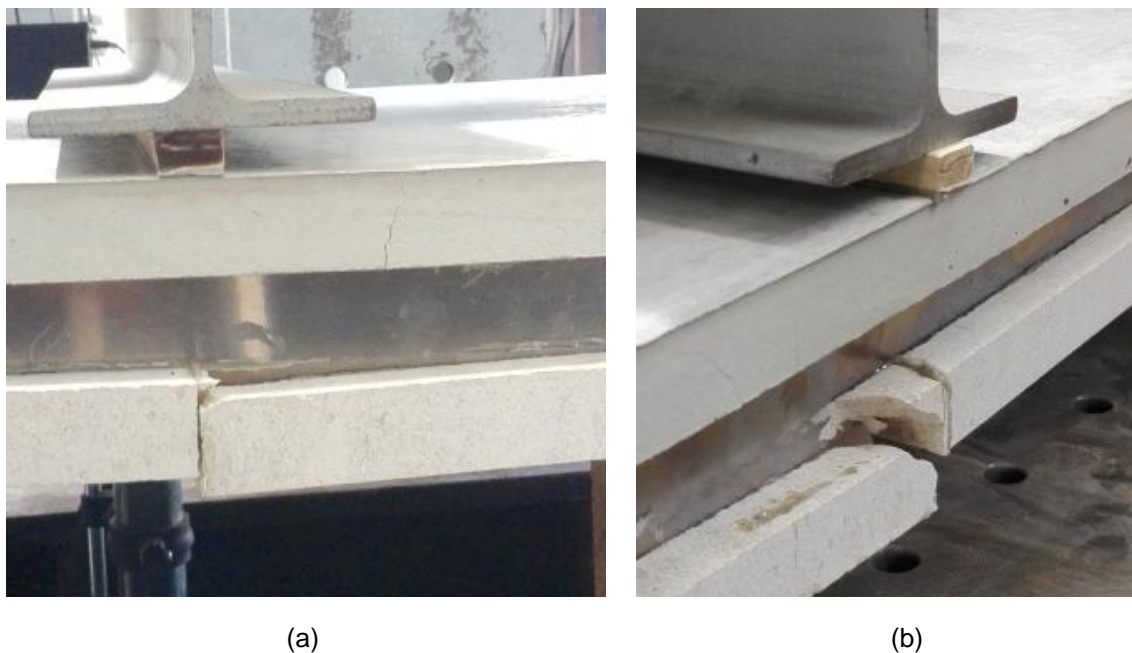


Figura 4.20 – Rotura da pedra por corte na secção de colagem

4.4.5. Carregamento no betão – Painel 1*

Relativamente ao quarto ensaio à flexão, ocorreu um problema com o *setup* do ensaio, danificando-se um dos painéis, que não pôde ser utilizado para estudar o comportamento do sistema em regime exclusivamente elástico (como se procedeu com o Painel 2). Por essa razão, foi reaproveitado o Painel 1 para fazer um novo ensaio à rotura, sendo este último designado por Painel 1*. Como o modo de rotura por punçoamento obtido no Painel 1 ocorreu apenas nas extremidades apoiadas da placa de betão, não comprometeu a integridade física da placa ao longo do seu vão. Na Tabela 4.11, apresentam-se os resultados do ensaio para o Painel 1*.

Tabela 4.11 – Leituras de deslocamentos em regime elástico (Painel 1*)

Força P (kN)	Deslocamentos (mm)				
	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
2	0,21	0,23	0,23	0,14	0,1
	0,22	0,24	0,24	0,15	0,1
	0,22	0,25	0,25	0,16	0,1
4	0,41	0,47	0,48	0,37	0,22
	0,43	0,49	0,51	0,39	0,22
	0,43	0,5	0,52	0,4	0,23

Na Figura 4.21 encontra-se o gráfico com a evolução da carga aplicada pelo atuador, em função dos deslocamentos obtidos nas secções de carregamento, para o Painel 1*.

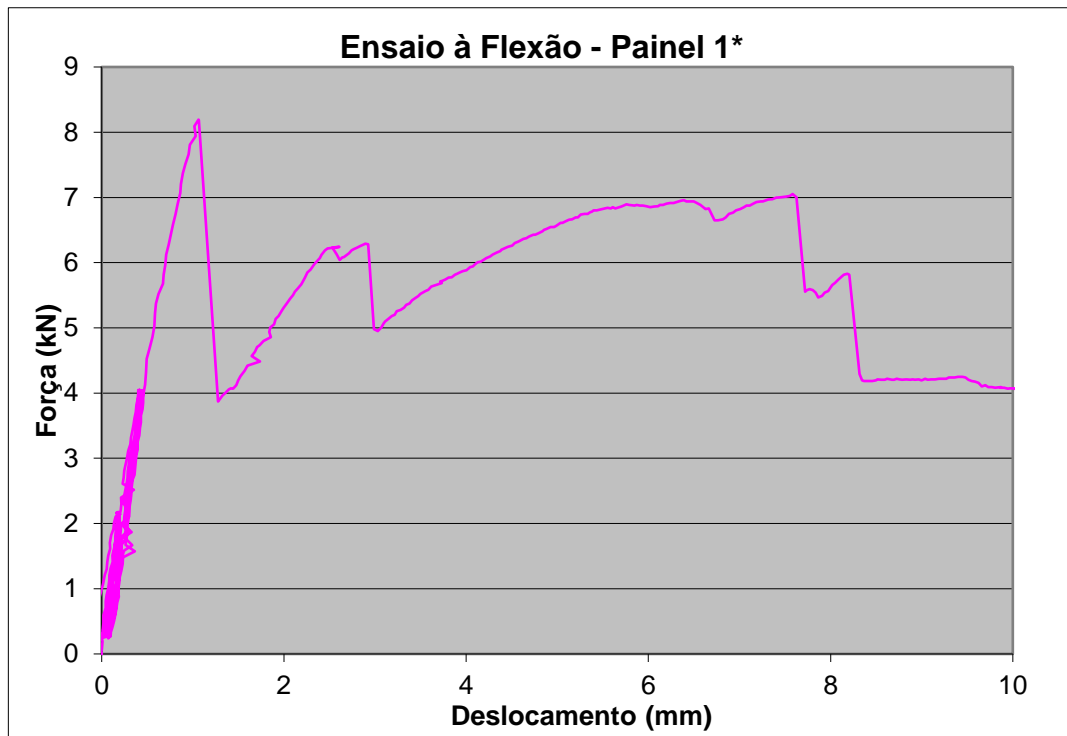


Figura 4.21 – Gráfico do ensaio ao Painel 1*

Observando o gráfico da Figura 4.21, é possível identificar inicialmente um andamento aproximadamente linear até uma carga de 8,2 kN, correspondente a um deslocamento das secções carregadas (δ_2 e δ_4) de 0,53 mm. Atingindo esse patamar, verificam-se de seguida novas perdas de rigidez com conseqüente incremento de carga nos patamares de 6,3 kN, e 7 kN. A partir deste último patamar, verifica-se uma quebra de rigidez mais acentuada, até se atingir a carga de 5,8 kN.

4.4.6. Estimativa da rigidez à flexão

Para avaliar a rigidez à flexão do painel, calculou-se a rigidez à flexão teórica de uma secção mista, através da Equação (4.7). As inércias de cada material em relação ao centro de rigidez utilizadas neste cálculo foram as calculadas na secção 3.5. Apresenta-se de seguida o cálculo dessa rigidez.

$$EI = \sum_{i=1}^n E_i I_i = E_c I_c + E_p I_p + 2 \times (E_{pf} I_{pf}) \quad (4.7)$$

$$E_c I_c + E_p I_p + 2 \times (E_{pf} I_{pf}) = 26 \times 10^3 \times 2,73 \times 10^7 + 45 \times 10^3 \times 1 \times 10^7 + 2 \times (70 \times 10^3 \times 65520) \approx \\ \approx 1,17 \times 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Através desta rigidez, é possível obter os deslocamentos teóricos nas secções de carregamento em cada ensaio à flexão, para os diferentes níveis de carga testados. O cálculo dos deslocamentos foi obtido através do sistema descrito na Equação (4.8), para um modelo de viga simplesmente apoiada, como representado na Figura 4.22.

$$y(x) = \begin{cases} \frac{P}{6LEI} [ab(2b + a) - x - bx^3], & 0 \leq x \leq a \\ \frac{P}{6LEI} [-a^3(b + a) + a(2b^2 + 4ab + 3a^2)x - 3a(b + a)x^2 + ax^3], & a \leq x \leq L \end{cases} \quad (4.8)$$

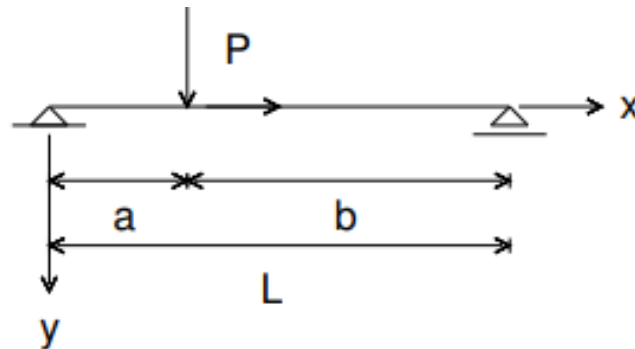


Figura 4.22 – Modelo de viga simplesmente apoiada solicitada pontualmente

Para obter os deslocamentos nas secções de carregamento, é necessário sobrepor os efeitos provocados pelas duas cargas em faca. Como tal, foram calculadas as flechas para cada carga a 1/3 e a 2/3 de vão. Os resultados das flechas (assim como todos os valores relevantes para o seu cálculo) apresentam-se na Tabela 4.12. Os índices para cada deslocamento $\bar{\delta}$ apresentado na Tabela 4.12 correspondem aos deslocamentos medidos por cada LVDT, como representado na Figura 4.12.

Tabela 4.12 – Cálculo dos deslocamentos esperados em cada LVDT por cada carga em faca

Carga no Atuador (kN)	P (kN)	a (mm)	b (mm)	LVDT	Secção x (mm)	Deslocamento y (mm)
2	1	460	960	$\bar{\delta}_1$	210	0,021
				$\bar{\delta}_2$	460	0,039
				$\bar{\delta}_3$	710	0,043
				$\bar{\delta}_4$	960	0,034
				$\bar{\delta}_5$	1210	0,017
4	2	460	960	$\bar{\delta}_1$	210	0,042
				$\bar{\delta}_2$	460	0,078
				$\bar{\delta}_3$	710	0,085
				$\bar{\delta}_4$	960	0,068
				$\bar{\delta}_5$	1210	0,034
6	3	460	960	$\bar{\delta}_1$	210	0,064
				$\bar{\delta}_2$	460	0,117
				$\bar{\delta}_3$	710	0,128
				$\bar{\delta}_4$	960	0,101
				$\bar{\delta}_5$	1210	0,052

O valor do deslocamento teórico final nas secções de carregamento é o resultado da soma dos deslocamentos provocados por cada carga, separadamente. Na Tabela 4.13 apresentam-se os deslocamentos finais para cada nível de carga para os painéis 1 a 3, assim como a sua comparação com os deslocamentos que se obtiveram aquando dos ensaios à flexão em cada painel.

Tabela 4.13 – Deslocamentos teóricos finais vs experimentais

Carga no Atuador (kN)	Secção i	Deslocamentos (mm)				Relação de Deslocamentos: Experimental/Teórico		
		Teóricos (δ_i)	Experimentais			Painel 1	Painel 2	Painel 3
			Painel 1	Painel 2	Painel 3			
2	1	0,038	0,123	0,283	0,100	3,2	7,4	2,6
	2	0,073	0,190	0,343	0,103	2,6	4,7	1,4
	3	0,086	0,227	0,360	0,140	2,6	4,2	1,6
	4	0,073	0,163	0,333	0,110	2,2	4,6	1,5
	5	0,038	0,147	0,280	0,100	3,9	7,4	2,6
4	1	0,076	0,213	0,430	0,233	2,8	5,7	3,1
	2	0,146	0,350	0,547	0,247	2,4	3,7	1,7
	3	0,170	0,423	0,580	0,307	2,5	3,4	1,8
	4	0,146	0,353	0,553	0,257	2,4	3,8	1,8
	5	0,076	0,287	0,423	0,173	3,8	5,6	2,3
6	1	0,116	-	0,563	-	-	4,9	-
	2	0,218	-	0,730	-	-	3,3	-
	3	0,256	-	0,777	-	-	3,0	-
	4	0,218	-	0,730	-	-	3,3	-
	5	0,116	-	0,537	-	-	4,6	-

Relativamente ao ELS, os deslocamentos apresentados pelos painéis devem apresentar alguma simetria relativamente ao meio vão do painel. Na fase de aquisição de dados, verifica-se que os deslocamentos δ_1 medidos no primeiro LVDT são diferentes dos deslocamentos δ_5 , medidos pelo quinto LVDT. O mesmo se passa com os deslocamentos δ_2 e δ_4 . Esta diferença pode ser explicada pelo facto da aplicação da carga não ser feita de forma rigorosamente simétrica, com uma das vigas HEB 100 do *setup* a aplicar ligeiramente mais carga que a outra. O facto da montagem dos painéis também não ser rigorosamente simétrica, e de terem sido utilizados materiais que também não são homogéneos na sua constituição, também têm um contributo para a ligeira assimetria que se verifica nos deslocamentos do painel.

Observando os resultados da Tabela 4.13, verificam-se diferenças significativas entre os valores calculados, com os que foram obtidas nos ensaios à flexão. Para o Painel 1, os deslocamentos medidos são duas a quatro vezes superiores aos teoricamente esperados. Para o Painel 2, verifica-se nas secções 1 e 5, valores cinco a sete vezes superiores aos que seriam teoricamente esperados. Para os restantes deslocamentos (nas secções de meio vão), os valores tendem a aproximar-se dos valores esperados (aproximadamente o triplo). Para o Painel 3, verificam-se deslocamentos entre uma vez e meia a três vezes superiores aos calculados. Nos três painéis, verifica-se que os deslocamentos nas secções 1 e 5 estão mais enviesados em relação ao modelo, do que os restantes deslocamentos a meio vão.

5. Análise de resultados

5.1. Produção de betão

A produção do betão envolveu um conjunto de ensaios laboratoriais, realizados como forma de validar a formulação adotada para o betão. De seguida, apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos ensaios.

5.1.1. Ensaio de compressão simples

O EC2 preconiza que um betão com classe de resistência C40/50 deve apresentar um valor característico da resistência à compressão em provetes cilíndricos de 40 MPa. O valor da resistência à compressão do betão deve ser determinado com recurso a ensaios à compressão a provetes cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, ou a provetes cúbicos com 15 cm de aresta. Observando os resultados para o ensaio de compressão simples em três provetes cúbicos, o valor médio obtido para a resistência à compressão (f_{cm}) do betão foi de 60,6 MPa (aos 28 dias). Segundo Costa e Appleton (2002), o valor da resistência em provetes cilíndricos é da ordem de 80% da resistência cúbica. Como tal, considerando essa redução, é possível obter uma estimativa da resistência média à compressão em provetes cilíndricos.

$$f_{cm} = 0,8f_{cm,cube} = 0,8 \times 60,6 \approx 48,5 \text{ MPa}$$

Os valores obtidos para a resistência média à compressão podem ser descritos através duma distribuição normal, na qual se define a resistência característica do betão como o valor que apresenta uma probabilidade de 95% de ser excedido. Segundo o EC2, o valor da resistência característica f_{ck} pode ser estimado como o valor da resistência média, descontado de 8 MPa, para betões com idades compreendidas entre 3 e 28 dias. Adotando esse valor, é possível estimar a resistência característica à compressão em provetes cilíndricos.

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 = 48,5 - 8 = 40,5 \text{ MPa}$$

Através deste cálculo, obtém-se um valor muito próximo daquele que se pretendia inicialmente (diferença de 0,5 MPa). Este resultado está em conformidade com o que se esperava obter e permite afirmar que a composição do betão utilizada é aceitável para produzir um betão com uma classe de resistência C40/50.

5.1.2. Ensaio de compressão diametral

O EC2 preconiza que um betão com classe de resistência C40/50 deve apresentar uma resistência média à tração de 3,5 MPa. Observando os resultados para o ensaio de compressão diametral, o valor obtido para a resistência à tração do betão foi de 3,27 MPa. Esta pequena diferença no valor da resistência à tração pode ser explicada pelas condições do ensaio realizado para obtenção deste parâmetro e também pela composição do betão autocompactável.

Segundo um estudo efetuado por Parra *et al.* (2011), os betões autocompactáveis com uma adição de filler calcário na sua composição podem apresentar uma resistência à tração (obtida através do ensaio de compressão diametral) em média 15% inferior (para idades a partir dos 28 dias), relativamente ao valor desse parâmetro para betões correntes da mesma classe. Tomando como referência esse valor de decréscimo, obtém-se uma nova resistência à tração corrigida, para o ensaio à compressão diametral do betão corrente.

$$f_{ct,sp}^* = \frac{f_{ct,sp}}{0,85} = \frac{3,27}{0,85} \approx 3,85 \text{ MPa}$$

Tendo em conta que a resistência à tração obtida pelo ensaio de compressão diametral apresenta alguma variabilidade relativamente à resistência à tração axial, o EC2 permite estimar o valor da resistência à tração axial através do ensaio de compressão diametral, utilizando um fator de conversão de 0,9.

$$f_{ct} = 0,9f_{ct,sp}^* = 0,9 \times 3,85 \approx 3,47 \text{ MPa}$$

Através deste fator de conversão, é possível chegar a um valor de resistência à tração muito próximo do valor que se esperava obter para este betão, de acordo com as resistências tabeladas no EC2. Este resultado permite afirmar que a presença de uma adição de filler calcário na composição deste betão contribui para uma ligeira diminuição da resistência à tração, relativamente ao que era previsto (diferença de 0,2 MPa).

5.1.3. Ensaio para o módulo de *Young*

O EC2 preconiza que um betão com classe de resistência C40/50 deve apresentar um módulo de *Young* igual a 35 GPa. O ensaio realizado em dois provetes prismáticos de 10x10x40 (m³) forneceu um valor para o módulo de *Young* de aproximadamente 26 GPa. Comparando os resultados obtidos com os esperados, verifica-se que o valor deste parâmetro é inferior ao esperado. Os valores para os módulos de *Young* do betão apresentados no EC2 são valores padronizados para betões produzidos com agregados de quartzito. Sendo o valor do módulo de *Young* proporcional ao da pedra que é utilizada no agregado, quanto mais rígida a pedra que compõe o agregado, maior será a rigidez do betão (para a mesma composição da mistura). Para betões produzidos com agregado calcário, a norma EN 1992-1-1 permite que o valor previsto para o módulo de *Young* seja reduzido em 10%, relativamente ao padronizado.

$$E_{cm}^* = 0,9E_{cm} = 0,9 \times 35 = 31,5 \text{ MPa}$$

Relativamente ao valor para agregados calcários, verifica-se também uma diferença, de 5,5 GPa. Esta diferença é difícil de explicar, uma vez que vários estudos realizados acerca desta propriedade em betões autocompactáveis chegaram a conclusões contraditórias. Segundo Persson (2001), os resultados de parâmetros como o módulo de *Young*, a retração ou a fluência mantêm-se constantes para betões correntes e para betões autocompactáveis, para um dado valor fixo de resistência à compressão.

Por outro lado, Ahmad *et al.* (2017) concluíram que nas mesmas condições, o módulo de *Young* tende sempre a ser menor nos betões autocompactáveis, por comparação com os correntes. Parra *et al.* (2011) são da mesma opinião, defendendo que este parâmetro tem tendência a ser sempre de menor valor nos betões autocompactáveis, com uma diferença de 2%. Segundo os mesmos autores, essa pequena diferença existe, pois o conteúdo de pasta cimentícia na mistura do betão autocompactável é muito superior do que no betão corrente. Apesar disso, uma diferença de 2% é muito pequena para poder explicar a causa deste enviesamento no módulo de *Young* obtido experimentalmente. Como tal, apesar de não ter sido feito um estudo da pasta cimentícia do betão, pode-se apontar como hipótese para a causa desta diferença, o facto da pasta cimentícia utilizada possuir um módulo de *Young* muito inferior às pastas cimentícias que são usualmente utilizadas em betões correntes (para uma classe de resistência C40/50).

5.1.4. Encurtamento diferencial

Pelos cálculos efetuados na secção 3.5, verifica-se que na ausência de um gradiente térmico, as deformações em cada placa serão diferentes. Considerando a Equação (3.4), apresenta-se na Tabela 5.1 o valor do encurtamento provocado por cada fenómeno no betão e na pedra, assim como a contribuição de cada fenómeno nesse encurtamento.

Tabela 5.1 – Deformações verificadas em cada placa

Material	Fenómeno	Extensão	Porcentagem (%)	Encurtamento (mm)
Betão	Retração endógena	$4,42 \times 10^{-5}$	5,4	0,07
	Retração de secagem	$4,56 \times 10^{-4}$	55,9	0,67
	Fluência	$2,35 \times 10^{-4}$	28,8	0,34
	Deformação Elástica	$8,07 \times 10^{-5}$	9,9	0,12
	Total	$8,16 \times 10^{-4}$	100	1,2
Pedra	Deformação Elástica (Total)	8×10^{-5}	100	0,12

Observando os resultados apresentados, verifica-se que o encurtamento total do betão é superior ao encurtamento da pedra (aproximadamente dez vezes superior). Esta diferença verifica-se porque a longo prazo, a pedra conta apenas com deformações elásticas provocadas pelo pré-esforço, enquanto o betão apresenta deformações superiores, resultado da sobreposição de efeitos da fluência, com a retração hídrica e deformações elásticas provocadas pelo pré-esforço. A maior parcela de encurtamento do betão corresponde ao fenómeno de retração de secagem (constitui 55,9% do encurtamento total). A escolha do tipo de cimento tem influência no cálculo da retração de secagem básica ($\epsilon_{cd,0}$). Como tal, para poder reduzir as deformações provocadas por este fenómeno, poder-se-ia ter utilizado um cimento com a mesma classe de resistência, mas que permitisse uma secagem normal (cimento tipo N). A humidade relativa do próprio meio onde se dá a retração do betão também influencia fortemente este fenómeno. Para o cálculo desta retração, foi utilizado um valor de 50% de humidade relativa. No entanto, se após a betonagem, o betão for exposto a ambientes com uma humidade relativa superior, é possível controlar as deformações impostas por este fenómeno de retração.

O segundo maior encurtamento corresponde à deformação provocada pela fluência (28,8% do encurtamento total). Segundo o EC2, os valores do coeficiente de fluência para um betão com cimento de secagem rápida podem ser inferiores a 2,5, desde que seja considerado um período superior a sete dias. Como tal, para poder reduzir o valor destas deformações, o painel poderia ter sido montado num período superior a sete dias, após a betonagem. O terceiro maior encurtamento corresponde à deformação elástica. Apesar da pedra e do betão apresentarem módulos de *Young* diferentes, verifica-se que o pré-esforço contribui para deformações elásticas praticamente iguais em ambas as placas. Esta igualdade pode ser explicada pelo facto da força de pré-esforço ter sido transmitida a cada material proporcionalmente à sua rigidez relativa. Utilizando os resultados apresentados na Tabela 5.1, apresenta-se de seguida o cálculo do encurtamento diferencial entre a pedra e o betão.

$$\Delta L = 1,2 - 0,12 = 1,08 \text{ mm}$$

Verifica-se que o encurtamento diferencial entre os materiais é muito reduzido. Tendo em conta que a deformação elástica em ambos os materiais é muito semelhante, esta diferença pode ser colmatada, controlando as deformações impostas pelos fenómenos de retração e de fluência descritos anteriormente. Verifica-se também que a escolha de um betão com um módulo de elasticidade próximo da pedra não contribui para aproximar as deformações das placas de pedra e de betão. Como tal, poderia ter sido produzido um betão com uma classe de resistência inferior a C40/50, com a condicionante de diminuir a resistência do painel ao ELU. Relativamente à eventual deformação da pedra por fluência, embora esse fenómeno não tenha sido contabilizado haverem poucos estudos que permitam aferir essa propriedade no calcário, a existência dessas deformações a longo prazo permitirá aproximar o comprimento de ambas as faces do painel, contribuindo para reduzir o valor do encurtamento diferencial entre a pedra e o betão.

5.2. Ensaios à flexão

A realização dos ensaios destrutivos à flexão foi útil, não só para observar os modos de rotura (e respetivas cargas), como também para confrontar esses valores obtidos com os que foram inicialmente estimados. Pelos cálculos realizados antes da fase de experimental, foram previstos dois modos de rotura, por punçoamento e por corte da pedra, e respetivas cargas. Apresenta-se na Tabela 5.2 o valor das cargas analíticas e experimentais.

Tabela 5.2 – Cargas analíticas vs experimentais

Face carregada	Modo de rotura		Carga (kN)	
	Analítico	Experimental	Analítica	Experimental
Pedra	Punçoamento	Punçoamento	9,2	9
Betão	Corte da pedra	Corte da pedra	7,2	7,3

De seguida, é feita uma análise de todos os ensaios à flexão realizados. Relativamente aos ensaios destrutivos dos Painéis 1 e 3, é feita uma análise dos modos de rotura observados e respetivas cargas que lhes deram origem. Essas cargas são posteriormente confrontadas com as cargas previstas analiticamente.

5.2.1. Carregamento na pedra

Analisando o primeiro ensaio destrutivo, verifica-se que o modo de rotura observado foi coerente com aquele que se esperava obter. A carga experimental obtida foi ligeiramente inferior à carga prevista. Esta pequena diferença de 0,2 kN na carga de punçoamento pode ser explicada pela contribuição do pré-esforço neste painel ser ligeiramente inferior a 10% da tensão normal, após perdas instantâneas (valor utilizado no coeficiente k_1 na Equação (4.4)). Para valores de pré-esforço superiores, é possível alcançar maiores resistências ao punçoamento, desde que a tensão de compressão uniforme não ultrapasse 20% da tensão de cálculo (condição imposta pela norma EN 1992-1-1). Este modo de rotura introduz uma preocupação futura com a aplicação destes painéis, nomeadamente na questão de fixação do painel à estrutura. Os elementos de fixação devem permitir uma distribuição de tensões adequada nas secções de apoio. Contudo, o punçoamento da placa de betão nas secções apoiadas apenas se verificou devido às condições de apoio inerentes aos ensaios realizados. A aplicação destes painéis em fachada não será feita com recurso a apoios pontuais, pelo que nunca poderia ocorrer este modo de rotura.

Para analisar o comportamento do painel, quando carregado na face da pedra (e em regime elástico), dividiram-se os ensaios à flexão em duas fases distintas: ciclos de carga-descarga e carregamento até à rotura. Na Figura 5.1, observa-se os resultados relativos a cada ciclo de carga-descarga, para o Painel 1 (primeiro ensaio destrutivo). De forma facilitar a leitura dos resultados relativamente a cada ciclo, criaram-se separações gráficas (artificiais) entre cada ciclo. Cada intervalo entre ciclos corresponde a uma diferença de deslocamentos de 1 mm.

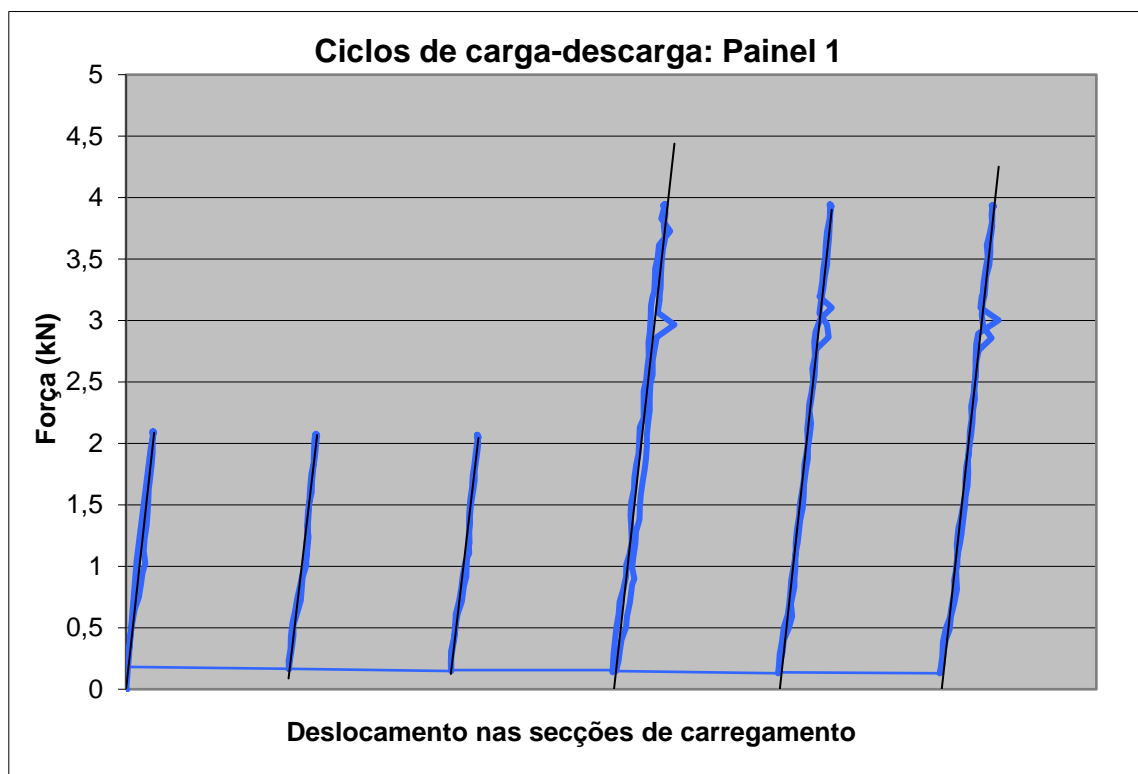


Figura 5.1 – Ciclos de carga-descarga do Painel 1

Observando o gráfico, é possível verificar que em todos os ciclos, os painéis apresentaram um comportamento aproximadamente elástico linear. A eventual perda de rigidez entre ciclos pode ser avaliada medindo o declive em cada ciclo de carga-descarga. Para tal, em cada ciclo de carga-descarga foi feita uma regressão linear, para aproximar os resultados do ensaio a retas que traduzem um regime elástico linear perfeito. Utilizando a equação da reta relativa a cada regressão, é possível verificar quantitativamente através do declive se houve perdas de rigidez entre cada ciclo. Na Tabela 5.3, encontram-se as equações relativas a cada regressão e respetivo erro quadrático.

Tabela 5.3 – Regressões lineares nos ciclos de carga-descarga do Painel 1

Carga (kN)	Ciclo	Equação da recta	Erro quadrático (R ²)
2	1	$y = 12,009 x$	0,9831
	2	$y = 11,21 x$	0,9686
	3	$y = 11,24 x$	0,9731
4	1	$y = 11,876 x$	0,9387
	2	$y = 12,153 x$	0,9763
	3	$y = 12,071 x$	0,9709

Observando as equações resultantes de cada regressão linear, é possível verificar diferentes valores de declive em cada reta. Estes declives traduzem uma medida relativa de rigidez, que resulta do rácio entre a força aplicada no atuador e a média aritmética dos deslocamentos verticais nas secções de carregamento (kN/mm). As retas apresentam todas um declive muito similar, o que significa que não houve nenhuma perda significativa de rigidez. Desde o primeiro até ao último ciclo de carga-descarga, o painel apresentou sempre o mesmo comportamento elástico. A aplicação de seis ciclos de carga-descarga serviu sobretudo para despistar pequenas alterações que se poderia observar nos resultados, por existência de pequenas folgas entre os materiais do painel, originadas na sua fase de produção. Importa destacar a qualidade dos resultados obtidos em cada regressão, cujas retas se ajustaram muito bem aos valores medidos nos ensaios para cada ciclo, algo que pode ser comprovado pelo erro quadrático, que apresenta um valor muito próximo da unidade.

Como referido na secção 4.4.3, no ensaio à flexão do Painel 2, para ter uma amostra maior do comportamento do painel em regime elástico, foi considerado um novo patamar de carga, pelo facto de ainda existir alguma folga entre a carga de 4 kN e a carga de punção observada no Painel 1. Assim sendo, o ensaio à flexão para o Painel 2 resulta num total de nove ciclos de carga-descarga, com posterior ensaio até à rotura. Na Figura 5.2, observa-se os resultados relativos a cada ciclo de carga-descarga, para o Painel 2. À semelhança do gráfico do primeiro ensaio, criaram-se separações gráficas (artificiais) entre cada ciclo. Cada intervalo entre ciclos corresponde a uma diferença de deslocamentos de 1 mm.

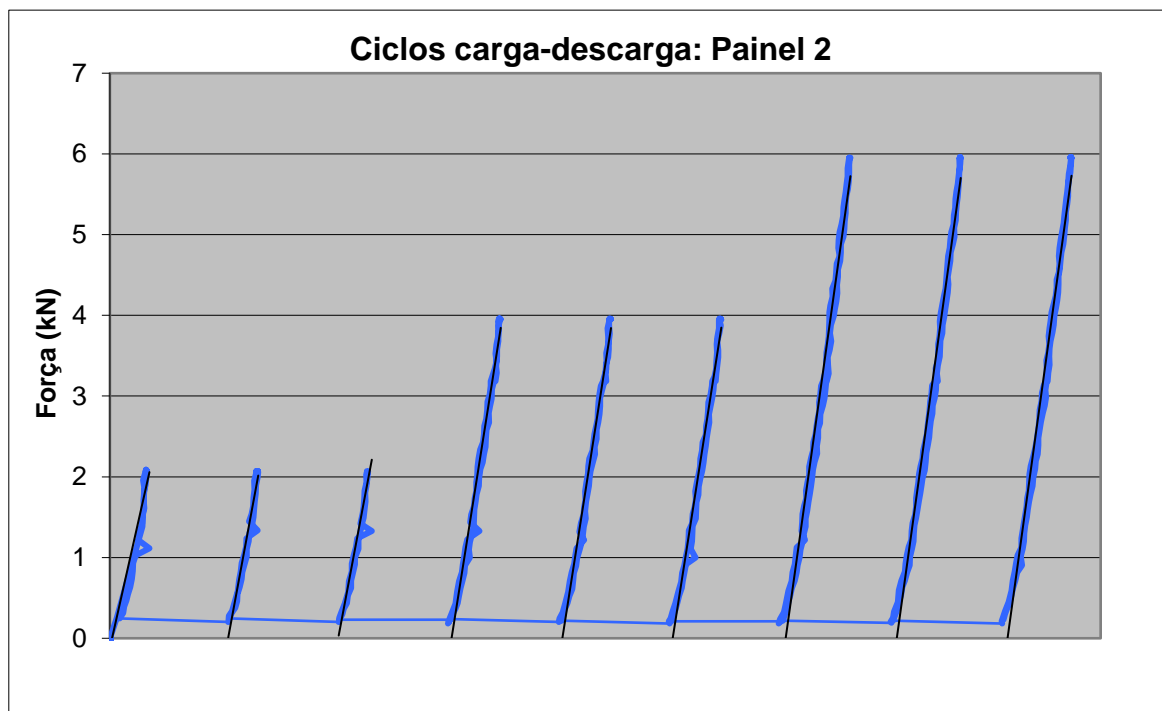


Figura 5.2 – Ciclos de carga-descarga do Painel 2

Para aproximar o comportamento do painel a um comportamento elástico linear perfeito, realizou-se novamente uma regressão linear em cada ciclo de carga-descarga. Na Tabela 5.4, encontram-se as equações das retas relativas a cada regressão, e o seu respetivo erro quadrático.

Tabela 5.4 – Regressões lineares nos ciclos de carga-descarga do Painel 2

Carga (kN)	Ciclo	Equação da recta	Erro quadrático (R ²)
2	1	$y = 6,0541 x$	0,9307
	2	$y = 7,3665 x$	0,9474
	3	$y = 7,2402 x$	0,9318
4	1	$y = 8,606 x$	0,9735
	2	$y = 8,6977 x$	0,9758
	3	$y = 8,7053 x$	0,9731
6	1	$y = 9,7326 x$	0,9776
	2	$y = 9,8153 x$	0,9808
	3	$y = 9,8547 x$	0,9811

Relativamente ao Painel 2, os resultados da rigidez para cada ciclo já apresentam valores distintos. No primeiro ciclo, verifica-se uma rigidez de valor 6,05 kN/mm. No último ciclo, a rigidez já apresenta um valor de 9,85 kN/mm. Para os primeiros ciclos de carga, a rigidez apresentada foi mais baixa. Observando cada ciclo para uma carga de 2 kN, apesar de não se verificar um acréscimo de deslocamentos residuais após cada ciclo, verifica-se que o andamento dos gráficos não é perfeitamente linear. O mesmo andamento pode ser observado no início dos restantes ciclos de carga-descarga (para forças baixas). Pode-se afirmar que numa fase inicial, embora seja muito próximo da linearidade, o painel apresenta um comportamento elástico não-linear.

A não linearidade do painel para cargas baixas verifica-se pelo aumento da rigidez do painel à medida que a carga aumenta. A tendência para o painel se comportar como elástico linear para valores de carga superiores verifica-se pelo facto do erro quadrático de cada regressão ser cada vez mais próximo da unidade, o que é um indicador de que as retas se ajustam cada vez melhor ao andamento dos gráficos. Comparando os dois ensaios, o Painel 1 apresenta uma rigidez de 12 kN/m, superior ao Painel 2, de 9,85 kN/mm. As diferenças de rigidez entre os painéis existem porque o processo de produção e montagem não é rigorosamente igual em cada painel. Tendo o Painel 2 seguido exatamente o mesmo esquema de montagem do Painel 1, as diferenças de rigidez podem ser justificadas por erros de montagem no Painel 2, nomeadamente na fase de aplicação de resina *epoxy* ao longo dos perfis de alumínio, que se revelou uma das etapas mais difíceis. A resina no seu estado fresco tem tendência a escorrer, sendo muito difícil por vezes garantir uma boa aderência entre as placas de pedra e o perfil.

Relativamente à fase do ensaio em que se levou o painel à rotura, é possível relacionar o comportamento do painel durante o ensaio com os dados que se obtiveram no gráfico. Na Figura 5.3, apresenta-se novamente o gráfico para o ensaio à rotura, relativo ao Painel 1.

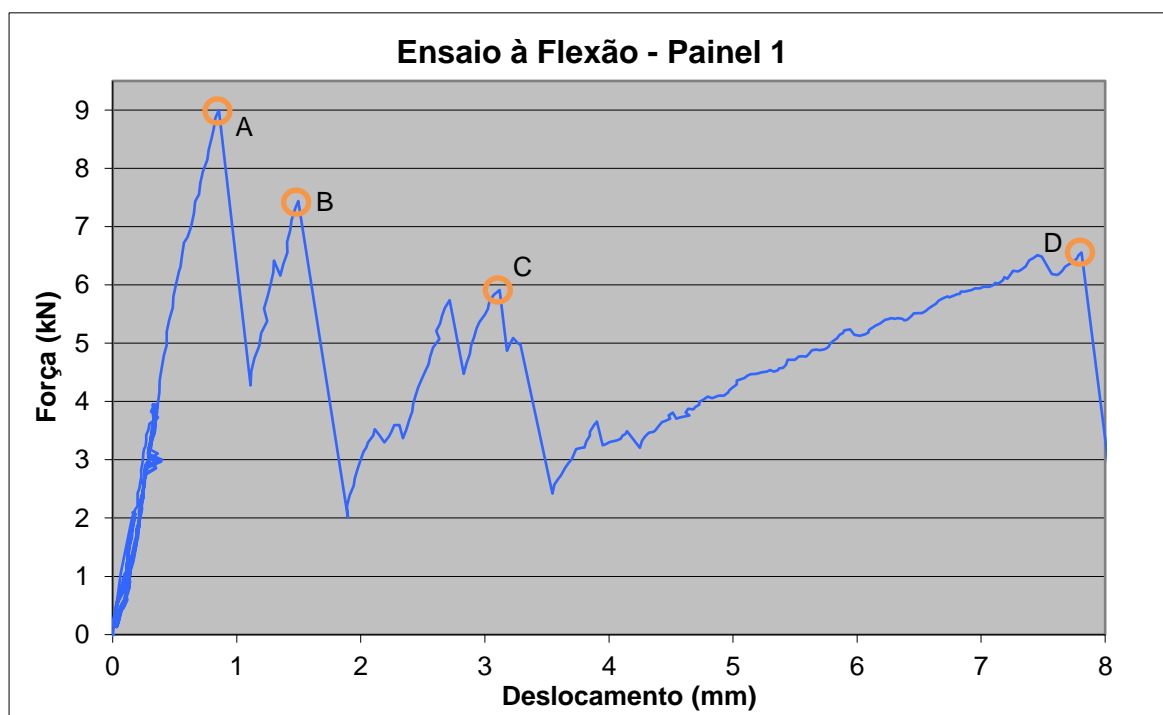


Figura 5.3 – Análise do comportamento do Painel 1 durante o ensaio

Observando o gráfico, há quatro patamares diferentes que é importante considerar. Cada um desses patamares corresponde a níveis de força de 9 kN, 7,4 kN, 5,9 kN e 6,5 kN. Como o painel ensaiado apresentou fraturas pelo betão em quatro secções distintas (secções apoiadas), estes quatro pontos de quebra de rigidez correspondem à fracturação em cada uma dessas secções. Estas roturas nos apoios por punçoamento correspondem aos pontos A, B, C e D, respetivamente (ver Figura 5.3).

5.2.2. Carregamento no betão

Analisando o segundo ensaio destrutivo, verifica-se que o modo de rotura observado e a respetiva carga foram coerentes com o que se esperava obter. Embora a carga experimental obtida tenha sido muito próxima da carga prevista, importa referir que a resistência ao corte adotada não corresponde exatamente ao tipo de pedra utilizada, uma vez que o calcário moca creme utilizado não se encontrava caracterizado ao corte. Tendo em conta que esse parâmetro não é comumente utilizado para caracterizar as pedras, utilizou-se para a resistência ao corte um valor de referência de 5,5 MPa para um calcário margo gresoso, obtido através de um estudo realizado por Falcão Neves *et al.* (2009). Apesar do valor da resistência ao corte ter sido adotada numa pedra diferente, o facto da carga experimental ter sido tão próxima da carga analítica permite concluir que o calcário moca-creme apresenta uma resistência ao corte muito próxima em relação ao calcário margo gresoso. Considerando este modo de rotura, é possível concluir até que valores de sucção o painel consegue resistir, utilizando a Equação (5.1). Tendo em conta a área do painel em planta, obteve-se a carga uniformemente distribuída a que o painel consegue resistir.

$$V_{\text{máx}} = 3,9 \text{ kN}$$

$$V_{\text{máx}} = \frac{qL}{2} \Leftrightarrow q = \frac{2 \times V_{\text{máx}}}{L} = \frac{2 \times 3,9}{1,42} \approx 5,5 \text{ kN/m} \quad (5.1)$$

$$q = 5,5 / 0,6 \approx 9,2 \text{ kN/m}^2$$

Para analisar o comportamento do painel, quando carregado na face do betão (e em regime elástico), dividiram-se os ensaios à flexão em duas fases distintas: ciclos de carga-descarga e carregamento até à rotura. Na Figura 5.4, observa-se os resultados relativos a cada ciclo de carga-descarga, para o Painel 3 (segundo ensaio destrutivo). De forma facilitar a leitura dos resultados relativamente a cada ciclo, criaram-se separações gráficas (artificiais) entre cada ciclo. Cada intervalo entre ciclos corresponde a uma diferença de deslocamentos de 1mm.

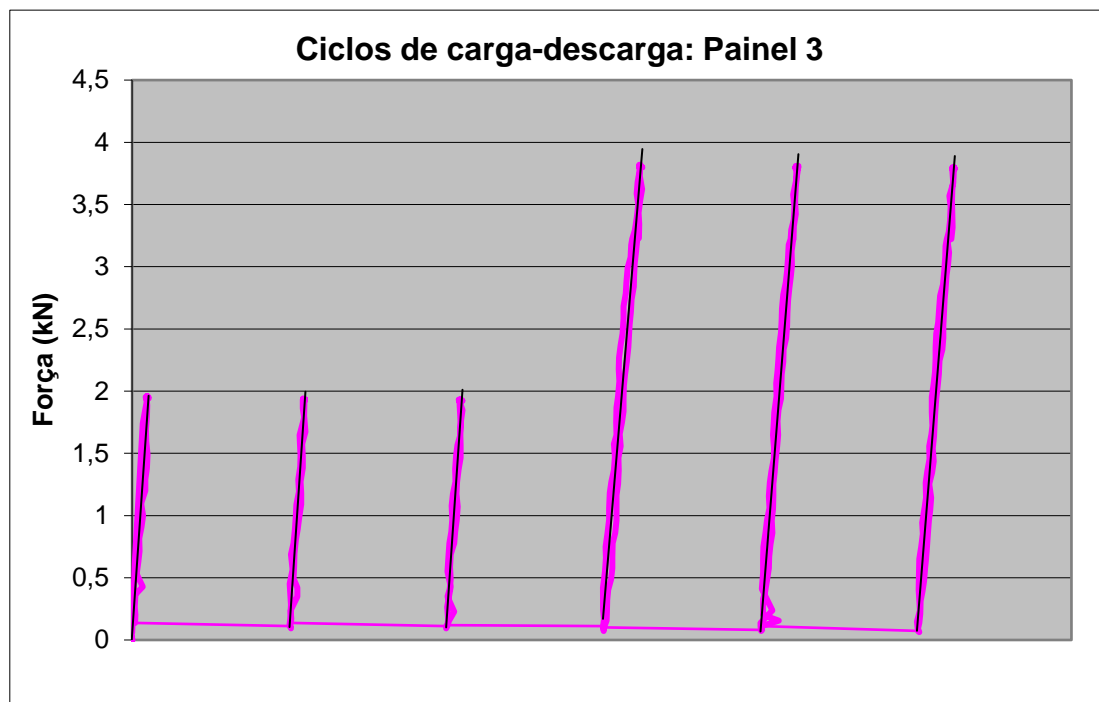


Figura 5.4 – Ciclos de carga-descarga para o Painel 3

Observando o gráfico, é possível verificar que em todos os ciclos, os painéis apresentaram um comportamento aproximadamente elástico linear. À semelhança dos painéis 1 e 2, em cada ciclo de carga-descarga foi feita uma regressão linear, para aproximar os resultados do ensaio a retas que traduzem um regime elástico linear perfeito. Utilizando a equação da reta relativa a cada regressão, é possível verificar quantitativamente se houve perdas de rigidez entre cada ciclo. Na Tabela 5.5, encontram-se as equações relativas a cada regressão e respetivo erro quadrático.

Tabela 5.5 – Regressões lineares nos ciclos de carga-descarga do Painel 3

Carga (kN)	Ciclo	Equação da recta	Erro quadrático (R ²)
2	1	$y = 18,193 x$	0,9342
	2	$y = 18,61 x$	0,8896
	3	$y = 18,264 x$	0,8813
4	1	$y = 15,004 x$	0,951
	2	$y = 15,845 x$	0,9423
	3	$y = 15,766 x$	0,9706

Observando as equações resultantes de cada regressão, é possível verificar diferentes valores de rigidez. No caso do Painel 3, o painel apresenta dois valores de rigidez distintos, de 18 kN/mm e 15kN/mm, para os ciclos de carga nos níveis de 2 kN e 4 kN, respetivamente. Tendo em conta que entre os ciclos de carga de 2 e 4 kN, não se verificam deslocamentos residuais após as descargas, o painel regressa sempre à mesma posição de origem, ou seja, apresenta um comportamento elástico. Como os valores de rigidez são diferentes nos dois patamares de carga, pode-se concluir que (à semelhança do Painel 2), o Painel 3 também apresenta um comportamento elástico não-linear, com tendência a comportar-se como elástico linear, para uma carga de 4 kN, uma vez que o gráfico se ajusta cada vez melhor a um andamento linear.

Relativamente à fase do ensaio em que se levou o painel à rotura, é possível relacionar o comportamento do painel durante o ensaio com os dados que se obtiveram no gráfico. Na Figura 5.5, apresenta-se novamente o gráfico para o ensaio à rotura, relativo ao Painel 3.

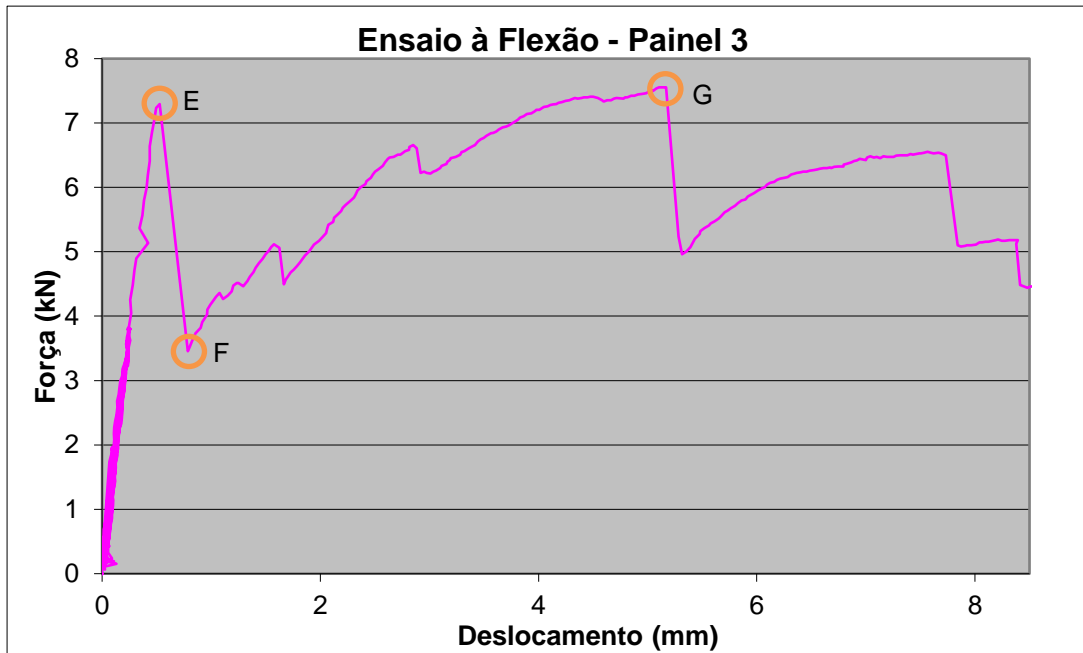


Figura 5.5 – Análise do comportamento do Painel 3 durante o ensaio

Observando o gráfico, há dois patamares diferentes que é importante considerar. Cada um desses patamares corresponde a níveis de força de 7,3 kN, e 7,5 kN, respetivamente. O primeiro patamar corresponde à rotura da pedra por corte num dos lados do painel (ponto E). A partir dessa rotura, a fracturação da pedra propaga-se até ao outro lado do painel, como se pode observar na Figura 5.6. Essa fracturação provoca uma perda gradual de rigidez que se pode observar no gráfico, entre os pontos F e G. Os deslocamentos representados no gráfico (que resultam da média entre os deslocamentos δ_2 e δ_4 nas secções de carregamento) deixam de ter significado a partir do ponto E, uma vez que um dos LVDT passa a ler deslocamentos apenas num dos lados da secção fraturada (como também se pode observar na Figura 5.6).



Figura 5.6 – Fraturação da pedra por corte ao longo da secção de colagem

Quando a fratura se propaga por toda a largura da pedra, dá-se o descolamento do perfil de alumínio e conseqüentemente uma perda significativa da rigidez, para uma carga de 7,5 kN (ponto G). As duas extremidades fraturadas foram já apresentadas na secção 4.4.4, e podem ser observadas na Figura 4.20. O descolamento do perfil leva a que, a partir desse instante, a pedra deixe de ser solicitada à flexão, verificando-se apenas uma flexão da placa de betão, como se pode observar na Figura 5.7.



Figura 5.7 – Flexão da placa de betão

Relativamente ao quarto ensaio à flexão, embora não tenha sido possível estudar o comportamento elástico do Painel 1*, verificou-se uma carga máxima de 8,2 kN neste ensaio (ligeiramente superior à que se verificou no Painel 3). Este resultado permite concluir que, mesmo para uma situação de punçoamento do betão, o sistema de painel híbrido consegue ainda assim manter a sua integridade estrutural para resistir a acções de sucção.

5.2.3. Avaliação da rigidez à flexão

Tal como referido anteriormente, os deslocamentos medidos nos ensaios são superiores aos calculados segundo o modelo. Essa diferença permite concluir que a rigidez à flexão do sistema é inferior ao valor calculado de $1,17 \times 10^{12}$ Nmm². Esta diferença de rigidez pode ser explicada pelo facto das secções de carregamento corresponderem a juntas de colagem entre as placas de calcário, com resina *epoxy*. A resina, embora permita uma continuidade das placas a nível estrutural, possui um módulo de *Young* muito inferior (5,5 GPa), quando comparada com a pedra e o betão. Este módulo de *Young* implica que a rigidez à flexão da secção mista seja mais baixa nas secções de carregamento. Para avaliar o efeito da resina *epoxy* na rigidez global da secção, calculou-se uma nova rigidez corrigida (novamente através da Equação (4.7)), tendo em consideração o valor do módulo de *Young* da resina. Esse cálculo implica conhecer a nova posição do centro de rigidez da secção mista.

$$\text{Centro de rigidez: } z_r = \frac{A \times E_c \times z_c + A \times E_r \times z_{rs}}{A \times E_c + A \times E_r} = \frac{26 \times 15 + 5,5 \times 75}{26 + 5,5} \approx 25,5 \text{ mm}$$

$$I_{\text{placa}} = \frac{600 \times 30^3}{12} + 600 \times 30 \times (25,5 - 15)^2 \approx 3,3 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_r = \frac{600 \times 30^3}{12} + 600 \times 30 \times (75 - 25,5)^2 \approx 4,5 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{pf}} = \frac{3 \times 60^3}{12} + 60 \times 3 \times (45 - 25,5)^2 \approx 1,2 \times 10^5 \text{ Nmm}^2$$

$$EI = \sum_{i=1}^n E_i I_i = E_c I_c + E_r I_r + 2 \times (E_{\text{pf}} I_{\text{pf}}) =$$

$$= 3,3 \times 10^6 \times 26 \times 10^3 + 4,5 \times 10^7 \times 5,5 \times 10^3 + 2 \times 1,2 \times 10^5 \times 70 \times 10^3 \approx 3,5 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

Utilizando a nova rigidez à flexão, é possível calcular os novos deslocamentos teóricos que se esperam obter em cada secção. Esses deslocamentos apresentam-se na Tabela 5.6. Como todos os deslocamentos são inversamente proporcionais à rigidez EI, o cálculo dos novos deslocamentos δ_i^* é feito através da correcção da rigidez anterior, utilizando a seguinte expressão:

$$\delta_i^* = \frac{\delta_i \times 1,17 \times 10^{12}}{3,5 \times 10^{11}}$$

Tabela 5.6 – Deslocamentos teóricos corrigidos vs experimentais

Carga no Atuador (kN)	Secção <i>i</i>	Deslocamentos (mm)				Relação de Deslocamentos: Experimental/Teórico		
		Teóricos (δ_i^*)	Experimentais			Painel 1	Painel 2	Painel 3
			Painel 1	Painel 2	Painel 3			
2	1	0,127	0,123	0,283	0,100	1,0	2,2	0,8
	2	0,244	0,190	0,343	0,103	0,8	1,4	0,4
	3	0,287	0,227	0,360	0,140	0,8	1,3	0,5
	4	0,244	0,163	0,333	0,110	0,7	1,4	0,5
	5	0,127	0,147	0,280	0,100	1,2	2,2	0,8
4	1	0,254	0,213	0,430	0,233	0,8	1,7	0,9
	2	0,488	0,350	0,547	0,247	0,7	1,1	0,5
	3	0,568	0,423	0,580	0,307	0,7	1,0	0,5
	4	0,488	0,353	0,553	0,257	0,7	1,1	0,5
	5	0,254	0,287	0,423	0,173	1,1	1,7	0,7
6	1	0,388	-	0,563	-	-	1,5	-
	2	0,729	-	0,730	-	-	1,0	-
	3	0,856	-	0,777	-	-	0,9	-
	4	0,729	-	0,730	-	-	1,0	-
	5	0,388	-	0,537	-	-	1,4	-

Observando os resultados apresentados na Tabela 5.6, verifica-se que após consideração do efeito da deformação da resina na correção dos deslocamentos, que os mesmos são maiores que os calculados em 4.4.6 e são muito próximos dos que se obtiveram aquando dos ensaios à flexão. Para o Painel 1, a relação entre os deslocamentos teóricos e experimentais varia entre 0,8 e 1,2 enquanto no Painel 2, essa relação encontra-se entre 1 e 2,2. Para o caso do Painel 3, verifica-se que os deslocamentos obtidos no ensaio são inferiores aos calculados (aproximadamente metade). Esta diferença pode ser explicada por duas razões:

i. Não é conhecido com muito rigor o valor do módulo de *Young* do calcário moca-creme, dado que foi utilizado um valor médio deste parâmetro para este tipo de pedra, através dum estudo feito por Amaral *et al.* (2007). O valor do módulo de *Young* tem influência no cálculo da posição do centro de rigidez e, conseqüentemente, da rigidez à flexão;

ii. O Painel 3 foi submetido ao carregamento na face do betão. Embora a secção transversal seja a mesma, a superfície do betão não apresenta descontinuidades. A inexistência de juntas de colagem na superfície do carregamento permite algum ganho de rigidez, quando o painel é solicitado nesta direcção.

Embora os resultados apresentados não permitam inferir com exactidão o valor da rigidez à flexão do painel, é possível concluir que essa rigidez se encontra mais próxima do valor de $3,5 \times 10^{11}$ Nmm². A existência de uma junta de colagem entre as placas de pedra tem influência na rigidez global da peça, contribuindo para aumentar entre duas vezes e meia a sete vezes os deslocamentos (resultados da Tabela 4.13). É possível concluir também que o painel não se comporta exactamente como uma viga simplesmente apoiada, uma vez que após consideração do efeito da resina, continua-se a verificar um enviesamento relativamente aos deslocamentos δ_1 e δ_5 . Para avaliar a contribuição de cada elemento da junta de colagem na rigidez do painel, apresenta-se de seguida o cálculo da rigidez à flexão relativa de cada material.

$$\text{Rigidez relativa da resina: } \frac{E_r I_r}{\sum_{i=1}^n E_i I_i} \times 100 = \frac{4,5 \times 10^7 \times 5,5 \times 10^3}{3,5 \times 10^{11}} \times 100 \approx 70,7\%$$

$$\text{Rigidez relativa do betão: } \frac{E_c I_c}{\sum_{i=1}^n E_i I_i} \times 100 = \frac{3,3 \times 10^6 \times 26 \times 10^3}{3,5 \times 10^{11}} \times 100 \approx 24,5\%$$

$$\text{Rigidez relativa do perfil: } \frac{2 \times (I_{pf} + A \times (z_r - z_{pf})^2)}{\sum_{i=1}^n E_i I_i} \times 100 = \frac{2 \times 1,2 \times 10^5 \times 70 \times 10^3}{3,5 \times 10^{11}} \times 100 \approx 4,8\%$$

Observando a contribuição de cada elemento, verifica-se que a resina e o betão são os materiais com maior contribuição para a rigidez à flexão. A “lâmina” de resina, apesar de ter um módulo de *Young* muito baixo, encontra-se mais distante do centro de rigidez da secção, o que contribui para aumentar a sua inércia. O betão, por outro lado, tem um módulo de *Young* maior, mas encontra-se muito próximo do centro de rigidez. Os perfis de alumínio, apesar de estarem a fletir segundo a sua maior inércia, têm uma contribuição global muito reduzida para a rigidez.

Embora os perfis não tenham contribuição relevante para o valor global da rigidez à flexão, a sua presença no sistema continua a trazer algumas vantagens. Tendo em conta que na fase de montagem dos painéis foi aplicada resina *epoxy* em vários pontos de contacto entre cada perfil e as reentrâncias das placas, a presença dos perfis irá permitir a transmissão de tensões de uma placa para outra, quando o painel for ensaiado. Quando se inicia a flexão da pedra ou do betão, o perfil também tem um contributo de solidarização entre a pedra e o betão (tal como o pré-esforço). A existência de vários pontos de colagem com resina no painel permite que haja uma distribuição de tensões das placas para o perfil, em vez da carga ser transmitida pontualmente nas secções de carregamento. Adicionalmente, o perfil tem também a função de impedir deslocamentos relativos entre o betão e as placas de pedra e serve também de apoio para essas placas, na fase montagem.

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1. Conclusões

Esta dissertação foi desenvolvida com dois objetivos principais:

- a) Desenvolver uma metodologia viável de aproveitar o desperdício de material pétreo utilizado na indústria das rochas ornamentais, para produção de agregado que permita a obtenção industrial (em pequena escala e no local da sua origem) de placas de betão com potencial de valorização comercial;
- b) Validar a viabilidade de aplicação destas placas de betão como substituto da pedra natural num sistema inovador de painéis de placas pré-esforçadas, o qual tem sido desenvolvido industrialmente para ser utilizado como produto de revestimento e/ou parede em fachadas, o “*INOVWALL*”.

Ao nível da indústria das rochas ornamentais, e pedra natural em geral, é impossível não gerar desperdícios associados aos vários métodos de processamento da pedra. Certas operações como o corte da pedra para a produção de placas, acabam sempre por originar uma quantidade significativa de resíduos que raramente são aproveitados/valorizados comercialmente. Apesar de existirem atualmente muitas empresas que aproveitam este material para britagem e uso na construção, a maioria é muitas vezes armazenado durante um tempo limitado, até que seja feito o seu transporte para aterro. Após desenvolver um produto que permite incorporar desperdícios de pedra na sua produção, apresentam-se de seguida um conjunto de conclusões que se podem retirar, com base no trabalho desenvolvido nesta dissertação:

- i. É possível desenvolver um produto para revestimento de fachada/parede que incorpore desperdícios da indústria da pedra, para desenvolver um betão com menor impacto ambiental, face às soluções já existentes para betão, aplicado no revestimento de fachadas;
- ii. O desperdício de calcário moca-creme da indústria da pedra é viável para produzir agregado incorporado numa mistura de betão autocompactável;
- iii. A composição de betão utilizada permite produzir um betão autocompactável com uma classe de resistência C40/50;
- iv. A adição de um filler calcário na composição de betão utilizada contribuiu para uma pequena redução da resistência à tração, relativamente a um betão corrente da mesma classe;
- v. Ao contrário dos resultados apresentados por Aquino et al. (2010), verifica-se que o betão produzido nesta dissertação com recurso a agregado calcário reciclado apresenta um módulo de *Young* inferior ao que seria expectável. A causa mais provável prende-se com a produção de um betão autocompactável, cuja composição poderá ter resultado numa pasta cimentícia consideravelmente menos rígida;

- vi. A placa de betão, quando aplicada no sistema do painel aos sete dias após a betonagem, apresenta maiores deformações a longo prazo do que a pedra. A principal causa que levou ao seu encurtamento foi a retração de secagem;
- vii. O pré-esforço, além de solidarizar todo o painel, contribui também para o aumento da resistência ao ELU, para ações de pressão, quando se encontra ligado à estrutura por quatro apoios pontuais;
- viii. O painel de fachada/parede produzido no âmbito desta dissertação, quando ligado à estrutura por quatro apoios pontuais, consegue resistir ao ELU para ações de sucção de aproximadamente 9,2 kN/m²;
- ix. Não sendo conhecido o valor da resistência ao corte do calcário moca-creme, o ensaio à flexão realizado permite concluir que essa resistência é de aproximadamente 5,5 MPa. No entanto, um ensaio de corte direto a provetes deste material permitiria aferir melhor essa propriedade;
- x. É possível verificar que em todos os ciclos de carga e descarga dos ensaios, o painel apresenta um comportamento elástico não-linear. Quando se solicita o painel a níveis de carga superiores (em regime elástico), verifica-se que o mesmo tende a ter um comportamento elástico muito próximo do linear;
- xi. A presença de juntas entre as placas de pedra (preenchidas com resina *epoxy*) contribui para que o painel produzido tenha uma rigidez à flexão 2,5 a 7 vezes mais baixa do que se a placa de pedra fosse contínua, contribuindo para um pior desempenho do painel ao ELS (relativamente a uma solução de placa de pedra contínua);
- xii. Apesar da existência das juntas de colagem, o painel apresenta uma rigidez ligeiramente superior ao ser carregado na face de betão, comparativamente ao carregamento na pedra.

Após produzir os painéis híbridos em pedra e betão pré-esforçados, é possível inumerar um conjunto de características, como forma de comparar a solução que foi desenvolvida com o conceito base de revestimento de fachadas em pedra pré-esforçada (o “*PRESSTONE*”).

- xiii. O painel produzido nesta dissertação possui dimensões com metade do valor, relativamente ao painel exclusivamente em pedra, constituindo uma solução significativamente mais leve;
- xiv. O painel híbrido, sendo de menores dimensões, constitui uma solução de montagem mais fácil (para cada unidade). No entanto, a sua aplicação em fachadas não é mais rentável em termos de tempo, dado que cada unidade deste painel ocupa um quarto da área do painel de fachada exclusivamente em pedra. Esta desvantagem também se verifica, comparando o painel híbrido com as restantes soluções comerciais apresentadas na Tabela 2.1;
- xv. A montagem de cada unidade do painel híbrido é mais simples, uma vez que apenas uma das faces (a exterior) possui um esquema de montagem com colagem das placas de pedra. Nos painéis exclusivamente em pedra, a colagem de pedra com resina *epoxy* tem de ser feita, não só ao nível das três placas de cada face, como também em relação às placas de extremidade;
- xvi. Os painéis em pedra estão dependentes de placas de extremidade. Essas placas, não só recebem as ancoragens de cada fio, como também devem ser previamente furadas, por forma a introduzir esses fios. No painel híbrido, este trabalho é dispensado, sendo apenas necessário

- garantir negativos na geometria das placas de topo e nas extremidades da cofragem, para acomodar as placas de ancoragem;
- xvii. No painel híbrido, são necessárias apenas duas placas de ancoragem para introduzir pré-esforço em três fios, enquanto na solução concorrente, são necessárias duas placas por cada fio (embora mais pequenas);
 - xviii. Nos painéis em pedra, o sistema de tensionamento atua diretamente nos fios, sendo por isso possível prevenir perdas de pré-esforço por reentrada das cunhas. Por outro lado, a introdução de pré-esforço com três macacos hidráulicos não permite evitar essas perdas, mas permite que a força seja transmitida em simultâneo nos três fios, impedindo perdas por encurtamento diferencial entre os mesmos;
 - xix. É difícil monitorizar a força de pré-esforço introduzida no painel híbrido (com o sistema que foi descrito), uma vez que a fiabilidade da força que se observa no indicador está dependente de uma boa calibração do equipamento. Nos painéis em pedra pré-esforçada, é possível medir o acréscimo no comprimento do fio e associar a força introduzida numa rotação completa da porca. Como tal, garante-se um controlo mais eficaz da força que é introduzida.
 - xx. O painel híbrido, apesar de constituir uma solução eco-eficiente pela utilização de material desperdiçado em pedreiras, utiliza um betão à base de cimento *Portland*. Como já foi referido anteriormente, a utilização deste material implica emissões de CO₂ para a atmosfera, algo que não acontece no painel de pedra.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos futuros nesta temática, propõe-se:

- i. Estudo detalhado de soluções de isolamento térmico e/ou acústico para painéis de fachada e parede híbridos em pedra pré-esforçada e betão eco-eficiente;

Tendo em conta que o principal foco desta dissertação foi a conceção de um produto estruturalmente viável, capaz de resistir às ações que lhe estarão sujeitas em condições atmosféricas adversas, existem ainda questões inerentes ao revestimento de fachadas que não foram exploradas nesta dissertação, como o caso da acústica e da térmica. Havendo várias soluções possíveis para melhorar o desempenho térmico e acústico das fachadas, seria interessante estudar quais os melhores materiais a adotar para esse fim e perceber como seria feita a sua integração na solução atual. Adicionalmente, quando o painel cumprir com todos os requisitos descritos acima, é importante definir uma solução que permita fazer a ligação entre a placa de betão (placa interior) e a fachada do edifício. Esse sistema de ligação é importante quando o painel híbrido é utilizado como painel de fachada. Se for utilizado no contexto de parede, importa definir uma solução para a ligação entre as laterais de cada painel. Tendo em conta que os fios de pré-esforço se encontram inseridos numa caixa de ar, é importante ter em conta a questão da durabilidade destes fios, pelo que se sugere também a inclusão de um material de revestimento, que garanta a durabilidade dos fios de pré-esforço.

- ii. Desenvolvimento de painéis de fachada em pedra e betão eco-eficiente;

Como alternativa ao tema desenvolvido nesta dissertação, propõe-se um estudo no qual ambos os materiais pudessem ser conjugados, de forma a trabalhar como um painel único, contrariamente a solução de duas placas. Uma hipótese seria a produção de placas de betão (com incorporação de desperdício de pedra) com colagem de uma folha de pedra de reduzida espessura na face exterior do painel. Além de ser valorizada a pedra para produção de um betão eco-eficiente, continuar-se-ia a ter em conta o aspeto estético, que é sempre importante em qualquer fachada.

- iii. Desenvolvimento de painéis de fachada e parede em pedra e betão armado eco-eficiente, pré-esforçados;

O estudo levado a cabo nesta dissertação permite avaliar a viabilidade estrutural do painel híbrido, com uma placa de betão não armado. No entanto, a utilização de uma malha de armadura no betão pode resultar nalguns ganhos de resistência importantes. Como tal, seria interessante um estudo para o desenvolvimento destes painéis, com a variante de utilizar betão armado e procedendo a uma campanha experimental semelhante, para poder comparar resultados com a solução desenvolvida nesta dissertação e perceber se os ganhos de resistência seriam significativos e justificariam a introdução de aço.

- iv. Estudo de soluções para a ligação de placas de pedra em painéis de fachada e parede em pedra e betão armado pré-esforçados;

O método de ligação utilizado para as placas de pedra na face exterior permitiu garantir uma continuidade do painel, a nível estrutural. No entanto, a utilização de um material significativamente menos rígido nessa ligação (resina *epoxy*) constitui uma perda de rigidez importante, quando o painel é solicitado à flexão. Como forma de colmatar essa perda de rigidez, propõe-se um estudo de outras alternativas de ligação das placas, com a utilização de conectores metálicos, ou de uma ligação mista (conectores com cola).

- v. Desenvolvimento de um modelo analítico para estudar diferentes soluções de betão a aplicar em painéis híbridos de fachada e parede pré-esforçados em pedra e betão eco-eficiente;

Tendo sido proposto inicialmente nesta dissertação a produção de um betão autocompactável com uma classe de resistência de C40/50, os resultados obtidos acabam por ser satisfatórios e permitem validar a composição do betão que foi utilizada. No entanto, esta poderá não ser a solução economicamente mais viável para produzir as placas interiores dos painéis. Como tal, propõe-se o desenvolvimento de um modelo analítico deste painel, para estudar a viabilidade das várias soluções de betão, confrontando os resultados com o custo que cada solução acarreta para a sua produção.

Referências

- Ahmad, Subhan, Arshad Umar, e Amjad Masood. 2017. «Properties of Normal Concrete, Self-Compacting Concrete and Glass Fibre-reinforced Self-Compacting Concrete: An Experimental Study». 173: 807–13.
- Amaral, Pedro M, Rui S Camposinhos, e José C Lello. 2013. «Natural Stone Testing Specification for a New Facade System». 548: 295–303.
- Amaral, Pedro M, Jorge C Fernandes, e L G Rosa. 2007. «A caracterização Física e Mecânica de Rochas Ornamentais: CONHECER OS LIMITES DA PEDRA». (April).
- Anjos, Marcos A S, e Aires Camões. 2014. «Betão auto-compactável eco-eficiente de reduzido teor em cimento com incorporação de elevado volume de cinzas volantes e metacaulino». Em *Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*, , 17–26.
- Antunes, Marilyne Junqueira. 2013. «ECO-Betão com Adição de Resíduo da Indústria Petrolífera».
- Appleton, Júlio. 1999. «Interesse e Vantagens da Aplicação de Pré-esforço em Edifícios».
- Aquino, Carlos et al. 2010. «The effects of limestone aggregate on concrete properties». *Construction and Building Materials* 24(12): 2363–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.008>.
- Camposinhos, Rui De S, José C Lello, Manuel T Neves, e Ricardo P Santos. 2013. «Structural performance of prestressed façade limestone panels». 1(2).
- Camposinhos, Rui S. 2017. «PAINÉIS PRÉ-ESFORÇADOS REALIZADOS A PARTIR DE PLACAS DE PEDRA NATURAL E TIRANTES EM AÇO DE PRÉ-ESFORÇO». 0: 1–13.
- Camposinhos, Rui S, e José C. Lello. 2010. «Prestressed Façade Stone Panels». : 1–5.
- Carvalho, Jorge. 2007. «Rochas Ornamentais , Pedras Naturais ou Pedras Dimensionais ?» 42(2): 157–59.
- Costa, António, e Júlio Appleton. 2002. «Estruturas de Betão I, Parte II - Materiais».
- Coutinho, Joana Sousa. 2011. «Betões eco-eficientes com resíduos». Em , 171–214.
- Cruz, Sena, e Miguel Azenha. 2013. «Estruturas de Betão II - 2012/2013».
- Duarte, Juliana. 2014. «Aspetos do Dimensionamento de Painéis Prefabricados de Fachada em GRC do Tipo Nervurado».
- Etzeberria, M, E Vázquez, A Marí, e M Barra. 2007. «Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete». 37: 735–42.
- Falcão Neves, P, M Costa e Silva, e M Reis e Sousa. 2009. «VARIACÃO DA RESISTÊNCIA AO CORTE DE ROCHAS BRANDAS COM O SEU ÍNDICE DE DURABILIDADE VARIATION OF WEAK ROCKS SHEAR STRENGTH WITH THEIR SLAKE».
- Ferreira, Luís Filipe Brandão, Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio, Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa, e Mestre Paulo Maranhã Nunes Tiago. 2013. «Projeto EcoFachada – Painéis de Fachada em Betão Eco-Eficiente de Base Geopolimérica com Incorporação de Resíduos». (November 2016).
- Ferreira, Luís Filipe Brandão, Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio Co-Orientador, Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa Co-Orientador, e Mestre Paulo Maranhã Nunes Tiago. 2015. «Painéis de Fachada Prefabricados em Betão Eco-Eficiente Ativado Tese especialmente elaborada para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil Tese Provisória».

Gonçalves, Maria. 2013. «Revestimento de piso em pedra calcária – adequabilidade, patologia e manutenção».

Gripp, Ronaldo Assis. 2008. «“ A IMPORTÂNCIA DO PROJETO DE REVESTIMENTO DE FACHADA , PARA A REDUÇÃO DE PATOLOGIAS ”».

ITeCons. 2018. «INOVWALL - Nova Tecnologia de Produção para Sistemas de Parede Pétrea Modular Multifuncional utilizada na Construção e Reabilitação Sustentável e Eco-eficiente». <http://www.itecons.uc.pt/projectos/inovwall/index.php?module=sec&id=642&f=1>.

Lithodecor. 2017. «Tipos de Fachada». <http://www.lithodecor.com/en/home.html> (5 de Janeiro de 2018).

Marques, Nuno Miguel Barreira. 2012. «Painéis de fachada em betão pré-fabricado – Comportamento térmico e estrutural».

Mendonça, Paulo. 2005. Universidade do Minho, Guimarães «Habitar sob uma segunda pele - Estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados».

Monteiro, Carlos. 2014. «CORTE DE PEDRA POR FIO DIAMANTADO».

Oliveira, Luciana Alves D E. 2002. «TECNOLOGIA DE PAINÉIS PRÉ-FABRICADOS TECNOLOGIA DE PAINÉIS PRÉ-FABRICADOS».

Parra, C, M Valcuende, e F Gómez. 2011. «Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete». *Construction and Building Materials* 25(1): 201–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.037>.

Persson, Bertil. 2001. «A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete». 31.

Pinto, Alberto. 2015. «Evolução da pedra natural | Novas Tecnologias».

Samúdio, Joana Alves. 2015. «Revestimento de fachadas com painéis reforçados com fibra de vidro (GRC) Arquitetura».

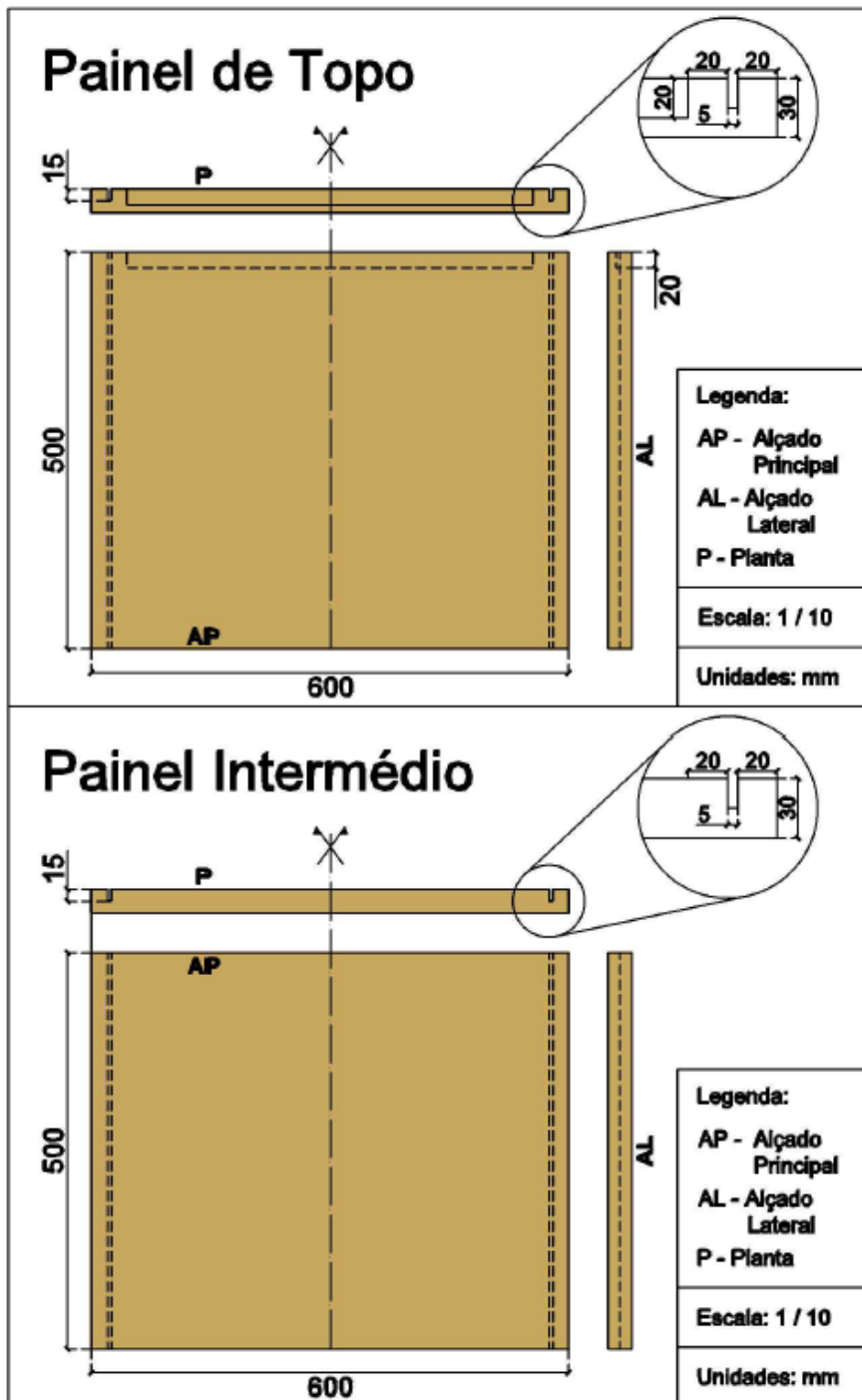
Silva, Rui, Jorge De Brito, e Ravindra Dhir. 2015. «Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in the production of structural concrete Civil Engineering».

Tabsh, Sami W, e Akmal S Abdelfatah. 2009. «Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete». *Construction and Building Materials* 23(2): 1163–67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007>.

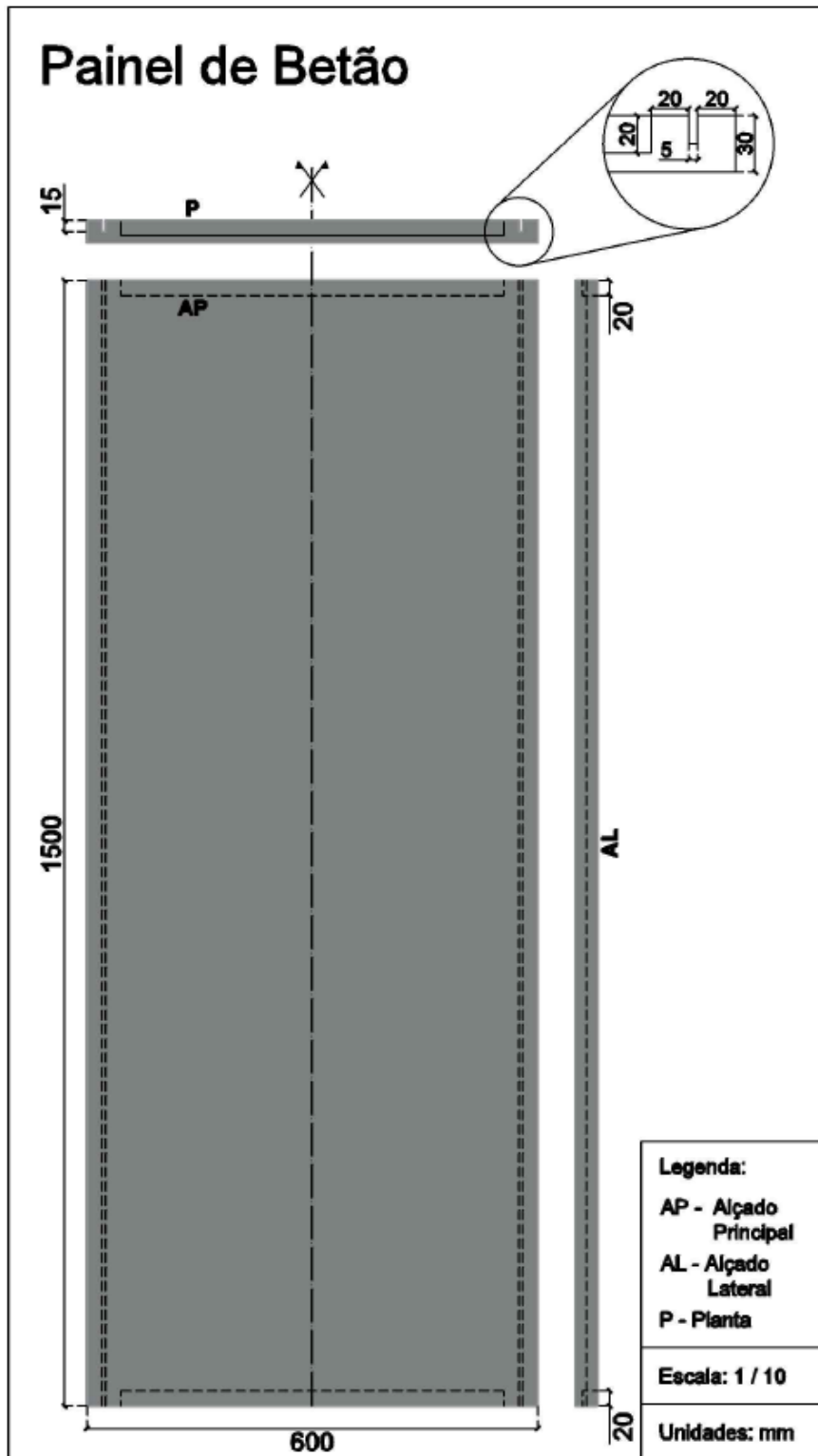
Veiga, Maria, e Sofia Malanho. 2009. «Metodologia de diagnóstico e reparação de anomalias».

Anexos

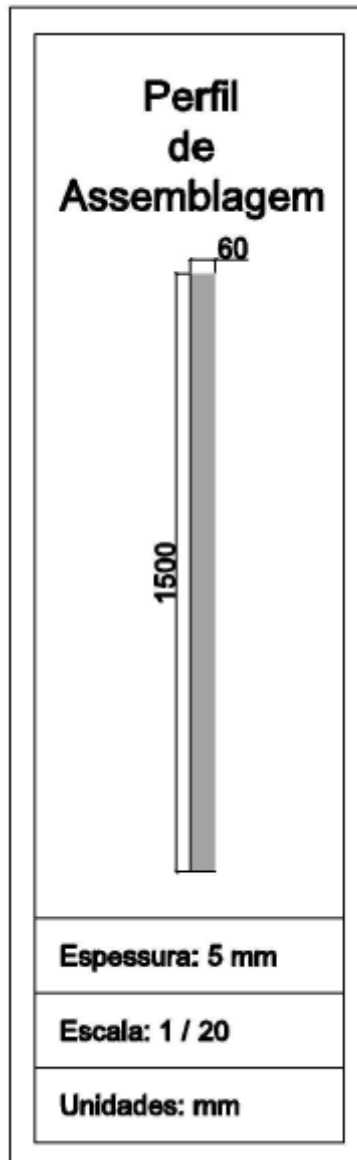
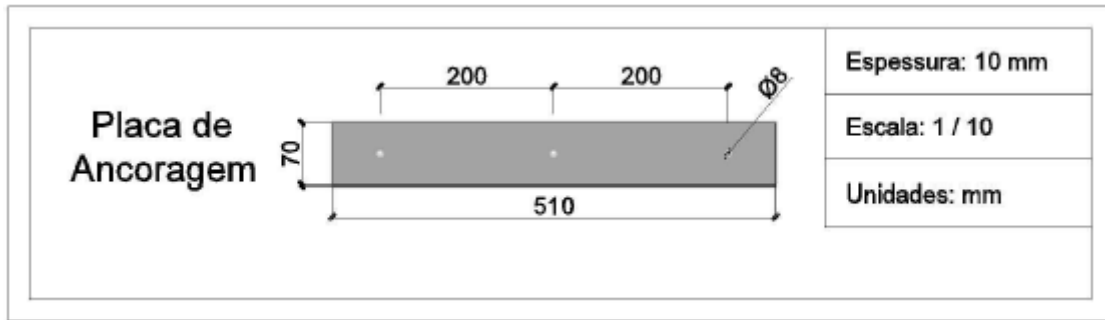
Anexo 1 – Ficha técnica das placas de pedra



Anexo 2 – Ficha técnica da placa de betão



Anexo 3 – Fichas técnicas do perfil de assemblagem e placa de ancoragem



1 – Componente A + B Cores: Verde acinzentado, cor de tijolo, preto e marfim.
 Densidade: Aproximadamente 1,52 g/cm³

2 – Tempo de trabalho

a) Mistura de 100g de componente A + 50g de componente B

A 10°C: 50-60 minutos

A 20°C: 20-30 minutos

A 30°C: 8-12 minutos

A 40°C 5-7 minutos

b) A 20°C e diferentes quantidades

20g de componente A + 10g de componente B: 25-35 minutos

50g de componente A + 25g de componente B: 25-35 minutos

100g de componente A + 50g de componente B: 20-30 minutos

300g de componente A + 150g de componente B: 15-25 minutos

3 – a) Processo de endurecimento (margem-D-endurecedor) de 2mm de espessura a 20°C

$\frac{2\text{ h}}{34}$	$\frac{3\text{ h}}{38}$	$\frac{4\text{ h}}{70}$	$\frac{5\text{ h}}{73}$	$\frac{6\text{ h}}{76}$	$\frac{7\text{ h}}{78}$	$\frac{8\text{ h}}{80}$	$\frac{24\text{ h}}{82}$
-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	--------------------------

b) Espessura de 5 mm depois de endurecer 2 horas a 110°C.

$\frac{20^\circ\text{C}}{82}$	$\frac{30^\circ\text{C}}{77}$	$\frac{40^\circ\text{C}}{75}$	$\frac{50^\circ\text{C}}{73}$	$\frac{60^\circ\text{C}}{78}$	$\frac{70^\circ\text{C}}{55}$	$\frac{80^\circ\text{C}}{53}$	$\frac{90^\circ\text{C}}{53}$	$\frac{100^\circ\text{C}}{52}$	$\frac{110^\circ\text{C}}{52}$
-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

4 – Propriedades mecânicas

Força de torção DIN 53452 : 50-60 N/mm²

Força de tensão DIN 53455 : 20-30 N/mm²

E-modulo: 5500-6000 N/mm²

5 – Resistência química

Absorção de água DIN 53495 0,5% aproximadamente

Solução de cloreto de sódio a 10% estável

Água salgada estável

Amónia a 10% estável

Lixívia a 10% estável

Ácido hidrocloreídrico a 10% estável

Ácido acético a 10% condicionalmente estável

Ácido fórmico a 10% condicionalmente estável

Petróleo estável

Gasóleo estável

Óleo lubrificante estável

6 – Duração em armazém: Aproximadamente 1 ano se guardado na embalagem original em lugar fresco mas não gelado.