



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Francisco Pereira Rodrigues

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO  
EXPERIMENTAL DE UM BETÃO BASEADO EM  
APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE  
TRANSFORMAÇÃO DE PEDRA**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções, orientada pelo Professor Doutor Fernando José Forte Garrido Branco e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2023

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Departamento de Engenharia Civil

Francisco Pereira Rodrigues

# **Desenvolvimento e caracterização experimental de um betão baseado em aproveitamento de resíduos de transformação de pedra**

## **Development and experimental characterization of a concrete based on stone processing waste**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em construções  
orientada pelo Professor Doutor Fernando José Forte Garrido Branco e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC  
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Julho de 2023



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

## AGRADECIMENTOS

As primeiras palavras deste documento servem para expressar o meu sincero agradecimento a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho. A todos, o meu sincero ‘obrigado!’. Gostaria ainda de deixar um especial agradecimento às seguintes pessoas.

Ao Professor Doutor Fernando José Forte Garrido Branco, pela inteira disponibilidade em orientar este trabalho, partilha do seu saber científico, constante apoio e incentivo ao longo destes meses de trabalho.

Ao professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho, por ter aceitado coorientar este projeto, procurando sempre colaborar com o seu conhecimento científico, manifestando o seu total apoio no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço todas as entidades envolvidas no projeto Life4Stone: Valorização de resíduos e subprodutos da transformação da pedra natural para produtos de construção, com o código de projeto CENTRO-01-0247-FEDER-047067, pelo financiamento do trabalho realizado. Agradeço em especial, à empresa promotora MVC, Mármore de Alcobaça, Lda por ter fornecido os resíduos que foram estudados.

A todas as pessoas que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, principalmente na vertente laboratorial, e em especial ao Luís Pereira, Luís Marques e João Vidal.

Aos meus amigos, que me foram acompanhando, não apenas durante estes meses, mas durante toda esta caminhada, gostaria de agradecer a vossa amizade, todo o constante apoio, motivação e companheirismo, tanto para estudar como para momentos de convívio.

Um sentido agradecimento vai para a minha família, que foram determinantes no incentivo, apoio e carinho demonstrado ao longo de todo este percurso, que nunca me deixou esmorecer ou baixar os braços.

Por último, o meu agradecimento mais importante vai para os meus pais, Fernando e Sofia, que me transmitiram todos os valores que me caracterizam. Agradeço o amor, carinho, paciência e suporte que sempre me deram durante destes 5 anos do meu percurso académico.

A eles dedico este trabalho!

## RESUMO

A indústria da construção é conhecida por ser responsável por uma considerável quantidade de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O betão, como um dos principais materiais de construção utilizados, desempenha um papel significativo nessa emissão. Deste modo, um dos principais desafios tecnológicos atuais está relacionado com a questão de tornar o betão mais sustentável, procurando reduzir as suas emissões de CO<sub>2</sub>.

A indústria de rochas ornamentais desempenha um papel significativo nas exportações de Portugal, no entanto um dos principais desafios enfrentados por ela, tanto na extração quanto no processo de transformação, é a geração de resíduos. As pedreiras de rochas ornamentais têm uma taxa de aproveitamento baixa, resultando na acumulação de grandes volumes de resíduos em aterros.

Este tema é abordado na presente dissertação de mestrado, a qual está inserida num projeto de pesquisa em andamento no DEC (Life4Stone) e tem como objetivo estudar soluções para o reaproveitamento dos resíduos gerados durante a extração e o corte das rochas. O objetivo é reduzir o volume de resíduos, incorporando-os em materiais de maior valor acrescentado. A dissertação consistirá na produção e caracterização de betões utilizando pó calcário e partículas granulares resultantes do tratamento industrial da pedra natural. Irá ainda ser avaliado a capacidade desses betões virem a ser usados para o fabrico de peças de mobiliário urbano, por meio de um programa de elementos finitos. Por último, será produzido um protótipo à escala real de uma das peças de mobiliário urbano modeladas.

Este trabalho irá ser desenvolvido através da seguinte estrutura: 1) Revisão bibliográfica; 2) Descrição do procedimento experimental; 3) Caracterização experimental; 4) Modelação numérica; 5) Produção de um protótipo.

### **Palavras-chave:**

Resíduos; Pedra Natural; Betão; Caracterização experimental; Modelação numérica; Mobiliário Urbano

## **ABSTRACT**

The construction industry is known to be responsible for a considerable amount of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions. Concrete, as one of the main construction materials used, plays a significant role in this emission. Thus, one of the main current technological challenges is related to the issue of making concrete more sustainable by seeking to reduce its CO<sub>2</sub> emissions. The ornamental stone industry plays a significant role in Portugal's exports, however, one of the main challenges faced by it, both in the extraction and in the transformation process, is the generation of waste. Ornamental stone quarries have a low utilization rate, resulting in the accumulation of large volumes of waste in landfills.

This topic is addressed in this master's thesis, which is part of an ongoing research project at the DEC (Life4Stone) and aims to study solutions for the reuse of waste generated during the extraction and cutting of stone. The goal is to reduce the volume of waste by incorporating it into higher value-added materials. The dissertation will consist in the production and characterization of concretes using limestone powder and granular particles resulting from the industrial treatment of natural stone. The ability of these concretes to be used for the manufacture of urban furniture will be evaluated using a finite element program. Finally, a full-scale prototype of one of the modeled pieces of street furniture will be produced. This work will be developed through the following structure: 1) Literature review; 2) Description of the experimental procedure; 3) Experimental characterization; 4) Numerical modeling; 5) Production of a prototype.

### **Keywords:**

Waste; Natural Stone; Concrete; Experimental Characterization; Numerical Modeling; Urban Furniture

---

## ÍNDICE

Agradecimentos	2
Resumo	3
Abstract	4
Índice	5
Índice de Figuras	7
Índice de Quadros	10
1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Enquadramento	11
1.2. Âmbito do projeto e objetivos do trabalho	12
1.3. Organização da dissertação	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. Enquadramento Ambiental	14
2.2. Caracterização dos resíduos do Setor das Rochas Ornamentais	18
2.3. Substituição parcial do ligante	20
2.4. Substituição parcial dos Agregados	21
2.5. Betão reforçado com fibras	23
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	24
3.1. Caracterização dos materiais	24
3.1.1. Cimento Portland Normal	24
3.1.2. Agregados finos	25
3.1.3. Agregados Grossos	25
3.1.4. Material substituto do ligante	26
3.1.5. Adjuvante	27
3.1.6. Fibras de reforço das características mecânicas	27
3.1.7. Água	27
3.2. Caracterização das misturas	28
3.3. Amassadura	29
3.4. Descrição dos ensaios	30
3.4.1. Resistência à compressão	30
3.4.2. Resistência à tração por flexão	31
3.4.3. Absorção de água por capilaridade	32
3.4.4. Absorção de água por imersão	35
3.4.5. Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons	37
3.4.6. Módulo de elasticidade dinâmico	38

---

4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	41
4.1.	Apresentação e discussão dos resultados	41
4.1.1.	Resistência à compressão	41
4.1.2.	Resistência à flexão	44
4.1.3.	Absorção de água por capilaridade	47
4.1.4.	Absorção de água por imersão	50
4.1.5.	Ensaio de Ultrassons	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
4.1.6.	Módulo de elasticidade dinâmico	54
5.	MODELAÇÃO NUMÉRICA	58
5.1.	Modelos numéricos no programa Mecway	59
5.2.	Apresentação e discussão dos resultados	63
6.	PROTÓTIPO DA FLOREIRA	73
6.1.	Betonagem da floreira	73
6.2.	Protótipo à escala real	73
7.	CONCLUSÃO	74
7.1.	Desenvolvimentos futuros	76
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Estrutura de resíduos setoriais	16
Figura 2.2	Modelo de economia circular	18
Figura 3.1	Fotografia dos agregados: a) Agregados finos: areia comercial; b) Agregados grossos: brita comercial e Tout Venant (resíduo em estudo)	26
Figura 3.2	Curvas granulométricas dos agregados	26
Figura 3.3	Pó calcário, resíduo de corte de pedra	27
Figura 3.4	Fibras de reforço das características do betão	27
Figura 3.5	Processo de Amassadura: a) Pesagem prévia dos constituintes; b) Homogeneização a seco da mistura; c) Mistura com a consistência pretendida	29
Figura 3.6	Moldes prismáticos e moldes cúbicos	30
Figura 3.7	Provetes desmoldados a ganhar cura	30
Figura 3.8	Ensaio de compressão: a) Ensaio a decorrer; b) Provetes ensaiados	31
Figura 3.9	Ensaio de flexão: a) Provelte a ser ensaiado; b) Provelte no fim do ensaio	31
Figura 3.10	Preparação dos provetes para ensaio de absorção por capilaridade: a) Secagem em estufa; b) Marcação dos provetes; c) Provetes preparados para o ensaio	33
Figura 3.11	Ensaio de absorção por capilaridade: a) Vista geral; b) Vista em pormenor	33
Figura 3.12	Ensaio de absorção por capilaridade. a) Pesagem do provete; b) Medição da ascensão capilar com uma craveira	34
Figura 3.13	Ensaio de absorção de água por imersão: a) Regularização dos provetes para o ensaio; b) Marcação dos provetes para o ensaio	35
Figura 3.14	Ensaio de absorção de água por imersão: a) Colocação dos provetes num recipiente; b) Imersão dos provetes até 1/3 da altura; c) Colocação de água até 2/3 da altura; d) Introdução de água até 2,5 cm acima da face superior	36
Figura 3.15	Ensaio de absorção de água por imersão: a) secagem dos provetes; b) pesagem dos provetes	37
Figura 3.16	Ensaio de Ultrassons: a) calibração do equipamento; b) Medição do sinal	38
Figura 3.17	Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico: a) Posição indicada na norma; b) Provelte posicionado para dar início ao ensaio. Fonte: NP EN 14146 - 2006	39

---

Figura 3.18 Frequência fundamental de ressonância natural à flexural	39
Figura 4.1 Resistência à compressão (MPa) - 7/28 dias	42
Figura 4.2 Influência dos resíduos em estudo na resistência à compressão	43
Figura 4.3 Resistência a compressão VS massa volúmica	44
Figura 4.4 Resistência à flexão - 7/28 dias	46
Figura 4.5 Resistência a compressão VS Resistência à Flexão	47
Figura 4.6 Regressão linear dos pontos de medição das várias composições:	50
Figura 4.7 Comparação da absorção entre as composições convencionais e as composições com incorporação de resíduos reciclados	51
Figura 4.8 Absorção de água por capilaridade VS Absorção de água por imersão	52
Figura 4.9 Velocidade de propagação de ondas de ultrassons (m/s)	53
Figura 4.10 Velocidade de propagação de ondas ultrassons VS Resistência à compressão	54
Figura 4.11 Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	55
Figura 4.12 Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico: Coerência	56
Figura 4.13 Módulo de elasticidade dinâmico VS Resistência à flexão	56
Figura 4.14 Módulo de elasticidade dinâmico e estático (GPa)	57
Figura 4.15 Módulo de elasticidade dinâmico (NP 14146-2006 Vs. UPV)	57
Figura 5.1 Representação esquemática da discretização do domínio em elementos finitos	58
Figura 5.2 Elemento finito utilizado (Tet10)	59
Figura 5.3 Modelos 3D das peças de mobiliário urbano: a) Banco de jardim M; b) Banco de jardim M2; c) Floreira	60
Figura 5.4 Banco M: a) Malha de elementos finitos; b) e c) Condições de apoio e cargas aplicadas	60
Figura 5.5 Banco M2: a) Malha de elementos finitos; b) e c) Condições de apoio e cargas aplicadas	61
Figura 5.6 Floreira: a) Malha de elementos finitos; b) e c) Condições de apoio e cargas aplicadas	62
Figura 5.7 Posição deformada do Banco de jardim M	64
Figura 5.8 Banco M com carregamento distribuído: Critério de rotura de Mohr,	65
Figura 5.9 Banco M com carregamento distribuído: Tensão principal máxima	65
Figura 5.10 Critério de rotura de Mohr e deformada para um carregamento distribuído de 1.46 MPa.	65
Figura 5.11 Banco M, carregamento aplicado nos nós: deformada	66
Figura 5.12 Banco M, carregamento aplicado nos nós: Critério de rotura de Mohr	66

---

---

Figura 5.13 Critério de rotura de Mohr e deformada para um carregamento aplicado nos 21 nós de 12 kN.	67
Figura 5.14 Posição deformada do Banco de jardim M2	67
Figura 5.15 Banco M2 com carregamento distribuído: Critério de rotura de Mohr	68
Figura 5.16 Banco M2 com carregamento distribuído: Tensão principal máxima	68
Figura 5.17 Critério de rotura de Mohr e deformada para um carregamento distribuído de 1.46 MPa	69
Figura 5.18 Banco M2, carregamento aplicado nos nós: deformada	69
Figura 5.19 Banco M2, carregamento aplicado nos nós: Critério de rotura de Mohr	70
Figura 5.20 Critério de rotura de Mohr e deformada para um carregamento aplicado nos 21 nós de 12 kN	70
Figura 5.21 Floreira: Deformada	71
Figura 5.22 Floreira: Critério de rotura de Mohr	71
Figura 6.1 Floreira: a) Cofragem; b) No fim da betonagem	73
Figura 6.2 Floreira desmoldada	73

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 Características químicas, físicas e mecânicas	24
Quadro 3.2 Resultados da análise granulométrica dos agregados	25
Quadro 3.3 Análise química do pó calcário	26
Quadro 3.4 Dados relativos ao Sika Viscocrete -3009	27
Quadro 3.5 Composição das misturas de betão	28
Quadro 3.6 provetes usados em cada amassadura	29
Quadro 4.1 Resistência mecânica à compressão (MPa)	41
Quadro 4.2 Classes de Resistência à compressão	44
Quadro 4.3 Resistência mecânica à Flexão (MPa)	45
Quadro 4.4 Valores médios da ascensão capilar	47
Quadro 4.5 Valores médios da absorção capilar	48
Quadro 4.6 Absorção de água por imersão	51
Quadro 4.7 velocidade de propagação de ondas de ultrassons	52
Quadro 4.8 Módulo de elasticidade dinâmico	54
Quadro 5.1 Características do material	63

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

A neutralidade carbónica, um uso sustentável de recursos naturais e uma eficaz gestão dos resíduos gerados são assuntos atuais, transversais a qualquer atividade económica. São tópicos especialmente importantes quando estamos perante uma das indústrias mais emissora de CO<sub>2</sub> para a atmosfera e com uma quantidade avultada de resíduos gerados, o sector da construção civil. Representando um total de mais de 7 % das emissões totais, estima-se que em 2022 tenham sido emitidos para a atmosfera 2.7 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> apenas pela indústria do cimento (Andrew, 2022). Em Portugal, no ano de 2021, o sector da construção civil foi responsável por 20 % do total de resíduos setoriais, o que equivale a 2.7 milhões de toneladas (INE, 2021).

A fim de atingir as metas impostas pelo pacto ecológico europeu, de se reduzir em 48% as emissões de CO<sub>2</sub> até 2030, obtendo a neutralidade carbónica até 2050 (Europeia, 2019), é fundamental encontrar estratégias que visem mitigar as emissões de dióxido carbono. Em função disto, é necessário implementar processos que sejam mais eficientes, durante as várias fases de transformação de um produto, e procurar introduzir o conceito de economia circular, reduzindo assim a pressão sob os recursos naturais e promovendo uma melhor gestão dos resíduos.

O sector das rochas ornamentais é uma das indústrias que interage com a construção civil e que também apresenta uma produção de resíduos bastante considerável, quer na sua vertente extrativa, quer transformadora. A baixa taxa de aproveitamento, de apenas 30 % do volume extraído, constitui a principal razão das grandes quantidades de resíduos depositadas em aterros (Furcas e Balletto, 2014). Esta deposição em aterros justifica-se essencialmente por questões de ordem económica, já que ainda não se encontraram soluções capazes de dar resposta ao problema, e que ao mesmo tempo traga um valor acrescentado ao processo produtivo das fábricas transformadoras de pedra natural.

No seguimento desta ideia, e com o intuito de promover estratégias de economia circular e eco-inovação, surge este tema de dissertação de mestrado, que leva ao estudo da composição e caracterização experimental de betões baseados em aproveitamento de resíduos de transformação de pedra natural. Neste estudo irão ser avaliados dois tipos de resíduos provenientes do sector da transformação da pedra natural. Um deles, constituído por partículas granulares de granulometria mais grossa, será testado como potencial substituto de agregados naturais. O segundo, de granulometria mais fina, será incorporado nas composições como parcial substituto do cimento.

A presente investigação irá caracterizar experimentalmente as várias composições destes betões, que irão incorporar estes dois tipos de resíduos em diferentes percentagens, com principal foco no comportamento mecânico e na durabilidade. Será ainda alvo desta dissertação avaliar, por meio de modelos numéricos, a capacidade de os betões desenvolvidos virem a ser usado em elementos pré-fabricados, nomeadamente, mobiliário urbano.

## **1.2. Âmbito do projeto e objetivos do trabalho**

Esta dissertação de mestrado insere-se no projeto Life4Stone (<https://www.uc.pt/Life4Stone/>), um projeto de investigação em co-promoção financiado pela Agência Nacional de Inovação, que tem como objetivo o desenvolvimento de produtos finais e intermédios para a construção, a partir da valorização de resíduos resultantes da indústria da transformação de pedra natural, contribuindo para a resolução de um dos principais constrangimentos da indústria das rochas ornamentais, sendo promovido por um consórcio, em que o promotor líder, é a MVC, Mármore de Alcobça, Lda, e os co-promotores são a Universidade de Coimbra, o CTCV – Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro e a empresa Mota Pastas Cerâmicas.

O objetivo geral deste trabalho consiste na caracterização experimental de um compósito de betão que incorpora resíduos resultantes da indústria da transformação de pedra natural, passível de ser usado em elementos pré-fabricados comercializáveis de mobiliário urbano.

Em particular propõe-se os seguintes objetivos:

- Executar um estudo laboratorial do desempenho de compósitos de betão, no estado endurecido, com a incorporação de resíduos provenientes da indústria da pedra ornamental, substituindo parcialmente o cimento e/ou os agregados naturais de granulometria mais grossa;
- Avaliar, com recurso a um programa de elementos finitos, a possibilidade de o betão produzido ser usado na produção de elementos pré-fabricados de mobiliário urbano, sem recurso às tradicionais armaduras;
- Conceber e realizar um protótipo, com produção à escala real, utilizando um compósito desenvolvido durante o projeto;
- Contribuir para que o sector da construção e da indústria transformadora de pedra apresentem uma maior sustentabilidade, desenvolvendo um produto que, para além de contribuir para as metas de neutralidade carbónica e os requisitos de uma economia circular, visa gerar um valor acrescentado bruto ao processo produtivo das fábricas.

## **1.3. Organização da dissertação**

A presente dissertação encontra-se estruturada em 7 capítulos.

O primeiro capítulo apresenta um enquadramento geral do tema, definindo os objetivos e sumariando a organização da mesma.

O segundo capítulo salienta os vários conceitos abordados ao longo do trabalho, dando particular ênfase às questões associadas com sustentabilidade e circularidade da economia. Neste capítulo, faz-se ainda uma descrição da indústria transformadora de pedra ornamental, caracterizando os resíduos gerados pela mesma. Posto isto, apresentam-se os vários estudos e resultados que têm vindo a ser obtidos ao longo dos anos, que abordam a substituição do ligante, nomeadamente o cimento, e a incorporação de agregados reciclados em detrimento dos agregados naturais.

O terceiro capítulo visa caracterizar os materiais usados, descrever as metodologias experimentais e o respetivo tratamento de dados.

No quarto capítulo resumem-se os resultados experimentais devidamente organizados e tratados, apresentando um comentário sobre os mesmos e comparando, sempre que possível, com as conclusões que foram apresentadas no segundo capítulo, correspondente à revisão bibliográfica.

No quinto capítulo é descrito de forma sumária e geral do método dos elementos finitos, apresentando em seguida os resultados obtidos da modelação numérica de peças de mobiliário urbano num programa de elementos finitos, o Mecway.

O penúltimo capítulo aborda o procedimento e a betonagem de um protótipo real.

Por último, o sétimo capítulo destina-se a apresentar as conclusões finais e a divulgar uma proposta para futuras investigações no âmbito do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O setor da construção civil apresenta um importante papel na conjuntura da economia nacional. Nunes (2011) descreve a área da construção civil como sendo “um sector muito diferenciado de outros setores de atividade, quer em termos produtivos, quer em termos de mercado de trabalho. Tem uma cadeia de valor muito extensa porque recorre a uma ampla rede de inputs, o que proporciona a existência de efeitos multiplicadores significativos a montante e a jusante.” (p.35). Em 2022, segundo a Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas (AICCOPN), grande parte dos indicadores setoriais registaram uma evolução positiva, dando ênfase ao crescimento de 9 % na taxa de emprego, atingido no 3.º trimestre de 2022, a mais alta registada nos últimos 10 anos, estimando-se um crescimento no valor bruto de produção de 3,4 % para o ano de 2023 (AICCOPN, 2022), após ter sido registado um aumento de 0,7 % no Valor Acrescentado Bruto (VAB) do setor da construção civil em 2022 (AICCOPN, 2023).

Outro setor de grande importância na economia nacional e mundial, é o das rochas ornamentais, sendo um dos setores intervenientes na cadeia de inputs mencionada por Nunes (2011). Embora assumam um papel de relevo na indústria da construção portuguesa, não dependem apenas desta para se assumirem como um importante setor económico já que, em 2020, Portugal exportou cerca de 2.220 milhões de toneladas, sendo um dos cinco países com maior volume de exportações a nível mundial, e o segundo dentro dos países da união europeia (Montani, 2020). No ano de 2020, a quantidade exportada representou peso percentual de 0,68 % no total das exportações portuguesas, valor este que sofreu um decréscimo em relação a 2019, que tinha sido de 0,71 %, uma vez que 2020 foi marcado por uma situação pandémica mundial (Assimagra, 2020).

O objetivo desta dissertação visa desenvolver um betão mais sustentável recorrendo a resíduos de uma indústria transformadora da pedra natural. Como tal, em seguida, será realizado um enquadramento ambiental do tema e caracterizado o resíduo proveniente do setor das rochas ornamentais. Posto isto, e já no âmbito da investigação, apresenta-se 3 subcapítulos: o primeiro cujo tópico principal centra-se na substituição parcial do ligante; o segundo no reaproveitamento do resíduo propriamente dito; e, por último, o estudo da influência das fibras no betão.

### 2.1. Enquadramento Ambiental

No passado, questões associadas com as temáticas “ambiente” e “recursos naturais”, raramente eram alvo de discussão por parte das demais comunidades. No entanto, com o passar dos anos, associado ao facto de se estarem a vivenciar as consequências dessa despreocupação, são cada

---

vez mais preponderantes nas decisões políticas. Na verdade, o primeiro programa que visava definir uma política do ambiente na comunidade europeia foi aprovado em 1973, cujo principal objetivo se centrava em “melhorar a qualidade e enquadramento de vida, o meio ambiente e as condições de vida dos povos que de lá fazem parte.” (European Commission, 1973, p.5). Após esta primeira diretiva, houve uma necessidade de adaptar os objetivos, em função da eficácia do programa e de uma consciencialização do erro cometido ao se ter ignorado estas questões durante tanto tempo. Posto isto, já foram aprovados pela Comissão Europeia 7 Programas de Ação em matéria de Ambiente (PAA), estando atualmente em vigor o 8.º programa, do qual se pretende executar uma transição ecológica de forma mais célere, justa e inclusiva, tendo como principal finalidade, que as pessoas tenham uma boa qualidade de vida, respeitando os limites do planeta, até 2050 (Comissão Europeia, 2022). De uma forma geral, o 8.º PAA é regido por 6 objetivos temáticos: (1) diminuição dos gases efeitos de estufa emitidos para a atmosfera; (2) reduzir a vulnerabilidade dos ecossistemas, da sociedade e da economia em relação às alterações climáticas, nomeadamente em situações de catástrofe natural associadas às condições climáticas; (3) avançar para uma economia assente num princípio de economia circular, promovendo um uso sustentável dos recursos e uma gestão eficaz dos resíduos gerados; (4) atingir a meta de poluição zero, com o intuito de obter um ambiente, em que o ar, águas e os solos, estão livres de substâncias tóxicas, assim como, no que a poluição sonora e luminosa diz respeito, minimizando os efeitos destas na sociedade e nos ecossistemas; (5) proteger, preservar e restaurar a biodiversidade; (6) promover a sustentabilidade e reduzir a pressão ambiental e climática imposta pela política de produção e consumo da União Europeia (UE) nos vários domínios da sociedade (Comissão Europeia, 2022).

O facto de o setor da construção civil apresentar um campo de aplicação muito vasto faz com que este seja um dos maiores setores gerador de resíduos. Segundo dados estatísticos revelados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), em 2021, foram gerados 13.6 milhões de toneladas de resíduos setoriais, dos quais 2.7 milhões de toneladas são gerados unicamente pela “construção”. Este valor representa cerca de 20 % dos resíduos produzidos pelo total da economia, ficando apenas atrás de setores como a indústria transformadora (23,5 %) e os setores da atividade económica ligados à gestão e valorização de resíduos (35,1 %). Na Figura 2.1, encontram-se ilustrados estes valores em gráfico relativos aos anos 2017 até 2021. Para além dos resíduos gerados no domínio da construção civil, o setor contribui, ainda que de forma indireta, mas bastante significativa, na quantidade de gases efeito estufa libertados para a atmosfera, visto que é uma das principais indústrias utilizadora de cimento. De acordo com a AICCOPN, em 2022, foram consumidas no mercado nacional cerca de 3.836 milhares de

toneladas de cimento, o que corresponde a um aumento de 1,5 % em relação a 2021, e o consumo mais alto registado desde 2011 (AICCOPN, 2023).

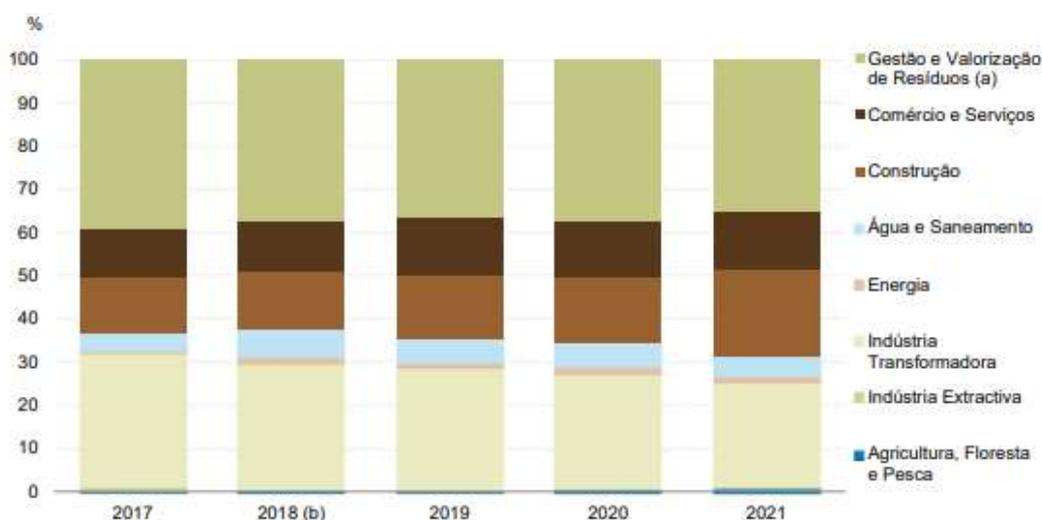


Figura 2.1 Estrutura de resíduos setoriais

Fonte: Instituto Nacional de Estatística. (2022). Estatísticas do Ambiente 2021

O consumo registado em Portugal é espelho do que se passa no mundo, já que em 2021 estima-se que foi emitido para a atmosfera 2.7 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> apenas pela indústria do cimento, o que correspondeu a mais de 7 % do total das emissões a nível mundial. Este é um valor que tem apresentado um forte crescimento ao longo dos anos, já que em 2002, a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido para atmosfera era de 1.4 bilhões de toneladas (Andrew, 2022). De uma maneira geral, a indústria da produção de cimento é considerada uma das que mais contribui com gases efeito estufa, uma vez que produz aproximadamente 0,59 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de cimento produzido (IEA como referido por Martínez-Martínez et al, 2023). Este CO<sub>2</sub> é libertado em duas fases: 60 % diretamente na decomposição do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), encontrado no calcário, em óxido de cálcio (CaO) e CO<sub>2</sub>, (Del Strother, 2019; Locher, 2005 como referido Kamitsou et al, 2022); e os restantes 40 % de forma indireta decorrente do processo energético inerente ao modo produção (Del Strother, 2019 como referido Kamitsou et al, 2022). Para além das questões relacionadas com os resíduos gerados e a libertação de gases efeito estufa, a indústria do cimento consome ainda grandes quantidades de energia, sendo necessário entre 440 a 3845 MJ por tonelada de cimento, desde a fase de mineração do calcário até ao embalamento (Justnes, 2012; Koumpouri, 2011 como referido por Kamitsou et al, 2022).

Em 2015, a Comunidade Internacional assinou, em Paris, um acordo que visa dar uma resposta global e eficiente face ao aumento da temperatura média do planeta, procurando dar uma resolução aos desafios associados às alterações climáticas. O Acordo de Paris definiu então 3

objetivos principais: (1) Conter o aumento da temperatura média global a um máximo de 2°C, reunindo todos os esforços para que esse aumento não seja superior a 1,5°C; (2) Aumentar a capacidade de adaptação aos diversos efeitos das alterações climáticas, promovendo uma capacidade de resistência climática; (3) Tornar os fluxos financeiros de acordo com um desenvolvimento assente num modelo resiliente e de baixo carbono (Resolução do Conselho de Ministros, 2019). Em função deste compromisso, o governo português decidiu redigir um Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050), “com o objetivo de explorar a viabilidade de trajetórias que conduzam à neutralidade carbónica, de identificar os principais vetores de descarbonização e de estimar o potencial de redução dos vários setores da economia nacional, como sejam a energia e indústria, a mobilidade e os transportes, a agricultura, florestas e outros usos de solo, e os resíduos e águas residuais.” (Resolução do Conselho de Ministros, 2019, p. 3209). Neste seguimento, a indústria do cimento demonstra, uma vez mais, ser uma área de forte potencial para contribuir para uma descarbonização da economia. Como tal, o RNC 2050 identifica que uma redução na quantidade de clínquer usado na produção do cimento, redução esta gradual até 2050 e com um máximo de 10 % face aos valores atuais, a incorporação de combustíveis alternativos e recuperação de parte do calor residual, podem contribuir para a descarbonização do setor (Resolução do Conselho de Ministros, 2019).

No âmbito desta perspetiva há ainda um conceito que assume uma especial importância na concretização dos objetivos e do acordo mencionados anteriormente, a Economia Circular (EC), que assenta num modelo económico que pretende alterar a forma como a sociedade se inter-relaciona com a natureza, com o propósito de preservar os recursos naturais e fomentar ciclos contínuos para os materiais (Figura 2.2). Além disso, este modelo tem como intuito estimular um desenvolvimento sustentável, através da sua aplicação a vários níveis no atual sistema económico, começando pelo micro, que compreende as empresas e os consumidores, passando pelo meso, nos quais estão inseridos os agentes económicos integrados em relações de simbiose, e por último o macro, ao qual diz respeito as cidades, as regiões e os governos (Prieto-Sandoval et al, 2018). Para se transitar do atual sistema de economia linear, ou seja, recolha, produção e eliminação, para uma EC, a Comissão Europeia (2014) definiu que era necessário se “redirecionar o foco para a reutilização, reparação, renovação e reciclagem dos materiais e produtos existentes. O que era visto como um «resíduo» podia ser transformado num recurso” (p.1). Para além disto, num contexto de economia circular, é fundamental ter a noção de circularidade no processo de desenvolvimento de um novo produto ou serviço, e ainda, incentivar uma eficaz cooperação entre as cadeias de fornecimento, da qual pode resultar uma redução na quantidade de resíduos produzidos, minimização dos custos e dos danos causados ao ambiente (Comissão Europeia, 2014).



Figura 2.2 Modelo de economia circular

Fonte: Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy.

## 2.2. Caracterização dos resíduos do Setor das Rochas Ornamentais

As rochas extraídas da natureza que constituem uma matéria-prima para construção são normalmente subdivididas em dois grandes setores: o dos agregados, do qual fazem parte as rochas britadas, as areias, as cascalheiras e os saibros; e o setor das rochas com função estruturante e decorativa, que não sofrem qualquer alteração na sua estrutura interna (Carvalho, 2007). Destes dois grupos não se incluem as argilas, os pegmatitos de quartzo e os feldspatos, comumente denominados Minerais Industriais usados no seio da indústria cerâmica. As rochas com funções estruturais e decorativas são designadas como rochas ornamentais, que são definidas “como matéria-prima de origem mineral utilizada como material de construção com funções essencialmente decorativas.” (Carvalho, 2007, p. 158). Pertencem a este grupo todos os materiais rochosos que são sujeitos a processos de transformação de acordo com dimensões requeridas, o acabamento final e a função do material de construção (Carvalho, 2007).

O setor das rochas ornamentais acaba por gerar quantidades avultadas de desperdícios, que surgem desde a fase de mineração até à etapa de acabamento, dada a necessidade de satisfazer especificações particulares, que vão desde o tamanho, forma e feitio, de modo a tornar este produto economicamente valioso e atrativo (Dolley, 2012). De uma forma geral, o volume do produto final representa apenas cerca de 30 % do volume extraído na fase de mineração, sendo que os restantes 70 % são considerados resíduos de extração e de transformação. Estes valores são ligeiramente variáveis consoante a tecnologia usada para a mineração e transformação do material rochoso em função da eficiência dos vários processos, sendo que estes têm vindo a

---

evoluir nos últimos anos. No entanto, não de forma significativa que faça reduzir a quantidade de resíduos gerados no setor das rochas ornamentais (Furcas e Balletto, 2014). Para se ter uma percepção mais clara da quantidade de desaproveitamento dos materiais rochosos, Yurdakul et al (2020) realizaram um caso de estudo a um estaleiro de processamento de pedra natural, do qual chegaram à conclusão que, para uma fábrica com uma capacidade de processamento de 2000 a 3000 metros quadrados por dia, gera aproximadamente 50 toneladas de desperdício diariamente, sólido e sob a forma de lama, sendo que, por cada bloco com um metro cúbico extraído forma-se cerca de 540 a 756 kg material sem valor comercial.

Conforme mencionaram Karaca et al (2012), no âmbito da área das rochas ornamentais os desperdícios da pedra natural podem ser divididos em 3 grandes grupos: (1) sólido, (2) pó, e (3) lamas.

O primeiro grupo é constituído essencialmente por blocos e placas que não têm um valor comercial no mercado, resultante da presença de elementos que alteram a cor, e ou eventualmente a homogeneidade da pedra. Neste grupo integram os blocos com um formato irregular, cujo processo de serração é demasiado complexo e dispendioso. Para além destes, existem ainda os pedaços resultantes da fase de transformação, que não têm uma configuração que possa ser ajustada por meios mecânicos, ou que são demasiado pequenos para terem uma aplicação no domínio das rochas ornamentais, logo, não são viáveis do ponto de vista económico. Os materiais rochosos que, embora tenham dimensões adequadas, apresentem pequenos defeitos são reutilizados noutras áreas da construção civil, nomeadamente, em pavimentos, revestimentos de paredes, ou para atender a pormenores arquitetónicos. Já os blocos com formas inadequadas são por norma reaproveitados para fins estruturais, em particular em obras de contenção (Furcas e Balletto, 2014). Em relação aos pedaços de menores dimensões são, por norma britados, sendo que vários têm sido os estudos com o intuito de avaliar o seu uso na substituição dos agregados naturais, quer para aplicações em betão (Rana et al, 2016), ou como substratos para estradas (Akbulut et al, 2007). Qualquer uma destas aplicações é possível, contudo, apresentam algumas desvantagens na ótica das empresas de transformação da pedra, já que os preços praticados são claramente inferiores. Para além disto, estão condicionadas a um mercado mais local, uma vez que o seu valor comercial acaba por restringir a possibilidade de trabalhar com mercados internacionais. Além das questões económicas, temos ainda condicionantes ao nível da sustentabilidade, especialmente no domínio do transporte (Furcas e Balletto, 2014).

Em relação ao segundo grupo mencionado, o pó, este é derivado dos vários processos até se obter o produto final, que vai desde a fase de mineração, passando pela fase de serração, polimento e empacotamento. Para além da oportunidade de o pó poder ser considerado um subproduto para outra indústria, enquanto resíduo apresenta ainda alguns efeitos nocivos para a saúde, particularmente doenças respiratórias, causadas pela extrema finura das partículas

(Furcas e Balletto, 2014). A literatura sugere o uso deste desperdício em misturas cimentícias como parcial substituto do ligante (Rana et al, 2016).

As lamas são o terceiro e último grupo identificado, resultando dos vários processos durante a transformação dos blocos rochosos, já que é prática geral adicionar água, a fim de minimizar as quantidades de pó geradas, canalizando a lama para depósitos, onde se inicia o processo de reciclagem, dado que, há medida que as partículas mais densas se vão depositando no fundo do tanque, se separa a água da lama e volta-se a introduzir esta água na fase de processamento da pedra (Furcas e Balletto, 2014). Já para a lama, vários têm sido os estudos com o objetivo de a incorporar no ramo dos materiais de construção, como aditivos para o betão (Rana et al, 2016), alvenaria e cerâmica (Galetakis et al, 2012).

### **2.3. Substituição parcial do ligante**

Seguindo a ordem de pensamento enunciada no subcapítulo 2.1, é fundamental estudar e investigar a possível substituição do cimento, enquanto ligante, de forma a minimizar o seu consumo, o que por si só resulta numa redução de gases efeito estufa libertados para a atmosfera, assim como uma minimização do uso de recursos naturais e de combustíveis fósseis (Carrasco et al, 2005).

Nesta perspetiva, a EN 197-1 (2011) identifica dois tipos de cimento Portland em que se adicionam minerais ativos como escórias, pozolanas naturais, e cinzas volantes: Tipo II/A-M, com uma substituição entre 6 a 20%; Tipo II/B-M, que contém entre 21 a 35 %. De acordo com a norma, estes cimentos podem conter mais 5 % de outras adições e a sua classe de resistência é definida consoante a resistência ao fim de 28 dias. (EN 197-1, 2011)

Posto isto, ao longo dos últimos anos, foram conduzidas várias investigações a fim de avaliar as quantidades ideais de substituição e quais as alterações nas propriedades físicas e químicas das misturas à base de cimento.

Carrasco et al (2005) concluíram que, para várias misturas de pó calcário com escórias de alto forno e cimento Portland, em que a percentagem dos dois primeiros componentes variou entre os 0 e os 22 %, havia em todas as idades (2, 7, 14, 28, 90, 180, 360 dias), uma mistura que continha os três constituintes e que apresentava uma maior resistência face ao cimento binário (cimento Portland com adição de apenas um elemento referidos em cima), ou até mesmo que o cimento Portland sem qualquer substituição. Os autores consideraram que este facto se deveu ao complemento do comportamento dos dois minerais, já que o pó calcário fornece uma resistência inicial mais elevada, e que as escórias de alto forno vão reagindo com o cimento, resultando num acréscimo de resistência à medida que o tempo vai passando. Courard et al (2014) também avaliaram a influência da incorporação de pó calcário em cimento Portland e em cimento com escórias de alto forno, chegando à conclusão, que a adição de pó calcário fazia reduzir a resistência à compressão, já que se diminuía a quantidade de cimento, e se aumentava

o teor de água. Por outro lado, a retração do betão diminuía com o aumento da taxa de substituição. Além disso, corroborou o que disseram Carrasco et al (2005) acerca do comportamento dos minerais. Em relação a outras características mais secundárias, os autores afirmam que: a porosidade à água aumenta com o acréscimo de percentagem de pó calcário, até se atingir os 15 % de substituição, mantendo-se praticamente inalterável para percentagens mais elevadas. A durabilidade das misturas foi reduzindo à medida que se ia aumentando a taxa de substituição, nomeadamente, no rácio de carbonatação, na resistência à penetração dos cloretos e na deformação imposta pelo ataque dos sulfatos. Ainda no âmbito deste artigo, avaliaram as propriedades da mistura enquanto estava fresca, o que levou os investigadores a chegarem à conclusão de que o tempo dormente, ou de indução, é maior para o cimento que contém escórias de alto forno, diminuindo à medida que se adiciona mais percentagem de pó calcário. Já em relação à trabalhabilidade constataram que não há grandes alterações independentemente da mistura (Courard e Michel, 2014). Da Silva et al (2015) num estudo experimental levado a cabo para betões com capacidade de auto compactação, aos quais foram adicionados quantidades de pó calcário, verificaram que estes apresentavam poros de maiores dimensões e um coeficiente de absorção de água mais elevado, quando comparado com iguais quantidades de cinzas volantes adicionadas ao mesmo tipo de betões.

A parcial substituição do cimento Portland não tem sido apenas investigada em composições de betão. Recentemente, vários tem sido os estudos realizados com o intuito de avaliar a possibilidade de esta substituição ser feita também em argamassas avaliando sobretudo a sua influência nas características mecânicas. Branco et al (2023) investigaram a incorporação de resíduos da transformação da pedra natural sob duas formas: a primeira enquanto areia obtida através resíduos de calcário, e a segunda sob a forma de pó calcário, com uma substituição do cimento até 15 %. Chegaram à conclusão de que, para esta percentagem de substituição, as argamassas apresentaram um acréscimo de performance mecânica aos 7 e aos 28 dias, tanto à compressão como à flexão e ainda, que o ganho de resistência à medida que aumentam os dias de curam não fica comprometida com a introdução do pó calcário. Correia et al (2023) executaram um estudo semelhante também em argamassas, em que também avaliaram a parcial substituição do cimento por pó calcário, que os conduziu a resultados semelhantes ao obtido por Branco et al (2023), ou seja, que para uma substituição de 15 % o comportamento mecânico das argamassas não era comprometido apresentando valores superiores à referência.

#### **2.4. Substituição parcial dos Agregados**

Embora reconhecido o potencial para os resíduos resultantes do setor das rochas ornamentais de serem considerados como um subproduto da construção e de outras indústrias, a estratégia de gestão destes resíduos passa essencialmente por depósito em aterros, muitas vezes ilegais, sem as condições necessárias para o seu tratamento, destruindo a paisagem da região, com

consequências para o Homem e para os recursos hídricos, decorrente de uma decomposição química quando sujeitos às condições atmosféricas (Rana et al, 2016). Com o propósito de evitar que este seja o término dos resíduos, uma das principais utilizações poderá passar pela sua incorporação como substituição parcial, ou total, dos agregados nas misturas de betão. Neste sentido, vários têm sido os estudos desenvolvidos nos últimos anos, avaliando as várias propriedades do betão incorporando resíduos provenientes do setor de rocha ornamental, dando particular ênfase à resistência e à durabilidade.

Binici et al (2008) constataram que o betão que continha o agregado reciclado (mármore e granito) apresentava uma maior resistência à compressão em todas as idades testadas do que a mistura de referência. A mesma tendência verificava-se nos ensaios à flexão e à tração. Hebhoub et al (2011) chegaram a semelhantes conclusões, já que para todas as percentagens de substituição do agregado natural por agregados reciclados à base de mármore, o betão mostrava uma maior, ou idêntica, resistência tanto à compressão como à flexão. Num estudo análogo aos anteriores, André et al (2014) registaram, para uma cura de 28 dias, uma resistência ligeiramente inferior ao betão convencional para as várias percentagens de substituição dos agregados naturais por agregados de mármore, no entanto, os autores consideraram que este decaimento não era relevante, já que estávamos perante valores da ordem dos 10.3%. Kore e Vyas (2016) seguiram o mesmo princípio, mas desta vez num betão leve, o qual demonstrou uma melhoria na resistência à compressão em relação ao betão base, nomeadamente de 40 % aos 7 dias e 18 % aos 28 dias. Rana et al (2015) avaliaram a substituição dos agregados convencionais por agregados reciclados de calcário em betão verificando que o último apresentava uma maior resistência. Gencel et al (2022) investigaram a incorporação de resíduos provenientes do setor da pedra ornamental (mármore) em betão estrutural, evidenciando que a resistência à compressão e flexão aumentou, dependendo do rácio água cimento, sendo que, quando este era menor, a resistência era maior, assim como o módulo de elasticidade, o que validava os resultados obtidos nos ensaios à compressão.

A durabilidade do betão, especialmente se este for reforçado com aço, está muito dependente do seu comportamento quando está em contacto com a água, já que esta acaba por ser um meio de transporte para os vários agentes químicos que afetam significativamente os reforços do betão, como o CO<sub>2</sub>, cloretos ou os sulfatos, pelo que parâmetros como a absorção de água, permeabilidade e porosidade assumem especial importância na deterioração e longevidade do betão (Rana et al, 2016). Em seguida serão apresentadas as várias conclusões que têm sido obtidas ao longo dos últimos anos.

Em relação à absorção de água, André et al (2014) concluíram que a substituição dos agregados convencionais por agregados reciclados de mármore não apresentavam uma diferença significativa quando totalmente imerso em água, sendo que os valores variam consoante o tipo de agregado natural substituído (basalto, calcário e granito). Quanto à permeabilidade, Rana et al (2015) testemunhou que os agregados reciclados de calcário produziam betão que não via

afetada a sua permeabilidade. Por outro lado, se os agregados reciclados fossem à base mármore, o betão podia ser cerca de 78% mais permeável (Kore e Vyas, (2016).

No que concerne a outros indicadores, como a resistência à carbonatação, André et al (2014) não notaram alterações consideráveis em relação a betões convencionais. Binici et al (2008) descobriram que o betão com agregados reciclados de granito e mármore apresentavam uma resistência à migração de cloretos notoriamente superior ao betão referência. Os mesmos resultados não foram validados por André et al (2014), que verificaram que a presença do mármore proporcionava a migração dos cloretos, dado o baixo teor de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), que por sua vez não formava sal de Friedel, um inibidor à migração dos cloretos. Por último, Binici et al (2008) afirmaram que o betão com agregados reciclados continha mais resistência ao ataque dos sulfatos, especialmente quando os agregados eram compostos por granitos.

## **2.5. Betão reforçado com fibras**

O betão é um material com bastante heterogeneidade e com uma excelente capacidade de resistir à compressão, porém apresenta um comportamento bastante distinto quando sujeito à flexão, apresentando uma resistência deveras menor, a rondar os 5 a 8 % da resistência à compressão (EN 1992-1-1, 2004). Para além disto, apresenta uma capacidade de deformação bastante reduzida e uma rotura frágil (Simões et al, 2017). Na tentativa de atenuar este comportamento e melhorar as características mecânicas do betão, fibras de diferentes materiais têm vindo a ser adicionadas ao betão, sendo que as mais comuns e com melhores resultados são a fibras de aço, polipropileno e vidro. Denotar que o comportamento do betão irá depender do tipo de fibra e da forma como esta se relaciona com a matriz do ligante. De uma forma geral, a resistência à compressão tende a aumentar com a adição de fibras, na medida em que as fibras irão absorver o efeito Poisson do betão, ou seja, a expansão do betão em compressão. Este melhoramento será tanto maior quanto maior for a resistência das fibras à tração e à rigidez, logo, as fibras de aço resultam num maior acréscimo da resistência à compressão do betão (Simões et al, 2017). Já no caso da resistência à tração, o betão irá mostrar um comportamento mais dúctil, caso a fibra introduzida tenha essa capacidade, como é o caso das fibras de polipropileno e de aço, ou um comportamento mais frágil, se a fibra, por sua vez, mostrar um comportamento frágil, assim como as fibras de vidro. Outra conclusão retirada pelos autores, foi o facto de que a capacidade de resistir a maiores cargas de tensão estar diretamente relacionável com uma maior adição de fibras à mistura em causa (Simões et al, 2017).

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta a caracterização dos materiais que foram usados ao longo desta investigação, descrevendo as suas características físicas e químicas. Pretende-se ainda descrever os procedimentos experimentais seguidos para determinar os vários parâmetros que serão discutidos no capítulo seguinte.

#### 3.1. Caracterização dos materiais

##### 3.1.1. Cimento Portland Normal

No desenvolvimento de todo o trabalho experimental foi usado cimento Portland do Tipo I, classe 42,5, fornecido pela Cimpor - Cimentos de Portugal, SGPS, S.A. De acordo com informação do fornecedor, o material cumpre todos os requisitos estabelecidos na norma NP EN 197-1:2012. O cimento utilizado pertencia todo ao mesmo lote, de maneira a garantir que as propriedades físicas e químicas se mantinham constantes em todas as amassaduras, e transportado e guardado em tambores plásticos com tampa, para que não houvesse uma deterioração ao longo do tempo. No Quadro 3.1 apresentam-se algumas características químicas, físicas e mecânicas divulgadas pela entidade fornecedora.

Quadro 3.1 Características químicas, físicas e mecânicas  
Fonte: Ficha Técnica CEM I 42,5 R

<b>Características Químicas</b>	
Perda ao fogo (P.F)	≤ 5%
Resíduo insolúvel (R.I)	≤ 5%
Sulfatos (SO <sub>3</sub> )	≤ 4%
Cloretos (Cl)	≤ 0.10%
<b>Características Físicas</b>	
Início de presa	≥ 60 min
Expansibilidade	≤ 10 mm
<b>Características Mecânicas (valores à compressão)</b>	
2 dias	20 MPa
28 dias	42,5 MPa

### 3.1.2. Agregados finos

Como agregado mais fino, recorreu-se a uma areia grossa rolada 0.3 obtida por meio de depósitos fluviais, fornecida por uma empresa local em Coimbra, Armazéns do Calhabé. Na Figura 3.1, pode-se encontrar uma fotografia do agregado. Já no Quadro 3.2 apresenta-se o resultado da análise granulométrica realizada, segundo a NP EN 933-1.2014, sendo que na Figura 3.2 encontra-se a respetiva curva granulométrica.

### 3.1.3. Agregados Grossos

Foram usados dois agregados grossos: uma brita comercial calcária n.º 1 fornecida pela mesma empresa que a areia, Armazéns do Calhabé; e o resíduo alvo de estudo, denominado daqui para a frente como tout Venant, fornecido pela empresa promotora do projeto Life4Stone MVC, Mármore de Alcobça, Lda. Este último é constituído por elementos de pedra natural considerados desperdícios durante o processo de transformação, que são à posteriori britados. Uma vez mais, na Figura 3.1 é possível visualizar todos os agregados utilizados. No Quadro 3.2 são apresentados os resultados das análises granulométricas dos respetivos agregados e na Figura 3.2 mostra-se as curvas granulométricas todas sobrepostas.

Quadro 3.2 Resultados da análise granulométrica dos agregados

Abertura dos Peneiros (mm)	Tout Venant - Mat. passado (%)	Brita n.º 1 - Mat. passado (%)	Areia 0.3 - Mat. passado (%)
63	100	100	100
40	100	100	100
31,5	100	100	100
20	94	100	100
16	78	100	100
14	70	100	100
12,5	63	100	100
10	50	83	100
8	43	38	100
6,3	34	3	100
4	25	1	100
2	18	1	84
1	12	1	59
0,5	8	0	31
0,25	5	0	12
0,125	3	0	5
0,063	0	0	2



Figura 3.1 Fotografia dos agregados: a) Agregados finos, areia comercial; b) Agregados grossos: brita comercial e Tout Venant (resíduo em estudo)

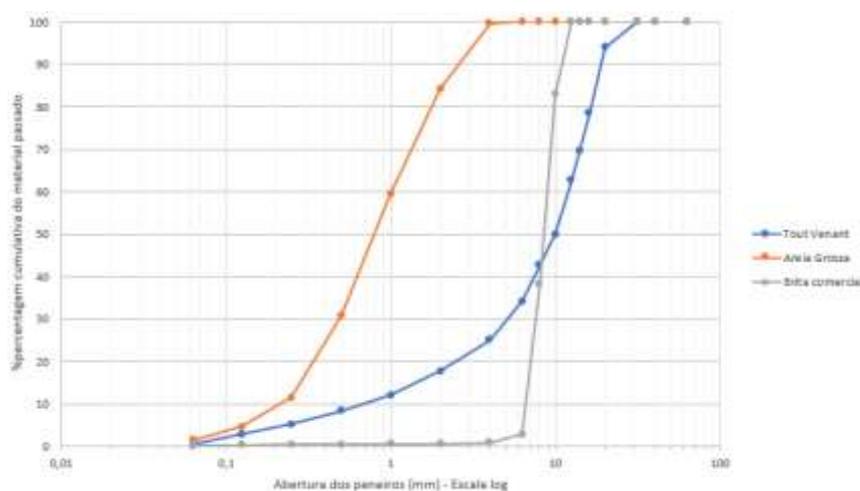


Figura 3.2 Curvas granulométricas dos agregados

### 3.1.4. Material substituto do ligante

No processo de valorização da pedra natural, para além do desperdício que é britado, é ainda gerada uma quantidade avultada de pó, que é recolhido diretamente por sistemas de extração e armazenados em silos próprios para o efeito. Sendo um pó à base essencialmente de calcário, foi ainda estudada nesta dissertação a possibilidade deste resíduo substituir parcialmente o cimento, agindo como um fíler no cimento Portland usado. Em seguida é apresentada a Figura 3.3 com uma fotografia do resíduo em questão, sendo que o Quadro 3.3 resume a análise química do pó calcário.

Quadro 3.3 Análise química do pó calcário

	P.Rubro (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	MnO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Total (%)
Pó calcário	44,0	< 0,50 <sub>l.q</sub>	< 0,50 <sub>l.q</sub>	55	< 0,50 <sub>l.q</sub>	< 0,50 <sub>l.q</sub>	< 0,30 <sub>l.q</sub>	< 0,30 <sub>l.q</sub>	< 0,30 <sub>l.q</sub>	< 0,10 <sub>l.q</sub>	< 0,50 <sub>l.q</sub>	99,0

### 3.1.5. Adjuvante

Com o intuito de reduzir o teor de água/cimento e, desta forma, obter um betão com maiores resistências mecânicas e menor permeabilidade, recorreu-se a um adjuvante, o Sika Viscocrete -3009, que permitiu, mesmo com quantidades reduzidas de água, obter um betão, no seu estado mais fresco, com uma boa trabalhabilidade e uma consistência que facilitava o processo de compactação nos moldes. No Quadro 3.4 é possível consultar alguns dados relativos ao produto fornecidos pela empresa.

Quadro 3.4 Dados relativos ao Sika Viscocrete -3009

Fonte: Ficha técnica Sika Viscocrete - 3009

Sika Viscocrete -3009	
Base química	Solução aquosa de policarboxilatos modificados
Massa volúmica	1.05 +/- 0.02 Kg/l
pH	4.0 +/- 1.0
Teor Cloretos	≤ 0.1%

### 3.1.6. Fibras de reforço das características mecânicas

A resistência à flexão é um dos pontos críticos do betão. Como tal, foi equacionada desde início testar uma composição em que se recorria a fibras metálicas com nervuras conforme as que são apresentadas na Figura 3.4.



Figura 3.3 Pó calcário, resíduo de corte de pedra



Figura 3.4 Fibras de reforço das características do betão

### 3.1.7. Água

Em todas as amassaduras foi utilizada água da rede pública de abastecimento da cidade de Coimbra. Sendo água potável, satisfaz todas as exigências da norma europeia NP EN 1008:2004.

### 3.2. Caracterização das misturas

Para caracterizar as misturas, recorreu-se ao método de Faury. O Quadro 3.5 resume composição de todas as misturas. Numa primeira fase, foram idealizadas 3 composições: A primeira que é um betão tradicional, produzido com agregados naturais e sem qualquer adição de resíduos, a REF. A segunda série, a REF\_T, foi idealizada substituindo integralmente o agregado grosso natural, ou seja, a brita comercial, por agregado reciclado, o tout venant. Por último, a B\_T, em que houve uma substituição parcial (71%) da brita comercial. Importa salientar que esta percentagem de substituição foi definida em função da granulometria dos tipos de agregados de grossos, a fim se retirar o máximo proveito de ambos. A estas três composições, principais, foram adicionadas mais 3 misturas, a REF\_B\_15, REF\_T\_15 e B\_T\_15, em que se procedeu a uma parcial substituição do cimento, em 15 %, por resíduo de corte de pedra. Por último, surge a T\_F\_15, que foi desenvolvida quando se encontravam disponíveis os resultados aos 7 dias da resistência à flexão das anteriores. Esta mistura tinha como objetivo melhorar a capacidade de resistir à flexão da mistura que apresentasse o melhor comportamento. Esta última mistura teve de ver ajustada a sua razão água/cimento, já que a introdução das fibras iria resultar numa argamassa demasiado seca.

Quadro 3.5 Composição das misturas de betão

Nomenclatura	Traço	W/C	Cimento (kg)	Areia grossa 03 (kg)	Brita (kg)	Tout Venant (kg)	Água (l)	Pó (kg)	Viscocrete 3009(g)	Fibras (kg)
REF	1:3	0,4	32,60	106,43	84,20	---	13,04	---	163	---
REF_B_15	1:3	0,4	27,71	106,43	84,20	---	13,04	4,89	163	---
REF_T	1:3	0,4	32,60	63,29	---	133,26	13,04	---	163	---
REF_T_15	1:3	0,4	27,71	63,29	---	133,26	13,04	4,89	163	---
B_T	1:3	0,4	32,60	71,51	36,60	88,45	13,04	---	163	---
B_T_15	1:3	0,4	27,71	71,51	36,60	88,45	13,04	4,89	163	---
T_F_15	1:3	0,5	27,71	65,27	---	131,29	16,30	4,89	195	1,63

### 3.3. Amassadura

Todas as amassaduras foram executadas recorrendo a uma betoneira de eixo vertical. O primeiro passo passava por se pesar todos os constituintes de forma separada. Posto isto, foram introduzidos para a cuba de forma sequencial e por ordem de grandeza todos os agregados, seguidos do cimento. Numa primeira fase, estes constituintes foram misturados a seco durante alguns segundos, de modo a garantir a homogeneidade de toda a mistura. Seguidamente, foi adicionada água, à qual já se tinha junto previamente o adjuvante, e misturou-se durante alguns minutos até se atingir uma consistência homogénea e trabalhabilidade desejável. Na Figura 3.5 encontram-se fotografias do processo.

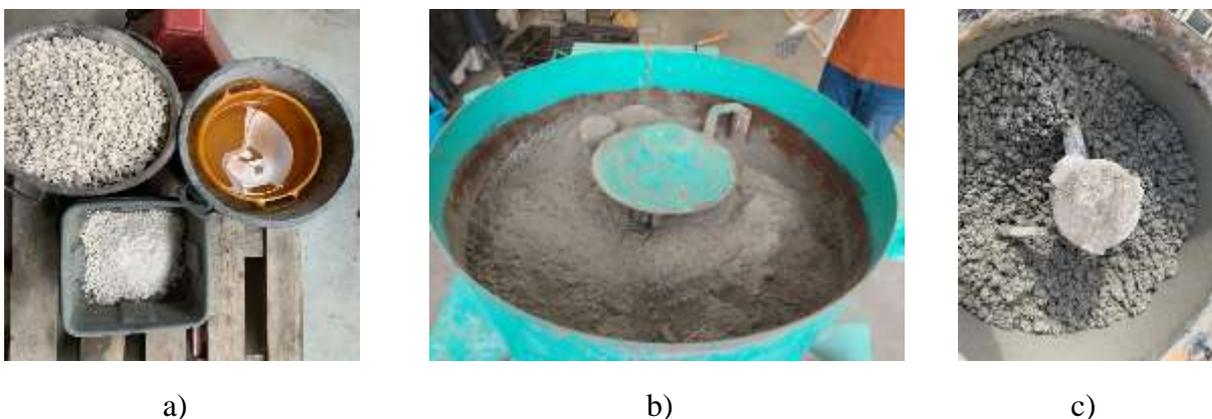


Figura 3.5 Processo de Amassadura: a) Pesagem prévia dos constituintes; b) Homogeneização a seco da mistura; c) Mistura com a consistência pretendida

O betão foi então colocado nos respetivos moldes, por duas fases, uma primeira camada, com o volume de cerca de metade do molde, que era vibrada, recorrendo uma mesa vibratória, durante alguns segundos; a segunda fase consistia em encher o que faltava de molde e voltar a vibrar de modo a libertar o máximo de ar preso, tendo um especial cuidado para que não houvesse uma segregação da mistura. O Quadro 3.6 apresenta as dimensões de moldes usados e os ensaios a que se destinavam, enquanto na Figura 3.6 encontra-se uma fotografia do tipo de moldes.

Quadro 3.6 provetes usados em cada amassadura

Nº	Dimensão	Ensaios
8	15x15x15cm <sup>3</sup>	Compressão, absorção de água por imersão, Ultrassons, Módulo de elasticidade
5	60x15x15cm <sup>3</sup>	Flexão, absorção de água por capilaridade, módulo de elasticidade

A desmoldagem dos provetes era feita sensivelmente após 12 horas de cura, sendo que, por razões de limitação de espaço na câmara de cura, os provetes prismáticos permaneciam à temperatura ambiente do laboratório, e os cubos eram colocados num recipiente cheio de água que, por sua vez, também ficava sujeito à temperatura do laboratório, conforme se pode ver pela Figura 3.7.



Figura 3.6 Moldes prismáticos e moldes cúbicos



Figura 3.7 Provetes desmoldados a ganhar cura

### 3.4. Descrição dos ensaios

Para todas as composições de betão endurecido realizaram-se os seguintes ensaios:

- Resistência à compressão (segundo especificação NP EN 12390-3 2021);
- Resistência à tração por flexão (conforme especificação NP EN 12390-5:2019);
- Absorção de água por capilaridade (de acordo com a especificação E393 do LNEC);
- Absorção de água por imersão (recorrendo à especificação E394 do LNEC);
- Ensaio de velocidade de propagação de Ultrassons (com base na NP EN 12504-4, 2021);
- Módulo de elasticidade dinâmico (NP EN 14146 - 2006).

#### 3.4.1. Resistência à compressão

Os ensaios levados a cabo para avaliar a resistência à compressão foram realizados conforme o procedimento apresentado na especificação NP EN 12390-3 2021, em que a carga foi aplicada a uma velocidade de 10 kN/s. Para todas as composições de betão foram ensaiados 3 provetes cúbicos de 15 cm de aresta, aos 7 dias e aos 28 dias. Denotar que houve sempre o cuidado que

a aplicação da carga fosse feita entre faces moldadas, e que não houvesse excessos nas arestas, nomeadamente nas arestas que compunham a face que não era moldada. A Figura 3.8 a) apresenta um ensaio a decorrer, na qual se pode ver um exemplar dos cubos a ser ensaiado, ao passo que na Figura 3.8 b) é possível visualizar 3 cubos já ensaiados.



a)



b)

Figura 3.8 Ensaio de compressão: a) Ensaio a decorrer; b) Provetes ensaiados

### 3.4.2. Resistência à tração por flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram executados para todas as composições de betão aos 7 e aos 28 dias, em provetes de  $60 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ , sendo que, em cada campanha de ensaio, eram testados 2 provetes para cada tipo de betão estudado. Para este ensaio foi seguida a especificação da norma NP EN 12390-5:2019, em que os provetes estavam apoiados em 3 pontos, conforme se pode ver na Figura 3.9 a), enquanto na Figura 3.9 b) visualiza-se um provete ensaiado.



a)



b)

Figura 3.9 Ensaio de flexão: a) Provede a ser ensaiado; b) Provede no fim do ensaio

Para o sistema de ensaio adotado, a rotura ocorre por tração com início nas fibras inferiores. Da resistência dos materiais, a tensão normal de uma viga, em regime elástico é dada pela Equação (1) (Dias da Silva, 2013),

$$\sigma = \frac{My}{I_z} [MPa] \quad (1)$$

em que M, é o momento fletor, y, a distância ao eixo neutro, e  $I_z$  o momento de inércia em relação ao eixo neutro.

Tendo em conta que o momento máximo que é obtido pela Equação (2),

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{PL}{4} [N.cm] \quad (2)$$

onde P, é a carga aplicada pela máquina e L a distância entre o apoio interno e os apoios externos.

Desenvolvendo a Equação (1) para o momento máximo, através da Equação (2), obtém-se a tensão de rotura à flexão que é dada pela Equação (3):

$$\sigma_R = \frac{3PL}{2bh^2} [Mpa] \quad (3)$$

### 3.4.3. Absorção de água por capilaridade

Sendo o objetivo principal obter um betão produzido com agregados reciclados, provenientes da indústria da transformação da pedra natural, com a finalidade de ser usado em peças de mobiliário urbano, era importante perceber qual seria a absorção por capilaridade. Para o efeito, seguiu-se o procedimento experimental apresentado na especificação do LNEC E 393. No que concerne aos provetes, a norma exige que o volume mínimo seja de 0,001 m<sup>3</sup> e que a altura do provete seja pelo menos o dobro da aresta do diâmetro. Para além destas, a especificação recomenda ainda que a secção seja quadrada ou circular, se possível não inferior a 10000 mm<sup>2</sup>, e por último, a dimensão da aresta deve ser de preferência de 150 mm. Os provetes usados neste ensaio foram os que resultaram dos ensaios à flexão que, regra geral, cumpriam todas as indicações da norma, à exceção dos provetes que não quebravam exatamente ao centro nos ensaios de flexão. Estes provetes originavam duas metades que não eram exatamente simétricas em termos de altura, logo não foi possível cumprir a 100 % a segunda exigência. No entanto, dado o tamanho da altura, e a proximidade com imposição da norma, foi considerado que não apresentava qualquer influência.

Posto isto, todos os provetes foram regularizados, recorrendo a um meio mecânico, como se pode ver na Figura 3.13 a), com o intuito de retirar eventuais imperfeições e uniformizar todas as faces, já que uma delas não era moldada.

Uma vez preparados os provetes, o primeiro passo resumia-se a colocar os provetes a secar numa estufa. A especificação do LNEC prevê que esta secagem seja feita a  $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 14 dias. Por motivos logísticos, optou-se por uma adaptação que consistiu em colocar os provetes a secar durante menos tempo a uma maior temperatura, ou seja, cerca de 6 a 7 dias a uma temperatura de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Após a secagem, os provetes foram pesados e marcados com uma linha horizontal a 0,5 cm da base, que servia para marcar a altura do provete que ficava imerso, e linhas verticais ao centro das várias faces, com o objetivo de medir a franja capilar. A Figura 3.10 representa os procedimentos descritos acima:

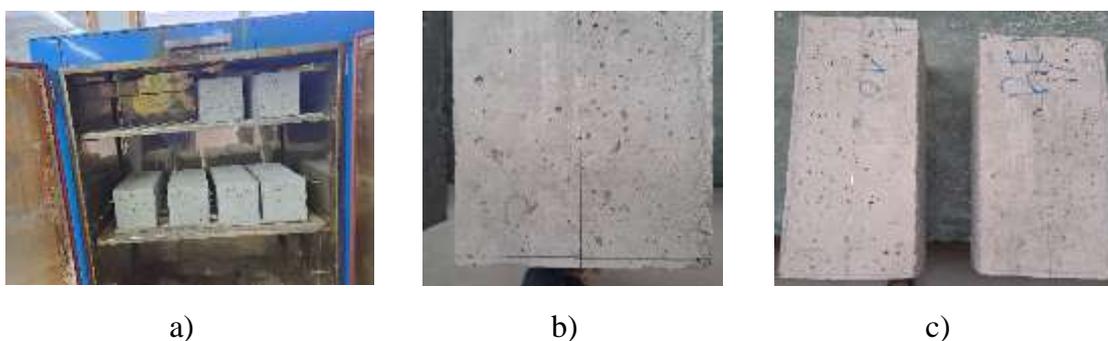


Figura 3.10 Preparação dos provetes para ensaio de absorção por capilaridade: a) Secagem em estufa; b) Marcação dos provetes; c) Provetes preparados para o ensaio

Depois de marcados e pesados, os provetes são colocados dentro de um recipiente sobre umas pequenas placas de plástico. Em seguida, o recipiente é cheio de água até à altura marcada previamente no provete, conforme se pode ver na Figura 3.11.



Figura 3.11 Ensaio de absorção por capilaridade: a) Vista geral; b) Vista em pormenor

Por último, foram efetuadas 4 medições da ascensão capilar às 3 h, 6 h, 24 h e 72 h, tendo por base o seguinte procedimento: os provetes são retirados do tabuleiro metálico, deixando-os descansar cerca de um minuto num recipiente não absorvente; pesagem do provete recorrendo a uma balança; medição da ascensão capilar em cada uma das 4 faces; recolocação do provete no tabuleiro metálico para assim continuar o ensaio. Na Figura 3.12 pode-se visualizar parte do procedimento descrito.



Figura 3.12 Ensaio de absorção por capilaridade. a) Pesagem do provete; b) Medição da ascensão capilar com uma craveira

Uma vez determinados todos os valores acima descritos, o cálculo da absorção de água por capilaridade é calculado pela Equação (4):

$$A_i = \frac{M_i - M_0}{A_{\text{finf}}} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (4)$$

Em que:  $M_i$  representa a massa média dos provetes no instante  $i$ ;  $M_0$  traduz a massa média dos provetes no início do ensaio;  $A_{\text{finf}}$  é a área da face inferior do provete.

Os resultados da absorção de água por capilaridade são expressos em  $\text{kg/m}^2$ , para cada instante  $\sqrt{t_i}$ . O declive da reta que melhor se ajuste aos pontos obtidos representa o coeficiente de absorção capilar, em  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$ .

#### 3.4.4. Absorção de água por imersão

Como forma de complemento ao ensaio descrito anteriormente, determinaram-se os valores de absorção de água por imersão, para cada composição de betão estudada, procurando perceber se a incorporação dos dois resíduos, influenciava o comportamento do betão na presença de água. Para tal, a metodologia experimental baseou-se na especificação E 394 do LNEC.

O primeiro passo resume-se à preparação dos provetes, aos quais a norma exige que tenham um volume mínimo de  $0,001 \text{ m}^3$ , e uma forma tal que nenhum ponto esteja afastado mais de 100 mm da superfície.

Assim sendo, foram usados uns provetes cúbicos de  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ , em que se recorreu a um meio mecânico para regularizar as superfícies, como se pode ver pela Figura 3.13 a). Em seguida, procedeu-se à marcação dos provetes às alturas correspondentes a  $1/3$  e  $2/3$  da sua altura total, ou seja, de 5 em 5 cm aproximadamente, conforme apresentado na Figura 3.13 b).



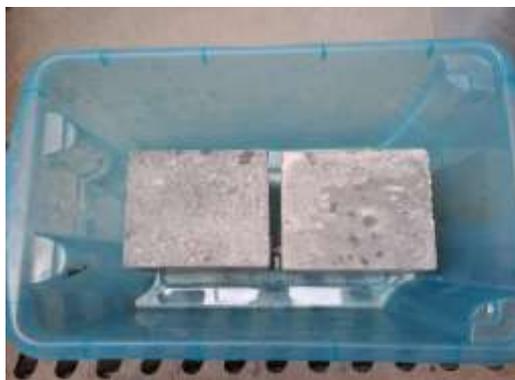
a)



b)

Figura 3.13 Ensaio de absorção de água por imersão: a) Regularização dos provetes para o ensaio; b) Marcação dos provetes para o ensaio

Assim sendo, podia dar-se início à saturação dos provetes tendo por base o seguinte método: colocar os provetes num recipiente plástico (Figura 3.14 a)); introduzir água no interior do recipiente até à primeira marcação, portanto até  $1/3$  da altura, evitando molhar a restante altura dos provetes (Figura 3.14 b)); Passada uma hora, voltar a colocar água para o recipiente, até  $2/3$  da altura, uma vez mais sem molhar o resto do provete (Figura 3.14 c)); por último, inserir a restante quantidade de água para o recipiente, até que a superfície livre da água esteja 2,5 cm acima da face superior do provete (Figura 3.14 d)). Denotar que este último passo, também deve ser realizado uma hora após o enchimento de água até os  $2/3$  da altura, segundo a especificação do LNEC.



a)



b)



c)



d)

Figura 3.14 Ensaio de absorção de água por imersão: a) Colocação dos provetes num recipiente; b) Imersão dos provetes até 1/3 da altura; c) Colocação de água até 2/3 da altura; d) Introdução de água até 2,5 cm acima da face superior

A especificação do LNEC considera que os provetes estão saturados quando a diferença de massas entre duas pesagens consecutivas, espaçadas de 24 horas, for inferior a 0.1 % da média das duas leituras. Em cada pesagem, os provetes foram retirados do recipiente com água, deixando escorrer a água superficial e secando o excesso de água das superfícies com panos ligeiramente humidificados (Figura 3.15). Seguidamente, o provete era pesado e registava-se a respetiva massa voltando a colocá-lo na água. Em todas as composições, ao fim de 48 horas os provetes já se encontravam saturados, pelo que os valores registados correspondiam à massa dos provetes saturados ao ar ( $m_1$ ).



Figura 3.15 Ensaio de absorção de água por imersão: a) secagem dos provetes; b) pesagem dos provetes

Posto isto, o provete saturado foi imerso em água e foi calculada a sua massa hidrostática,  $m_2$ . Para finalizar, faltava determinar a massa dos provetes secos,  $m_3$ . Uma vez mais, a norma do LNEC considera que o provete está totalmente seco, quando entre duas pesagens separadas de pelo menos 24 horas, a massa não varia mais de 0.1%. Como tal, depois das pesagens dos provetes saturados, estes foram colocados na estufa à temperatura de 100°C.

Nesta fase, estavam recolhidos todos os valores necessários para determinar a absorção de água por imersão,  $A_i$ , determinada pela Equação (5),

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 [\%] \quad (5)$$

em que,  $m_1$  representa a massa do provete saturado ao ar,  $m_2$  traduz a massa hidrostática do provete saturado, e  $m_3$  a massa do provete seco.

#### 3.4.5. Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons foi realizado com o objetivo de avaliar a qualidade do betão, nomeadamente, obtendo informações sobre eventuais as características mecânicas, possível presença de fendas, homogeneidade e potenciais defeitos do betão. No fundo, o ensaio consiste em determinar a velocidade de propagação, entre dois pontos, por meio de um impulso ultrassónico. Importa referir que foi seguida a norma NP EN 12504 – 4 (2021).

O primeiro passo consiste em calibrar o equipamento de medição conforme a Figura 3.16 a). Após a calibração do equipamento, o ensaio inicia-se gerando um impulso ultrassónico transmitido por meio de um transdutor piezoelétrico emissor  $T_x$ . Este sinal é captado na face

oposta do cubo (transmissão direta) utilizando um outro transdutor piezoelétrico, o recetor  $R_x$ , conforme se pode visualizar na Figura 3.16 b). Desta forma, regista-se o tempo  $t_i$  que o sinal levou a percorrer a distância entre os transdutores, ou seja, uma face do cubo.



Figura 3.16 Ensaio de Ultrassons: a) calibração do equipamento; b) Medição do sinal

Uma vez registado o tempo que o sinal elétrico demora a atravessar o cubo, recorre-se à Equação (6) para calcular a velocidade do som em m/s.

$$V_i = \frac{S_i}{t_i} [m/s] \quad (6)$$

Em que,  $S_i$ , representa o comprimento que o sinal tem de atravessar, que neste caso era 150 mm, uma vez que se usaram os provetes cúbicos de 150 mm de face, e  $t_i$  o tempo que o sinal demora a atravessar esse comprimento.

Denotar que, para este conjunto de ensaios, utilizaram-se os cubos que eram destinados aos ensaios de absorção, já que este é um ensaio não destrutivo.

#### 3.4.6. Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico foi executado seguindo o procedimento normativo indicado na NP EN 14146 – 2006. O ensaio foi realizado utilizando uma placa de aquisição National Instruments, que apresenta dois canais de entrada, um martelo de impacto e um acelerómetro. Foram usados provetes prismáticos retangulares de dimensões 15 x 15 x 60 cm<sup>3</sup> definido na norma como provetes preferenciais, ou seja, com um comprimento de 4 vezes a largura.

O procedimento experimental consistiu em instrumentar o provete a fim de calcular o módulo de elasticidade dinâmico a partir de frequências de flexão, posicionando-o tal como era indicado na norma. Uma vez corretamente posicionado, colocou-se o acelerómetro na parte superior do provete junto a uma das extremidades ao centro da largura, como se pode visualizar na Figura

3.17, e com o martelo de impacto aplicou-se uma pancada ao centro do provete, registrando a frequência fundamental de ressonância à flexão.

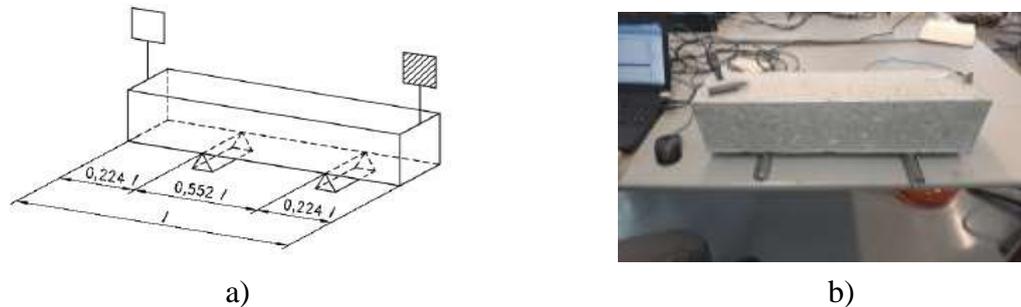


Figura 3.17 Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico: a) Posição indicada na norma; b) Provete posicionado para dar início ao ensaio. Fonte: NP EN 14146 - 2006

A frequência fundamental de ressonância natural à flexão corresponde à frequência mais alta, para a qual se obtém uma amplitude máxima. A Figura 3.18 mostra um exemplo de um resultado obtido para uma das composições.

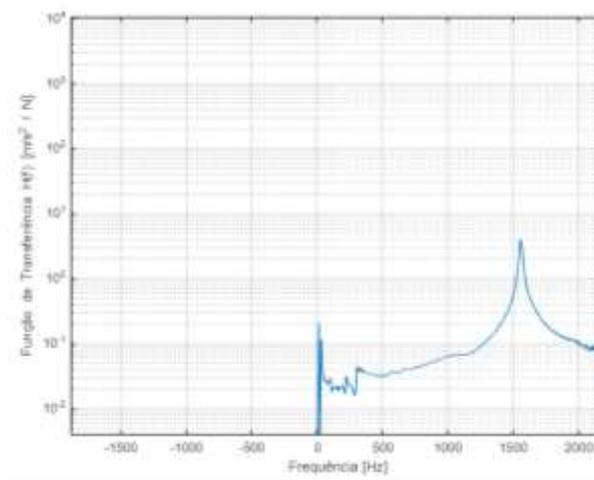


Figura 3.18 Frequência fundamental de ressonância natural à flexural

Com esta frequência e recorrendo à Equação (7) calcula-se o valor final do módulo de elasticidade dinâmico:

$$Ed_F = 15.136 \times 10^{-6} l^2 \times F_F^2 \times \rho \times C \text{ [MPa]} \quad (7)$$

Em que:  $l$  é o comprimento, em metros;  $F_F$  a frequência de ressonância natural, em Hz;  $\rho$  a densidade em  $\text{kg/m}^3$ ; e  $C$  um valor que varia consoante o coeficiente de Poisson, mas que foi considerado, simplifcadamente, para todas as amostras, igual a 1.451.

Atendendo ao facto que foi medida a velocidade de propagação de ondas de impulsos ultrassónicos, aproveitou-se esses dados para calcular o módulo de elasticidade dinâmico recorrendo à Equação (8) (Pereira et al, 2022).

$$E_{upv} = \frac{\rho V^2 (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} [MPa] \quad (8)$$

Em que,  $E_{upv}$  é o módulo de elasticidade dinâmico em MPa,  $V$  a velocidade do impulso em km/s,  $\rho$  a densidade em  $kg/m^3$ , e  $\mu$  o coeficiente de Poisson.

Popovics et al (2008) levaram a cabo um estudo do módulo de elasticidade dinâmico e estático, no qual avaliaram as correlações desenvolvidas entre ambos. Chegaram à conclusão que para o cálculo do módulo de elasticidade estático através de uma correlação com o módulo de elasticidade dinâmico, calculado por meio da frequência de ressonância natural, a expressão que incorre no menor erro é Equação (9).

$$E_s = \frac{k145037.74E_d^{1.4}0.0624\rho^{-1}}{145037.74} [GPa] \quad (9)$$

Em que,  $k$  assume o valor de 0.23,  $\rho$  é a densidade em  $kg/m^3$ , e  $E_d$  o módulo de elasticidade dinâmico, GPa.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O presente capítulo é dedicado a apresentar os resultados dos ensaios descritos no capítulo 3, procedendo a uma análise e discussão. Neste processo, procurou-se comparar, tanto quanto possível, os resultados obtidos com a informação apresentada no capítulo do estado da arte.

### 4.1. Apresentação e discussão dos resultados

#### 4.1.1. Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram efetuados seguindo o procedimento caracterizado no ponto 3.4.1. No Quadro 4.1 apresentam-se os resultados obtidos para as diferentes composições aos 7 dias e aos 28 dias.

Quadro 4.1 Resistência mecânica à compressão (MPa)

Nomenclatura	7 dias			28 dias		
	Carga Média (MPa)	S <sub>s</sub> (MPa)	Coef. Variância (%)	Carga Média (MPa)	S <sub>s</sub> (MPa)	Coef. Variância (%)
REF	45,30	0,71	1,57	49,77	2,02	4,07
REF_B_15	34,83	1,27	3,64	42,43	2,71	6,38
REF_T	38,20	1,47	3,85	45,53	0,17	0,38
REF_T_15	51,95	0,55	1,06	55,97	3,52	6,30
B_T	50,20	3,43	6,84	56,47	2,82	4,99
B_T_15	45,20	3,15	6,98	51,00	5,02	9,85
T_F_15	39,73	4,00	10,07	47,73	2,09	4,37

Analisando os dados do Quadro 4.1 pode verificar-se que a série REF\_T\_15 é a que apresenta a maior resistência mecânica à compressão aos 7 dias de idade. No entanto é de salientar ainda a mistura B\_T, cuja resistência à compressão é ligeiramente inferior, cerca de 1 MPa. Estes dois tipos de betão mantêm esta tendência aos 28 dias de cura, embora desta vez, seja a composição B\_T que demonstre a maior resistência, com uma diferença de apenas 0,5 MPa. No sentido inverso encontra-se a série REF\_B\_15, que mostrou ter a menor resistência, tanto aos 7 dias como aos 28 dias de idade. Como seria de esperar à partida, todas as composições apresentaram um acréscimo de resistência dos 7 para os 28 dias, como se pode visualizar na Figura 4.1.

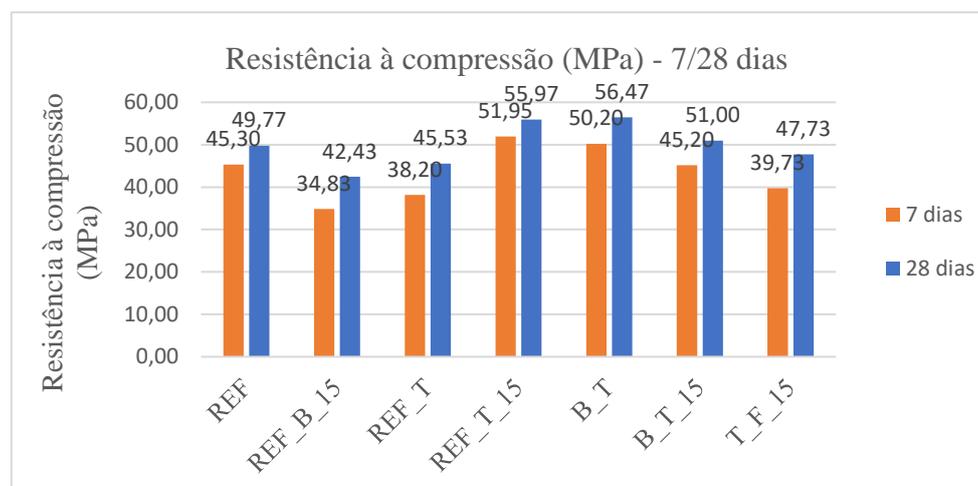


Figura 4.1 Resistência à compressão (MPa) - 7/28 dias

Conforme se pode ver pela Figura 4.2, os resultados obtidos permitem ainda afirmar que, de forma geral, a introdução do pó como substituto parcial do cimento resulta num decréscimo da resistência, quer seja aos 7 ou aos 28 dias. Estes dados encontram-se em sintonia com o que concluíram Courard et al (2014), que referem que o pó calcário fazia reduzir a resistência à compressão, já que se acabava por aumentar indiretamente a razão da água/cimento. Todavia, o betão REF\_T\_15, não seguiu esta tendência, acabando por demonstrar um ganho de resistência, que chegou a ser superior a 25 % aos 7 dias e da ordem dos 19 % aos 28 dias. Isto em comparação com uma mistura semelhante, mas sem qualquer substituição do cimento.

Nas composições em que houve uma substituição dos agregados naturais, pelo resíduo em estudo, o tout Venant, os resultados foram promissores. Quando este foi conjugado numa mistura com o agregado grosso natural (B\_T), a uma percentagem, aproximadamente, de 71%, resultou na série com o melhor comportamento quando sujeita à compressão aos 28 dias. Mesmo quando houve uma substituição integral do agregado grosso natural pelo resíduo, o valor da resistência continuou interessante, uma vez que, apenas houve um decréscimo a rondar os 9%, decaimento este considerado irrelevante para um grande conjunto de aplicações no domínio da construção civil, tal com afirmaram André et al (2014). De salientar ainda, que a composição que incorporou 100 % de tout Venant e 15 % de pó, a REF\_T\_15, registou o segundo melhor valor de resistência à compressão aos 28 dias, apresentando um ganho de resistência da ordem dos 11 % em relação à mistura que apenas incorporava agregados grossos naturais (REF). Os resultados obtidos encontram-se em concordância com as conclusões apontadas pelos vários autores citados na revisão bibliográfica, em que a maioria afirmou que a incorporação de resíduos provenientes do corte e transformação da pedra natural resultava numa maior ou idêntica resistência.

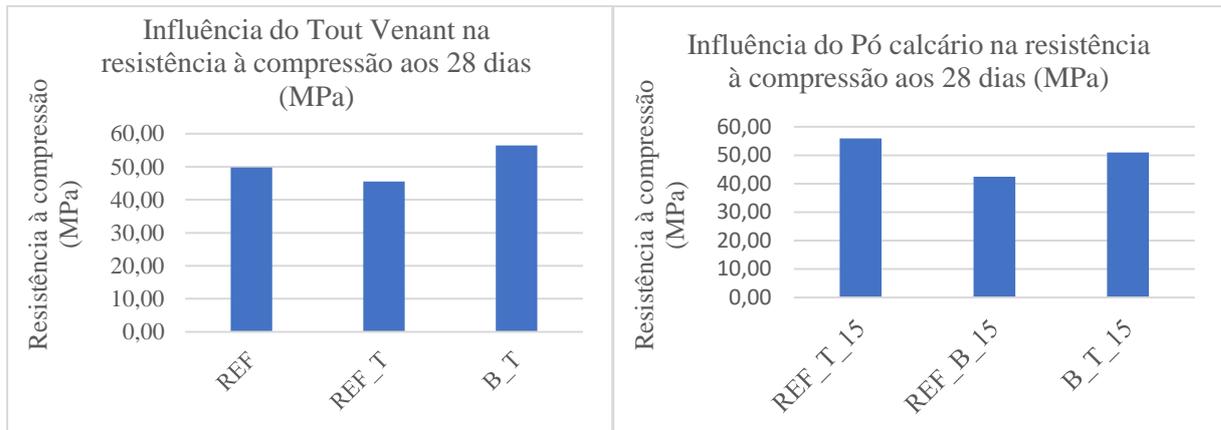


Figura 4.2 Influência dos resíduos em estudo na resistência à compressão

Comentando agora a série T\_F\_15, uma mistura à qual foi adicionada uma percentagem de fibras de aço, em função do volume de cimento, com o intuito de ver melhorada a capacidade de o betão resistir à flexão. Apesar do valor obtido para a resistência ser o terceiro mais baixo de todas as composições, não implica que esteja diretamente associado ao facto de se ter incorporado as fibras, mas sim por questões como: o aumento da razão água/cimento, por ser necessário obter uma melhor trabalhabilidade do betão; e a incorporação de uma percentagem de pó calcário como parcial substituto do cimento, já que uma vez mais se reduziu indiretamente a razão água/cimento.

Sendo um dos alvos do projeto estudar as várias propriedades do betão, faz todo o sentido avaliar quais as classes de resistência do betão à compressão. Para tal, recorre-se à NP EN 206-1 2007, avaliando a resistência característica aos 28 dias em provetes cúbicos de 150 mm. Utilizando o critério 1 de verificação de conformidade da resistência do betão resultou o Quadro 4.2, que resume a classe de resistência à compressão de todos os betões estudados. Denotar que todas as composições originaram um betão com classe de resistência alta dentro da classificação dos betões de massa volúmica normal, sendo que o REF\_T\_15 e o B\_T atingiram a máxima classe dessa classificação. Este quadro acaba por corroborar o que foi mencionado anteriormente, ou seja, que até o betão com menor classe de resistência consegue satisfazer uma ampla gama de atividades dentro do setor da construção civil.

No seguimento das classes de resistência importa comparar a resistência obtida à compressão e de que forma se relaciona com a massa volúmica do betão. Para tal, apresenta-se na Figura 4.3 uma comparação entre a resistência à compressão e a massa volúmica aparente. Este gráfico permite concluir, que ao contrário do que seria esperado, e de um modo geral, os betões com incorporação do resíduo tout venant apresentam menor massa volúmica e ao mesmo tempo uma maior ou semelhante resistência mecânica à compressão, do que as séries que apenas têm agregados naturais.

Quadro 4.2 Classes de Resistência à compressão

Nomenclatura	Carga média (MPa)	$f_{ck,cube}$ (MPa)	$f_{ck,cube+4}$ (MPa)	Classe de resistência à compressão
REF	49,77	45	49	C35/45
REF_B_15	42,43	37	41	C30/37
REF_T	45,53	37	41	C30/37
REF_T_15	55,97	50	54	C40/50
B_T	56,47	50	54	C40/50
B_T_15	51,00	45	49	C35/45
T_F_15	47,73	37	41	C30/37

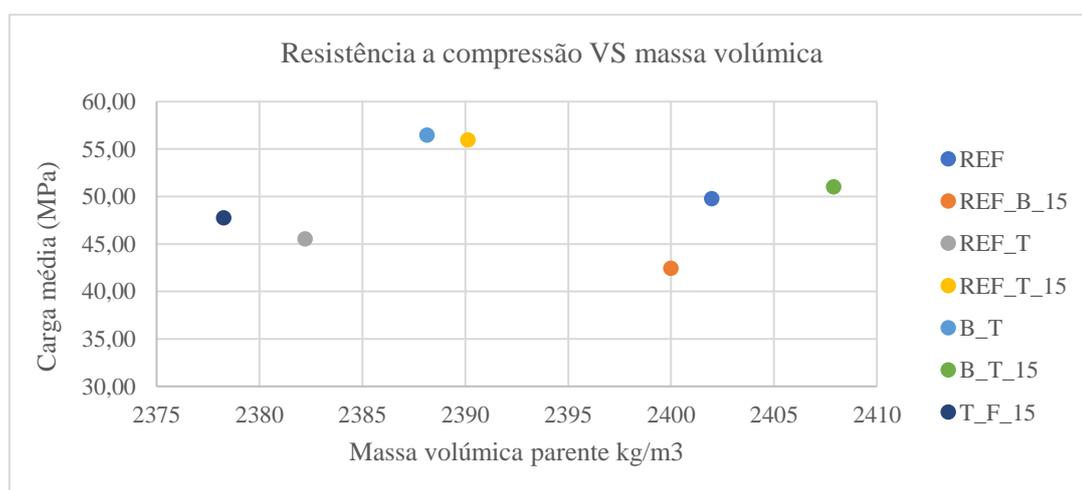


Figura 4.3 Resistência a compressão VS massa volúmica

Por último, um comentário aos valores obtidos para os coeficientes de variância, que em nenhum caso foram superiores a 10 %, o que permite concluir que, de modo geral, a dispersão dos resultados é pequena o que possibilita inferir alguma confiança nos dados apresentados.

#### 4.1.2. Resistência à flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram executados conforme procedimento descrito no capítulo 3.4.2. Em seguida apresenta-se o Quadro 4.3, que resume os principais valores obtidos e um respetivo comentário aos mesmos.

Quadro 4.3 Resistência mecânica à Flexão (MPa)

Nomenclatura	7 dias				28 dias			
	Carga média flexão (kN)	Carga média flexão (MPa)	S <sub>s</sub> (MPa)	coef. Variância (%)	Carga média flexão (kN)	Carga média flexão (MPa)	S <sub>s</sub> (MPa)	coef. Variância (%)
REF	26,97	5,99	0,68	2,54	24,51	5,45	0,09	0,37
REF_B_15	25,41	5,65	1,68	6,61	25,32	5,63	0,51	2,01
REF_T	32,01	7,11	3,04	9,50	24,68	5,48	0,32	1,28
REF_T_15	27,00	6,00	0,69	2,54	28,50	6,33	2,13	7,46
B_T	27,94	6,21	1,81	6,48	26,06	5,79	1,04	3,97
B_T_15	27,385	6,09	0,63	2,28	24,65	5,48	0,25	1,03
T_F_15	25,05	5,57	0,48	1,92	22,67	5,04	0,34	1,50

Fazendo uma análise geral do Quadro 4.3, depreende-se que aos 7 dias a composição que apresentou uma maior resistência à flexão foi a REF\_T, com um pico de 7.11 MPa. Embora tenha apresentado a maior resistência aos 7 dias, não teve um destaque muito significativo, já que em relação à mistura com a menor resistência, T\_F\_15, a diferença foi da ordem dos 22 % ou, por outros termos, 1.55 MPa. Ainda aos 7 dias verificou-se que havia uma semelhança entre os valores obtidos, rondando os 6 MPa.

Analisando os resultados obtidos aos 28 dias, a mistura que atingiu o maior valor de resistência foi a REF\_T\_15, com o valor médio de 6.33 MPa. Esta mistura quando comparada com a composição com menor resistência, que uma vez mais foi a T\_F\_15, apresentou uma diferença que rondou os 20 %, logo, voltou a não haver uma grande discrepância entre os valores obtidos para as diferentes séries. A Figura 4.4 permite tirar uma conclusão que não seria de esperar à partida, nomeadamente, dos 7 para os 28 dias, em todas as misturas houve um decréscimo da resistência, à exceção da composição REF\_T\_15. Este facto poderá estar associado à cura ter sido realizada em ambiente de laboratório, em que os provetes podem ter apresentado uma evaporação de água, favorecendo a sua secagem. Uma secagem mais rápida pode implicar numa interrupção das reações químicas e, portanto, os provetes não atingirem o máximo da sua resistência. Há ainda um outro fator que se tem de ter em conta nesta análise, que é o desvio padrão. Consultando o Quadro 4.3 e a Figura 4.4, verifica-se que o desvio padrão aos 7 dias é maior que o desvio padrão aos 28 dias. Isto poderá indicar que não tenha havido um acréscimo de resistência, mas que ao mesmo tempo também não tenha diminuído. Em especial para a série REF\_T\_15 aos 28 dias, que foi a única que apresentou um acréscimo de resistência aos 28 dias, mas ao mesmo tempo, apresentou o maior coeficiente de variância entre os resultados obtidos.

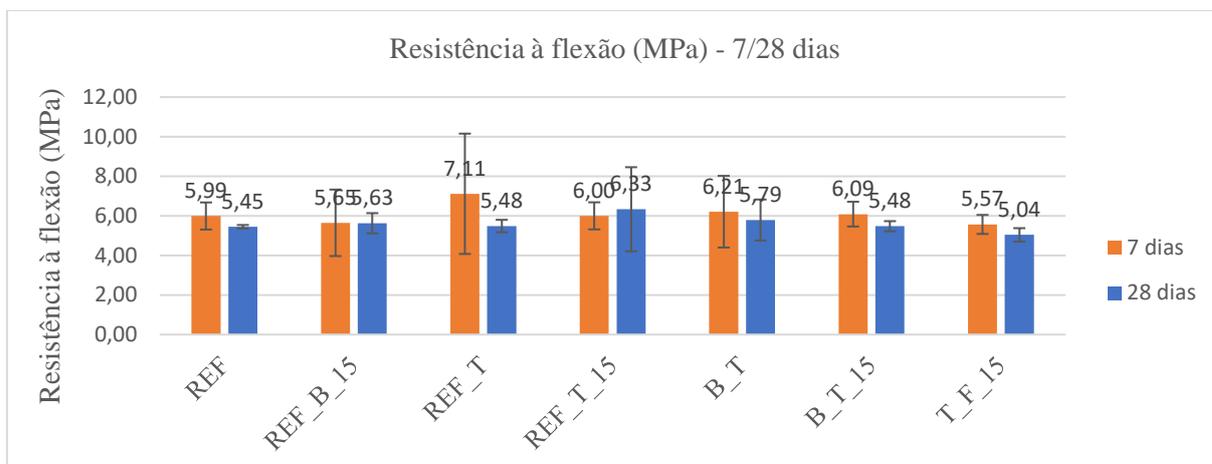


Figura 4.4 Resistência à flexão - 7/28 dias

Embora, se tenha verificado um decréscimo médio de tensão dos 7 para os 28 dias, os resultados obtidos vão, geralmente, ao encontro das conclusões apresentadas pelos vários autores citados na revisão bibliográfica, nomeadamente, Binici et al (2008), Hebhouh et al (2011) e Gencel et al (2022), que afirmaram que em relação ao betão convencional, a incorporação de resíduos provenientes da indústria da transformação da pedra, como alternativa aos agregados naturais, resultava num betão com uma maior capacidade de resistir à flexão.

Esta tendência apenas não se verificou na composição T\_F\_15, que apesar de ter sido adicionado um elemento com o propósito de aumentar a resistência à flexão, neste caso as fibras de aço, houve a necessidade de ajustar o teor da água, aumentando a razão da água/cimento. Gencel et al (2022) concluíram que o aumento da razão água/cimento, fazia diminuir a resistência e diminuir o módulo de elasticidade. Pelo que, a diferença de cerca de 20 % entre as séries REF\_T\_15 e T\_F\_15, que apresentam uma composição semelhante à exceção das fibras e do teor em água, está eventualmente associada ao aumento da razão água/cimento e que, porventura, se não fosse a presença das fibras esta diferença seria mais acentuada.

Ainda da observação da Figura 4.4 pode-se apontar que a introdução do pó calcário, em substituição parcial do cimento, fez com que houvesse um decréscimo da resistência do betão com 7 dias, em relação às séries que apresentavam uma composição semelhante, mas com 100 % de cimento. Esta foi uma tendência que se inverteu aos 28 dias, visto que se visualiza um acréscimo de resistência nas misturas com a incorporação de pó. A única série que não seguiu esta regra foi a B\_T\_15, que continuou a mostrar um ganho de resistência sem a substituição do cimento. Este acréscimo de resistência pode eventualmente ser explicado pela maior dispersão dos grãos de cimento, que assim ficam com maior superfície para reagir com a água. Para além disso, o pó tem a capacidade de fixar água, por absorção e adsorção, ficando essa água disponível para contribuir para a reação de hidratação do cimento a longo prazo. Este é um fenómeno que se encontra incluído nos processos denominados como “cura interna”.

Recorrendo à Figura 4.5 para fazer uma comparação entre a resistência à flexão e à compressão pode concluir-se que os valores obtidos estão em consonância com o que é indicado pela norma EN 1992-1-1, 2004, que diz que os valores da resistência à flexão são entre 5 a 8 % do valor da resistência à compressão. No caso em estudo, esta relação não se encontra dentro deste intervalo, apresentando uma relação ligeiramente maior, oscilando entre os 10 e os 13 %.

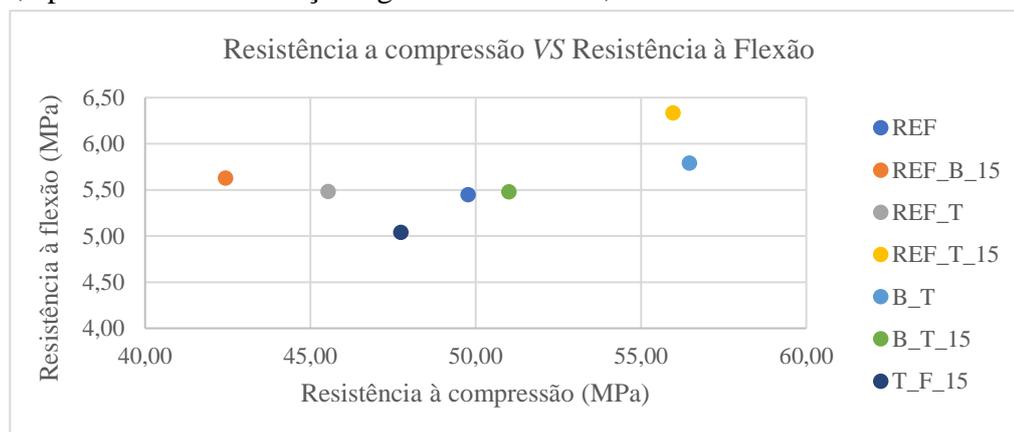


Figura 4.5 Resistência a compressão VS Resistência à Flexão

À semelhança do que aconteceu com os resultados da resistência compressão, os dados obtidos para a resistência à flexão revelaram uma pequena dispersão, com um coeficiente de variância inferior a 10 % em todos os casos. Isto volta a implicar alguma confiança nos resultados obtidos.

#### 4.1.3. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado segundo o procedimento descrito no ponto 3.4.3, em que os provetes são colocados em contacto com a água medindo o ganho de peso graças à absorção capilar e ainda à altura da ascensão capilar. Os Quadros 4.4 e 4.5 resumem os valores médios da ascensão capilar e absorção capilar, respetivamente, para cada um dos instantes medidos.

Quadro 4.4 Valores médios da ascensão capilar

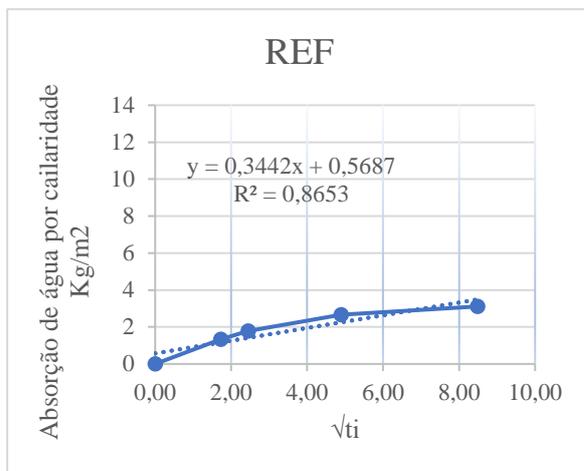
Nomenclatura	3h	6h	24h	72h
	Alt (mm)	Alt (mm)	Alt (mm)	Alt (mm)
REF	10,3	11,3	13,0	13,9
REF_B_15	15,4	20,0	25,0	29,8
REF_T	7,88	13,3	19,3	20,4
REF_T_15	14,6	16,6	22,0	24,9
B_T	12,1	15,6	20,8	24,4
B_T_15	11,9	14,4	18,5	20,8
T_F_15	13,8	19,8	22,4	25,1

Quadro 4.5 Valores médios da absorção capilar

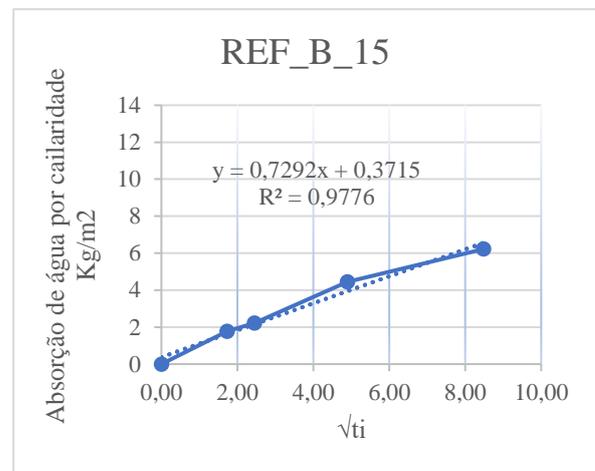
Nomenclatura	3h	6h	24h	72h
	Absorção (kg/m <sup>2</sup> )			
REF	1,3	1,8	2,7	3,1
REF_B_15	1,8	2,2	4,4	6,2
REF_T	0,9	1,3	3,1	4,4
REF_T_15	2,2	3,1	6,2	11,6
B_T	0,9	1,8	4,0	5,3
B_T_15	0,9	1,8	2,7	3,6
T_F_15	1,3	2,2	4,4	7,1

Da análise dos dados apresentados nos Quadros 4.4 e 4.5, pode-se constatar que em todas as séries, a absorção de água por capilaridade foi sempre aumentando à medida que o tempo foi decorrendo, sendo que a composição que apresenta uma maior absorção foi a REF\_T\_15, com um valor de 11.6 kg/m<sup>2</sup>, e uma ascensão capilar de 24.9 mm, ao fim de 72 horas. Por outro lado, o betão que demonstrou uma menor absorção capilar foi o REF, com uma absorção média de 3.1 kg/m<sup>2</sup>, e uma ascensão capilar da ordem dos 13.9 mm. Outro fator que pode ser observado nos resultados é que, para cada mistura, uma maior absorção de água conduz a uma maior ascensão capilar. No entanto comparando as várias séries, não se pode constatar a mesma conclusão, isto porque há betões com maior absorção capilar, aos quais não correspondeu a maior ascensão capilar. Este facto vai ao encontro das expectativas iniciais, já que seria de esperar que o agregado reciclado apresentasse uma maior absorção do que os agregados naturais, pelo que uma maior absorção poderia não implicar necessariamente uma maior altura capilar. Veja-se o seguinte caso: a série, REF\_B\_15 apresenta uma absorção média, ao fim das 72 horas, de 6.2 kg/m<sup>2</sup> e uma ascensão capilar de 29.8 mm. Quando comparada com a composição REF\_T\_15, apresenta uma absorção capilar 46 % inferior e uma altura capilar 20 % superior, sendo que apenas diferem entre si no tipo de agregado, em que a primeira apenas contém o agregado grosso natural e a outra o agregado grosso reciclado.

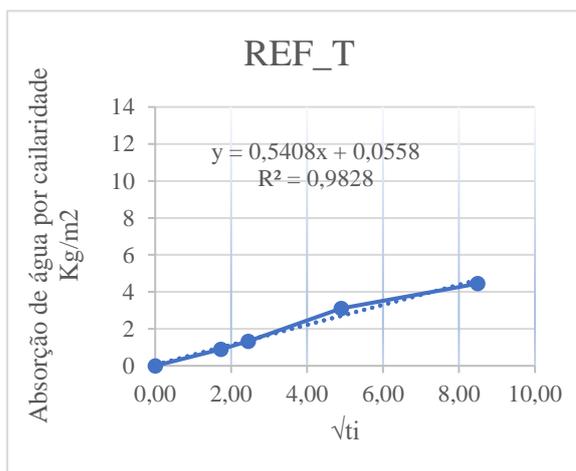
Atendendo ao que foi dito no parágrafo anterior, optou-se por comparar as absorções capilares dos diferentes tipos de betão, recorrendo às absorções por massa, em detrimento das alturas da ascensão capilar. Para tal, apresenta-se a Figura 4.6, na qual se pode visualizar a relação entre a absorção capilar, em função da absorção da massa e da área da secção do provete, e a raiz quadrada do instante t. Relembrando que, para cada composição efetuou-se uma regressão linear que melhor se ajustava ao conjunto de pontos, e cujo declive fornece o coeficiente de absorção capilar.



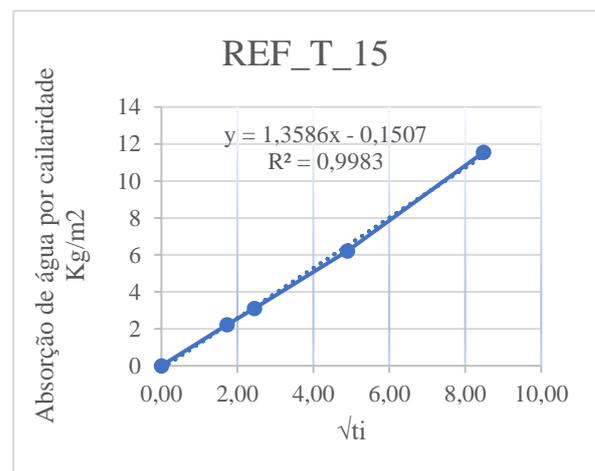
a)



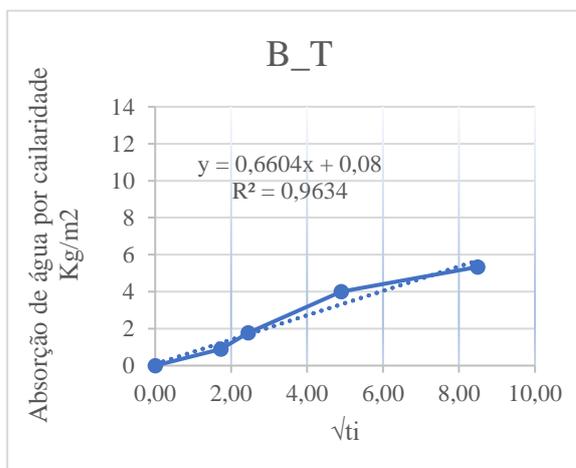
b)



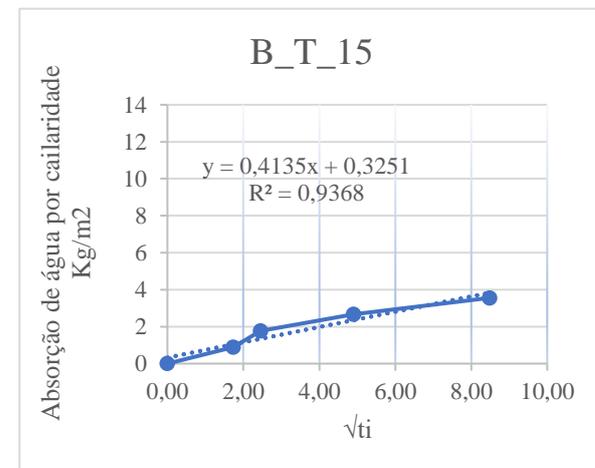
c)



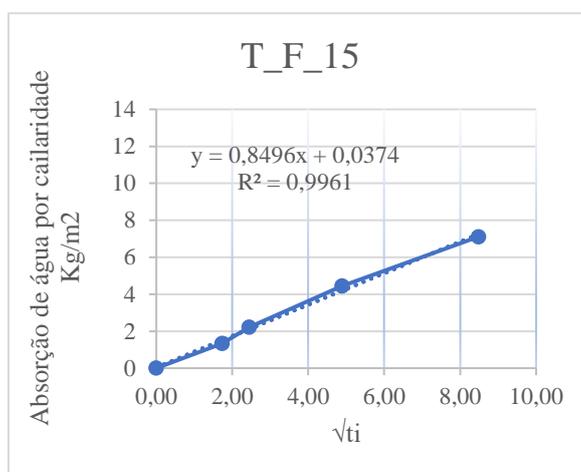
d)



e)



f)



g)

Figura 4.6 Regressão linear dos pontos de medição das várias composições:  
a) REF; b) REF\_B\_15; c) REF\_T; d) REF\_T\_15; e) B\_T; f) B\_T\_15; g) T\_F\_15

Avaliando os vários coeficientes de absorção capilar apresentados na Figura 4.6, é possível afirmar que a incorporação do pó calcário como parcial substituto do cimento, levou a um acréscimo da absorção capilar em quase todas as composições, à exceção da série B\_T\_15.

Quando se analisa a influência da substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, no coeficiente de absorção capilar, observa-se que a sua incorporação leva a que se obtenham betões com maior aptidão para absorver água. Exemplo disso foi o facto de o coeficiente de absorção capilar ter crescido cerca de 36 % na série REF\_T e 48 % na composição B\_T, isto em comparação com a mistura com apenas agregado natural, a REF. Complementando esta análise com a evolução à medida que o tempo foi decorrendo, verificou-se que, às 3 horas e às 6 horas, a incorporação não implicou um maior coeficiente de absorção. Pelo contrário, uma vez que numa fase inicial do ensaio este coeficiente era menor quando comparado com a mistura com agregados 100 % naturais. O coeficiente apenas se começou a superiorizar ao registado na série REF, quando se atingiram as 24 horas de ensaio.

Finalmente, importa referir os coeficientes de correlação próximos da unidade obtidos nas várias regressões lineares, traduzem uma proximidade entre os pontos experimentais e as mesmas retas.

#### 4.1.4. Absorção de água por imersão

Em seguida, apresentam-se os resultados mais significativos do ensaio de absorção de água por imersão, que foi descrito no ponto 3.4.4. No Quadro 4.6 resumem-se os valores obtidos.

Quadro 4.6 Absorção de água por imersão

Nomenclatura	Ai (%)	Ss (%)	coef. Variância (%)
REF	6,27	0,90	14,27
REF B 15	6,82	0,69	10,16
REF T	10,17	0,52	5,07
REF T 15	10,63	0,49	4,60
B T	7,32	1,19	16,28
B T 15	7,33	0,68	9,23
T F 15	11,11	1,94	17,47

Observando o Quadro 4.6 é possível inferir que a série que apresenta maior absorção de água é a T\_F\_15, com um valor de 11.11 %, seguida das séries REF\_T, e REF\_T\_15, com valores de absorção de água próximos de 10.17 % e 10.63 % respetivamente. Quanto à composição que apresenta a menor absorção, é a mistura REF, com um valor de 6.27 %. Neste ensaio, houve alguma dispersão dos resultados, já que a mistura T\_F\_15 apresentou um coeficiente de variância a rondar os 17 %, o que implica que é necessário algum cuidado nas conclusões tiradas com esse valor.

Procedendo agora a uma análise das Figuras 4.7 e 4.8, pode-se perceber que as conclusões tiradas aquando do estudo dos resultados apresentados no ensaio de absorção de água por capilaridade, são reforçadas neste ensaio. Nomeadamente, que a quantidade de agregado grosso reciclado incorporado nas composições em detrimento do agregado natural faz aumentar a absorção de água, sendo que neste caso, quanto maior for a percentagem de substituição maior será a absorção de água por imersão, conforme se pode ver comparando as séries REF\_T e B\_T com a série de REF que apresentam mais 38% e 14 % de absorção, respetivamente. Quanto ao pó calcário, como parcial substituto do cimento, conduz a betões com maior grau de absorção. No entanto, é um acréscimo muito reduzido variando apenas entre 0.06 % a 8 %.

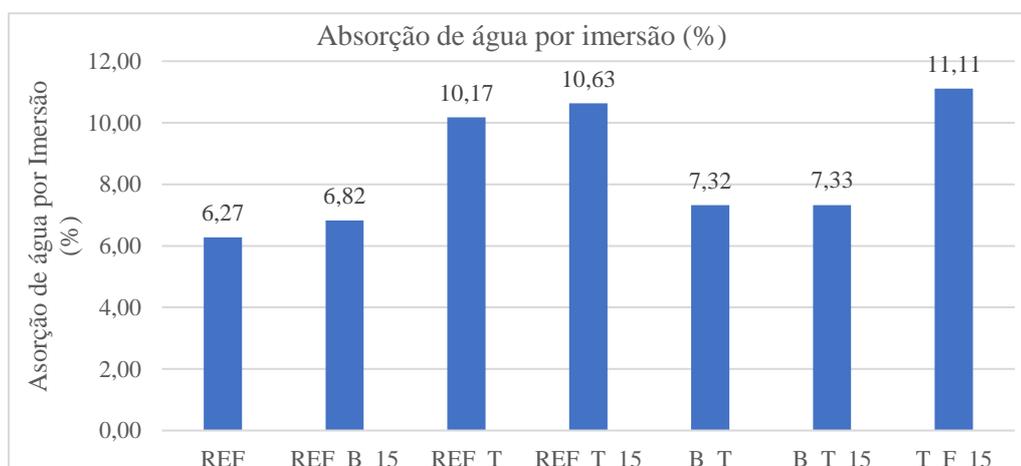


Figura 4.7 Comparação da absorção entre as composições convencionais e as composições com incorporação de resíduos reciclados

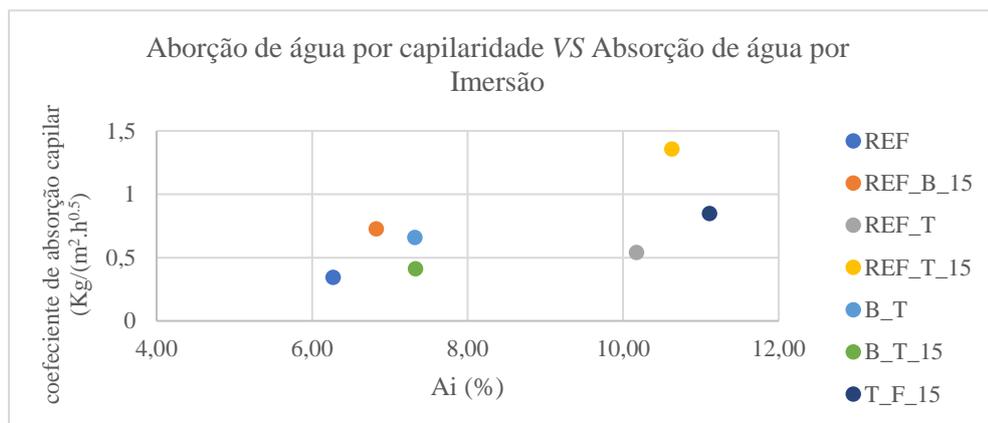


Figura 4.8 Absorção de água por capilaridade VS Absorção de água por imersão

Num olhar geral aos valores de absorção dos betões estudados, verifica-se que a diferença entre os valores não é muito significativa, no sentido que a composição com uma maior absorção por imersão é ligeiramente superior a 10 %, pelo que, e à semelhança do que concluíram André et al (2014), a substituição do agregado convencional pelo agregado reciclado no betão não induz uma diferença muito significativa quando totalmente imerso em água.

#### 4.1.5. Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons

Este ensaio decorreu seguindo a norma apresentada no capítulo 3.4.5, onde foi determinada a velocidade de propagação de ultrassons, a fim de avaliar a qualidade do betão obtido nas várias composições estudadas. Em seguida apresenta-se o Quadro 4.7, que resume os resultados obtidos.

Quadro 4.7 velocidade de propagação de ondas de ultrassons

Nomenclatura	velocidade de propagação em (m/s)	S <sub>s</sub> (m/s)	coef. Variância (%)
REF	4975	0,75	2,49
REF_B_15	4777	0,00	0,00
REF_T	4777	0,00	0,00
REF_T_15	5629	0,25	0,94
B_T	4458	1,25	3,71
B_T_15	4065	1,50	4,07
T_F_15	3932	1,25	3,28

Com recurso à Figura 4.9 conclui-se que a composição que apresenta uma maior velocidade de propagação de ondas de ultrassons é a REF\_T\_15 com uma velocidade 5629 m/s. No sentido inverso, encontra-se a série T\_F\_15 com a velocidade de propagação mais baixa, da ordem dos 3932 m/s.

Observando agora a influência da incorporação de resíduo no betão, pode afirmar-se que, de forma geral, a introdução de agregado grosso reciclado em detrimento do agregado grosso natural implica numa menor velocidade de propagação do som, ou seja, num betão que apresenta uma menor qualidade na sua estrutura interna. Este fenómeno poderá dever-se ao facto de o resíduo incorporado apresentar maior porosidade do que os agregados naturais, ou pelo facto de haver uma ligação menos coesa e compacta entre os vários componentes.

Quanto ao pó calcário, semelhante conclusão pode ser retirada. A sua utilização leva a que se obtenham betões com menores velocidades de propagação de ondas de ultrassons. Neste caso, a questão prende-se eventualmente pela redução da quantidade de ligante ativo presente na mistura, gerando um betão com menor qualidade. Há, no entanto, uma mistura que foi exceção às duas conclusões apresentadas anteriormente, a REF\_T\_15, sendo mesmo a que apresentou o betão com melhor resultado, melhor ainda do que o betão convencional.

Recorrendo ao Quadro 4.7 visualiza-se que o coeficiente de variância obtido para cada amostra, foi relativamente baixo, sendo o maior valor da ordem dos 4%, o que revela que a dispersão entre os resultados foi baixa, havendo, inclusive, séries que este coeficiente de variância foi de 0%.

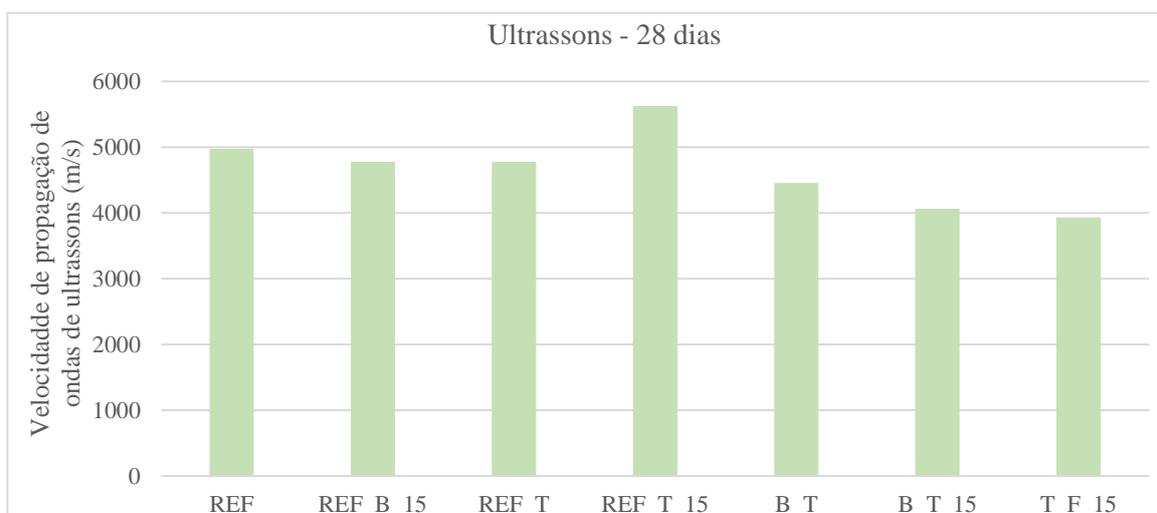


Figura 4.9 Velocidade de propagação de ondas de ultrassons (m/s)

A Figura 4.10 é apresentada com o intuito de se comparar a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas de ultrassons. Procedendo à sua análise, depreende-se que há uma certa tendência para que, quanto maior a resistência à compressão maior seja a velocidade de propagação de ondas de ultrassons, no que resulta num betão de melhor qualidade. Exemplo disto mesmo, é a série REF\_T\_15 que a apresenta uma das maiores resistências à compressão e a maior velocidade de propagação de ondas.

Já as composições B\_T e B\_T\_15 não seguem esta tendência, dado que apresentam valores de resistência à compressão consideráveis, no entanto não apresentam os maiores valores de velocidade de propagação de ondas de ultrassons.

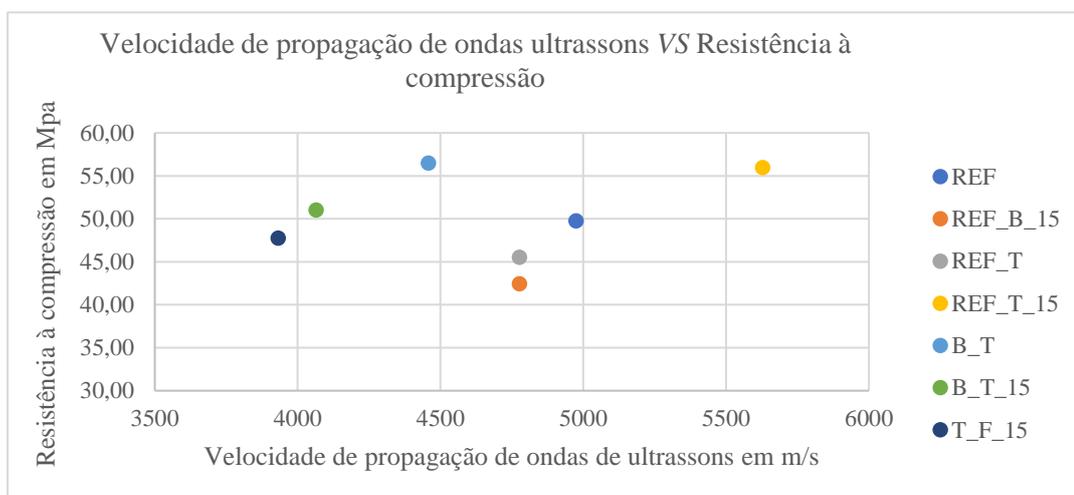


Figura 4.10 Velocidade de propagação de ondas ultrassons VS Resistência à compressão

#### 4.1.6. Módulo de elasticidade dinâmico

O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico foi realizado segundo o ponto descrito no capítulo 3.4.6, sendo que este parâmetro foi calculado por dois métodos diferentes, um seguindo o procedimento indicado no documento normativo NP EN 14146 – 2006, e o segundo calculado de forma indireta por meio da velocidade de propagação de ondas de ultrassons.

O Quadro 4.8 resume os principais resultados e o valor calculado para o módulo de elasticidade dinâmico calculado a partir da frequência natural de vibração do provete.

Quadro 4.8 Módulo de elasticidade dinâmico

Nomenclatura	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Média (Hz)	Ed <sub>F</sub> (GPa)	S (GPa)	coef. Variância (%)
REF	2318,52	1554	44,3	0,94	0,06
REF_B_15	2345,19	1597	45,9	0,47	0,03
REF_T	2238,52	1478	37,5	0,00	0,00
REF_T_15	2297,78	1519	40,7	0,47	0,03
B_T	2284,44	1587	44,2	0,94	0,06
B_T_15	2365,93	1585	45,7	11,81	0,75
T_F_15	2168,81	1422	33,7	0,47	0,03

Analisando a Figura 4.11 visualiza-se que a série que apresenta um maior destaque do módulo de elasticidade é a REF\_B\_15, com um valor de 45.9 GPa. Importa ainda salientar a composição B\_T\_15, que também apresenta um valor considerável, e apenas 0.6 % inferior, com um total de 45.7 GPa.

Numa outra perspetiva, o betão que apresenta o menor valor do módulo de elasticidade dinâmico é o T\_F\_15, apresentando apenas 33.7 GPa, um valor cerca de 36 % inferior ao valor máximo.

Verificando agora os resultados que incorporam na sua composição o agregado grosso reciclado, conclui-se que a sua introdução na mistura faz descer o módulo de elasticidade, isto quando comparado com o betão convencional equivalente. Esta descida é tanto maior quanto maior for a percentagem de agregado natural substituído, conforme comprovam os valores das séries REF\_T e B\_T, que têm um módulo de elasticidade inferior cerca de 17% e 0.21 %, respetivamente.

No sentido inverso, evolui a relação entre a substituição parcial do cimento e o módulo de elasticidade, já que, em todas as misturas, a introdução do pó calcário fez com que o módulo de elasticidade apresentasse um valor maior, quando comparado com misturas em tudo semelhantes menos na quantidade de pó incorporada, variando entre valores a rondar o 3 % e os 8 %.

Uma vez mais, os valores obtidos para o coeficiente de variância traduzem uma grande confiança nos resultados obtidos, já que este parâmetro, em nenhuma das séries, ultrapassou o 1 %, chegando mesmo a ser zero para a composição REF\_T. Este coeficiente de variância praticamente nulo está associado ao tipo de provete, que permitia obter um sinal com um pico de frequência muito bem definido e uma coerência próxima do 1, conforme se pode visualizar na Figura 4.12.

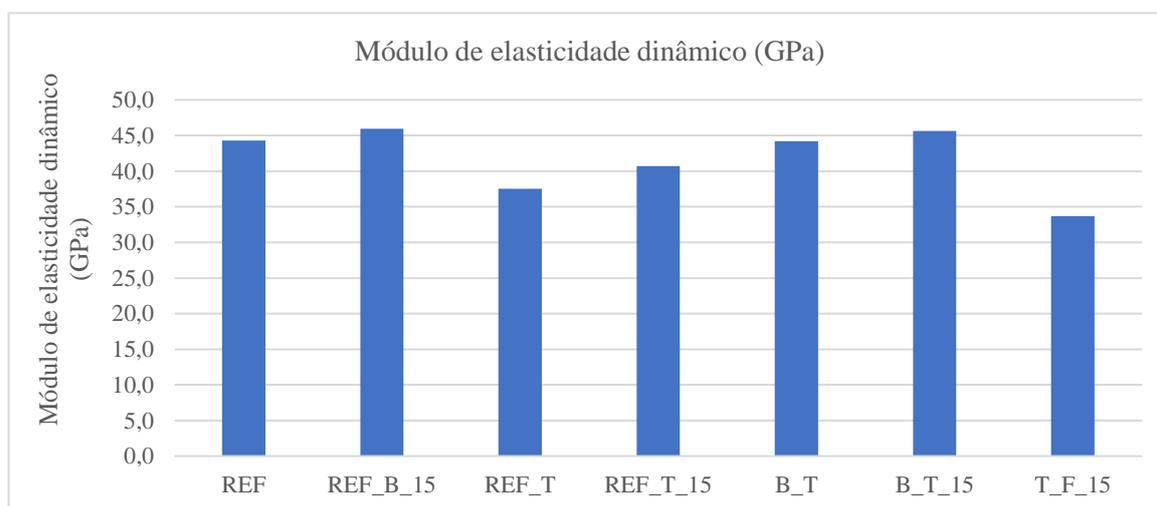


Figura 4.11 Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)

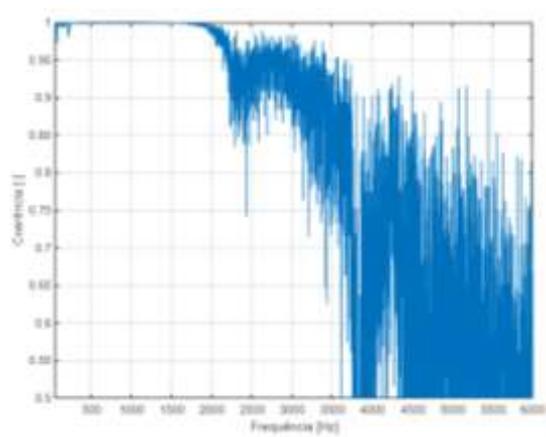


Figura 4.12 Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico: Coerência

A Figura 4.13 ilustra a comparação do módulo de elasticidade e a resistência à flexão, sendo que facilmente se pode concluir que, ao aumento da resistência à flexão está associado o aumento do módulo de elasticidade dinâmico, como seria de esperar à priori. Esta conclusão apenas não é válida para a série REF\_T\_15 que apresenta a maior resistência à flexão, embora não seja acompanhada do maior valor para o módulo de elasticidade.

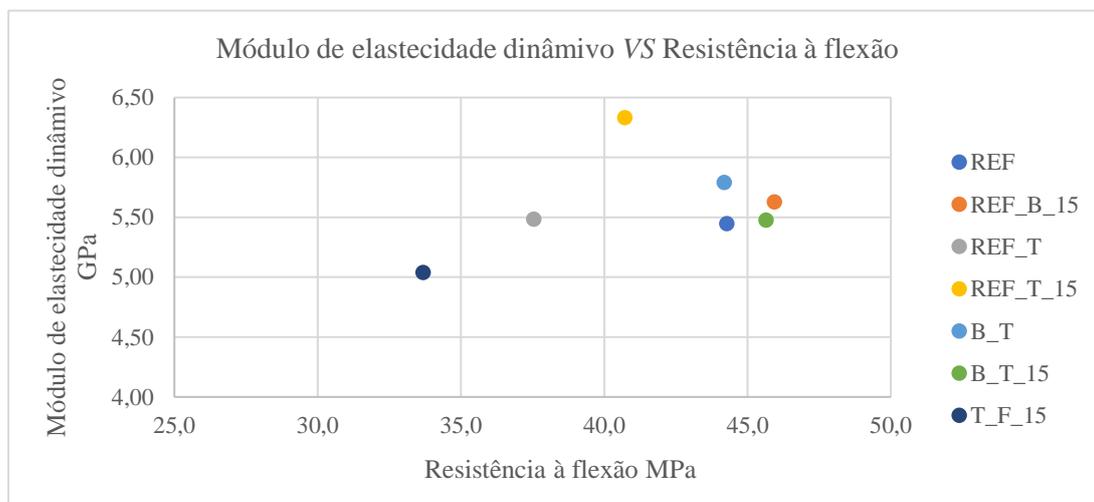


Figura 4.13 Módulo de elasticidade dinâmico VS Resistência à flexão

Procedeu-se ao cálculo do módulo de elasticidade estático através de uma correlação com o módulo de elasticidade dinâmico, conforme apresentado no capítulo 3.4.6. A Figura 4.14 resume os resultados comparando os dois módulos.

Analisando a Figura 4.14, é perceptível que o valor calculado para o módulo de elasticidade estático, é menor que o valor do módulo de elasticidade dinâmico, num intervalo de valores que varia entre os 6.5 e o 7.3 MPa. O facto de o módulo de elasticidade estático apresentar um valor menor, quando comparado com o dinâmico era expectável e que vai ao encontro da bibliografia,

nomeadamente, de Popovics et al (2008), que também obtiveram valores maiores para o módulo de elasticidade dinâmica em testes feitos em betão, associando este facto à própria composição do betão.

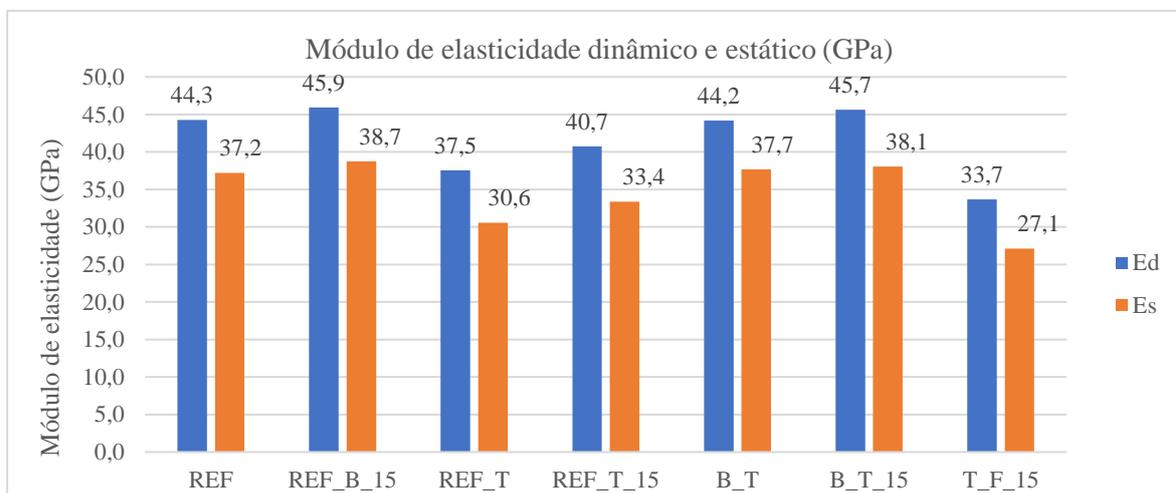


Figura 4.14 Módulo de elasticidade dinâmico e estático (GPa)

Uma vez medida a velocidade de propagação das ondas de ultrassons, resolveu-se utilizar a fórmula apresentada no ponto 3.4.6, equação (8), a fim de comparar os módulos de elasticidade dinâmicos obtidos por dois métodos diferentes. A Figura 4.15 resume essa comparação.

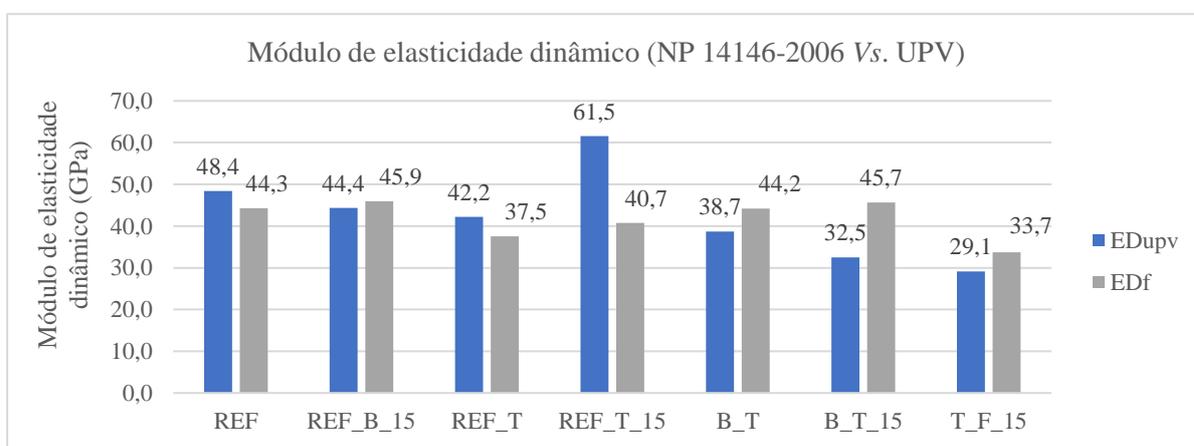


Figura 4.15 Módulo de elasticidade dinâmico (NP 14146-2006 Vs. UPV)

Analisando a Figura 4.15, pode-se perceber que há uma diferença de valores entre os módulos de elasticidade dinâmico, calculado segundo a NP EN 14146 – 2006, ou segundo a Equação (8), que tem por base a velocidade de propagação de ondas de ultrassons. No entanto, esta diferença não é assim tão significativa, nomeadamente, em módulo varia de 1.6 a 5.5 GPA, à exceção de duas composições, a REF\_T\_15 e a B\_T\_15.

## 5. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Ao longo deste estudo, desenvolveram-se várias composições de betão, procedendo a uma caracterização experimental de várias características, entre as quais, a resistência mecânica desses betões. Este capítulo surge com o intuito de avaliar a capacidade desse betão vir a ser usado em peças de mobiliário urbano. Para tal, recorreu-se a um programa de análise de elementos finitos, o Mecway, onde foram modeladas 3 peças de mobiliário urbano, designadamente dois bancos de jardim com diferentes geometrias e uma floreira.

Ao longo deste capítulo será apresentada uma abordagem simples ao método dos elementos finitos (MEF). Em seguida, proceder-se-á à modelação das várias peças, apresentando os resultados obtidos e verificando se cumprem o critério de rotura considerado.

Uma análise baseada no MEF parte da modelação do sistema que vai ser estudado, dividindo esse domínio num número finito de segmentos, áreas ou volumes, aos quais se dá o nome de elementos finitos. A este passo dá-se o nome de discretização do domínio. Aos elementos são atribuídas funções de forma, as quais expressam o campo da variável, como por exemplo, temperatura, velocidade, deslocamento, entre outros. Estas funções de forma são definidas em termos de uma variável dependente em certos pontos, denominados como nós da malha de elementos finitos. Dependendo dos elementos, os nós podem coincidir com vértices dos mesmos, sendo que podem ainda existir nós ao centro das arestas, faces ou no interior do elemento. A Figura 5.1 ajuda a clarificar estes conceitos.

Desta forma, os valores da variável nos nós e as respetivas funções de aproximação, permitem definir completamente o comportamento do campo da variável dentro dos elementos. Assim sendo, é possível resolver o problema de determinar o comportamento de um número infinito de pontos dentro de determinado domínio, através do cálculo num número finito de pontos, os nós da malha de elementos (Teixeira-Dias et al, 2010).

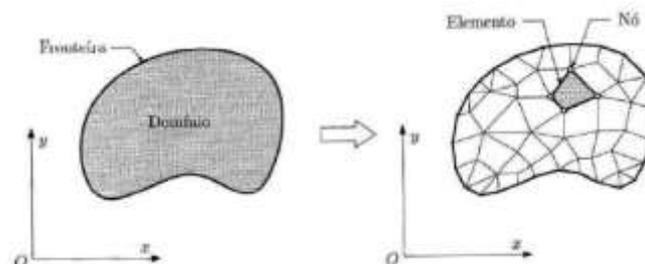


Figura 5.1 Representação esquemática da discretização do domínio em elementos finitos

Importa ainda realçar que o grau de aproximação da solução depende não só da quantidade de elementos e da sua geometria, mas também do tipo de funções de forma escolhidas para representar o campo da variável, sendo que estas devem satisfazer certos requisitos de compatibilidade em função do problema a ser estudado (Teixeira-Dias et al, 2010).

### 5.1. Modelos numéricos no programa Mecway

A análise dos modelos numéricos das peças de mobiliário urbano foi executada com auxílio de um software comercial, o Mecway. Este é um programa de análise de elementos finitos com o principal foco em simulações mecânicas e térmicas, capaz de realizar análise estáticas lineares, não lineares, dinâmicas, entre outras (Mecway Finite Element Analysis, 2023). Embora seja possível criar os modelos 3D pela própria interface do programa, optou-se por recorrer ao SketchUP para o desenho da floreira, enquanto os modelos a 3 dimensões dos bancos de jardim foram diretamente fornecidos por uma das entidades promotoras do projeto Life4Stone (figura 5.3).

Uma vez importados os modelos para a interface do Mecway recorreu-se a uma das funcionalidades do programa, que consiste em gerar a malha de elementos finitos que melhor se ajusta à geometria do modelo em questão. O elemento que foi considerado é identificado na biblioteca do Mecway com a referência Tet10, sendo um elemento sólido tetraédrico com 10 nós, conforme se pode visualizar na figura 5.2.

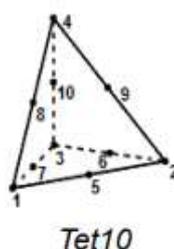
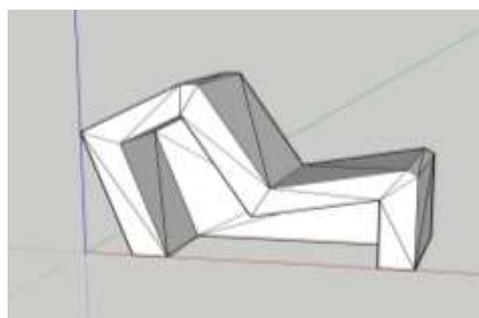
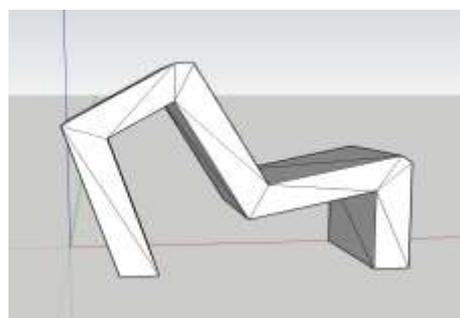


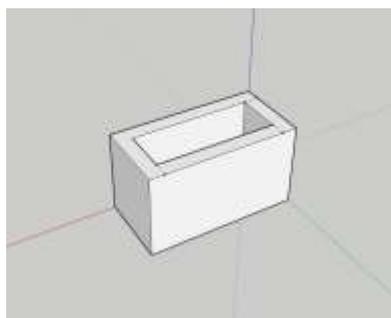
Figura 5.2 Elemento finito utilizado (Tet10)



a)



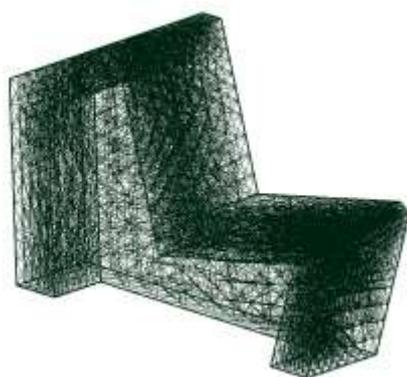
b)



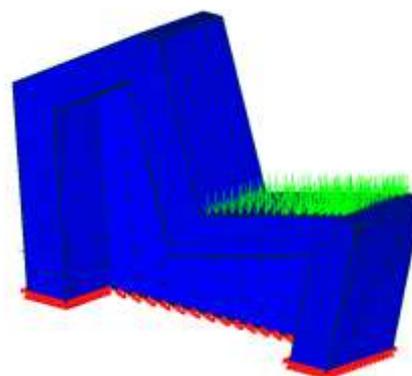
c)

Figura 5.3 Modelos 3D das peças de mobiliário urbano: a) Banco de jardim M; b) Banco de jardim M2; c) Floreira

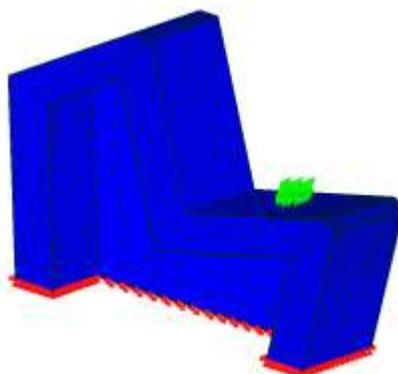
A Figura 5.4 representa a malha de elementos finitos que foi gerada para o banco de jardim, as condições de apoio e as cargas aplicadas.



a)



b)



c)

Figura 5.4 Banco M: a) Malha de elementos finitos; b) e c) Condições de apoio e cargas aplicadas

Para o banco de jardim do tipo M foi gerada uma malha com 22 017 nós e 14 080 elementos. Considerou-se que o banco se encontrava totalmente fixo ao chão, ou seja, que a base estava encastrada. Como tal, aplicou-se nas faces inferiores um apoio fixo, que restringe totalmente a deslocação e rotação em todas as direções. Quanto às cargas aplicadas, foram avaliados dois tipos de carregamento: no primeiro caso, figura 5.4 b), assumiu-se um carregamento de 1 kN distribuído por toda a face do assento, o que corresponde a 0.0058 MPa; no segundo caso, figura 5.4 c), considera-se apenas a aplicação de cargas pontuais de 0.05 kN em 21 nós, numa zona onde se irá concentrar o peso de uma pessoa sentada. Esta zona foi definida de forma arbitrária, mas tentando representar aproximadamente a situação de utilização real. De notar que a carga de 1 kN representa a carga gerada por uma pessoa com uma massa de aproximadamente 100 kg. Para além destes carregamentos, em cada caso, considera-se o peso próprio da peça de mobiliário urbano e uma aceleração da gravidade de  $9.8 \text{ m/s}^2$ . A figura 5.5 representa a malha de elementos finitos que foi gerada para o banco de jardim M2, as condições de apoio e as cargas aplicadas.

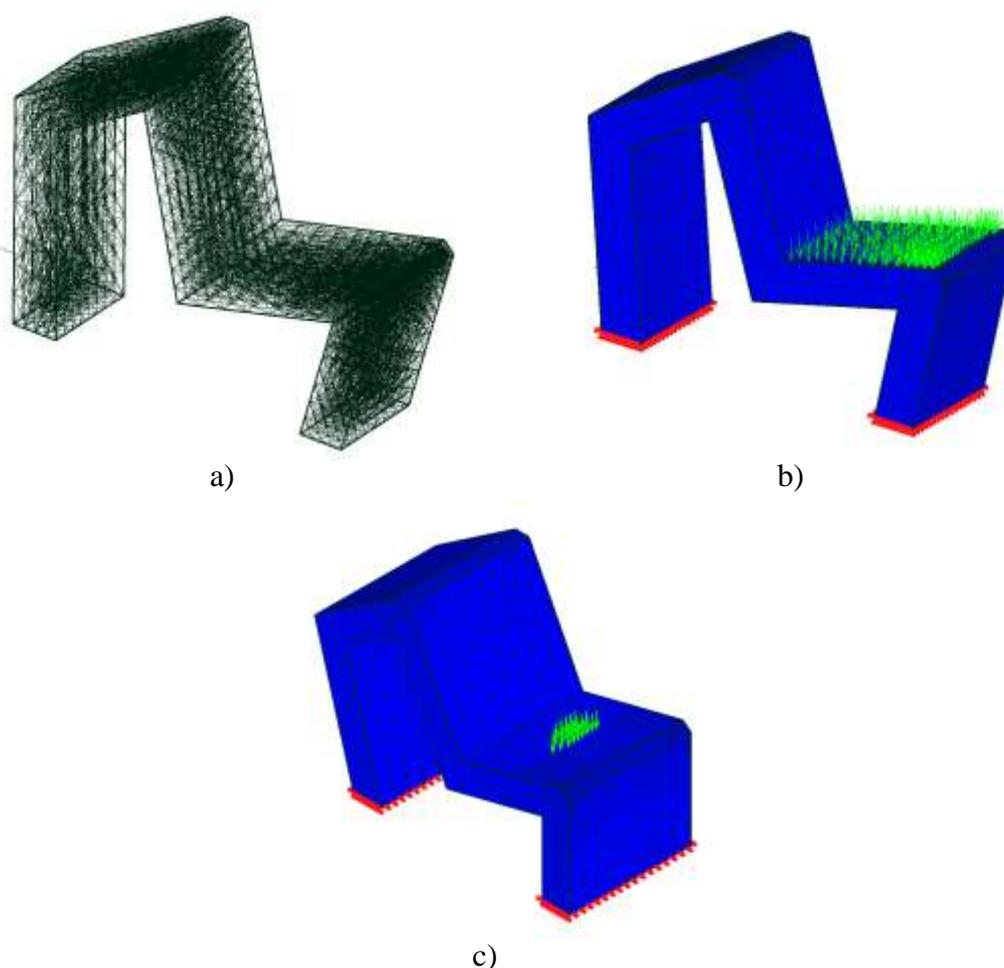


Figura 5.5 Banco M2: a) Malha de elementos finitos; b) e c) Condições de apoio e cargas aplicadas

Para o banco de jardim M2 gerou-se uma malha com 19 557 nós e 12 288 elementos, sendo que as condições de apoio e os carregamentos aplicados foram em tudo semelhantes ao banco M. No caso da floreira a malha de elementos finitos apresenta 4833 nós e 3072 elementos. Quanto às condições de apoio, assumiu-se uma vez mais um apoio fixo na face inferior da floreira, restringindo o deslocamento e a rotação. Em relação aos carregamentos, considerou-se uma carga horizontal, com o valor de zero à superfície da floreira e o valor máximo no fundo interior. Na face interior da floreira há ainda um carregamento distribuído vertical de  $6.4 \text{ kN/m}^2$ . Importa salientar que este carregamento simula que a floreira se encontra cheia de terra de jardim, com um peso volúmico de  $1600 \text{ kg/m}^3$ . À semelhança dos bancos de jardim, há ainda a atuar no modelo a aceleração da gravidade com o valor de  $9,2 \text{ m/s}^2$  e o peso próprio da floreira. A Figura 5.6 ilustra malha de elementos finitos considerada, as condições de apoio e os carregamentos aplicados.

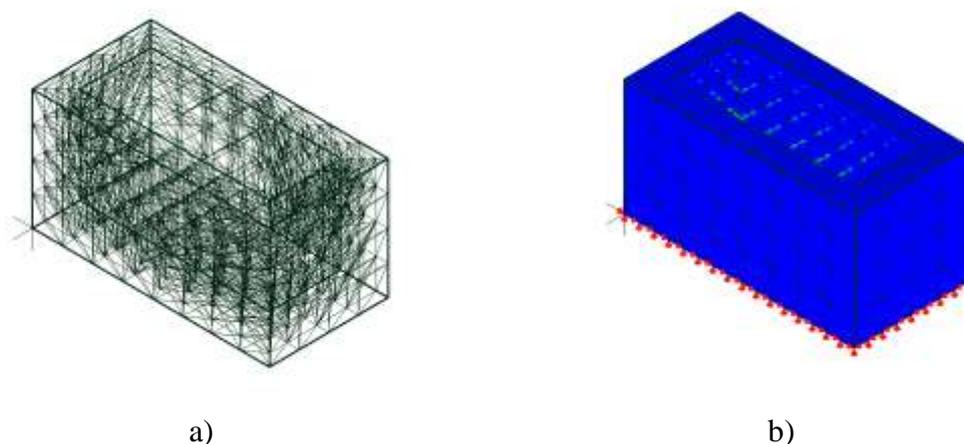


Figura 5.6 Floreira: a) Malha de elementos finitos; b) e c) Condições de apoio e cargas aplicadas

A composição de betão escolhida foi a REF\_T\_15, que em geral apresentava as melhores características mecânicas determinadas experimentalmente, já que apresentava o segundo maior valor de resistência à compressão e o maior valor de resistência à flexão. Embora o valor de absorção de água fosse o mais alto nos dois tipos de ensaio de absorção realizados, considera-se que não haveria uma diferença muito significativa que fizesse crer que a durabilidade do betão iria estar suficientemente comprometida. O quadro 5.1 resume as características do material que foi considerado no Mecway.

Todas as análises realizadas consideraram um comportamento linear 3D.

Quadro 5.1 Características do material

Nomenclatura	Resistência à compressão (Mpa)	Resistência à tração por flexão (Mpa)	Es (GPa)	Densidade (Kg/m3)
REF_T_15	55,97	6,33	33,39	2297,78

## 5.2. Apresentação e discussão dos resultados

Atendendo que existe uma infinidade de estados de tensão bi e tridimensionais que podem provocar a rotura, a difícil execução de ensaios deste tipo e os seus custos bastante elevados, levam à necessidade de recorrer aos chamados critérios de rotura para avaliar o comportamento do material. Estes critérios permitem prever, através das tensões que provocam a rotura em tração e em compressão unidimensional, as condições em que se dá a rotura nestes mesmos estados (Dias da Silva, 2013).

Tendo em atenção que o material em questão é considerado frágil, usou-se o critério de rotura de Mohr, o qual apresenta os resultados que melhor se aproximam do que se passa experimentalmente (Dias da Silva, 2013). O critério garante que o material não rompe enquanto a seguinte condição for verificada:

$$\frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} < \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_t}{\sigma_t - \sigma_1 - \sigma_3} \quad (10)$$

Em que,  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  representam as tensões principais, e  $\sigma_t$  e  $\sigma_c$  são a tensão de rotura em tração e compressão uniaxiais, respetivamente.

Sabendo que se trata de um material frágil, as tensões de tração não serão superiores a  $\sigma_t$ , e que os resultados da Equação (10) apenas são considerados viáveis se a  $\sigma_3$  for inferior a zero, então a Equação (10) pode ser escrita na seguinte condição (Dias da Silva, 2013):

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_t} - \frac{\sigma_3}{\sigma_c} < 1 \quad (11)$$

A Equação (11) traduz então o critério de Mohr para a previsão da rotura de materiais frágeis, sendo que no Mecway foi programada uma expressão equivalente (Equação (12)) de modo a garantir que todos os nós eram devidamente verificados.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_t} - \frac{\sigma_3}{\sigma_c} - 1 < 0 \quad (12)$$

A Figura 5.7 representa a deformada do banco de jardim do tipo M, que nos permite visualizar que a maior deformação se dá na zona superior, onde não há qualquer apoio ao chão. Apesar disso, o valor obtido para este tipo de carregamento, é relativamente baixo, na ordem do 0.002 mm.

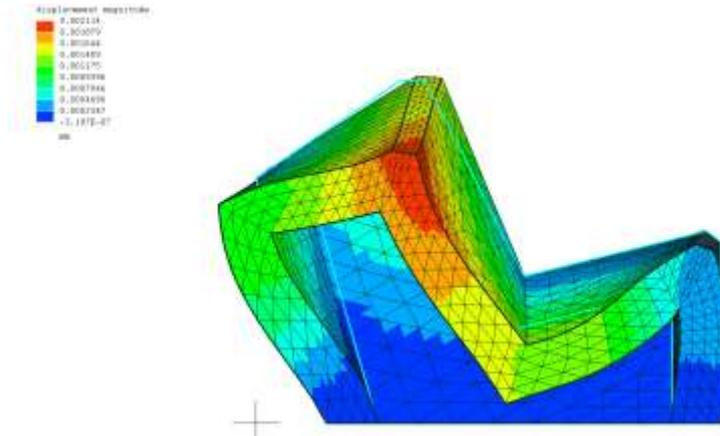


Figura 5.7 Posição deformada do Banco de jardim M

A figura 5.8, mostra o banco de jardim M, com o critério de rotura de Mohr representado. Antes de passar a uma análise do resultado obtido, importa referir que apenas iria haver rotura caso os valores apresentados fossem positivos, caso contrário estávamos no domínio da segurança. Ainda na figura 5.8 pode-se claramente perceber, que para a situação modelada não haveria rotura de nenhum dos pontos, sendo que o ponto que estava mais próximo da rotura apresentava um valor de -0.99, ou seja, ainda muito longe de uma possível rotura. A deformada apresentada indica que a zona mais próxima da rotura é onde se dá o maior deslocamento. Nessa zona, as fibras inferiores estão essencialmente sujeitas à tração, como se pode ver na figura 5.9 (onde  $\sigma_1$  é positiva e máxima), resultando na zona mais próxima da rotura uma vez que o material considerado apresenta uma tensão de rotura bastante menor em tração do que em compressão. Na figura 5.10 encontra-se representado um resultado do programa Mecway, com a posição deformada e o gráfico de cores para o critério de rotura de Mohr. Neste caso, simulou-se uma carga de pico de 250 KN, que se distribui pela face do assento em 1.46 Mpa. Este carregamento leva à rotura do banco, uma vez que se atinge valores positivos no critério de Mohr, sendo que o grafismo de cores foi limitado apenas aos valores negativos. Portanto, na figura 5.10 é possível visualizar certas zonas a preto, que indicam quais os primeiros locais a romper. Apesar deste carregamento levar à rotura do banco, é necessário ter em conta que é um carregamento altamente improvável de acontecer num banco de jardim, e apenas foi modelado para que se percebesse quais as zonas que iriam romper primeiro e para mostrar que era necessário um carregamento extremamente elevado para que se atingisse a rotura.

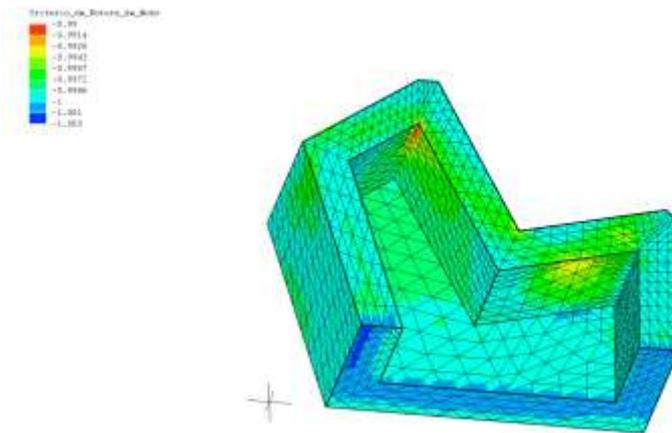


Figura 5.10 Banco M com carregamento distribuído: Critério de rotura de Mohr,

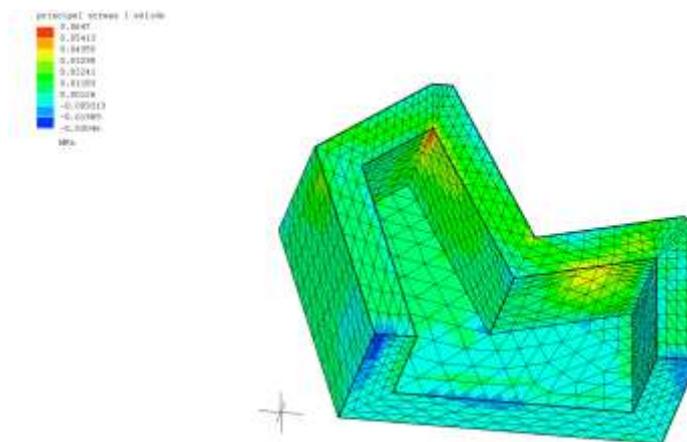


Figura 5.10 Banco M com carregamento distribuído: Tensão principal máxima

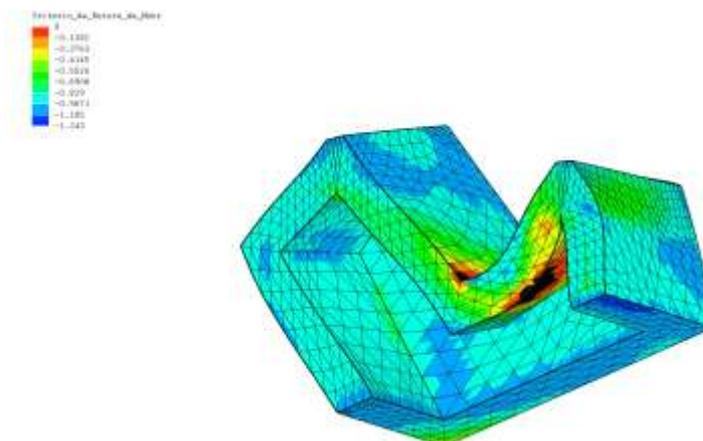


Figura 5.10 Critério de rotura de Mohr e deformada para um carregamento distribuído de 1.46 MPa.

Para o banco de jardim M com o carregamento aplicado nos nós (caso 2), a Figura 5.11 mostra a deformada obtida. Em relação ao primeiro caso, verifica-se uma deformada semelhante, com um deslocamento mais pequeno, da ordem dos 0.0016 mm. Já a Figura 5.12, mostra o critério de rotura de Mohr para aquele tipo de carregamento, que mais uma vez mostra não haver rotura. Quando comparado com o carregamento distribuído, constata-se que se está ligeiramente mais longe da rotura, já que o valor apresentado é menos negativo, o que vai ao encontro da diferença encontrada na magnitude dos deslocamentos entre os dois casos de deslocamento.

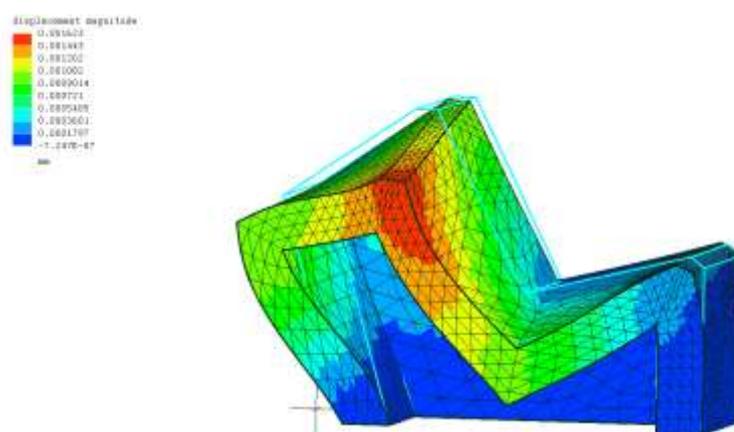


Figura 5.11 Banco M, carregamento aplicado nos nós: deformada

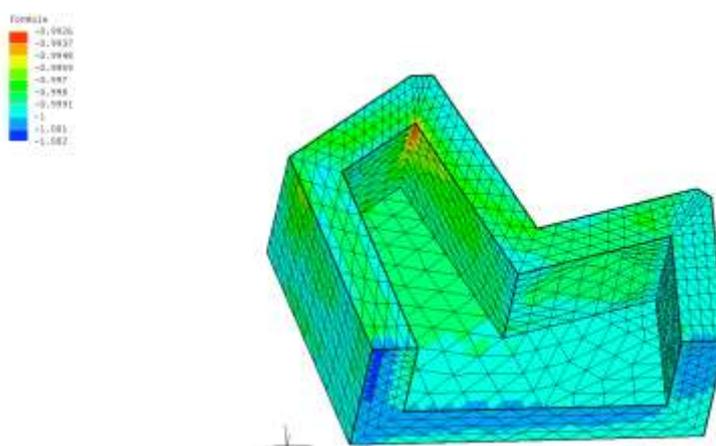


Figura 5.12 Banco M, carregamento aplicado nos nós: Critério de rotura de Mohr

À semelhança do primeiro carregamento, elevou-se a carga para 250 kN dividida pelos 21 nós considerados inicialmente, o que fez um total de 12 kN por nó. A figura 5.13 representa a posição deformada e o grafismo de cores para este carregamento. Pela observação da mesma percebe-se que, à medida que se vai aumentando a carga dos nós, a deformada vai-se

acentuando, atingindo-se o máximo deslocamento na zona dos nós carregados. É ainda nessa zona que se concentram maiores tensões, pelo que será nessa zona que o material irá entrar em rotura primeiro, no entanto para o carregamento considerado tal não acontece.

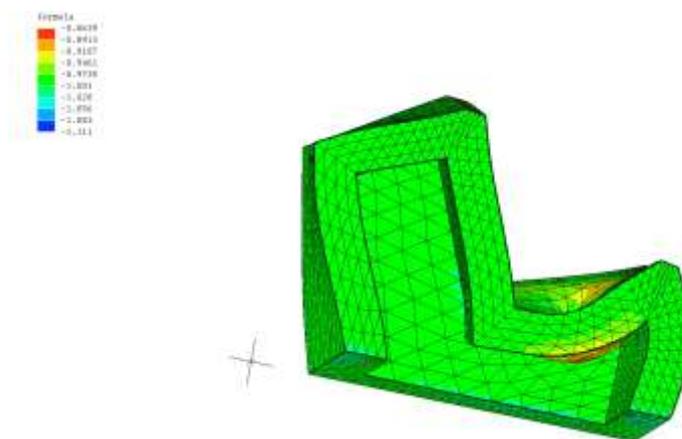


Figura 5.13 Critério de rotura de Mohr e deformada para um carregamento aplicado nos 21 nós de 12 kN.

Comparando os dois tipos de carregamento, percebe-se que o primeiro caso será mais representativo da realidade e do comportamento do material na generalidade do banco, enquanto o resultado do segundo caso de carregamento acaba por apresentar uma deformação muito localizada, concentrada nos nós carregados.

Para o caso do banco de jardim M2, semelhante raciocínio foi executado. A Figura 5.14 mostra a posição deformada para o primeiro caso de carregamento, uma carga distribuída de 0.058 Mpa. Para este caso a deformada atinge o máximo de 0.0068 mm.

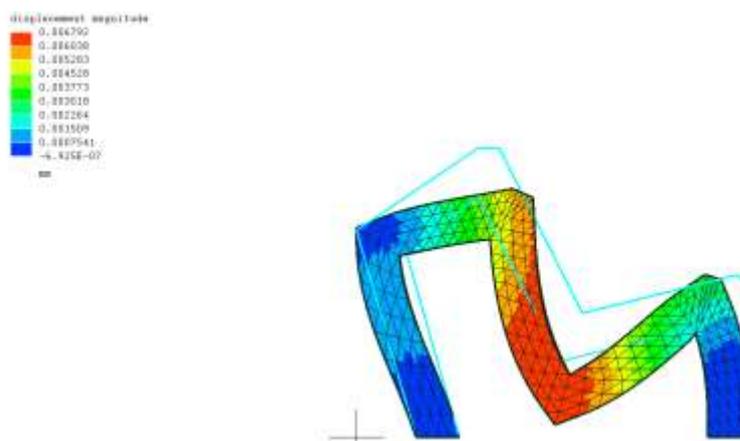


Figura 5.14 Posição deformada do Banco de jardim M2

Na Figura 5.15 apresenta-se o banco de jardim M2 com o grafismo indicativo do critério de rotura de Mohr. À semelhança do que se passou com o banco M, as zonas onde a rotura está mais perto de acontecer, são as zonas em tração, conforme se pode ver na Figura 5.16. Embora uma vez mais se tenha uma certa folga, já que o valor máximo é na ordem dos -0.97.

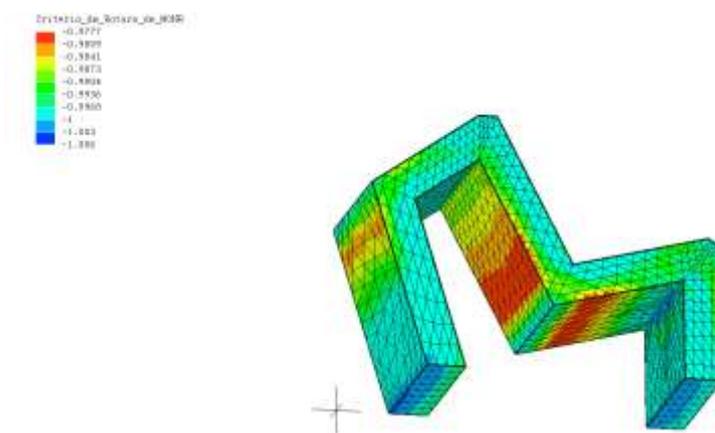


Figura 5.15 Banco M2 com carregamento distribuído: Critério de rotura de Mohr

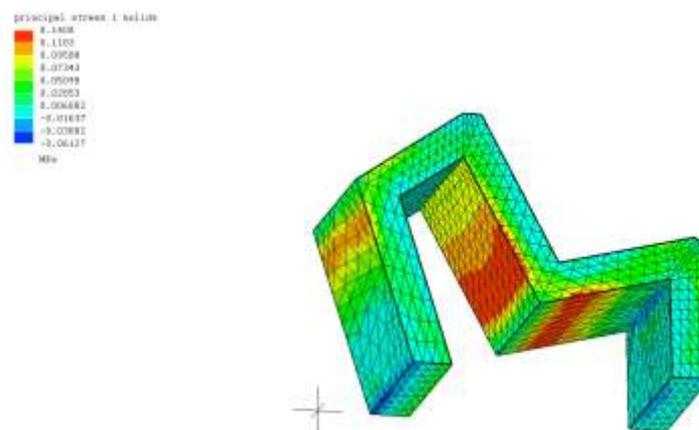


Figura 5.16 Banco M2 com carregamento distribuído: Tensão principal máxima

Também para este caso aumentou-se o carregamento distribuído para um total de 1.46 MPa, com o intuito de perceber quais as zonas que iriam romper primeiro, representadas a preto no grafismo de cores, e poder fazer-se uma comparação com o outro tipo de banco. A Figura 5.17 representa a deformada e o critério de rotura para esse mesmo caso.

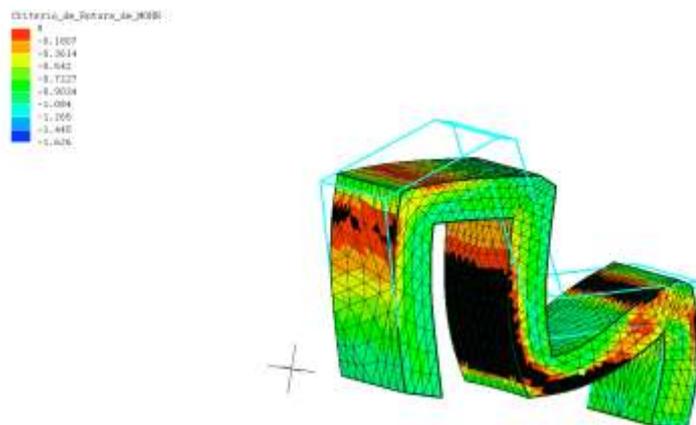


Figura 5.17 Critério de rotura de Mohr e deformada para um carregamento distribuído de 1.46 MPa

Além disso, para este tipo de banco considerou-se um segundo tipo de carregamento, uma carga aplicada em 21 nós de 0.05 kN. A Figura 5.18 representa a deformada obtida para este caso de carga, que é muito semelhante há obtida pelo carregamento distribuído, embora com uma magnitude mais pequena, de 0.0049 mm.

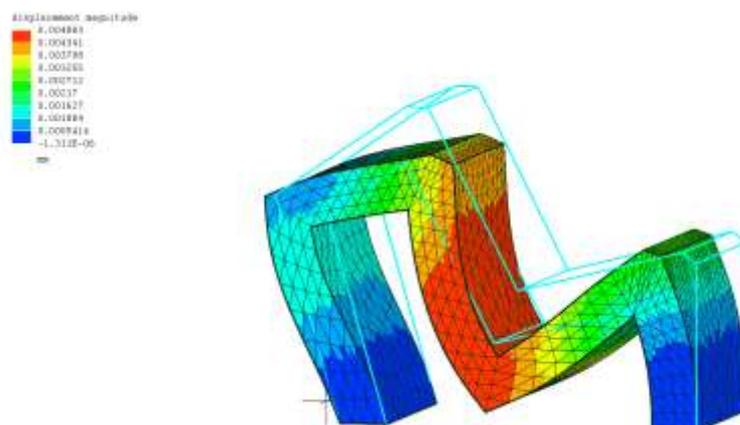


Figura 5.18 Banco M2, carregamento aplicado nos nós: deformada

No que ao cumprimento do critério de rotura concerne, verificamos pela Figura 5.19 que o critério é cumprido na plenitude em todos os pontos, no entanto, em relação ao carregamento distribuído apresenta-se ligeiramente mais longe da rotura.

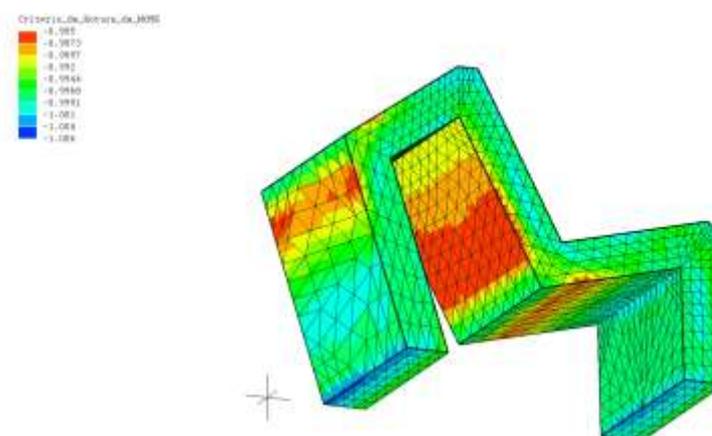


Figura 5.19 Banco M2, carregamento aplicado nos nós: Critério de rotura de Mohr

Ainda neste modelo, aumentou-se o valor da carga aplicada nos nós para o total de 12 kN, uma vez mais para se poder comparar com o banco de jardim M. A Figura 5.20 mostra a deformada do banco em questão e com critério de rotura para o carregamento indicado. Neste contexto, a deformada manteve uma forma aproximada ao carregamento distribuído, no entanto, volta a ver-se uma certa tendência para esta deformada ser mais acentuada na zona do nós carregados, nos quais a rotura está mais próxima de valores positivos, embora, uma vez mais não se tenha atingido a rotura.

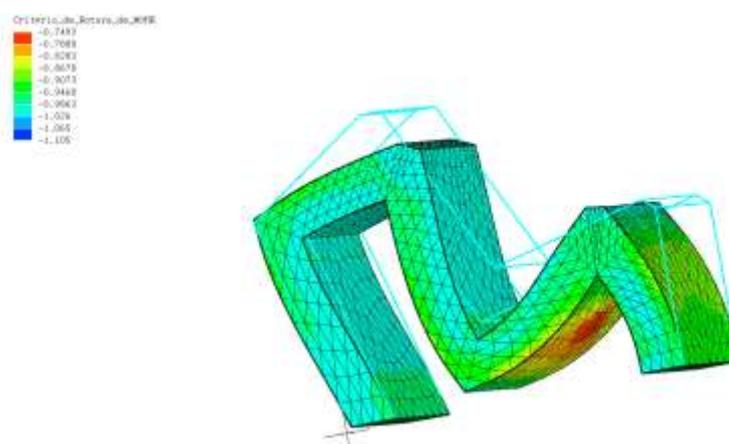


Figura 5.20 Critério de rotura de Mohr e deformada para um carregamento aplicado nos 21 nós de 12 kN

Como comentário final em relação aos dois bancos, refira-se que o banco de jardim M apresenta um comportamento que é claramente superior ao banco M para todos os tipos de carregamento considerados e avaliados. No entanto, para as aplicações previstas, o banco do tipo M2 tem uma capacidade de resistência satisfatória, pelo que se pode considerar que os dois tipos de banco são viáveis de ser executados com o betão identificado, REF\_T\_15.



Em suma, pode-se concluir que todas as peças estudadas irão cumprir as suas funções quando sujeitas a condições de carregamento ditas normais. Importa ainda realçar que estas geometrias foram idealizadas para serem executadas recorrendo apenas a betão, sem a necessidade de armaduras, daí a sua robustez. Conclui-se que este último facto é cumprido, portanto, todas as peças de mobiliário urbano analisadas conseguem resistir sem a necessidade das tradicionais armaduras.

## 6. PROTÓTIPO DA FLOREIRA

Neste capítulo será apresentado um protótipo à escala real de uma das peças de mobiliário urbano modeladas no programa de elementos finitos. Ao longo do capítulo será feita uma breve descrição do processo de betonagem, e por último, irá apresentar-se uma fotografia com a floreira já desmoldada e pronta ser usada.

### 6.1. Betonagem da floreira

De uma forma geral, o procedimento que foi usado foi em tudo semelhante ao seguido para a betonagem dos vários provetes, sendo que apenas, apenas diferiu foi o modo de vibração da peça. Nos moldes recorreu-se a uma mesa vibratória, ao passo que para a floreira utilizou-se um vibrador elétrico com agulha, por uma questão de facilidade do processo de vibração. Procurou-se ter algum cuidado ainda com o molde usado, recorrendo a serra juntas para ter a certeza de que não havia deformações da cofragem, enquanto o betão não atingisse a presa necessária, conforme se pode ver pela Figura 6.1.



a)



b)

Figura 6.1 Floreira: a) Cofragem; b) No fim da betonagem

### 6.2. Protótipo à escala real

A figura 6.2 mostra uma fotografia do protótipo no fim de desmoldado.



Figura 6.2 Floreira desmoldada

## 7. CONCLUSÃO

O presente projeto inseriu-se num trabalho de investigação que vinha a decorrer no Departamento de Engenharia civil, o Life4Stone. O principal objetivo deste projeto consistiu em desenvolver e caracterizar um betão baseado no aproveitamento de resíduos resultantes da indústria da transformação de pedra natural, capaz de ser usado no fabrico de elementos pré-fabricados de mobiliário urbano. Para tal, realizou-se uma caracterização experimental do desempenho mecânico dos compósitos de betão, que incorporavam dois tipos de resíduos provenientes de uma das empresas promotora do projeto: O pó calcário, proveniente do corte de pedra, que era um resíduo de uma granulometria mais fina. Este produto foi usado para testar uma eventual substituição parcial do cimento. O segundo resíduo, designado tout venant, constituído por partículas granulares de maiores dimensões, cujo objetivo principal passava por substituir em parte, ou eventualmente de forma integral, os agregados grossos naturais, comumente usados no betão convencional.

O presente trabalho permitiu chegar às seguintes conclusões em relação ao comportamento mecânico dos betões estudados:

- A introdução do pó calcário como parcial substituto do cimento, conduz a um ligeiro decréscimo da resistência à compressão, quer aos 7 dias ou aos 28 dias. Por outro lado, a incorporação de resíduos granulares de maiores granulometrias, em substituição dos agregados convencionais, permite produzir betões com uma maior ou idêntica resistência à compressão, em relação ao betão tradicional.
- Os betões aos quais foi adicionado o resíduo tout venant apresentaram uma menor massa volúmica e ao mesmo tempo uma maior ou semelhante resistência mecânica à compressão, quando comparados com os betões de agregados naturais.
- A reutilização destes resíduos não afetou o normal processo de ganho de resistência à compressão à medida que se aumentava a idade dos betões produzidos.
- Em relação ao betão convencional, a incorporação de resíduos provenientes da indústria da transformação da pedra, como alternativa aos agregados naturais, resultou num betão, com uma maior capacidade de resistir à flexão.
- A adição de pó calcário como parcial substituto do cimento implicou um decréscimo da resistência à flexão aos 7 dias e um acréscimo aos 28 dias. Isto é eventualmente explicado pela maior dispersão dos grãos de cimento, que assim ficam com maior superfície para reagir com a água, e pela capacidade do pó calcário em fixar água, quer por absorção e adsorção, ficando essa água disponível para contribuir para a reação de hidratação do cimento a longo prazo.

---

Para avaliar o comportamento higrométrico das várias composições, realizaram-se dois tipos de ensaio: ensaio de absorção de água por capilaridade e ensaio de absorção de água por imersão, que permitiriam chegar às seguintes conclusões:

- O coeficiente de absorção capilar, de um modo geral, sofreu um acréscimo com a incorporação do pó calcário, como parcial substituto do cimento.
- Quanto à influência da substituição do agregado natural pelo agregado constituído por resíduo, no coeficiente de absorção capilar, observa-se que a sua incorporação leva a que se obtenham betões com maior aptidão para absorver água.
- O ensaio de absorção por imersão veio reforçar esta ideia, nomeadamente, a quantidade de agregado grosso reciclado incorporado nas composições em detrimento do agregado natural faz aumentar a absorção de água, sendo que neste caso, quanto maior for a percentagem de substituição maior será a absorção de água por imersão. Quanto ao pó calcário, como parcial substituto do cimento, conduz a betões com maior grau de absorção. No geral, os maiores valores de absorção de água são ligeiramente superior a 10 %, pelo que a substituição do agregado convencional pelo agregado reciclado no betão não induz uma diferença muito significativa quando totalmente imerso em água.

Quantificou-se a velocidade de propagação de ondas de ultrassons, que permitiu concluir:

- A introdução de agregado grosso reciclado em detrimento do agregado grosso natural implica numa menor velocidade de propagação do som, ou seja, o betão apresenta uma pior qualidade na sua estrutura interna. Semelhante conclusão é apresentada com a incorporação do pó calcário nas composições, já que se obtêm betões com velocidades de propagação inferiores.
- O módulo de elasticidade das misturas que incorporam na sua composição o agregado grosso sob a forma de resíduo é menor, isto quando comparado com o betão convencional. Sendo que esta descida é tanto maior quanto maior for a percentagem de agregado natural substituído. No sentido inverso, evolui a relação entre a substituição parcial do cimento e o módulo de elasticidade, já que, em todas as misturas, a introdução do pó calcário fez com que o módulo de elasticidade apresentasse um valor mais alto. Por último, foi ainda evidente que o módulo de elasticidade estático apresenta um valor menor que o módulo de elasticidade dinâmico.

Para finalizar, pode-se concluir que betão escolhido, o REF\_T\_15, com 100 % de substituição dos agregados grossos naturais, e uma substituição do cimento em 15 %, resultou num betão capaz de ser usado no fabrico das peças de mobiliário urbano, que foram modeladas ao longo deste trabalho, tendo sido produzido igualmente um protótipo.

Em suma, pode-se afirmar que os objetivos propostos na introdução desta dissertação foram amplamente atingidos. Para além disso, foi um trabalho que promoveu o desenvolvimento intelectual, a capacidade de pesquisa, e o conhecimento crítico e científico do autor. Como tal

a escrita desta dissertação é considerada pelo autor como algo muito positivo ao longo do seu percurso académico.

### **7.1. Desenvolvimentos futuros**

O presente projeto teve o seu principal foco na caracterização do comportamento mecânico e no comportamento higrométrico dos betões desenvolvidos até aos 28 dias de idade. Pelo que, para um desenvolvimento futuro seria pertinente avaliar os seguintes aspetos:

- Caracterizar o comportamento mecânico, nomeadamente a resistência à flexão e à compressão, para amostras com mais tempo de cura, eventualmente aos 90, 180 e 360 dias. Desta forma, será possível perceber se as conclusões apresentadas para os 7 e 28 dias se mantêm ou se, por outro lado, a incorporação de resíduos irá afetar o comportamento mecânico a longo prazo.
- Neste estudo, apenas foi avaliado o comportamento higrométrico, como principal parâmetro de avaliação da durabilidade dos betões em causa. Seria talvez interessante, complementar o estudo da durabilidade do betão, avaliando parâmetros como: carbonatação acelerada, Resistência a migração dos cloretos e aos sulfatos. Assim podia-se ter uma visão mais clara se a incorporação dos resíduos afetaria a durabilidade do betão reciclado, quando comparado com o betão convencional.
- No domínio da modelação numérica, há também uma proposta de desenvolvimento futuro. Tendo em conta a robustez das geometrias escolhidas, seria talvez proveitoso proceder a uma otimização das geometrias, a fim de colocar menos betão nas peças de mobiliário urbano, sem afetar o comportamento do mecânico da peça. Deste modo, iríamos tornar as peças ainda mais sustentáveis e ao mesmo tempo reduzir o seu custo de fabrico.

---

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akbulut H., Güreş C., “Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements,” *Building and Environment*, Volume 42 (2007), pp. 1921- 1930.
- Andre, A., de Brito, J., Rosa, A., & Pedro, D. (2014). Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste. *Journal of Cleaner Production*, 65, 389-396.
- Andrew, R. (2022). Global CO2 emissions from cement production (Version 220516) Zenodo. Recuperado de <https://doi.org/10.5281/zenodo.6553090>
- Assimagra. (2020). Estatística anual dos recursos Minerais, Edição 2021. Lisboa, Portugal:Autor.
- Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas. (2022). Previsões apontam para um crescimento do Valor Bruto da Produção do Setor da Construção em 2023. Porto, Portugal:Autor.
- Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas. (2023). Investimento em Construção recupera no 4.º Trimestre de 2022 Porto, Portugal:Autor.
- Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas. (2023). Construção termina 2022 com evolução favorável. Porto, Portugal:Autor.
- Barbosa, R., Lapa, N., Dias, D., & Mendes, B. (2013). Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances. *Construction and Building Materials*, 48, 457-463.
- Binici, H., Shah, T., Aksogan, O., & Kaplan, H. (2008). Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of materials processing technology*, 208(1-3), 299-308.
- Branco, F. G., Correia, A. A., Cerejeira, A., Aniceto, M., Morais, P. V., Chung, A. P., Peixoto, M., Rodrigues, J., Matias, G., Torres, I., Vieira, J. (2023). Mechanical performance of mortars with incorporation of stone cutting sludge. 2nd International Conference on Construction, Energy, Environment & Sustainability, Funchal, Portugal.
- Branco, F. G., Correia, A. A., Cerejeira, A., Aniceto, M., Morais, P. V., Chung, A. P., Peixoto, M., Rodrigues, J., Matias, G., Torres, I., Vieira, J. (2023). Effect of adding cutting limestone waste in mortars. 6th internacional conference on WASTES, solutions, treatments, opportunities, Coimbra; Portugal.
- British Standards Institution. (2011). Cement - part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements, EN 197-1. Londres, Reino Unido: Autor.

- 
- Carrasco, B., Cruz, N., Terrados, J., Corpas, F. A., & Pérez, L. (2014). An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. *Fuel*, *118*, 272-280.
- Carrasco, M. F., Menéndez, G., Bonavetti, V., & Irassar, E. F. (2005). Strength optimization of “tailor-made cement” with limestone filler and blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*, *35*(7), 1324-1331.
- Carvalho, J. (2007). Rochas ornamentais, pedras naturais ou pedras dimensionais?. Boletim de Minas, Vol. 42, nº 2,(2007).
- Comissão Europeia. (2014). A economia circular – interligação, criação e conservação de valor. Serviço das Publicações. Recuperado de <https://data.europa.eu/doi/10.2779/85279>
- Comissão Europeia. (2022). DECISÃO (UE) 2022/591 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 6 de abril de 2022 relativa a um Programa Geral de Ação da União para 2030 em Matéria de Ambiente. Jornal Oficial da União Europeia, L114, pp. 22-36
- Courard, L., & Michel, F. (2014). Limestone fillers cement based composites: Effects of blast furnace slags on fresh and hardened properties. *Construction and Building Materials*, *51*, 439-445.
- Da Silva, P. R., & De Brito, J. (2015). Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *Construction and Building Materials*, *86*, 101-112.
- Dias da Silva, V. (2013). “Mecânica e resistência dos materiais”. Coimbra, Portugal.
- Dolley T.P., US Geological Survey Minerals Yearbook, Stone, Dimension [Advance Release], 2012, Reston, Virginia
- E 372 (1993); Água de amassadura para betões: características e verificação de conformidade. LNEC. Portugal
- E 393 (1993) – Betões: Determinação da absorção de água por capilaridade. LNEC. Portugal.
- E 394 (1993) – Betões: Determinação da absorção de água por Imersão - Ensaio à pressão atmosférica. LNEC. Portugal.
- EN 12390-5:2019; Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens.
- EN 1992-1-1:2004. Design of concrete structures. General rules and rules for buildings
- European Commission. (1973). Declaration of the Council of the European Communities and of the representatives of the Governments of the Member States Meeting in the Council of 22 November 1973. Official Journal of the European Communities, Vol. 16, C. 112, pp. 1-53
- Europeia, C. (2019). Pacto Ecológico Europeu. 11-12-2019.
- Ficha Técnica CEM I 42,5 R
- Ficha técnica Sika Viscocrete – 3009
- Fontes, C. M. A., Silva, R. B., & Lima, P. R. L. (2019). Characterization and effect of using bottom and fly ashes from co-combustion of cocoa waste as mineral addition in concrete. *Waste and Biomass Valorization*, *10*, 223-233.
-

- Furcas, C.; Balletto, G. (2014) Increasing the value of Dimension Stone Waste for a more achievable Sustainability in the management of non-renewable resources, *Journal of Solid Waste Technology and Management*, Vol. 40 (3), pp. 185-196
- Galetakis M., Alevizos G., Leventakis K., Evaluation of fine limestone quarry by-products, for the production of building elements – An experimental approach, *Construction and Building Materials*, Volume 26 (2012) pp. 122–130.
- Gencel, O., Nodehi, M., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Benli, A., Koksall, F., ... & Ozbakkaloglu, T. (2022). The use of waste marble for cleaner production of structural concrete: A comprehensive experimental study. *Construction and Building Materials*, 361, 129612.
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., & Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171.
- Instituto Nacional de Estatística. (2022). *Estatísticas do Ambiente 2021*. Lisboa, Portugal: Autor.
- Kamitsou, M. D., Kanellopoulou, D. G., Christogerou, A., & Angelopoulos, G. N. (2022). A contribution towards a more sustainable cement: Synergy of Mill Scales, greek wet fly ash, conventional raw materials and clinkering temperature. *Minerals*, 12(3), 324.
- Karaca, Z., Pekin, A., & Deliormanlı, A. H. (2012). Classification of dimension stone wastes. *Environmental Science and Pollution Research*, 19, 2354-2362.
- Kore, S. D., & Vyas, A. K. (2016). Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete. *Case studies in construction materials*, 4, 85-92.
- Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarejo, L., Eliche-Quesada, D., & Sánchez-Soto, P. J. (2023). New Types and Dosages for the Manufacture of Low-Energy Cements from Raw Materials and Industrial Waste under the Principles of the Circular Economy and Low-Carbon Economy. *Materials*, 16(2), 802.
- Mecway Finite Element Analysis Manual - Version 20.0. (2023). Mecway Limited. New Zealand
- Montani, C. (2020). XXXI Rapporto Marmo e pietre nel mondo. Recuperado de [https://issuu.com/marmonews/docs/impaginato\\_xxxi\\_mailing](https://issuu.com/marmonews/docs/impaginato_xxxi_mailing)
- NP EN 1008:2004 - Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão. (2004)
- NP EN 12390-3:2021; Ensaios do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes
- NP EN 12504-4. 2021. Ensaios do betão nas estruturas, Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons. Lisboa: Instituto Português da Qualidade, 2007.
- NP EN 14146: 2006; Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). Lisboa: Instituto Português da Qualidade, 2006.

- 
- NP EN 197-1:2012 Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes (2012)
- NP EN 933 -1.2014 Ensaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica” (2014)
- Nunes, C. (2011). Perspectivas para o Setor da Construção. Boletim Mensal de Economia Portuguesa, Vol. 8, pp. 35-50
- Pereira, L.; Branco, F. G.; Godinho, L; Ortega, J. M. (2022) Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de argamassas- comparação de metodologias. 53º congresso espanhol de acústica. Elche, Espanha.
- Popovics, J. S., Zemajtis, J., & Shkolnik, I. (2008). A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete. ACI-CRC Final Report, 16.
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of cleaner production*, 179, 605-615.
- Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A., Allen, G. C., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2009). Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of hazardous materials*, 172(2-3), 1049-1060.
- Rana, A., Kalla, P., Verma, H. K., & Mohnot, J. K. (2016). Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. *Journal of cleaner production*, 135, 312-331.
- Rana, A., Kalla, P., Singh, S., Meena, A. (2015). Rheology, strength and permeability of concrete containing recycled Kota stone aggregate. Proceedings of the India UKIERI Concrete Congress – Concrete Research Driving Profit and Sustainability, at NIT Jalandhar
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019. Diário da República n.º 123/2019 – I Série. Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior. Lisboa, Portugal.
- Sathe, S., Kangda, M. Z., & Dandin, S. (2022). An experimental study on rice husk ash concrete. *Materials Today: Proceedings*.
- Simões, T.; Costa, H.; Dias-da-Costa, D.; Júlio, E. (2017) Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes. *Construction and Building Materials*, Vol. 137, pp. 548 – 556.
- Teixeira-Dias, F., Pinho-da-Cruz, J., Valente, R. F., & de Sousa, R. A. (2010). Método dos elementos finitos: técnicas de simulação numérica em engenharia.
- Wang, S., Miller, A., Llamazos, E., Fonseca, F., & Baxter, L. (2008). Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties. *Fuel*, 87(3), 365-371.
- Yurdakul, Murat. "Natural stone waste generation from the perspective of natural stone processing plants: An industrial-scale case study in the province of Bilecik, Turkey." *Journal of Cleaner Production* 276 (2020)