



Universidade de Aveiro
Ano 2020

**Tiago Manuel
Almeida Cunha**

Utilização de resíduos em betões e argamassas



**Tiago Manuel
Almeida Cunha**

Utilização de resíduos em betões e argamassas

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Moraes, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação científica do Doutor Seyed Hamid Maljaee, Investigador Pós-Doutorado no CICECO - Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professora auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutora Helena Maria da Costa Paiva
Bolseira de Pós-Doutoramento CICECO – Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Morais
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A presente dissertação representa o culminar de um percurso marcante, pelo que quero expressar o meu agradecimento a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a sua conclusão. Deste modo, agradeço:

Ao orientador, Professor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Morais, pela oportunidade de acompanhar o projeto PaperChain, pela disponibilidade demonstrada e transmissão de conhecimentos ao longo da realização desta dissertação.

Ao coorientador, Doutor Seyed Hamid Maljaee, pelo apoio na realização da campanha experimental e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Engenheiro Fábio Simões, pela disponibilidade, ajuda constante e paciência.

Aos meus irmãos, à minha avó e em especial aos meus pais, por terem tornado possível esta etapa da minha vida e acima de tudo por me permitirem sonhar.

À Carolina pela paciência, apoio e incentivo, que em muito me ajudaram a atingir os meus objetivos.

A todos os meus amigos e a todos aquele que tive o prazer de conhecer ao longo do meu percurso académico, agradeço por todos os momentos e experiências que vivenciamos juntos.

palavras-chave

Valorização de resíduos, Argamassa, Biochar, Carço de azeitona, Casca de arroz, PaperChain, Betão, Cinzas de cal.

resumo

A indústria da construção é responsável por 7% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) geradas globalmente. Estima-se que na produção de uma tonelada de cimento é emitida cerca de uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂). Atualmente a população vive em déficit ecológico, a população encontra-se a consumir mais recursos do que o planeta é capaz de regenerar. A redução da utilização de recursos naturais, a redução da emissão de gases com efeitos de estufa e a procura pela sustentabilidade são uma necessidade da indústria da construção. É necessário criar alternativas ao cimento, de forma a reduzir o seu consumo e as emissões de gases com efeitos de estufa associadas à sua produção.

Na presente dissertação foi acompanhado o caso circular 1A do projeto PaperChain, que tem como objetivo a substituição do filler usado em elementos de betão pré-esforçado por cinzas de cal, resíduo gerado pela indústria da pasta e do papel. Foi também efetuada a incorporação de biochar de caroço de azeitona e biochar de casca de arroz em argamassas, com o objetivo de substituir parcialmente o cimento.

Os resultados alcançados nos vários ensaios realizados são positivos, verificou-se que com a substituição do filler pela cinza de cal as propriedades do betão podem ser melhoradas. Com a incorporação do biochar em argamassas observa-se que algumas propriedades das argamassas não são afetadas. A incorporação do biochar nas argamassas, apresenta melhorias no coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Com os resultados alcançados na presente dissertação, verifica-se que é possível criar uma simbiose entre o crescimento da indústria da construção e a sustentabilidade, reconhecendo os resíduos como recursos e o seu valor económico e ambiental, promovendo uma economia circular e a valorização de resíduos.

keywords

Waste valorization, Mortar, Biochar, Olive stone, Rice husk, PaperChain, Concrete, Lime mud.

abstract

The construction industry is responsible for 7% of all carbon dioxide (CO₂) emissions globally. It is estimated that the production of one ton of cement generates about one ton of carbon dioxide (CO₂). Currently, we live in ecological deficit, the population is consuming more resources than the planet is capable of regenerating. Thus, reducing the usage of natural resources, reducing greenhouse gas emissions and implementing sustainability-focused measures are crucial to the construction industry. It is necessary to create alternatives to cement, thus reducing its consumption and reducing the greenhouse gas emissions associated with its production.

This dissertation accompanies the circular case 1A of the PaperChain project, which aims to replace the filler used in pre-cast concrete elements with lime mud, a residue generated by the pulp and paper industry. The olive stone and rice husk biochar were incorporated in mortars, with the objective of partially replacing cement.

Positive results were achieved in the various tests carried out: the replacement of the filler by lime mud can improve the properties of the concrete. With the incorporation of biochar in mortars, it is observed that some properties of mortars are not affected. Nonetheless, the incorporation of biochar in mortars resulted in improvements in the water absorption coefficient by capillarity.

The results obtained in this dissertation corroborate the possibility of creating a symbiosis between the growth of the construction industry and sustainability, by viewing waste as potential resources and therefore recognizing its economic and environmental value, and promoting a circular economy and the value of waste.

ÍNDICE

Índice	i
Índice de figuras	v
Índice de tabelas	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	5
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Estrutura e organização da dissertação	6
2. Gestão ambiental e valorização de resíduos	9
2.1. Apresentação do projeto de economia circular - PaperChain.....	9
2.1.1. Utilização de resíduos da indústria do papel em betão pré-esforçado.....	9
2.1.2. A indústria da pasta e do papel.....	9
2.1.3. Processo de produção da pasta e do papel.....	12
2.1.4. Resíduos gerados no processo de produção da pasta e do papel.....	14
2.1.5. O projeto PaperChain	16
2.1.6. Estudos recentes	19
2.2. Utilização de biochar em argamassas	19
2.2.1. Conversão térmica através da pirólise.....	21
2.2.2. Resíduos da casca de arroz	23
2.2.3. Resíduos do caroço de azeitona.....	24
2.2.4. Estudos recentes	25
3. Utilização de cinzas de cal em betão pré-esforçado - PaperChain.....	29
3.1. Caracterização dos materiais	29
3.1.1. Método de Coulter.....	29
3.1.2. Difração de raios X.....	30
3.1.3. Área superficial específica.....	30

3.2.	Caraterização do betão.....	31
3.2.1.	Resistência à compressão	31
3.2.2.	Massa volúmica em estado endurecido	33
3.2.3.	Ensaio de ultrassons	33
3.2.4.	Absorção de água por capilaridade	34
3.2.5.	Sistema de monitorização.....	35
3.3.	Produção dos elementos pré-fabricados	37
3.4.	Instalação dos pórticos.....	41
3.5.	Resultados obtidos.....	43
3.5.1.	Características dos materiais	43
3.5.2.	Características do betão.....	49
3.5.3.	Monitorização dos pórticos	55
4.	Utilização de biochar em argamassas.....	63
4.1.	Metodologia experimental.....	63
4.1.1.	Pirólise.....	66
4.1.2.	Caraterização geral dos materiais.....	68
4.1.3.	Caraterização do Biochar	71
4.1.4.	Caraterização das argamassas no estado fresco	78
4.1.5.	Caraterização das argamassas em estado endurecido	83
4.2.	Resultados e discussão.....	90
4.2.1.	Ensaio relativos aos materiais.....	90
4.2.2.	Caraterização do Biochar	92
4.2.3.	Ensaio de caraterização das argamassas no estado fresco	101
4.2.4.	Ensaio de caraterização das argamassas em estado endurecido	105
5.	Conclusões e trabalhos futuros.....	115
5.1.	Conclusões.....	115
5.2.	Proposta de trabalhos futuros	119

6. Referências bibliográficas 121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do Earth Overshoot Day, (Earth Overshoot Day, 2020)	2
Figura 2 - Hierarquia da gestão de resíduos, (Corrêa Silva et al., 2019).....	3
Figura 3 - Economia Circular, (Circular Economy Portugal, 2019)	4
Figura 4 – Destino dos resíduos sólidos produzidos em Portugal, (CELPA, 2019)	11
Figura 5 - Esquema do processo de fabrico da pasta e do papel e resíduos gerados, (Navigator Company, 2019)	13
Figura 6 - Produção de resíduos sólidos, (CELPA, 2019).....	15
Figura 7 – Esquema representativo dos casos circulares do PaperChain, (PaperChain, 2019a)	17
Figura 8 - Esquema do fluxo da cinza de cal, (Adaptado de Apresentação da Reunião Geral PaperChain, Aveiro, 2019)	18
Figura 9 – Implantação geral dos pórticos.....	18
Figura 10 – Processo da pirólise e processo auto térmico, (Mario A. Heredia Salgado & Tarelho, 2018)	22
Figura 11 – Roturas satisfatórias de provetes cúbicos.....	32
Figura 12 – Roturas insatisfatórias de provetes cúbicos.....	32
Figura 13 – Teste de resistência à compressão: a) Equipamento usado; b) Proвете a ser ensaiado	32
Figura 14 – Medição com o Pundit	34
Figura 15 – Pormenor sensores usados: a) Sensor interno; b) Sensor externo.....	36
Figura 16 – Pormenor do data logger: a) Data logger; b) Ligação sensores ao data logger	36
Figura 17 – Produção do betão: a) Central de betonagem; b) Transporte do betão;	37
Figura 18 – Ancoragem de pré-esforço	38
Figura 19 – Armadura das vigas.....	38
Figura 20 – Colocação sensores internos	38
Figura 21 – Cofragem e betonagem	39
Figura 22 – Provetes de controlo da resistência: a) Após betonagem; b) Provetes em cura	39
Figura 23 – Descofragem da viga.....	40
Figura 24 – Sensores exteriores: a) Posicionamento dos sensores exteriores; b) Pormenor sensor exterior	40

Figura 25 – Pormenores montagem dos pilares: a) Sapata; b) Montagem dos pilares	41
Figura 26 – Pormenores montagem das vigas: a) Retirada da viga do camião; b) Montagem da viga	42
Figura 27 – Instalação final	42
Figura 28 - Filler (esquerda) e Cinza de Cal (direita)	43
Figura 29 – Curva de distribuição granulométrica dos agregados	44
Figura 30 - Curva de distribuição granulométrica diferencial da cinza de cal.....	46
Figura 31 - Curva de distribuição granulométrica diferencial do filler.....	46
Figura 32 – Difratoograma do filler	48
Figura 33 – Difratoograma da cinza de cal	48
Figura 34 - Resistência à compressão dos provetes de betão aos 7 dias de cura	50
Figura 35 - Resistência à compressão dos provetes de betão aos 28 dias de cura	50
Figura 36 – Massa volúmica em estado endurecido dos provetes de betão aos 7 dias de cura	51
Figura 37 – Massa volúmica em estado endurecido dos provetes de betão aos 28 dias de cura	52
Figura 38 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes de betão	54
Figura 39 – Temperatura registada pelos sensores após a betonagem.....	56
Figura 40 – Extensões registadas pelos sensores após a betonagem.....	57
Figura 41 – Temperatura registada pelos sensores interiores a meio vão da viga	58
Figura 42 – Temperatura registada pelos sensores internos a um terço do vão da viga	59
Figura 43 – Extensões registadas pelos sensores interiores	59
Figura 44 – Temperaturas registadas pelos sensores exteriores.....	60
Figura 45 – Extensões registadas pelos sensores exteriores	61
Figura 46 - Diferentes biomassas e biochar: a) Biomassa de casca de arroz; b) Biomassa de caroço de azeitona; c) Biochar de casca de arroz; d) Biochar de caroço de azeitona;	67
Figura 47 - Máquina de peneiração	69
Figura 48 - Areia peneirada e separada após a pesagem.....	69
Figura 49 - Cimento Portland CEM II/B-L 32,5 N	70
Figura 50 – Superplastificante usado	71
Figura 51 - Moinho de argolas	72
Figura 52 – Biochar antes e depois de moído	72
Figura 53 – Picnómetro de hélio	73

Figura 54 – Equipamento de análise granulométrica, (Marianito Ascensão, 2015).....	74
Figura 55 - Microscópio eletrônico de varrimento	75
Figura 56 - Espectrómetro de fluorescência de raios X.....	76
Figura 57 - Difractómetro de raios x	77
Figura 58 - Equipamento para o cálculo da área superficial específica	77
Figura 59 – Misturadora usada na preparação da argamassa	79
Figura 60 - Preparação dos provetes: a) Moldes utilizados; b) Mesa de vibração	80
Figura 61 - Provetes em câmara climática.....	80
Figura 62 – Mesa de espalhamento (a) e método de medição (b)	82
Figura 63 – Processo para o cálculo da massa volúmica: a) Retificação dos provetes; b) Pesagem dos provetes; c) e d) Medição dos provetes	84
Figura 64 – Provetes no tabuleiro com água e pesagem.....	86
Figura 65 - Acessórios usados para o teste de flexão	87
Figura 66 – Proвете a ser testado.....	87
Figura 67 - Acessórios usados para o teste de compressão	88
Figura 68 – Semi prisma a ser testado	88
Figura 69 – Equipamento para a determinação do coeficiente de condutividade térmica, (Thermal Analysis Labs, 2020a)	90
Figura 70 - Provetes para realização do teste de condutividade térmica.....	90
Figura 71 - Curva de distribuição granulométrica da areia usada	91
Figura 72 – Curva de distribuição granulométrica diferencial do biochar de caroço de azeitona.....	94
Figura 73 – Curva de distribuição granulométrica diferencial do biochar de casca de arroz	94
Figura 74 - Microscopia do Biochar de casca de arroz: a) Ampliação de 200x; b) Ampliação de 1500x;	95
Figura 75 - Microscopia do Biochar de caroço de azeitona: a) Ampliação de 200x; b) Ampliação de 1500x;.....	96
Figura 76 - Biochar casca de arroz antes de moído, ampliação de 40x.....	96
Figura 77 – Biochar caroço de azeitona antes de moído: a) Ampliação de 100x; b) Ampliação de 1000x	97
Figura 78 - Difratoograma do biochar de caroço de azeitona	99
Figura 79 – Difratoograma do biochar de casca de arroz.....	99

Figura 80 - Absorção de água por capilaridade das argamassas com traço 1:3	107
Figura 81 - Absorção de água por capilaridade das argamassas com traço 1:4	107
Figura 82 – Resistência à compressão das argamassas com traço 1:3	111
Figura 83 – Resistência à compressão das argamassas com traço 1:4	112
Figura 84 – Resistência à flexão das argamassas com traço 1:3	113
Figura 85 - Resistência à flexão das argamassas com traço 1:4.....	113

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dados estatísticos europeus, (CEPI 2019)	10
Tabela 2 - Parâmetros de cada tipo de pirolise	21
Tabela 3 - Quantidade de resíduos produzidos por sistema de extração, (Freitas, 2007; Sempiterno & Fernandes, 2014).....	25
Tabela 4 – Distribuição granulométrica da cinza de cal e do filler	46
Tabela 5 – Área superficial específica da cinza de cal e do filler	47
Tabela 6 – Critérios de avaliação do betão com base na velocidade da onda ultrassónica, (Teodoro et al., 2019)	52
Tabela 7 – Módulo de elasticidade e velocidade da onda ultrassónica dos provetes de betão	53
Tabela 8 – Composição das argamassas	65
Tabela 9 - Propriedades mecânicas	70
Tabela 10 – Propriedades físicas	70
Tabela 11 – Propriedades químicas	70
Tabela 12 - Percentagem de massa acumulada nos peneiros	92
Tabela 13 – Massa volúmica do biochar e do cimento usado	92
Tabela 14 – Distribuição granulométrica do biochar	94
Tabela 15 – Caracterização química do biochar e do cimento.....	98
Tabela 16 – Área superficial específica das amostras	100
Tabela 17 - Valores obtidos para o espalhamento	102
Tabela 18 – Massa volúmica em estado fresco	104
Tabela 19 – Massa volúmica em estado endurecido	105
Tabela 20 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade.....	108

1. INTRODUÇÃO

A redução da utilização de recursos naturais, a redução da emissão de gases com efeito de estufa e a procura por sustentabilidade, são uma necessidade da indústria da construção, (Thomas, 2018).

A União Europeia comprometeu-se a reduzir, até 2030, as emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 40% face aos níveis de 1990. Para cumprir o acordo de Paris e evitar o aquecimento da Terra em 1,5 graus, comprometeu-se também a atingir a neutralidade das emissões de carbono até 2050, (E.U., 2019; Parlamento Europeu, 2019).

Atualmente a população vive em défice ecológico. O Earth Overshoot Day representa o dia em que a população esgota a capacidade natural para esse mesmo ano, (Global Footprint Network, 2018).

Em 1970 o Earth Overshoot Day foi registado no dia 29 de dezembro. Em 2019 o Earth Overshoot Day foi no dia 29 de julho. Em Portugal o Overshoot Day foi no dia 26 de maio. A partir do dia do Overshoot Day a população encontra-se a consumir mais recursos do que o planeta é capaz de regenerar num ano, os recursos dos anos seguintes começam a ser consumidos antecipadamente e o dióxido de carbono acumula-se na atmosfera, (Earth Overshoot Day, 2020). Como apresentado pela Figura 1, no ano 2019, para satisfazer as necessidades da população mundial seriam precisos 1,75 planetas Terras, (Earth Overshoot Day, 2020).

O betão é dos materiais mais usados na construção. A produção de betão, a nível global, é de 10 biliões de toneladas, estando previsto um aumento para 18 biliões de toneladas até 2050. Este aumento deve-se ao crescimento da população e consequentemente da procura e construção de habitação e infraestruturas, (Alkheder, Obaidat, & Taamneh, 2016; Aprianti, Shafigh, Bahri, & Farahani, 2015; Muthukrishnan, Gupta, & Kua, 2019). O betão, na sua constituição apresenta entre 20 a 40% de cimento. Estima-se que a indústria do cimento é responsável por 7% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) geradas globalmente. No processo de produção de uma tonelada de cimento é emitida cerca de uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂), (Aprianti et al., 2015; Muthukrishnan et al., 2019; Thomas, 2018). Dado este cenário é necessário criar alternativas ao cimento, de forma a reduzir o seu consumo e as emissões de gases com efeito de estufa associadas à sua produção, (Siddique et al., 2016; Thomas & Chandra Gupta, 2016).

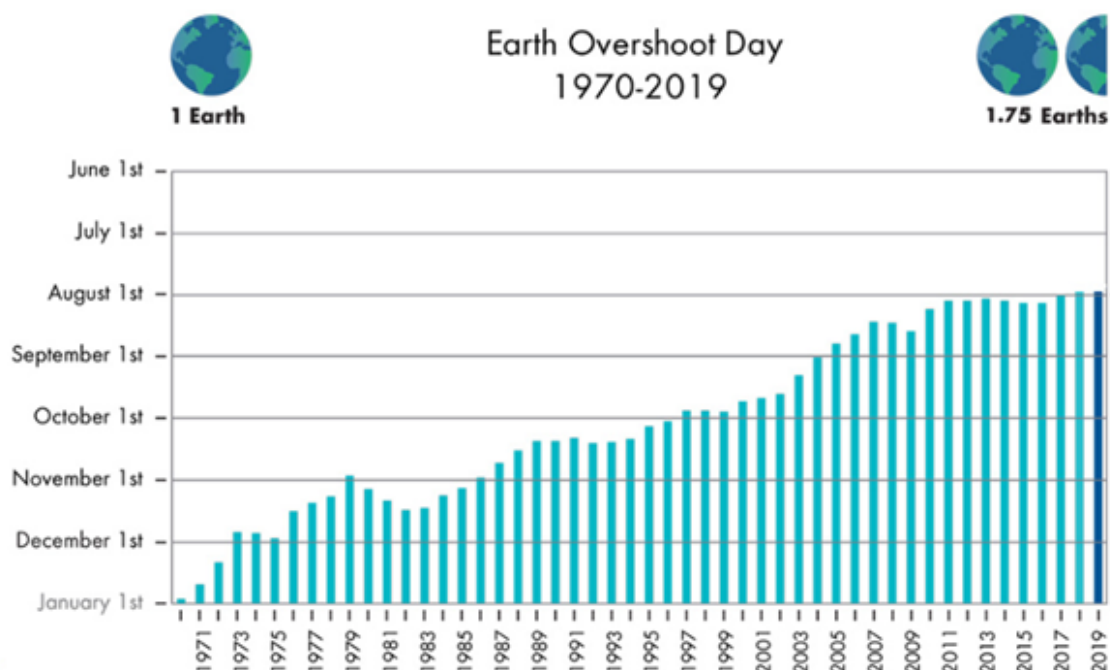


Figura 1 – Evolução do Earth Overshoot Day, (Earth Overshoot Day, 2020)

A substituição parcial de cimento por resíduos será estudada. Entende-se por resíduo, qualquer substância ou objeto da qual o detentor se desfaz ou tem a intenção ou obrigação de se desfazer, (Modolo, 2014).

Em Portugal, a gestão de resíduos é feita com base na norma NP EN ISO 14001, que tem como prioridade ambiental evitar a produção de resíduos, uma vez que estes ao mesmo tempo que produzem lixo contribuem também para uma significativa perda de recursos, (D. N. Bastos, 2016).

O decreto-lei n.º 46/2008, de 12 de março, alterado pelo decreto-lei n.º 73/2011, de 17 de junho, estabelece o regime das operações de gestão de resíduos compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação. Foram lançadas uma série de medidas legislativas e normativas no sentido de se promover a aplicação da hierarquia de resíduos, (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019a).

Como indica a Figura 2 foi estabelecida uma hierarquia de destino preferencial e uma ordem prioritária de ação da mais favorável para a menos favorável surgem, prevenção, minimização, reutilização, reciclagem, valorização energética, eliminação e por último, a

deposição adequada, normalmente em aterro sanitário, (D. R. S. Bastos, 2014; Corrêa Silva, Costa Roza, & Rathmann, 2012; Dias, 2011).

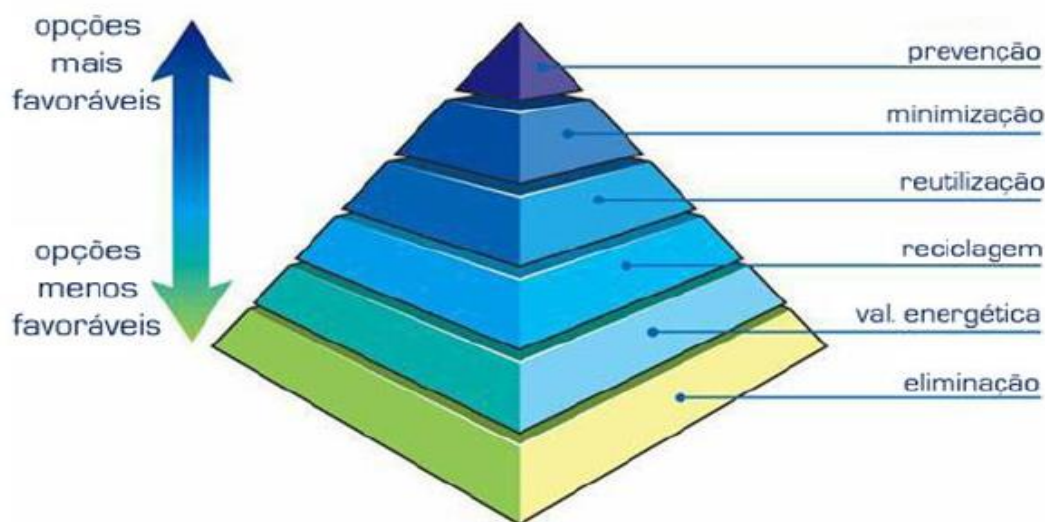


Figura 2 - Hierarquia da gestão de resíduos, (Corrêa Silva et al., 2019)

A deposição dos resíduos em aterro, como destino final, não só implica uma perda de valor potencial dos resíduos depositados como também a ocupação de grandes áreas. Com a expansão das áreas urbanas torna-se cada vez mais difícil encontrar locais adequados para aterros, são necessários grandes investimentos no sentido de cumprir a regulamentação rígida que visa proteger a saúde pública e o ambiente onde se integram. É necessário, reconhecer os resíduos como recursos e perceber que têm valor, tanto em termos económicos como ambientais, (D. N. Bastos, 2016).

Na maioria dos países que compõem a União Europeia as taxas de deposição são de 30 €/tonelada de resíduo inerte, em Portugal no ano de 2019 o custo de deposição em aterro foi de 9,9 €/tonelada, (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019b; Buruberri, 2014).

O baixo custo de deposição em relação aos restantes países tem incentivado outros países a enviarem os seus resíduos para Portugal. No ano 2019, em Portugal, registou-se a entrada de 230 mil toneladas de resíduos vindos do exterior, (Ministério do Ambiente e da Acção Climática, 2020).

Atualmente é praticada a economia linear, as indústrias usam as matérias-primas provenientes do meio ambiente, transformam em novos produtos, terminado o ciclo de utilização são descartados para o meio ambiente. Na economia linear os produtos são fabricados, utilizados e deitados fora, (EuroNews, 2016). Este é um processo linear, no qual

as matérias-primas são, normalmente, finitas e representa um duplo desperdício, pelos custos de tratamento dos resíduos e pelo impacto no ambiente, (AICEP, 2018).

Se não repensarmos a forma como usamos as matérias-primas nesta economia linear de "recolher-produzir-descartar", os recursos vitais para a indústria podem esgotar-se daqui a dez a cinquenta anos, (AICEP, 2018).

Em 2010, foram extraídos 65 mil milhões de toneladas de recursos do planeta para fazer funcionar a economia global. Em 2020, o número aumentará para perto de 100 mil milhões e em 2050, com a população a crescer para os 9,7 mil milhões, serão necessárias cerca de 186 mil milhões de toneladas, (Embopar, 2019). É necessário produzir materiais com matérias primas que não são aproveitadas por outras indústrias, fazendo assim que a gestão de resíduos tenha uma componente económica, como indicado na Figura 3.

Com o evoluir da consciência da sociedade moderna para as questões de sustentabilidade, surgiu o conceito de economia circular, que ao contrário da economia linear, usa os resíduos como matéria prima alternativa, desta forma a exploração de recursos naturais é reduzida, bem como os problemas ambientais. A economia circular é um conceito estratégico que assenta na prevenção, redução, reutilização, recuperação, e reciclagem de materiais e energia, substituindo o conceito de fim-de-vida da economia linear. A economia circular é vista como um elemento-chave para promover a dissociação entre o crescimento económico e o aumento no consumo de recursos, (FCT, 2019).

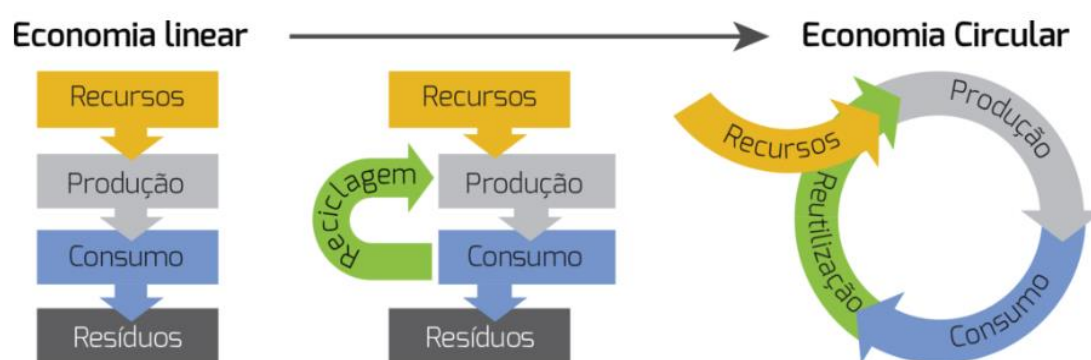


Figura 3 - Economia Circular, (Circular Economy Portugal, 2019)

Calcula-se que as empresas europeias consigam poupar até 600 mil milhões de euros e reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 450 milhões de toneladas até 2030 caso adotem a economia circular, (Comissão Europeia, 2015). A implementação da economia circular apresenta quatro grandes benefícios: crescimento económico, poupança de recursos, crescimento do emprego e inovação, (FCT, 2019).

1.1. Motivação

O aumento populacional, o aumento da procura de recursos naturais e conseqüente pressão dos mesmos tem alertado a sociedade para a necessidade de conceitos mais sustentáveis e para a necessidade de obter uma racionalização dos recursos naturais, de forma consciente e comprometida com a responsabilidade ambiental, ambicionando uma diminuição das emissões de gases com efeitos de estufa

Se por um lado o setor da construção é um dos setores que mais consome recursos, por outro lado existem milhões de toneladas de resíduos cujo destino final é o aterro, desta forma a valorização dos resíduos torna-se uma alternativa para o setor da construção.

Existe a necessidade de criar uma simbiose entre o crescimento da indústria e a sustentabilidade, promovendo a economia circular e a valorização de resíduos.

Esta dissertação tem como objetivo aprofundar o estudo da utilização de resíduos na indústria da construção, promovendo a valorização de resíduos de caroço de azeitona e resíduos da casca de arroz em argamassas e resíduos da indústria da pasta e do papel (cinzas de cal) no betão, procurando alcançar uma simbiose perfeita entre a vertente económica e a ambiental.

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação é estudar e desenvolver soluções de integração de resíduos em betões e argamassas, resíduos que de outra forma seriam enviados para aterros. promovendo assim a sua valorização.

De uma forma resumida, os objetivos desta dissertação, são:

- 1) Acompanhamento do caso circular 1A do projeto PaperChain, cujo objetivo é o estudo da viabilidade das cinzas de cal substituírem o filler em elementos de betão pré-esforçado;
- 2) Estudo e caracterização dos resíduos de caroço de azeitona e de casca de arroz;
- 3) Incorporação de biochar de caroço de azeitona e biochar de casca de arroz em argamassas, substituindo 2% da massa de cimento;
- 4) Estudo do efeito da incorporação do biochar e análise das suas vantagens e desvantagens;

1.3. Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação é composta por seis capítulos, que pretendem interligar e sequenciar de forma lógica todo o trabalho desenvolvido, nomeadamente: introdução, gestão ambiental e valorização de resíduos, utilização de cinzas de cal em betão pré-esforçado - PaperChain, utilização de biochar em argamassas, conclusões e trabalhos futuros e por fim, referências bibliográficas.

No capítulo 1 é realizado um enquadramento da necessidade da valorização dos resíduos, é analisado o impacto ambiental associados à indústria cimenteira e ao setor da construção, é abordada a necessidade da redução de recursos naturais e da redução de gases com efeitos de estufa, é também especificada a hierarquia da gestão de resíduos e o conceito de economia circular. Além disso são abordados os objetivos, a motivação e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 está organizado em dois subcapítulos. No primeiro subcapítulo inicialmente é apresentada a indústria da pasta e do papel, o processo de produção da pasta e do papel e os resíduos gerados durante o processo. Os resíduos gerados são quantificados e o seu destino é analisado. Por fim é apresentado o projeto PaperChain e todos os seus casos circulares, com foco no caso circular 1A. No segundo subcapítulo é apresentado o biochar e os diferentes métodos de produção existentes. São apresentados os resíduos que foram utilizados para a produção do biochar, e os processos em que os resíduos utilizados são gerados. Por fim, através de uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, são apresentados os resultados obtidos noutras investigações.

O capítulo 3 é dedicado ao acompanhamento do caso circular 1A do PaperChain. Neste capítulo são descritos os ensaios utilizados para caraterizar as cinzas de cal e o filler usado no fabrico dos pórticos e os ensaios utilizados para caraterizar o betão produzido. Todo o processo de produção das vigas e pilares é devidamente explicado, tal como o processo de instalação e monitorização dos pórticos. No final do capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na caraterização dos materiais e do betão e na monitorização dos pórticos.

O capítulo 4, é dedicado à utilização de biochar em argamassas. Neste capítulo é descrita a metodologia experimental aplicada e os ensaios realizados para a caraterização dos materiais, com maior foco na caraterização do biochar. Todo o procedimento da produção, preparação e condições de cura dos provetes de argamassa são descritos, bem como a normalização empregue. Os ensaios de caraterização das argamassas em estado fresco e em

estado endurecido são devidamente explicados, tal como a normalização empregue. Por fim são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o trabalho experimental.

No capítulo 5 é efetuada a conclusão, onde se faz uma síntese dos principais assuntos e dos resultados obtidos ao longo desta dissertação. São também apresentadas propostas de possíveis trabalhos futuros relacionados com os temas, com vista ao desenvolvimento de questões não tratadas na presente dissertação.

Por último, no capítulo 6, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento da presente dissertação.

2. GESTÃO AMBIENTAL E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS

Nesta dissertação será estudada a substituição parcial de filler por resíduos da indústria da pasta e do papel e a substituição parcial de cimento por resíduos da indústria do arroz e da indústria do azeite. Evitando que os resíduos sejam depositados em aterro, procurando que a utilização de recursos naturais pela indústria da construção reduza e que as emissões de gases com efeito de estufa sejam diminuídas.

2.1. Apresentação do projeto de economia circular - PaperChain

2.1.1. Utilização de resíduos da indústria do papel em betão pré-esforçado

Neste capítulo são apresentados alguns dados introdutórios sobre a indústria da pasta e do papel, o seu processo de produção e os resíduos gerados, com foco nas instalações da Navigator Company, em Cacia, Aveiro. Por fim será feita uma introdução ao projeto PaperChain e aos seus casos circulares, com maior foco no caso circular 1A.

2.1.2. A indústria da pasta e do papel

A indústria da pasta e do papel emprega, diretamente, mais de 180 000 pessoas na Europa e apresenta uma faturação de 90 biliões de euros, (Laínez, Pérez-Fortes, Bojarski, & Puigjaner, 2018). Em Portugal, as empresas associadas da CELPA (Associação da Indústria Papeleira) em 2017 apresentaram um volume de vendas de 2,68 biliões de euros, representando 2,7% do produto interno bruto, (CELPA, 2018).

Alguns dados sobre a produção e consumo da indústria europeia da pasta e do papel, de 1991 a 2018 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados estatísticos europeus, (CEPI 2019)

	1991	2000	2005	2010	2017	2018
Número de empresas	1 082	979	881	725	676	685
Faturação (milhões euros)	—————	79 388	74 537	75 790	87 397	90 000
Produção de pasta (toneladas)	33 807	39 962	41 602	38 695	38 008	38 304
Produção de Papel e cartão (toneladas)	65 052	90 823	98 823	95 065	92 208	92 180
Consumo de madeira (toneladas)	120 274	148 093	153 380	148 901	149 381	154 880

Através da Tabela 1 é possível concluir que apesar da redução do número de empresas, não se observa uma redução na produção, que permaneceu estável ou ligeiramente superior. A faturação tem vindo a aumentar nos últimos anos.

Durante os processos de produção, esta indústria produz grandes quantidades de resíduos, que devem ser geridos de forma sustentável, minimizando assim o impacto negativo no meio ambiente, (D. N. Bastos, 2016).

A indústria da pasta e do papel é um importante produtor de resíduos sólidos. No entanto, há uma tendência crescente para a utilização dos seus resíduos sólidos e subprodutos industriais em diferentes setores, visando a sua valorização sustentável. As dificuldades encontradas, não são apenas em termos de aplicações viáveis, mas também relacionadas com burocracias, tornando a valorização de resíduos sólidos industriais um desafio para produtores e utilizadores finais, (Modolo, 2014).

Na última década o setor da pasta e do papel tem feito um esforço para reduzir o aterro e as taxas de deposição de resíduos. A maioria das novas instalações desenvolveu sistemas para recuperar energia de diferentes fluxos de resíduos, no entanto alguns fluxos de resíduos como misturas orgânicas e inorgânicas ou cinzas geradas nos sistemas de recuperação de energia são mais difíceis de ser reutilizados, (Laínez et al., 2018).

Portugal mantém neste sector a necessidade de procurar soluções de valorização para uma série de resíduos, neste caso, resíduos sólidos do processo de produção de pasta e papel, (Modolo, 2006).

Na Figura 4 são apresentados os destinos dos resíduos produzidos pela indústria portuguesa da pasta e do papel entre 2008 e 2017.

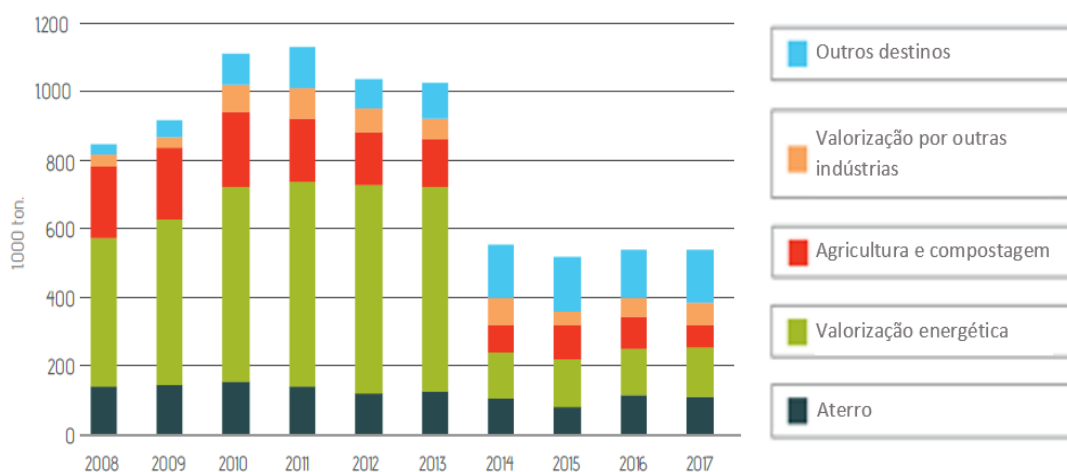


Figura 4 – Destino dos resíduos sólidos produzidos em Portugal, (CELPA, 2019)

Como destino dos resíduos sólidos em 2017, a agricultura e compostagem, corresponde a 12% do total de resíduos, a valorização por outras indústrias representa 12% do total e a valorização energética que representou 26% do total de resíduos. A deposição em aterro absorveu 21% dos resíduos produzidos, (CELPA, 2018). De salientar que a partir de 2014 a forma de quantificação de alguns resíduos foi alterada, como tal não deve ser feita uma comparação direta com os anos anteriores.

Atualmente o destino final dos resíduos industriais é um aspeto crítico, sendo desejável alcançar uma simbiose perfeita entre a vertente económica e ambiental. Nos últimos anos, a opção tradicional de deposição em aterro como destino final dos resíduos industriais tem vindo a sofrer limitações, também devido à imposição de taxas ambientais de valor crescente, (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019b; Buruberri, 2014).

2.1.3. Processo de produção da pasta e do papel

A matéria prima predominante em Portugal para o processo da pasta e do papel é uma variedade de eucalipto denominado *eucalyptus globulus*. Ao elaborar a pasta, as ligações entre as fibras e a lenhina sofrem rotura por processos químicos ou mecânicos. Os métodos de obtenção da pasta diferenciam-se pelo seu rendimento, qualidade do produto final e pelos processos de elaboração/recuperação dos reagentes químicos, (Buruberri, 2014; Modolo, 2006).

Em Portugal o método de fabrico da pasta de celulose mais comum é o método químico, quando comparado com o método mecânico, diminui a danificação das fibras de celulose, aumentando assim a resistência e qualidade do papel, (Buruberri, 2014; Lisboa, 2008).

O processo de produção utilizado pela Navigator Company é um processo químico, denominado processo Kraft, (The Navigator Company, 2019).

Na Figura 5 é apresentado um esquema síntese do processo Kraft, implementado na unidade industrial da Navigator Company em Cacia.

A produção de pasta e papel pelo processo Kraft é feita pelas seguintes etapas: (Arraja, Louro, & Capela, 2005; Buruberri, 2014; Modolo, 2006, 2014; The Navigator Company, 2019)

- 1) Corte dos troncos de madeira e transporte para a fábrica;
- 2) Os toros de madeira são descascados e transformados em pequenos pedaços com dimensões controladas, que se designam aparas, sendo de seguida armazenadas. As cascas da madeira são queimadas numa central de biomassa para gerar energia para o processo;
- 3) De forma a separar as fibras de celulose da lenhina, as aparas entram na zona de baixa pressão dos digestores e são aquecidas a vapor;
- 4) As aparas passam à zona de impregnação, onde, à pressão de cerca de 9 kgf/cm² e a uma temperatura entre 155 °C e 170 °C ficam em contacto com o licor branco durante cerca de 1h30;
- 5) A digestão é interrompida por um rápido arrefecimento com licor branco e descompressão, obtendo-se uma pasta crua acastanhada e licor negro.
- 6) A pasta crua acastanhada é lavada e crivada, com remoção de nós da madeira e dos pedaços mal digeridos, originando assim o licor negro diluído;

- 7) Depois de lavada, a pasta crua é sujeita ao processo de branqueamento com agentes oxidantes, entre cada estágio de branqueamento existe uma etapa de lavagem, obtendo-se após cada etapa pasta cada vez mais branqueada. O branqueamento da pasta tem como objetivo eliminar a lenhina residual e os componentes que acompanham as fibras de celulose.
- 8) A suspensão de pasta é armazenada em torres e segue depois para a secção denominada de tiragem, onde se transforma no produto acabado (refinação) na forma de fardos de pasta adequados para expedição.
- 9) No processo de recuperação de energia, o licor negro proveniente da lavagem da pasta é extraído e submetido a um processo de evaporação, seguindo para a caldeira de recuperação onde os seus compostos orgânicos são queimados, gerando vapor de alta pressão que é utilizado na produção de energia elétrica;
- 10) Os efluentes do processo passam por um tratamento primário, onde ocorre sedimentação dos sólidos suspensos, as frações sólidas que contem fibras são enviadas para o fabrico de papel e cartão, as frações líquidas são enviadas para o tratamento secundário.

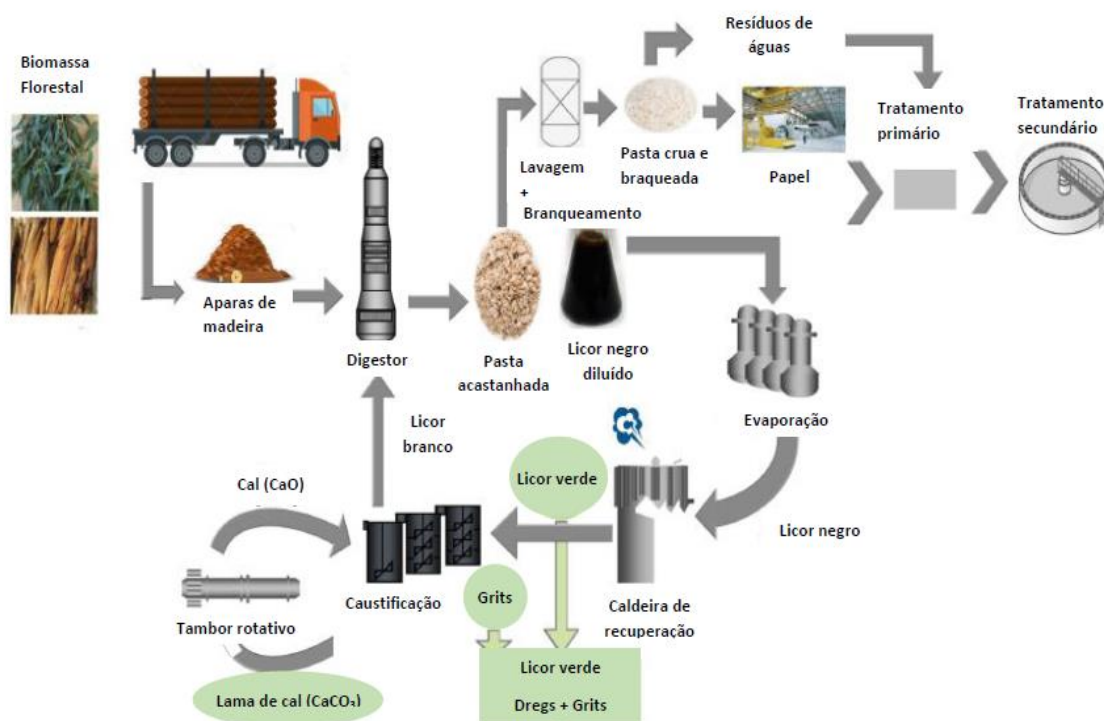


Figura 5 - Esquema do processo de fabrico da pasta e do papel e resíduos gerados, (Navigator Company, 2019)

2.1.4. Resíduos gerados no processo de produção da pasta e do papel

A instalação industrial da *Navigator Company* opera com um circuito de regeneração dos reagentes de cozimento, o licor branco, e aproveita a carga orgânica para a cogeração de energia elétrica/vapor. O vapor gerado é utilizado como fonte de calor nas distintas etapas do processo de fabrico, (Buruberri, 2014; Oliveira, 2009).

O processo de recuperação química é composto pela evaporação, geração de vapor, regeneração do licor branco e tratamento de afluentes, (Buruberri, 2014; Modolo, 2006).

No processo de evaporação, o licor negro diluído proveniente da etapa de lavagem da pasta crua, é concentrado ao circular por um sistema de evaporadores com circulação forçada, seguindo para duas unidades concentradoras, atingindo um teor final de sólidos na ordem dos 73%, (Buruberri, 2014; Modolo, 2006).

Na recuperação de sais inorgânicos e geração de vapor, na caldeira de recuperação o licor negro concentrado é aquecido até fundir os seus componentes inorgânicos, denominados smelt, e queimar os componentes orgânicos para gerar vapor, que é convertido, pela ação de turbogeradores, em eletricidade, (Buruberri, 2014; Modolo, 2014).

O smelt passa para um tanque de dissolução que contém licor branco diluído, proveniente da caustificação, originando o licor verde. O licor verde que contém impurezas sólidas (dregs), passa por um clarificador, onde as impurezas sólidas são depositadas e a seguir bombeadas para um silo de armazenamento. Ao licor verde é adicionado um apagador de cal e extraem-se os resíduos inorgânicos alcalinos denominados grits, (Buruberri, 2014; Modolo, 2006; The Navigator Company, 2019).

O processo de caustificação tem como objetivo a regeneração do licor branco. No processo de caustificação o licor verde reage com a cal, originando licor branco e lamas de cal. O licor branco é clarificado e enviado para o digestor. As lamas de cal, são lavadas e seguem para o tambor rotativo de forma a serem calcinadas e formar cal, (Buruberri, 2014; Modolo, 2014).

Os efluentes líquidos gerados no processo de fabrico sofrem três tipos de tratamentos primário, secundário e de manuseamento das lamas, (Lisboa, 2008; Oliveira, 2009).

O tratamento primário de efluentes consiste em neutralizar a mistura de efluente ácido (sulfúrico) e a mistura de efluente alcalina (cal viva) e posterior separação dos sólidos leves, nós e material não cozido através da passagem por um sistema de grelhas mecânicas e areias, por sedimentação rápida. Por último os sólidos que estão em suspensão (fibras, resíduos de casca) são removidos. As lamas depositam-se nos sedimentadores primários, sendo removidas por bombagem, (Buruberri, 2014; Oliveira, 2009). Para o cumprimento das

normativas ambientais que regulam a descarga, após o tratamento primário é necessário reduzir a quantidade de matéria orgânica do afluente. Para tal o efluente é submetido ao tratamento secundário de lamas ativadas, é descarregado nas bacias de arejamento onde se encontram microrganismos em suspensão que degradam a matéria orgânica. O efluente com microrganismos é encaminhado para sedimentadores secundários onde são removidos os microrganismos, este sedimento constitui a lama biológica, (Buruberri, 2014; Oliveira, 2009).

As bactérias e odores do efluente são eliminadas com cloro, o efluente de seguida é conduzido para o coletor municipal, fazendo a descarga no mar, (Oliveira, 2009).

Resumindo, durante o processo de produção da pasta e do papel vários resíduos são produzidos, no entanto alguns deles são reaproveitados através do circuito de recuperação de químicos.

Na Figura 6 são apresentados os principais resíduos da indústria da pasta e do papel e os seus valores. Para uma correta interpretação da Figura 6 é importante realçar que partir de 2014 a forma de quantificação de todos os resíduos de madeira produzidos internamente, provenientes de processos de descasque e preparação de madeira para a produção de pasta, foi alterada. Deste modo, não deve ser feita uma comparação direta com os anos anteriores. Como produção de resíduos sólidos em 2017 destacam-se as lamas como o maior resíduo produzido, seguido da madeira e resíduos do descasque da madeira.

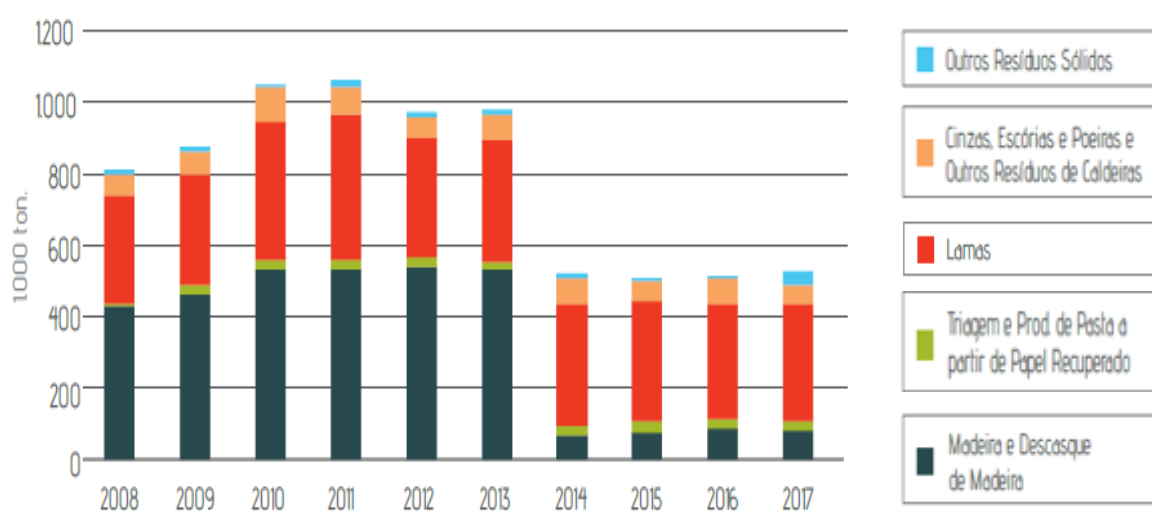


Figura 6 - Produção de resíduos sólidos, (CELPA, 2019)

2.1.5. O projeto PaperChain

O PaperChain é um projeto europeu que aborda a valorização dos resíduos da indústria da pasta e do papel. O projeto concentra-se nos fluxos de resíduos cujo destino atual é principalmente o aterro, (PaperChain, 2019f).

O projeto PaperChain apresenta um modelo de simbiose industrial centrado no uso de diferentes fluxos de resíduos gerados pela indústria da pasta e do papel, como matéria-prima valiosa para três setores industriais: construção civil, setor mineiro e indústria química, implementado cinco novos modelos de economia circular centrados na valorização dos resíduos gerados, como matéria prima secundária para esses mesmos setores, (European Commission, 2019).

O PaperChain tem como objetivos: (ACCIONA, 2019)

- Conceber a linha de base para os modelos de economia circular em torno da indústria da pasta e do papel e os setores selecionados;
- Implementar os processos de valorização à escala industrial;
- Demonstrar os modelos circulares em escala real em quatro países da Europa;
- Validar a sustentabilidade dos modelos de economia circular;
- Realizar os processos de certificação e orientações para as soluções recicladas;
- Desenvolver uma estratégia de mercado, rotas de exploração e garantir a replicação;

O PaperChain engloba 5 projetos piloto á escala real, um no setor das minas, um no setor químico e três no setor da construção, distribuídos pela Suécia, Eslovénia, Espanha e Portugal.

O Caso Circular 1, realizado em Portugal, divide-se em dois casos, Caso Circular 1A e Caso Circular 1B, em ambos os casos o setor a receber a matéria prima é o setor da construção. No Caso Circular 1A é estudada a viabilidade de a cinza de cal substituir o filler em elementos de betão pré-esforçados. No Caso Circular 1B é estudada a viabilidade da incorporação de dregs e grits como matérias-primas secundárias para pavimentos betuminosos, (PaperChain, 2019f).

O Caso Circular 2, é realizado em Espanha, também no setor da construção, neste caso são utilizadas cinzas volantes como matéria prima para substituição do cimento em obras de estabilização do solo em projetos rodoviários, o desempenho técnico e ambiental será demonstrado em três casos piloto com diferentes graus de complexidade, (ACCIONA, 2019; PaperChain, 2019b).

O Caso Circular 3, também no setor da construção é realizado na Eslovénia, neste caso são utilizadas as cinzas do processo de recuperação de energia como substituto de cascalho, usando essas cinzas como material de aterro juntamente com gabiões, para estabilização de deslizamentos de terra, (PaperChain, 2019c).

O caso circular 4 é realizado na Suécia, no setor da indústria química, neste caso são usadas as fibras proveniente do tratamento primário de efluentes, da indústria da pasta e do papel, como matéria prima secundária para a produção de derivados de etanol (tintas, por exemplo), (PaperChain, 2019d).

O caso circular 5 também é realizado na Suécia, no setor mineiro, neste caso circular os dregs, produzidos pela indústria da pasta e do papel são valorizados como camadas de vedação reativa para mitigar a drenagem de rochas ácidas em depósitos de resíduos de minas, (PaperChain, 2019e).

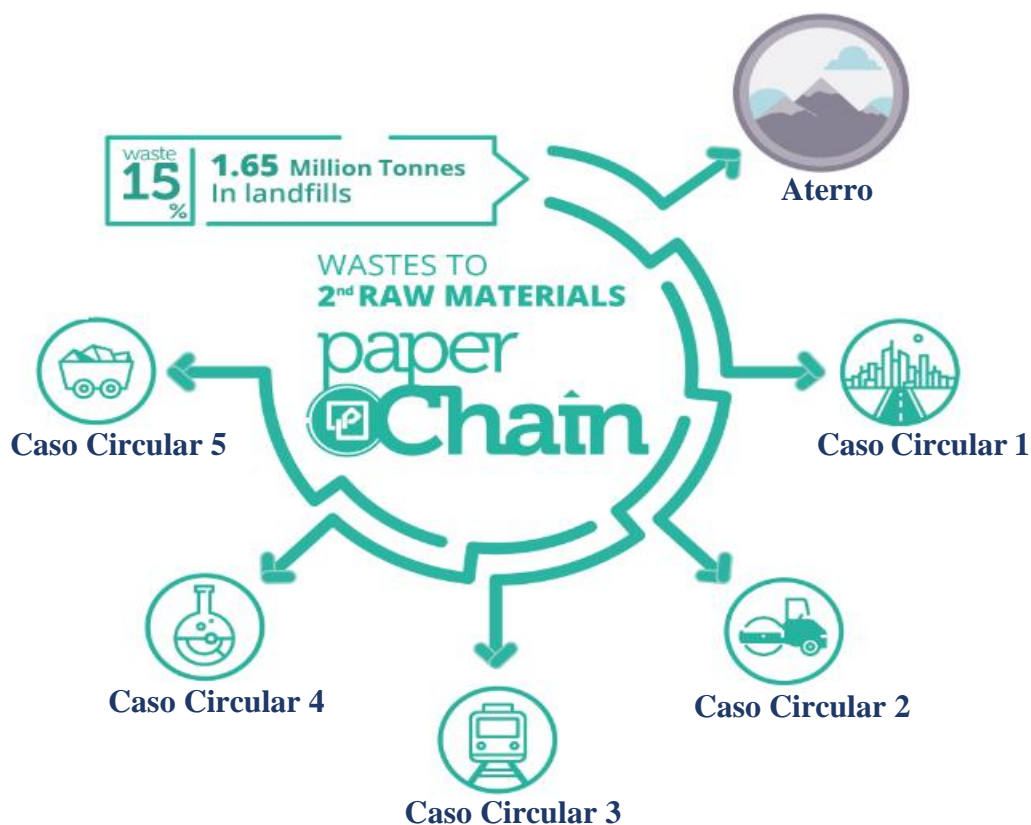


Figura 7 – Esquema representativo dos casos circulares do PaperChain, (PaperChain, 2019a)

Um dos objetivos desta dissertação é acompanhar e monitorizar o caso circular 1A do PaperChain. Este caso circular tem como objetivo a substituição total de filler por cinzas de cal, fornecidas pelo complexo industrial da Navigator Company, em Cacia, para o fabrico de pórticos com betão pré-esforçado, (PaperChain, 2019a).

Na Figura 8 é apresentado um esquema do processo deste caso circular.

De forma a implementar este caso circular em escala real, o objetivo passa por fabricar 4 pórticos, 3 com substituição total do filler pela cinza de cal e 1 pórtico com o betão de controlo. Os agregados utilizados serão de acordo com a EN 12620.

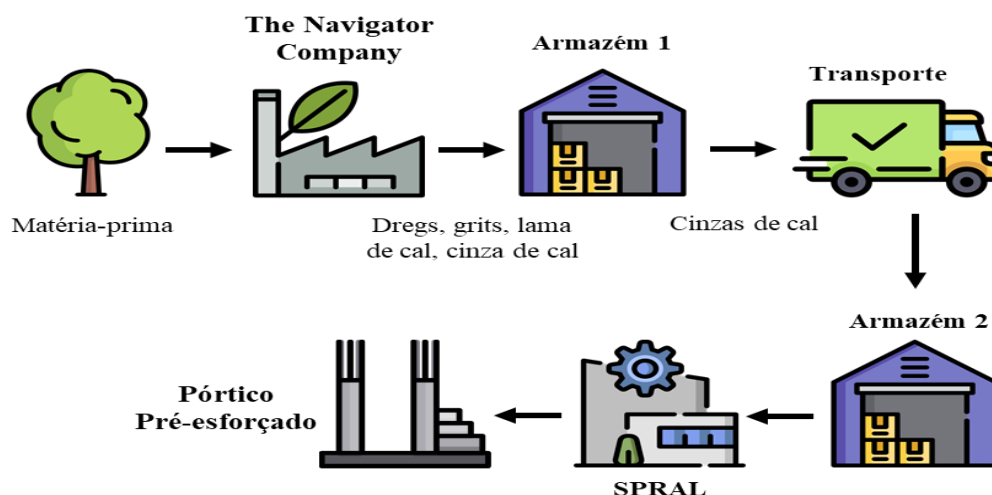


Figura 8 - Esquema do fluxo da cinza de cal, (Adaptado de Apresentação da Reunião Geral PaperChain, Aveiro, 2019)

O fabrico dos pórticos foi realizado em janeiro de 2020, as vigas são de secção variável e apresentam 19,80 m de comprimento, com uma altura de 0,4 m nas extremidades e 1,4 m a meio vão. Os pilares têm 10,25 m, e têm uma secção de 0,5 m x 0,4 m. Cada pórtico será espaçado 5 m. Na Figura 9 é apresentada uma vista da implantação geral.



Figura 9 – Implantação geral dos pórticos

Serão instalados sensores internos e externos nas vigas, de forma a serem monitorizados, até dezembro de 2020. Os sensores serão conectados a um data logger que irá armazenar as medições.

De forma a viabilizar o caso circular, de acordo com Decreto-Lei n.º 178/2006, foi necessário um pedido de licenciamento, designado título único ambiental.

2.1.6. Estudos recentes

Existe diversa biografia sobre a utilização de resíduos da indústria da pasta e do papel, no entanto a biografia sobre a aplicação de cinzas de cal não é tão basta quando comparada com os restantes resíduos da indústria da pasta e do papel.

Eroğlu, Acar, Üçüncü, & Imamoğlu, 2006, estudaram a utilização de cinza de cal na estabilização de solos e estradas florestais, obtendo resultados que permitem concluir que as deformações das estradas podem ser estabilizadas com cinza de cal.

Eroğlu, Acar, Üçüncü, & Imamoğlu, 2007, num outro estudo concluíram que a cinza de cal apresenta potencial para ser aditivo em compósitos de cimento.

Khunton, Nilpairach, & Sangsuk, 2014, estudaram a aplicação de cinza de cal como aditivo em tijolos de barro, provando que a resistência à flexão, e absorção de água eram próximas às amostras sem cinza de cal.

Buruberri, 2014, estudou a utilização de lamas de e cinzas de cal e outros resíduos da indústria da pasta e do papel, como matérias primas em argamassas, concluindo que os resíduos estudados são possíveis de ser valorizados em argamassas.

Modolo, 2014, estudou o uso de cinzas de cal como substituto de cimento em argamassas, com percentagens de 10 %, 20% e 30 % da massa de cimento, com os resultados obtidos concluiu que a resistência mecânica não é alterada significativamente com a adição de cinza de cal.

2.2. Utilização de biochar em argamassas

O biochar é um produto sólido poroso, rico em carbono, resultante de um processo denominado pirólise, onde a biomassa é termicamente convertida em ambiente controlado, com oxigénio limitado, (Castro, 2013; Vieira, 2017).

O biochar é um carvão ecológico, no entanto diferente do carvão, pois o biochar é mais rico em carbono, o seu processo de produção como é controlado não liberta para o meio ambiente

gases com efeito de estufa e pode ser produzido a partir de uma gama de diferentes matérias-primas de biomassa. No seu processo de produção é também possível ser gerada energia, (Vieira, 2017; Weber & Quicker, 2018).

Teoricamente o biochar pode ser produzido a partir da decomposição térmica de qualquer material carbonáceo. As matérias-primas e processos para a produção sustentável de biochar são, na realidade, limitados pela disponibilidade da matéria-prima, condições de mercado para o biochar e seus coprodutos de processo, e os impactos ambientais combinados, (Brewer & Brown, 2012).

O biochar tem sido utilizado na agricultura, sendo misturado nos solos, com o objetivo de os melhorar. Os fatores que tornam o biochar um bom agente nos solos podem igualmente contribuir no setor da construção. O pH elevado e a alta taxa de retenção de água do biochar fazem com que absorva parte da mistura de água durante a mistura do betão, reduzindo assim a quantidade de água livre no betão, a água absorvida pode então ser libertada durante a cura do betão, promovendo a hidratação secundária pela cura interna, podendo resultar no aumento da resistência do betão, (Brewer & Brown, 2012; Choi, Lee, & Yeon, 2012; Vieira, 2017).

Foram realizados alguns trabalhos sobre a utilização de biochar para a construção de estradas, mais recentemente, tem sido explorado como um material de construção, existindo uma tendência emergente em usar biochar como agregado no betão, (Gupta & Kua, 2017). Segundo Gupta & Kua, 2017, três das propriedades que tornam o biochar numa mais valia para a sua utilização no setor da construção, são, a baixa condutividade térmica, a elevada estabilidade química e a baixa inflamabilidade.

O Ithaka Institute, 2013, tem desenvolvido estudos para aplicar o biochar na construção, obtendo resultados que permitem afirmar que o biochar apresenta excelentes propriedades isolantes, melhora a qualidade do ar e absorve a humidade do ar.

A produção de biochar apresenta um rendimento que varia entre 10% a 35% da massa de biomassa inicial, dependendo das condições de operação do processo de pirólise da biomassa, (D. N. Bastos, 2016).

2.2.1. Conversão térmica através da pirólise

Os processos térmicos mais comuns são a pirólise lenta, pirólise rápida, pirólise instantânea, torrefação e a gaseificação. Em todos estes processos são geradas algumas quantidades de três produtos: sólidos (carvão e/ou cinzas), líquido (bio óleo) e gasoso (syngas ou gás pirolítico), (Choi et al., 2012).

Dentro dos processos térmicos, a pirólise tem recebido especial atenção.

O termo pirólise provém das origens gregas de “pyro” que significa fogo e “lysis” que significa decompor, (Rego, 2015).

A pirólise é um processo de decomposição térmica que ocorre em ambiente controlado, na ausência de oxigénio (atmosfera inerte) e a temperaturas elevadas, (D. N. Bastos, 2016; Conz, 2015).

Na pirólise ocorrem reações químicas que envolvem degradação molecular de moléculas maiores em moléculas menores na presença de calor, (Choi et al., 2012; Marques Silva, 2009).

No processo de pirólise podem ser utilizados diferentes combustíveis, como por exemplo biomassa, resíduos florestais, resíduos agrícolas, resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais, entre outros. O rendimento deste processo depende da matéria-prima utilizada e dos parâmetros das reações envolvidas na pirólise, (Carvalho, 2014).

Dependendo das condições de operação, o processo de pirólise pode ser classificado em três subclasses: pirólise lenta, pirólise rápida e pirólise instantânea, (D. N. Bastos, 2016).

Na Tabela 2 são apresentados os fatores que caracterizam cada tipo de pirólise.

Tabela 2 - Parâmetros de cada tipo de pirolise

Tipo de pirólise	Aquecimento	Temperatura (°C)	Produtos
Pirólise lenta	Lento	300 - 700	Carvão, bio óleo e gás
Pirólise Rápida	Muito rápido	600 - 1000	Bio óleo
Pirólise instantânea	Muito rápido	800 - 1000	Gás e bio óleo

A pirólise rápida e a pirólise instantânea são usadas na produção de gás e bio óleo, uma vez que a taxa de aquecimento é elevada, favorecendo a perda de massa e maior libertação de gases. Este tipo de pirólise ocorre com uma taxa de aquecimento rápida e requer elevadas temperaturas de operação, (D. N. Bastos, 2016; Conz, 2015).

A pirólise lenta ocorre sob uma baixa taxa de aquecimento e é usada na produção de biochar, pois promove a transformação do material em material sólido, (D. N. Bastos, 2016; Conz, 2015).

Alguns compostos presentes no bio óleo apresentam um potencial valor, podendo ser utilizados na síntese de outros compostos ou outros fins (aplicações energéticas, por exemplo), (Rego, 2015).

O produto gasoso é composto por gases não-condensáveis como o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogénio (H₂), metano (CH₄) e outros hidrocarbonetos leves, da decomposição dos componentes da matéria-prima, (D. R. S. Bastos, 2014; Rego, 2015).

Dependendo da quantidade do produto e da qualidade pretendida de biochar, cada processo utiliza diferentes condições de reação (temperatura, taxa de aquecimento, atmosfera reativa ou inerte, tipo de reator, etc.), (Brewer & Brown, 2012; Vieira, 2017).

A biomassa é constituída por celulose, hemicelulose e lignina, a pirólise leva á degradação destes constituintes, produzindo, produtos sólidos, líquidos e gasosos. A degradação térmica de lenhina e hemicelulose provoca uma perda considerável de massa sob a forma de produtos voláteis, ficando para trás uma matriz rígida de carbono amorfo, designado por biochar, (D. N. Bastos, 2016; Mesquita Filho & Roberto Vieira, 2018).

Ao contrário de uma combustão, que é exotérmica, a pirólise é um processo endotérmico, sendo necessário uma fonte de calor para o sistema. No entanto existem estudos, para que durante pirólise, os produtos gerados possam ser utilizados como fonte energética para fornecer calor para o próprio processo. Este procedimento, apesar de ainda não reunir um consenso na literatura, pode tornar a pirólise um processo menos endo térmico ou até auto térmico, em que o calor necessário para o processo pode ser produzido por ele mesmo, (Mario A. Heredia Salgado & Tarelho, 2018; Rego, 2015).

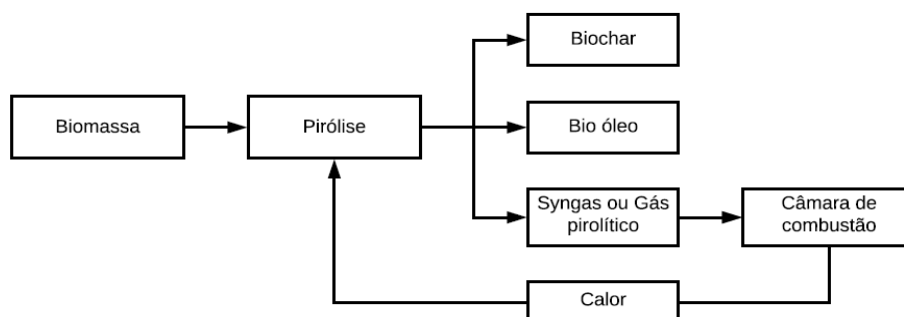


Figura 10 – Processo da pirólise e processo auto térmico, (Mario A. Heredia Salgado & Tarelho, 2018)

2.2.2. Resíduos da casca de arroz

O arroz é o 3º cereal mais cultivado mundialmente, sendo cultivado em mais de uma centena de países ocupando uma superfície de 165 milhões de hectares, que produzem mais de 715 milhões de toneladas anualmente, (COMPETE, 2019; Mesquita Filho & Roberto Vieira, 2018).

Em Portugal, são produzidos anualmente 179 777 toneladas de arroz “paddy” (com casca). A área de produção divide-se maioritariamente no vale do Tejo e alguns afluentes (14 000 hectares), Sado (9 000 hectares) e Mondego (6 000 hectares) é também cultivado nos vales do Vouga, no entanto com menos expressão, (FAOSTAT, 2019; Marketing Agrícola, 2017; Sousa, 2005).

No processo de transformação do arroz, desde a colheita do cereal até à obtenção do produto acabado, são originados sub-produtos de valor económico reduzido, (COMPETE, 2019).

No processo de colheita são recolhidos os grãos de arroz com a casca, conhecido por arroz “paddy”. A casca representa cerca de 20% de cada grão, (Sousa, 2005). Atendendo a esses valores, são produzidos a nível mundial 143 milhões de toneladas de casca de arroz e a nível nacional cerca de 36 000 toneladas.

Ao contrário de outros sub-produtos (farelo e palha de arroz), a casca de arroz destaca-se não só pelo seu abundante volume de produção, mas também por representar um resíduo agrícola subvalorizado indigerível, sendo usada em várias aplicações não-alimentares de baixo valor, nomeadamente para o revestimento de pisos de locais de permanência de animais, condicionamento de solos ou o simples despejo em aterros e queima a céu aberto. Estas abordagens, para além de não constituírem fonte de rendimento, acarretam problemas ambientais, (COMPETE, 2019; Rama, 2014).

A casca de arroz possui uma superfície dura que demora aproximadamente 5 anos a decompor-se, representando um resíduo que ocupa muito espaço sendo necessárias áreas de despejo de tamanho considerável. Assim, este resíduo torna-se nocivo, quando na realidade pode ser aproveitado de forma sustentável quer ecologicamente quer financeiramente, (COMPETE, 2019; Rama, 2014).

A composição química da casca do arroz é similar às fibras orgânicas, contendo, celulose, lenhina, hemicelulose, o seu composto principal é a sílica, proporcionando características pozolânicas que tem capacidade de melhorar a durabilidade do betão armado.

2.2.3. Resíduos do caroço de azeitona

A extração de azeite está fortemente concentrada nos países do Mediterrâneo que representam cerca de 95% da produção oleícola a nível mundial. Isto deve-se ao facto desta zona ter condições climáticas propícias, tais como exposição solar e clima seco para o cultivo das oliveiras, (Brito, 2016; Ferraz, 2012).

As culturas de oliveira ocupam mundialmente uma área de 11,5 milhões de hectares, produzindo perto de 20,3 milhões de toneladas de azeitona anualmente, (CONFAGRI, 2017). Em Portugal, no ano 2018 foram produzidas 725,368 toneladas de azeitona, as culturas de oliveira ocupavam cerca de 361,177 hectares, distribuídas pelas principais regiões olivícolas nacionais, Trás-os-Montes, Alto Douro, Beira Interior, Ribatejo e Alentejo, (Brito, 2016; PORDATA, 2019b, 2019a).

Cerca de 96% da produção da azeitona em Portugal tem como destino final a sua transformação em azeite, (Brito, 2016).

Nos lagares onde o azeite é produzido são gerados dois tipos de resíduos, um líquido com uma tonalidade escura, denominado águas ruças e um resíduo sólido, constituído por uma mistura de caroços, peles e celulose, denominado bagaço de azeitona. A ramagem e as folhas separadas das azeitonas também representam resíduos do processo, no entanto do ponto de vista ambiental não são tao importantes, (Brito, 2016; Ferraz, 2012).

As águas ruças correspondem a 50% dos resíduos gerados, o bagaço de azeitona corresponde a 30%, os 20% restantes são o azeite, (Brito, 2016; Ferraz, 2012).

Num quilograma de bagaço de azeitona, 600 gramas correspondem a pedaços de caroço e 400 gramas a polpa da azeitona, no entanto estes valores variam consoante o sistema de extração e a variedade da azeitona, (Brito, 2016).

A produção de azeite é uma atividade agroindustrial de elevada importância económica nos países do mediterrâneo. No entanto associada á produção do azeite está a produção de grandes quantidades de resíduos originadas durante o seu fabrico, o bagaço de azeitona e as águas ruças, que quando descarregados indevidamente para o meio ambiente potenciam graves problemas tóxicos e com efeitos nocivos para os ecossistemas, (Ferraz, 2012; D. Martins, 2016).

A extração do azeite envolve diferentes etapas, como a lavagem, moagem, batedura e a própria extração do azeite. As quantidades e propriedades físico-químicas dos resíduos produzidos depende do sistema usado para a extração, (Roig, Cayuela, & Sánchez-Monedero, 2005; Sempiterno & Fernandes, 2014).

Os sistemas de extração existentes são o de prensa hidráulica, o sistema contínuo de duas fases e o sistema contínuo de três fases. Estes métodos diferem no volume de extração, no rendimento, na quantidade de água consumida e nas quantidades de subprodutos gerados, (Roig et al., 2005; Sempiterno & Fernandes, 2014).

Em Portugal, num total de 504 de lagares de azeite, 191 operam com o sistema de prensas hidráulicas, 203 com o sistema contínuo de duas fases e 110 com o sistema contínuo de três fases. Entre os sistemas de extração de azeite o sistema contínuo de duas fases elimina praticamente a produção de águas ruças, no entanto é o sistema que produz maior quantidade de bagaço de azeitona, (Brito, 2016; Freitas, 2007; Sempiterno & Fernandes, 2014).

Na Tabela 3 são quantificados os resíduos gerados por cada sistema, no processamento de uma tonelada de azeitona.

Tabela 3 - Quantidade de resíduos produzidos por sistema de extração, (Freitas, 2007; Sempiterno & Fernandes, 2014)

Sistema de extração	Bagaço de azeitona (kg)	Água ruças (m ³)
Prensas hidráulica	400	0,40 – 0,60
Sistema contínuo de duas fases	700 - 800	0,12 – 0,2
Sistema contínuo de três fases	500-600	1,0 – 1,2

2.2.4. Estudos recentes

2.2.4.1. Biochar de casca de arroz

Ao longo dos últimos anos devido à sensibilização para a importância da durabilidade do betão e para a necessidade de reduzir o impacto ambiental, a valorização de resíduos e dado o potencial da casca de arroz, têm sido conduzidos diversos estudos sobre a possibilidade da utilização da casca de arroz no setor da construção.

Sousa, 2005, estudou a substituição de 7% do cimento em provetes de betão, por cinzas de casca de arroz, os resultados obtidos provaram que a utilização da cinza de casca de arroz melhora a durabilidade do betão sem uma redução significativa da resistência.

Choi et al., 2012, estudou as propriedades do biochar de madeira, casca de arroz e de switchgrass (erva) e a sua capacidade de retenção de água quando substituindo 5%, 10%, 15% e 20% de cimento em argamassas.

Khan, Jamil, Karim, & Zain, 2014, estudaram a resistência à compressão, durabilidade, resistência à penetração dos cloretos, absorção de água, resistência à corrosão, em betões com 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30 % de biochar de casca de arroz.

Muthukrishnan et al., 2019, substituíram 20 % da massa de cimento em argamassas, por 18% de cinza de casca de arroz e 2% de biochar de casca de arroz, no entanto as amostras com mistura de cinza e biochar de casca de arroz apresentavam menor resistência à compressão que a amostra de controlo. Aumentando a percentagem de biochar de casca de arroz de 2% para 6% e diminuindo a percentagem de cinza de casca de arroz de 18 % para 14 % obtiveram um aumento de 16.5 % da resistência aos 28 dias.

Akhtar & Sarmah, 2018, substituíram até 1% da massa de cimento por biochar de casca de arroz. As amostras com substituição de 0.1 % da massa de cimento por biochar de casca de arroz apresentam maior resistência á compressão aos 7 dias quando comparadas com o betão de referência. A absorção de água das amostras com biochar é semelhante à das amostras de controlo.

Asadi Zeidabadi, Bakhtiari, Abbaslou, & Ghanizadeh, 2018, estudaram a substituição do cimento no betão com 0%, 5% e 10% de biochar de casca de arroz, obtendo um aumento de 12 % da resistência á compressão com a substituição de 5% da massa do cimento com biochar de casca de arroz.

2.2.4.2. Biochar de caroço de azeitona

É cada vez mais importante procurar estratégias de valorização e/ou tratamento das águas ruças e do bagaço de azeitona. Atualmente estes resíduos são aplicados na produção de alimentos para animais e bio convertidos em fertilizantes, no entanto estas aplicações não são eficientes e em alguns casos o estudo ainda não foi investigado o suficiente em laboratório, (D. Martins, 2016).

Al-Akhras, Al-Akhras, & Attom, 2008, estudaram a influência da utilização de cinzas de resíduos de azeitona em betão exposto a altas temperaturas, utilizaram percentagens de resíduos de azeitona de 7%, 15% e 22% da massa do cimento, comprovando que o comportamento do betão com cinzas de resíduos de azeitona é melhor que o comportamento do betão de controlo e que o comportamento do betão com cinzas de resíduos de azeitona aumenta com o aumento de percentagem das cinzas.

N. M. Al-Akhras & Abdulwahid, 2010, estudaram a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas de argamassas, com resíduos de azeitona, substituindo parcialmente o cimento ou

a areia, utilizando percentagens de resíduos de azeitona de 5%, 10% e 15%. Substituindo a areia conclui-se que a trabalhabilidade diminui com o aumento das cinzas de resíduos da azeitona e que as propriedades mecânicas aumentam com o aumento da percentagem das cinzas. Com as mesmas percentagens, mas substituindo o cimento conclui-se que a resistência à compressão e à flexão diminuem com o aumento da percentagem da cinza de resíduos da azeitona.

Al-Akhras, 2012, estudou o efeito da utilização das cinzas do caroço da azeitona em betão exposto a reações álcalis-sílica, utilizou percentagens de cinza do caroço da azeitona de 7%, 15% e 22% de areia fina, constatando que o betão com cinzas do caroço da azeitona é mais resistente á detreorização das reações álcalis-sílica.

Plaza, González, Pis, Rubiera, & Pevida, 2014, estudaram a influência do biochar de casca de amêndoa e caroço de azeitona na absorção de dióxido de carbono. Devido aos micróporos do biochar concluíram que este biochar é capaz de absorver dióxido de carbono e outros gases.

A maioria dos estudos desenvolvidos tem como alvo as cinzas dos resíduos de azeitona. No entanto existem alguns estudos sobre a produção do biochar de caroço de azeitona bem como o seu potencial na construção.

3. UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE CAL EM BETÃO PRÉ-ESFORÇADO - PAPERCHAIN

Neste capítulo serão descritos os ensaios utilizados para a caracterização dos materiais usados no fabrico dos pórticos, com foco na cinza de cal e no filler. Todo o processo de produção das vigas e pilares será devidamente explicado, tal como o processo de instalação e monitorização dos pórticos.

3.1. Caracterização dos materiais

A produção dos pórticos foi realizada nas instalações da empresa SPRAL - Sociedade de Pré-esforçados de Aveiro, Lda. Todos os materiais usados na produção das vigas e dos pilares são os materiais usados regularmente pela empresa SPRAL - Sociedade de Pré-esforçados de Aveiro, Lda, com exceção da cinza de cal, que será o substituto ao filler usado por norma pela empresa.

A cinza de cal foi seca e armazenada num silo nas instalações da Navigator Company, posteriormente foi transportada, num contentor adequado para as instalações da empresa onde os pórticos foram produzidos.

Os materiais usados na produção dos pórticos são caracterizados através de vários ensaios. As areias, o filler e a cinza de cal foram sujeitas a uma análise granulométrica. As propriedades da cinza de cal e do filler, foram também estudadas através do método de Coulter onde se obteve a curva de distribuição granulométrica e o tamanho das partículas. Foi também determinada a área superficial específica do filler e da cinza de cal.

Os ensaios realizados e o procedimento adotado serão descritos.

3.1.1. Método de Coulter

O método de Coulter permite quantificar e determinar o tamanho das partículas, detetando e medindo variações de resistência elétrica. As partículas são suspensas num líquido condutor e são forçadas a passar numa pequena abertura onde a existência de eletrodos gera corrente elétrica. A corrente elétrica gerada origina pulsos elétricos passíveis de ser quantificados. A avaliação das perturbações geradas pela passagem das partículas

permite elaborar uma curva de distribuição granulométrica do material, (Marianito Ascensão, 2015).

3.1.2. Difração de raios X

A difração de raios X (DRX) é uma técnica não destrutiva importante para caracterizar os materiais, pois permite identificar e quantificar as suas fases cristalinas. É utilizada na identificação, caracterização e determinação da estrutura cristalográfica dos minerais, (Gemusse, 2014; Macedo, 2016).

Os raios X ao interagirem com a matéria provocam a sua difração. Cada sólido cristalino tem um padrão único característico, podendo ser usado como uma “impressão digital” na sua identificação, (Gemusse, 2014). Este ensaio consiste em emitir um feixe de raios x monocromático, com comprimento de onda conhecido, sobre uma camada fina da amostra, com átomos regularmente espaçados, fazendo com que cada átomo se torne uma fonte de radiação. Este fenómeno causará interferência das ondas emitidas pelos átomos. Um feixe difratado resulta da construção de interferências, porque apenas as ondas de interferências construtivas correspondem aos máximos de difração, (Gemusse, 2014; Macedo, 2016).

O feixe ao difratar reflete com ângulos que são característicos do retículo cristalino, obtendo-se o correspondente difratograma. Este fenómeno dá origem à difração com base na lei de Bragg, obtendo-se deste modo um difratograma da amostra, (Macedo, 2016).

A identificação dos minerais nos difratograma baseia-se na localização dos picos e as determinações quantitativas baseiam-se nas áreas e alturas dos mesmos picos. A identificação de fases da amostra é realizada pela comparação do difratograma com difratograma de uma base de dados de referência, (Gemusse, 2014; Macedo, 2016).

3.1.3. Área superficial específica

A área superficial específica foi calculada recorrendo à teoria de B.E.T. (Brunauer-Emmett-Teller) através da determinação do volume de gás (azoto) necessário para formar multicamadas moleculares sobre toda a superfície de uma amostra a temperatura constante (temperatura de ebulição do azoto), (Instituto Pedro Nunes, 2020; Macedo, 2016).

3.2. Caraterização do betão

As estruturas de betão são concebidas para, durante o seu período de vida útil, garantirem níveis de segurança e durabilidade. A qualidade de um betão é avaliada pelas suas características físicas, mecânicas e pela sua durabilidade. Os ensaios sobre o betão endurecido ditam em última instância o desempenho e adequabilidade do betão, (L. M. M. Ferreira, 2007).

De todas as betonagens dos pilares e vigas foram retirados provetes cúbicos (150mm x 150 mm x 150 mm) para efetuar testes, de forma a caraterizar o betão com cinza de cal comparando com o betão padrão (betão com filler) produzido pela empresa SPRAL, Lda. Para caraterização mecânica dos betões produzidos realizaram-se ensaios da resistência à compressão, ensaio de ultrassons e absorção de água por capilaridade.

3.2.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão é a característica mecânica mais importante do betão, pois nas estruturas a função deste material é essencialmente resistir às tensões de compressão.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em cubos conforme a NP EN 12390-3 de 2011.

A metodologia de ensaio consiste em posicionar o provete na superfície de ensaio (certificando-se de que esta se encontra limpa e seca), de modo a que a carga seja aplicada perpendicularmente à direção da moldagem. De acordo com a EN 12390-4 de 2003, a carga aplicada deve ser contínua e a uma velocidade constante.

As roturas verificadas podem ser ou não satisfatórias, como exemplificado na Figura 11. Caso se verifique uma rotura não satisfatória, esta deve ser registada.

De acordo com a NP EN 12390-3 a resistência á compressão é dada pela equação:

$$f_c = \frac{F}{A_s} \quad (1)$$

Em que:

f_c – é a resistência à compressão, em Mpa (N/mm²);

F – é a carga máxima à rotura, em N;

A_s - é a área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada, em mm²;

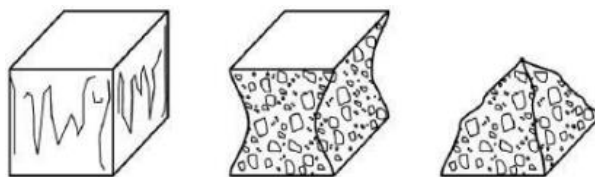


Figura 11 – Roturas satisfatórias de provetes cúbicos

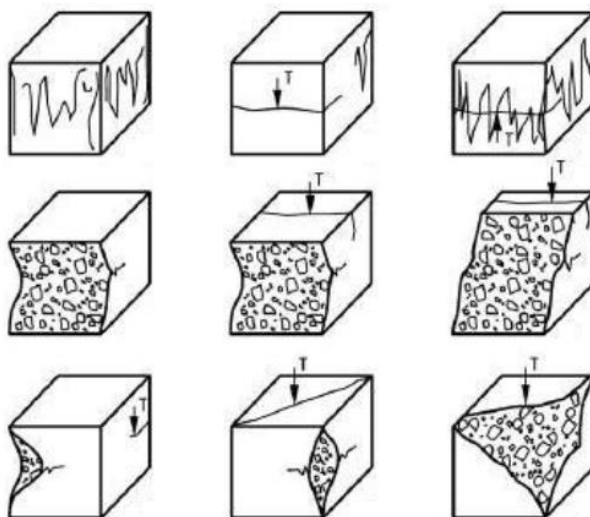


Figura 12 – Roturas insatisfatórias de provetes cúbicos



a)



b)

Figura 13 – Teste de resistência à compressão: a) Equipamento usado; b) Provede a ser ensaiado

3.2.2. Massa volúmica em estado endurecido

O ensaio de determinação da massa volúmica do betão endurecido permite avaliar a sua compacidade, a percentagem de vazios existente no betão e permite quantificar o peso do material a considerar no cálculo de uma estrutura de betão, (Lourenço, 2016).

A norma EN 12390-7 de 2003 reconhece três métodos de determinar a massa e o volume dos provetes. A massa dos provetes pode ser determinada nas condições tal como recebido, saturado em água e seco em estufa. O volume dos provetes pode ser obtido pelo método do deslocamento de água, medindo as dimensões dos provetes ou considerando que os provetes apresentam as dimensões dos moldes. Para a determinação da massa volúmica em estado endurecido, o cálculo da massa dos provetes foi efetuado pela secagem em estufa e o volume pelas dimensões dos moldes.

Este ensaio foi realizado aos 28 dias de cura, em provetes cúbicos de 150 mm de aresta.

Os provetes foram colocados numa estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até a massa do provete ser constante.

A massa volúmica é calculada utilizando a seguinte equação:

$$D = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Em que:

D – Massa volúmica endurecida (kg/m^3);

m – Massa do provete (kg)

V – Volume do provete (m^3)

3.2.3. Ensaio de ultrassons

Este ensaio utiliza ultrassons na caracterização do betão, portanto é um ensaio não destrutivo. A metodologia para a medição da velocidade de impulsos ultrassónicos em estruturas de betão encontra-se normalizada na EN 12504-4 de 2007 e consiste na medição do tempo de percurso de uma onda ultrassónica a atravessar uma camada conhecida de betão, ou seja, existem dois transdutores, um emissor e um recetor, onde o emissor emite as ondas longitudinais que atravessam o betão e o recetor capta a onda recebida. O tempo de percurso da onda é então medido. Quando o betão é de boa qualidade, em termos de densidade uniforme e homogeneização, a onda é mais rápida a atravessar a camada de betão. Quando isso não acontece a onda é mais lenta, (M. Ferreira, 2017).

O ensaio para obtenção da velocidade de propagação dos ultrassons pode ser realizados por três modos: direto, indireto e semidirecto. O método direto é o que apresenta maior fiabilidade nos resultados uma vez que o percurso é medido com maior rigor, (M. Ferreira, 2017; Sampaio, 2010). Como indica a Figura 14, o ensaio foi realizado pelo modo direto e o aparelho utilizado foi um Pundit (Portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester).

As superfícies de apoio devem apresentar-se lisas e limpas, colocam-se os transdutores sobre duas faces opostas do provete (transmissão direta), com aplicação de massa de contacto nestas superfícies. Uma vez calibrado o aparelho, fazem-se três leituras por provete.



Figura 14 – Medição com o Pundit

Este método foi utilizado para determinar o módulo de elasticidade do betão.

Determinado o tempo médio que o impulso da onda ultrassónica demora a percorrer a distância do provete (distância conhecida), obtém-se a velocidade de impulso. Sabendo a massa volúmica do provete e a velocidade de impulso é possível calcular o módulo de elasticidade de cada provete.

3.2.4. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água é uma das propriedades mais correlacionadas com a durabilidade do betão. O ensaio de absorção de água por capilaridade permite medir a capacidade do betão de absorver água por ascensão através dos vasos capilares. A absorção por capilaridade consiste na diferença entre a massa do provete de betão endurecido que esteve com uma das

faces em contacto com água durante um determinado tempo e a massa do provete seco, dividida pela área da superfície em contacto com a água, (M. Ferreira, 2017; Lourenço, 2016).

A absorção de água é definida como a entrada de água na rede porosa do betão devido a forças capilares, que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares, sendo dependente do diâmetro capilar. Assim sendo, quanto menor for a absorção do material, mais protegida estará a estrutura, (M. Ferreira, 2017).

O ensaio foi realizado aos 28 dias de cura do betão em provetes cúbicos com aresta de 150 mm, especificados na norma NP-EN 12390-1.

O ensaio da absorção de água por capilaridade consiste em colocar uma das faces dos provetes de betão em um tabuleiro com 5 mm de água e efetuar pesagens da massa do provete, 5 minutos, 10 minutos, 30 minutos, 60 minutos, 90 minutos e 120 minutos após o provete ser colocado em contacto com a água.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade é obtido através da relação da quantidade de água absorvida pela área em contacto com a água e a raiz do tempo.

3.2.5. Sistema de monitorização

A monitorização é importante pois permite conhecer o comportamento das vigas com cinza de cal e sem cinza de cal, a monitorização foi efetuada com recurso a instrumentação específica. Foram instalados sensores numa viga com cinza de cal e numa viga com o filler. Os sensores instalados são sensores de cordas vibrantes. A aplicação de sensores de cordas vibrantes em estruturas de betão armado é prática corrente. Estes sensores possuem duas placas metálicas nas suas extremidades que permitem garantir uma maior aderência entre o sensor e o betão, sendo a extensão medida segundo o seguinte princípio: no interior do sensor existe uma corda metálica cuja frequência de vibração é passível de ser correlacionada com a tensão na corda. Por outro lado, uma variação da deformação do sensor, ou seja, da estrutura pois considera-se existir uma aderência perfeita entre ambos, provoca uma alteração na tensão da corda metálica. Assim, através de uma corrente que percorre uma bobine instalada junto à estrutura metálica, é possível criar um campo magnético que excita a corda, a qual passa a oscilar a uma frequência associada à tensão correspondente. A oscilação da corda no interior desse campo magnético induz uma corrente alternada na bobine que é detetada pelo sistema de aquisição, (Teixeira, Leitão, Faria, & Azenha, 2012).

Os sensores estão ligados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados (data logger), periodicamente os dados armazenados pelo data logger tem de ser transferidos para um computador. Os sensores de cordas vibrantes são aplicados de forma a determinar uma deformação, que associada ao comprimento do sensor permite extrapolar o valor da extensão no betão. Os sensores de cordas vibrantes têm incorporado um sensor de temperatura, o que permite também monitorizar temperaturas.

Os sensores usados são de uso interno, isto é, de embeber no betão e de uso externo, aplicados à superfície da viga. De forma a ganhar sensibilidade, todos os sensores foram previamente testados.

Os sensores de embeber (internos) foram instalados a meio vão e a um terço do vão da viga. A meio vão da viga foram instalados lateralmente três sensores exteriores, no topo da secção transversal, a meio e no fundo da secção transversal.

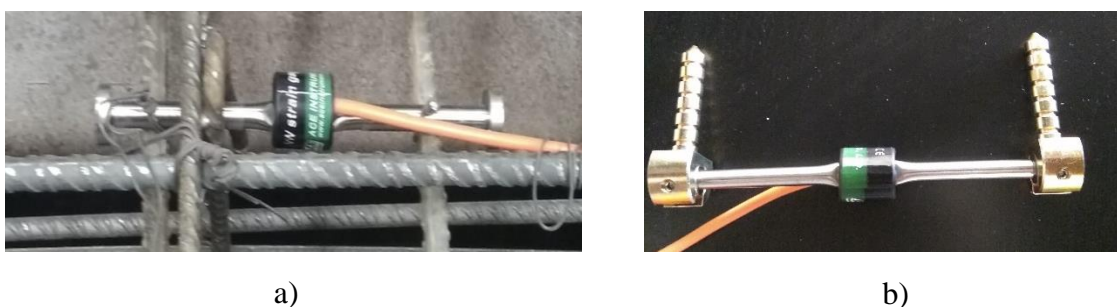


Figura 15 – Pormenor sensores usados: a) Sensor interno; b) Sensor externo

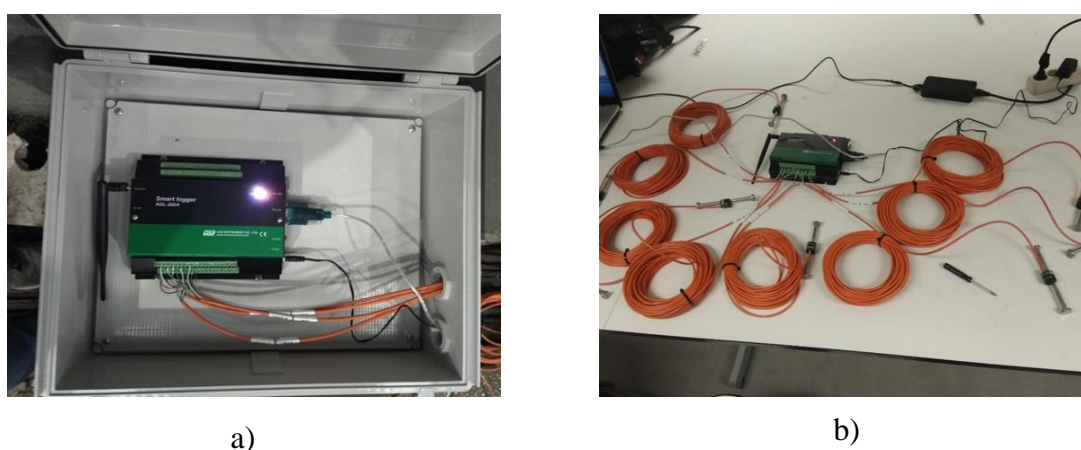


Figura 16 – Pormenor do data logger: a) Data logger; b) Ligação sensores ao data logger

3.3. Produção dos elementos pré-fabricados

Todos os elementos foram produzidos na SPRAL - Sociedade de Pré-esforçados de Aveiro, Lda, empresa que se dedica à produção de estruturas pré-fabricados de betão.

Foram produzidos 4 pórticos, totalizando 4 vigas e 8 pilares.

Ao longo deste capítulo são apresentados vários registos fotográficos das várias etapas da produção das vigas e dos pilares.

O processo de fabrico dos pórticos com cinza de cal e sem cinza de cal, difere apenas na adição da cinza de cal aos restantes inertes.

Os agregados, que se encontram em “silos” separados consoante a sua calibragem, o cimento e o filler, são transportados por tapetes rolantes para uma central de betonagem

O transporte do filler até à central de betonagem difere do transporte da cinza de cal até á betoneira. O filler está armazenado num silo e o sistema de transporte é um sistema automatizado, a cinza de cal como é apenas usada para este estudo teve de ser adicionada manualmente.



a)



b)

Figura 17 – Produção do betão: a) Central de betonagem; b) Transporte do betão;

O betão é transportado através de baldes que se deslocam suspensos de pontes rolantes até à cofragem de moldagem das vigas.

A produção das vigas e dos pilares é realizada numa pista de pré-esforço. A pista de pré-esforço é constituída por uma base metálica onde são aplicadas as cofragens, também

metálicas, com o perfil da peça que se pretende. Nos extremos da pista existem ancoragens, ligadas ao pavimento, onde são fixados os cordões do pré-esforço.

Antes da colocação da cofragem é colocada toda a armadura necessária



Figura 18 – Ancoragem de pré-esforço



Figura 19 – Armadura das vigas

Após a colocação da armadura foram colocados os sensores internos na armadura.



Figura 20 – Colocação sensores internos

Concluída a colocação da armadura e dos sensores internos, é colocada a cofragem com o perfil da peça e inicia-se a betonagem. O betão é transportado até à pista de pré-esforço, a vibração do betão é feita através de vibradores incorporados na cofragem. De todas as betonagens são retiradas amostras de betão para controlo da resistência.

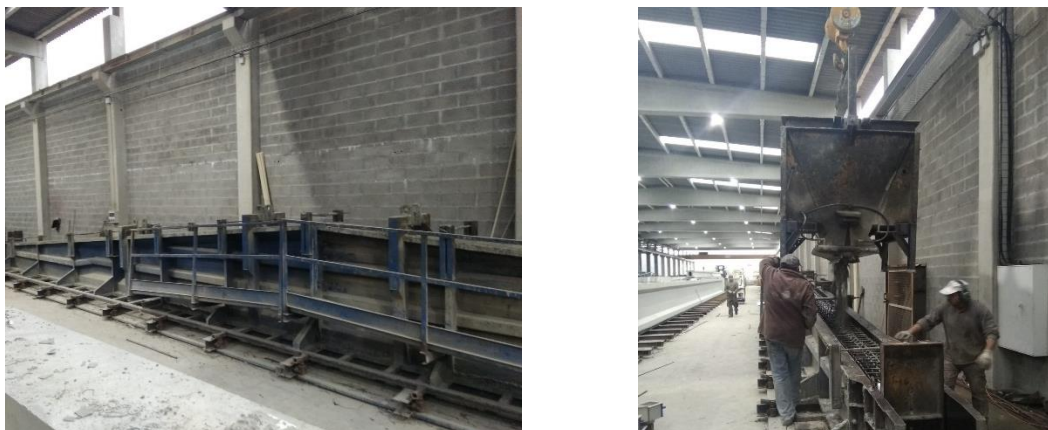


Figura 21 – Cofragem e betonagem



a)

b)

Figura 22 – Provetes de controlo da resistência: a) Após betonagem; b) Provetes em cura

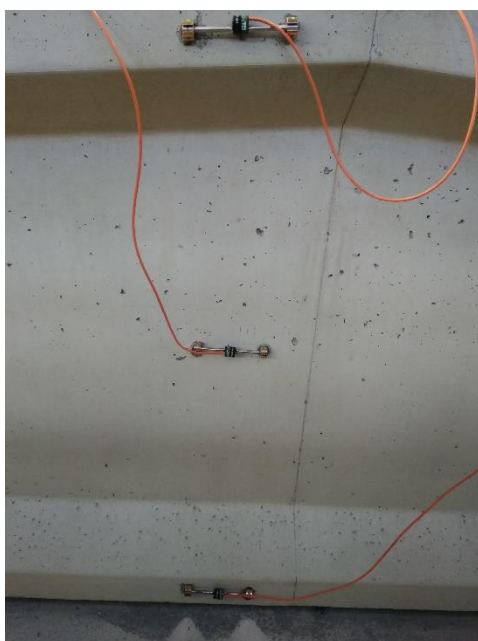
Os provetes foram deixados durante 72 horas ao ar livre. Ao fim desse processo é retirado o molde, os provetes são colocados em cura numa câmara climática com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $95 \pm 5\%$. O processo de cura é realizado conforme a norma EN 12390-2 de 2009.

Dois dias após a betonagem a cofragem é retirada.

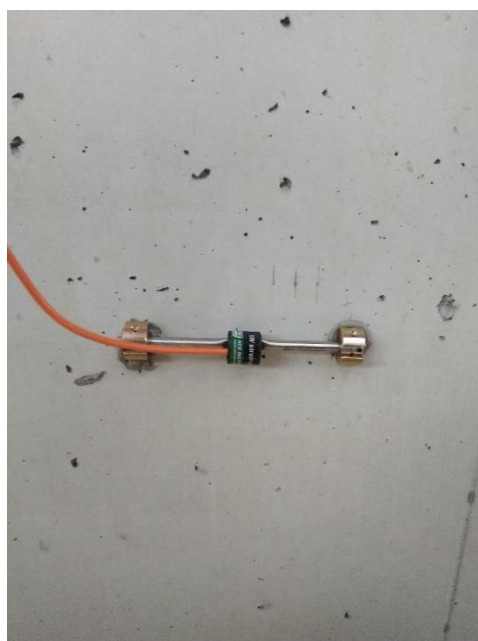


Figura 23 – Descofragem da viga

Antes da instalação dos pórticos foram instalados os sensores exteriores na superfície da viga. O betão foi perfurado até a saliência do sensor entrar na totalidade. Após perfurado, com uma bomba de ar a perfuração foi limpa, colocou-se o sensor na posição pretendida e foi aplicada uma bucha química.



a)



b)

Figura 24 – Sensores exteriores: a) Posicionamento dos sensores exteriores; b) Pormenor sensor exterior

3.4. Instalação dos pórticos

Antes da montagem dos elementos pré-fabricados foi necessário proceder ao transporte dos elementos para o local da montagem. Neste caso circular como o local da obra é nas mesmas instalações da produção das peças pré-fabricadas não existem muitas condicionantes, apesar disso as peças têm de ser transportadas com auxílio a um camião. Durante o transporte foi necessário desligar os sensores, existindo assim uma interrupção nas medições obtidas.

Este tipo de construção oferece inúmeras vantagens, como a maior rapidez de construção e a inexistência de desperdícios na execução e montagem.

Os elementos foram montados com auxílio a uma grua móvel e dois homens a dirigir o elemento com recurso a duas cordas guias presa a cada lado do elemento. Devido à elevada dimensão das peças pré-fabricadas é necessário especial cuidado com o içamento e posicionamento.

As sapatas utilizadas também são pré-fabricadas.

As figuras abaixo demonstram as várias etapas da montagem dos pórticos.



a)



b)

Figura 25 – Pormenores montagem dos pilares: a) Sapata; b) Montagem dos pilares

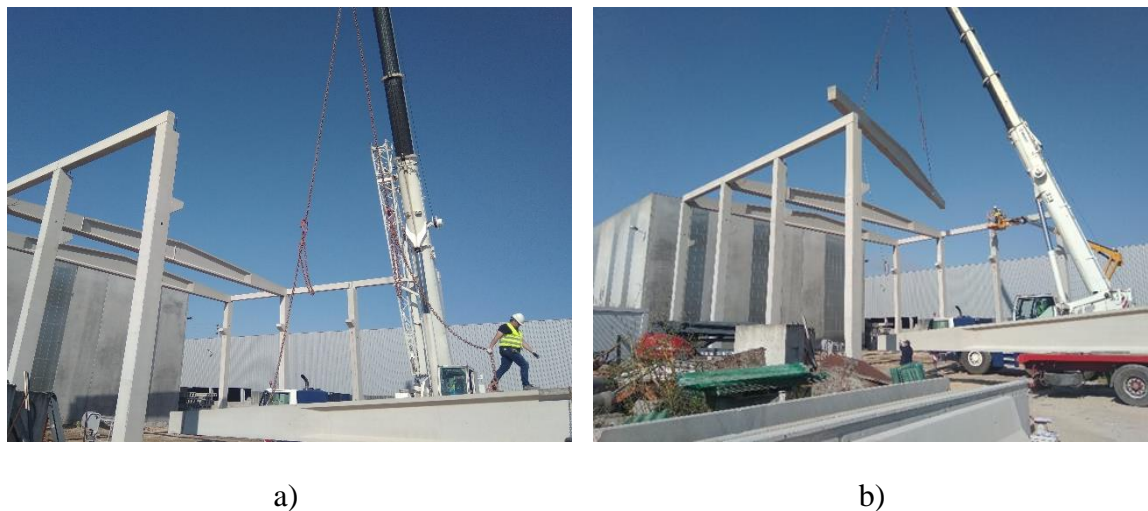


Figura 26 – Pormenores montagem das vigas: a) Retirada da viga do camião; b) Montagem da viga



Figura 27 – Instalação final

3.5. Resultados obtidos

Neste capítulo são apresentados os diferentes resultados obtidos para a caracterização dos materiais usados na produção das vigas e pilares. Serão analisados e discutidos os resultados obtido pelos ensaios para a caracterização do betão e os resultados obtidos pelos sensores instalados nos pórticos.

3.5.1. Características dos materiais

O betão é constituído por ligante (cimento ou cimento e adições), água, agregados e eventualmente adjuvantes. Neste capítulo são apresentados os resultados efetuados aos materiais usados na produção das peças pré-fabricadas.

As areias, o filler e a cinza de cal foram sujeitas a uma análise granulométrica.

Para conhecer melhor as propriedades da cinza de cal e do filler, através do método de Coulter foi obtida a curva de distribuição granulométrica e o tamanho das partículas. Foi também determinada a área superficial específica.

Neste capítulo são expostas comparações entre o filler e a cinza de cal, na Figura 28 observa-se a diferença visual entre ambos.



Figura 28 - Filler (esquerda) e Cinza de Cal (direita)

3.5.1.1. Análise granulométrica dos materiais usados

As especificações para os agregados usados no betão estão presentes na norma EN 12620:2002 +A1:2010.

O betão é constituído entre 60% a 75% de agregados (finos e grossos), dada a sua elevada percentagem na composição é importante uma correta seleção dos agregados, (Barbosa, 2013).

Para a determinação da distribuição granulometria dos materiais usados nos pórticos foram usados os peneiros com a seguinte abertura: 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,500 mm, 0,250 mm, 0,125 mm e 0,063 mm.

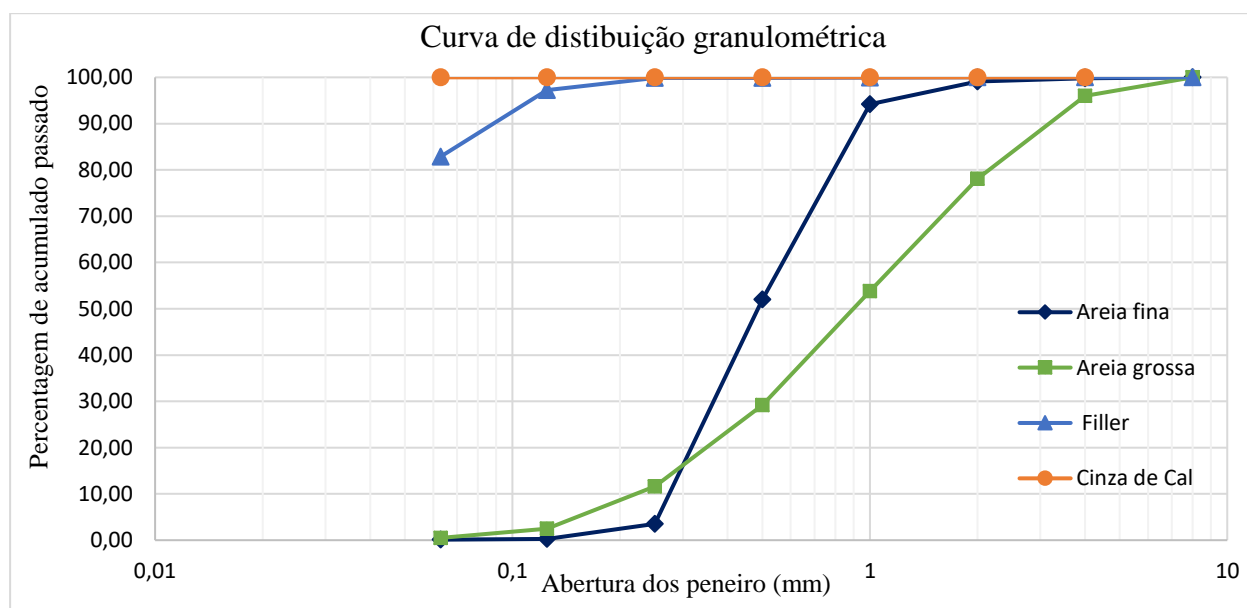


Figura 29 – Curva de distribuição granulométrica dos agregados

De acordo com a norma EN 12620:2002 +A1:2010, o termo filler, representa o agregado cuja maior parte passa no peneiro 0,063 mm e que pode ser adicionado ao betão para fornecer certas propriedades. Observando a Figura 29, verifica-se que tanto no filler como na cinza de cal, grande parte do material passa no peneiro 0,063 mm. O filler apresenta 82,89% de material passado no peneiro 0,063 mm, enquanto que a cinza de cal apresenta 100% de material passado no peneiro 0,063 mm. Posto isto, através da granulométrica, a cinza de cal pode ser usada com filler. Como grande parte do filler e da cinza de cal passam o menor peneiro usado, 0,063 mm, foi necessário recorrer ao método de Coulter para se obter informação sobre as partículas abaixo de 0,063 mm.

A máxima dimensão da areia fina é de 1,0 mm, da areia grossa é de 4,0 mm De acordo com a norma EN 933 – 1 de 2000, para agregados com máxima dimensão igual ou inferior a 4 mm a massa mínima necessária para efetuar a análise granulométrica é de 0,2 Kg. Para a areia fina foram usadas 290 gramas, para a areia grossa foram utilizadas 339 gramas, depois de devidamente secas a uma temperatura de 110°C ± 5°C, respeitando o indicado na norma EN 933 – 1 de 2000.

A areia fina apresenta uma percentagem de 100% de passados no peneiro com abertura de 4 mm, enquanto que a areia grossa apresenta 96% de passados. No peneiro com abertura de 1 mm, a areia fina apresenta uma percentagem de passados de 94%, a areia grossa apresenta uma percentagem de material passado de 53%.

3.5.1.2. Método de Coulter

Através da curva de distribuição granulométrica da cinza de cal e do filler, observa-se que 100% das partículas da cinza de cal apresentam um diâmetro inferior a 0,063 mm e que 83% das partículas do filler apresentam um diâmetro inferior a 0,063 mm. Para obter informação sobre as partículas com diâmetro inferior a 0,063 mm foi realizado o método de Coulter.

Todas as conclusões retiradas da análise pelo método de Coulter serão alusivas a partículas com diâmetro inferior a 0,063 mm, para diâmetros superiores é utilizada a curva de distribuição granulometria.

Pelo método de Coulter pode concluir-se que o filler apresenta um tamanho médio das partículas inferior à cinza de cal. O diâmetro médio das partículas da cinza de cal é de 9,970 μm e o diâmetro médio das partículas do filler é de 5,260 μm .

Pela Tabela 4, observa-se que 90% das partículas do filler apresentam um tamanho inferior a 15,19 μm , enquanto que na cinza de cal 90% das partículas apresentam um tamanho inferior a 22,12 μm . Verifica-se que 50% das partículas do filler apresentam um diâmetro igual ou inferior a 2,725 μm , enquanto que 50% das partículas de cinza de cal apresentam um diâmetro inferior ou igual a 7,992 μm .

Pela Figura 30 e Figura 31, observa-se que a cinza de cal tem uma distribuição do tamanho das partículas mais uniforme.

Através da curva de distribuição granulometria verificou-se que a cinza de cal apresentava uma granulometria inferior ao filler, apesar disso, pelo método de Coulter, sabendo que apenas foram analisadas partículas inferiores a 0,063 mm, verifica-se que as partículas do filler apresentam tamanho médio e uma granulometria inferior à cinza de cal.

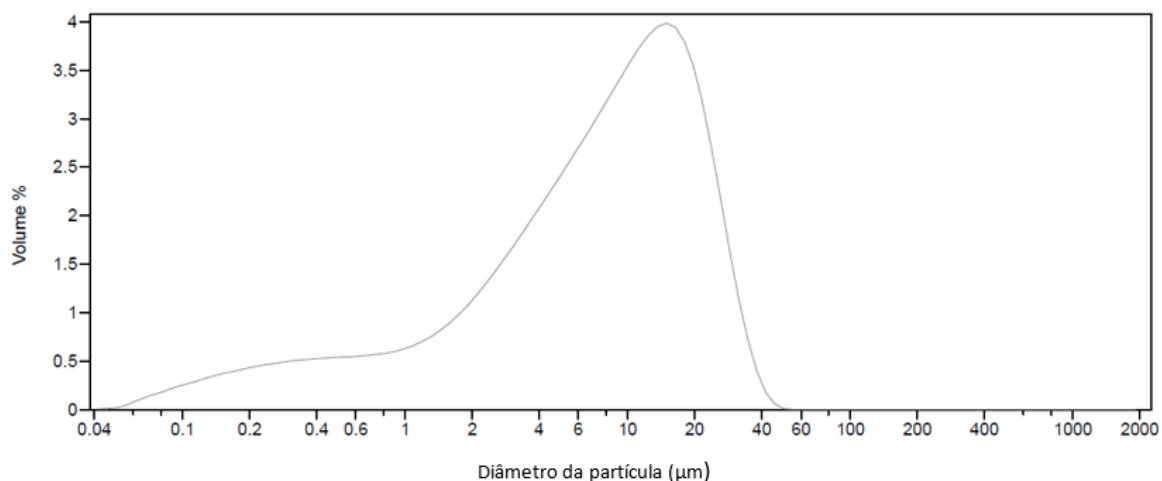


Figura 30 - Curva de distribuição granulométrica diferencial da cinza de cal

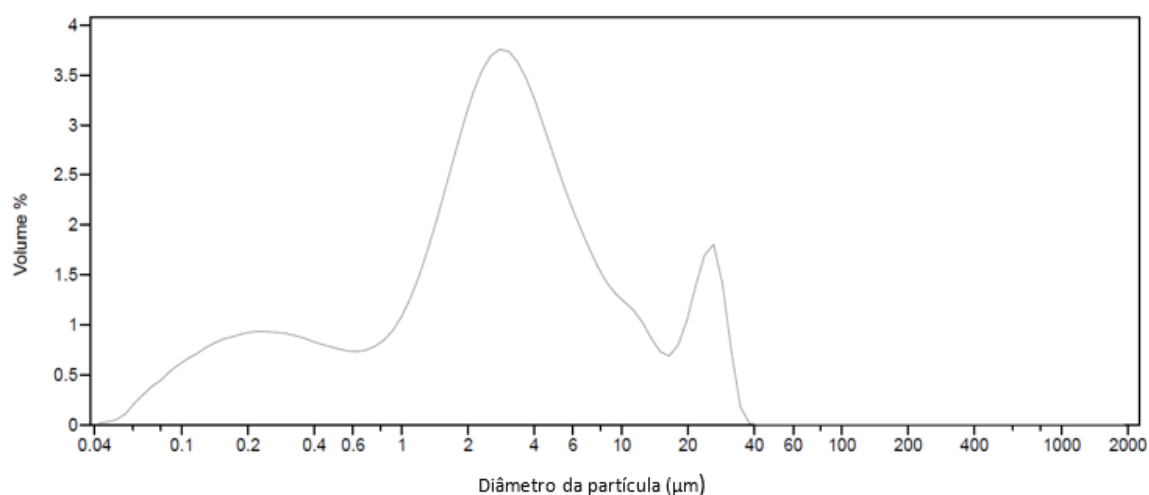


Figura 31 - Curva de distribuição granulométrica diferencial do filler

Tabela 4 – Distribuição granulométrica da cinza de cal e do filler

% <	Cinza de cal	Filler
	Diâmetro da partícula (µm)	Diâmetro da partícula (µm)
10	0,648	0,232
25	3,023	1,149
50	7,992	2,725
75	15,12	5,615
90	22,12	15,19

3.5.1.3. Área superficial específica

A área superficial específica é a razão entre a superfície total e o volume das partículas de um agregado e determina a quantidade de água necessária para lubrificar a mistura, (Coutinho, 2002a).

Como se pode observar na Tabela 5 a cinza de cal apresenta uma área superficial específica inferior ao filler.

Através da análise pelo método de Coulter verificou-se que o filler apresenta partículas com diâmetro inferior á cinza de cal, como as partículas do filler tem menor dimensão a sua maior área superficial especifica é justificável. De acordo com Coutinho, 2002, quanto maior a dimensão das partículas menor a superfície especifica.

A maior área superficial especifica do filler influencia a quantidade de água de amassadura necessária, pois materiais com maior área superficial especifica necessitam mais água de amassadura que materiais com menor área superficial especifica. A substituição do filler pela cinza de cal poderá levar a uma redução da quantidade de água de amassadura necessária.

Tabela 5 – Área superficial específica da cinza de cal e do filler

Amostra	m ² /g
Cinza de cal	0,7857
Filler	1,1561

3.5.1.4. Difração de raios X

Através da difração de raios x verificou-se que o filler e a cinza de cal apresentam fases cristalinas.

Através do difratograma do filler e da cinza de cal é possível verificar que o difratograma do filler apenas apresenta picos de carbonato de cálcio (CaCO₃), enquanto que no difratograma da cinza de cal foram detetados picos típicos do carbonato de cálcio (CaCO₃) e do óxido de cálcio (CaO). Na Figura 33 estão assinalados alguns dos picos de óxido de cálcio (CaO) detetados no difratograma da cinza de cal.

De acordo com a difração de raios x efetuada, 100% dos picos detetados na amostra de filler são de carbonato de cálcio (CaCO₃). Na amostra de cinza de cal, 96% dos picos detetados são de carbonato de cálcio (CaCO₃) e 4% de óxido de cálcio (CaO). Benachour, Davy,

Skoczylas, & Houari, 2008; Eroğlu et al., 2007; Modolo, 2014; Vuk, Tinta, Gabrovšek, & Kaučič, 2001, nos seus estudos também verificaram que a difração de raios x efetuada à cinza de cal apresenta picos de carbonato de cálcio (CaCO_3) e óxido cálcio (CaO) e possui uma estrutura cristalina.

De acordo com Modolo, 2014, a quantidade de carbonato de cálcio (CaCO_3) que a cinza de cal apresenta torna-a um material interessante para ser usado como filler. A cinza de cal e o filler apresentam semelhanças químicas e físicas que permitem que a cinza de cal seja um potencial substituto do filler.

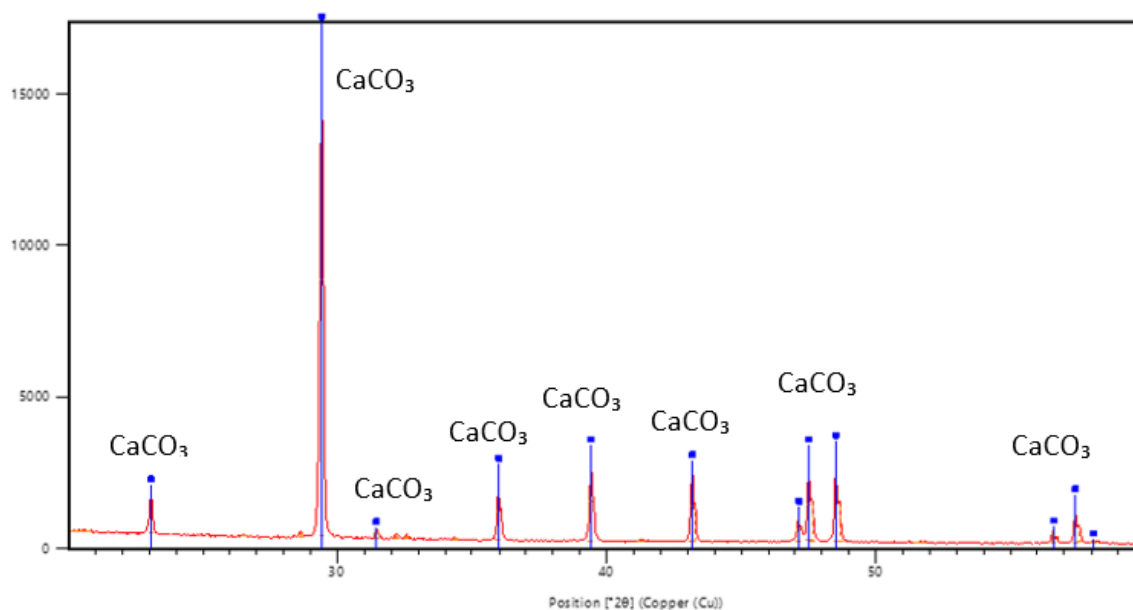


Figura 32 – Difratoograma do filler

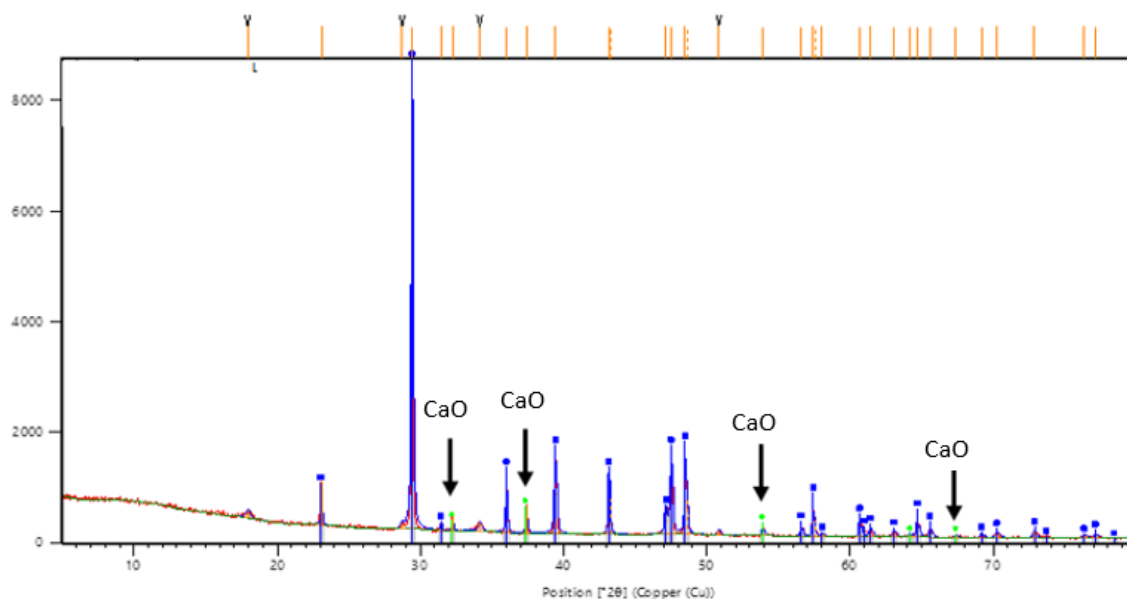


Figura 33 – Difratoograma da cinza de cal

3.5.2. Características do betão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para a resistência à compressão do betão, o módulo de elasticidade, a absorção de água por capilaridade do betão e os resultados da monitorização, obtidos pelos sensores instalados nas vigas.

3.5.2.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão do betão foi avaliada aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura em provetes cúbicos. Como dito anteriormente, ao longo das betonagens efetuadas foram retirados moldes cúbicos para avaliar as características do betão. Os resultados apresentados são valores médios de dois provetes.

Nos moldes cúbicos retirados da betonagem das vigas, aos 7 dias de cura, observa-se que a amostra com cinza de cal apresenta uma resistência à compressão superior à amostra com filler. A amostra com cinza de cal apresenta uma resistência à compressão de 66,5 MPa, a amostra com filler, apresenta uma resistência à compressão de 61,85 MPa, regista-se assim um aumento de 7,5% da resistência à compressão com a substituição do filler pela cinza de cal. Aos 28 dias de cura, a amostra com cinza de cal apresenta uma resistência à compressão de 73,85 MPa, a amostra com filler apresenta uma resistência à compressão de 73,5 MPa.

Nos moldes cúbicos retirados da betonagem dos pilares, aos 7 dias de cura, verifica-se que a amostra com filler apresenta uma resistência à compressão de 51,6 MPa e a amostra com cinza de cal apresenta uma resistência à compressão de 49,95 MPa. Observa-se que a substituição do filler pela cinza de cal provoca uma redução de 3,2% da resistência à compressão. Aos 28 dias de cura a amostra com filler apresenta uma resistência à compressão de 61 MPa, a amostra com cinza de cal apresenta uma resistência à compressão de 56,2 MPa. A substituição do filler pela cinza de cal apresenta uma diminuição de 7,8% da resistência à compressão.

Observando a Figura 34 e a Figura 35 verifica-se que, independentemente da idade de cura, as amostras retiradas das betonagens dos pilares apresentam uma resistência à compressão inferior às amostras retiradas da betonagem das vigas. Nas amostras retiradas da betonagem das vigas, aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, as amostras com cinza de cal apresentam uma resistência à compressão superior às amostras com filler, no entanto nas amostras retiradas da betonagem dos pilares as amostras com cinza de cal apresentam uma resistência à compressão inferior às amostras com filler. Importa salientar que a formulação do betão das vigas é diferente da formulação do betão dos pilares, tal como a classe do cimento usado

nas vigas é diferente da classe do cimento usado nos pilares. Dessa forma é justificável que a resistência à compressão dos pilares seja inferior da resistência à compressão das vigas.

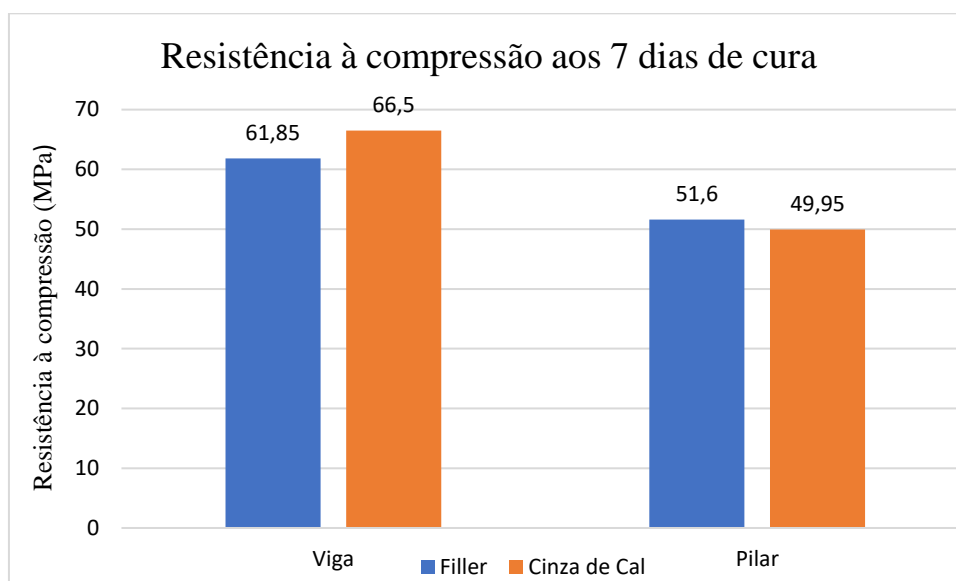


Figura 34 - Resistência à compressão dos provetes de betão aos 7 dias de cura

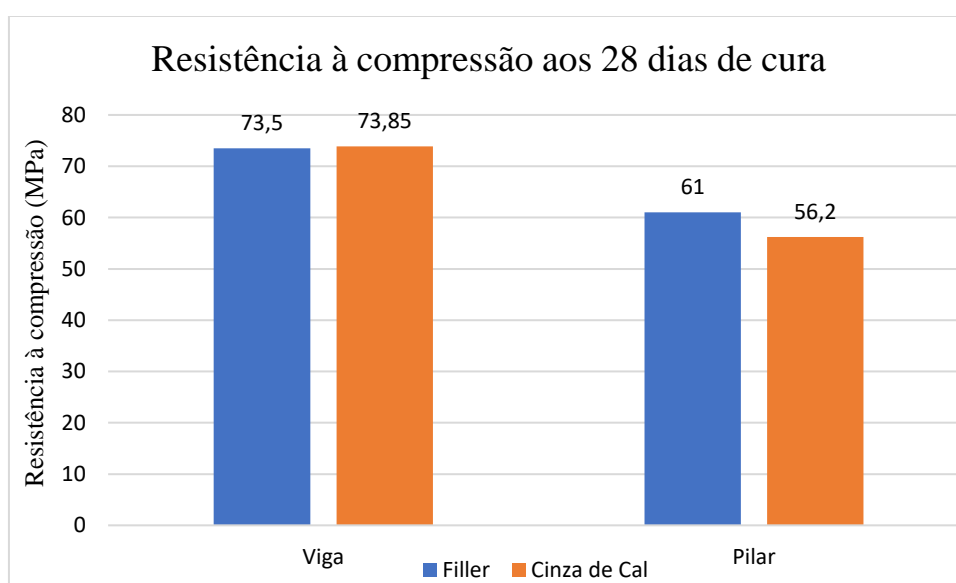


Figura 35 - Resistência à compressão dos provetes de betão aos 28 dias de cura

3.5.2.2. Massa volúmica em estado endurecido

A massa volúmica do betão (kg/m^3) é obtida através da razão entre a massa do provete de betão e o volume do provete de betão.

Nas amostras retiradas da betonagem das vigas, aos 7 dias de cura a amostra com filler apresenta uma massa volúmica superior à amostra com cinza de cal. Aos 28 dias de cura, a

amostra com cinza de cal apresenta uma massa volúmica superior, no entanto a diferença não é significativa.

Nas amostras retiradas da betonagem dos pilares, em ambas as idades de cura as amostras com filler apresentam uma maior massa volúmica, à semelhança dos resultados obtidos para a resistência à compressão, onde os provetes com filler apresentaram uma maior resistência à compressão. Aos 7 dias de cura, o provete com cinza de cal, comparando com o provete com filler apresenta uma redução da massa volúmica de 2%, aos 28 dias apresenta uma redução de 3%.

Como dito anteriormente, a formulação do betão dos pilares é diferente da formulação do betão das vigas, dessa forma é justificável que nos pilares as alterações da massa volúmica sejam diferentes às registadas nas vigas

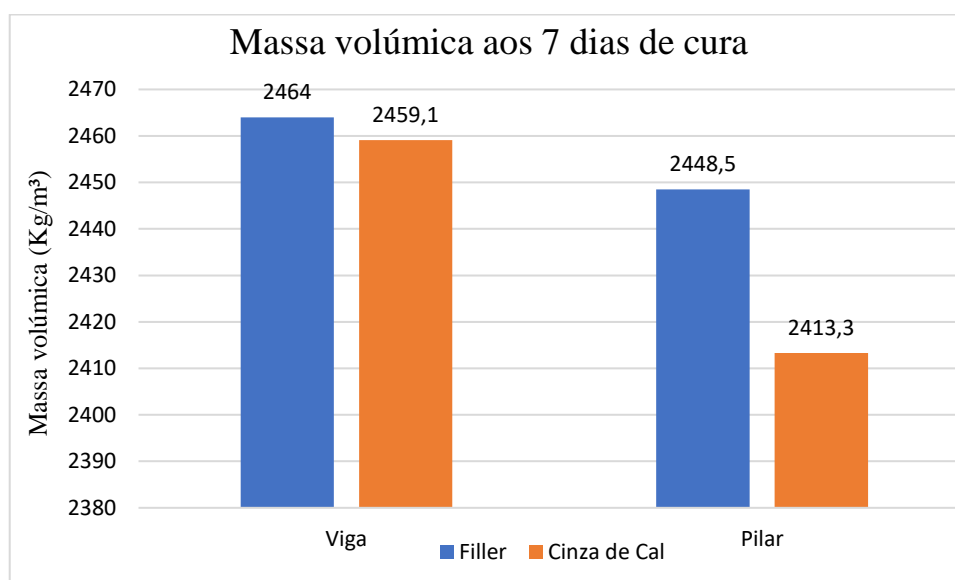


Figura 36 – Massa volúmica em estado endurecido dos provetes de betão aos 7 dias de cura

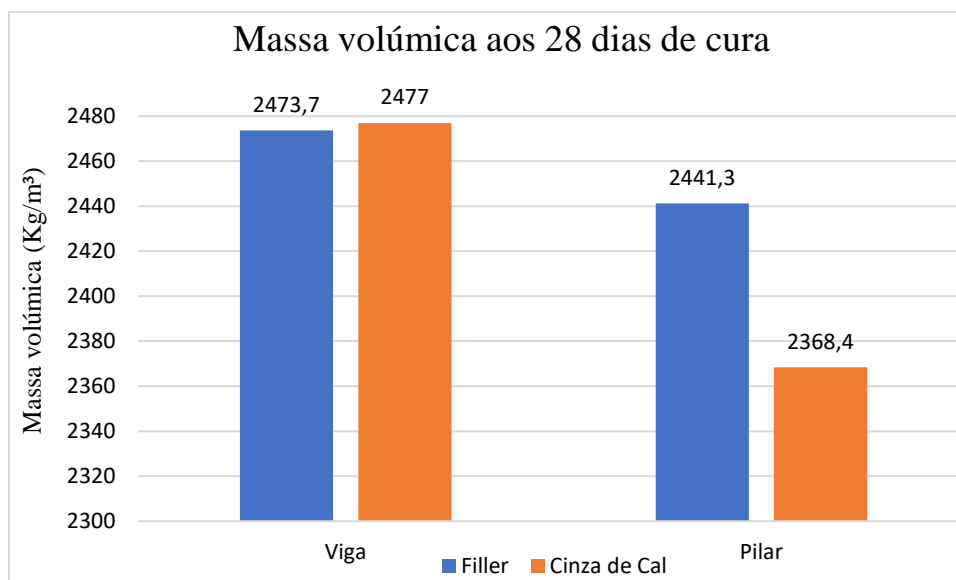


Figura 37 – Massa volúmica em estado endurecido dos provetes de betão aos 28 dias de cura

3.5.2.3. Ensaio de ultrassons

A técnica de ultrassons avalia a qualidade do betão, avalia a sua uniformidade, assume-se que betão com maiores velocidades de propagação da onda ultrassónica apresentam maior compacidade, ou seja, apresenta menos vazios. As ondas ultrassónicas propagam-se mais rapidamente em meios mais densos, (Teodoro, Carasek, & Oswaldo, 2019).

A norma EN 12504-4 apresenta uma correlação que associa os valores da velocidade do pulso ultrassónico com a qualidade do betão, como se observa na Tabela 6.

Tabela 6 – Critérios de avaliação do betão com base na velocidade da onda ultrassónica, (Teodoro et al., 2019)

Velocidade da onda ultrassónica (m/s)	Qualidade do betão
> 4500	Excelente
3500 a 4500	Bom
3000 a 3500	Regular
2000 a 3000	Má
< 2000	Péssimo

As amostras estudadas, de acordo com os critérios de avaliação do betão com base na velocidade ultrassónica, apresentam uma qualidade excelente. Em todas as amostras a velocidade da onda ultrassónica é superior a 4500 m/s, como se observa na Tabela 7.

Tabela 7 – Módulo de elasticidade e velocidade da onda ultrassónica dos provetes de betão

Amostra	Módulo de elasticidade 28 dias (GPa)	Velocidade da onda ultrassónica (m/s)
Viga - Filler	64,47	5105,1
Viga - Cinza de cal	63,91	5079,2
Pilar - Filler	60,31	4968,3
Pilar - Cinza de cal	61,06	5076,9

O módulo de elasticidade depende da massa volúmica do provete e da velocidade da onda ultrassónica, no entanto a correlação do módulo de elasticidade com a velocidade da onda ultrassónica é superior do que com a massa volúmica. Quanto maior a massa volúmica, maior o módulo de elasticidade, quanto maior a velocidade da onda ultrassónica, maior o módulo de elasticidade.

Observando os dados da Tabela 7, verifica-se que nos provetes retirados da betonagem das vigas, a amostra com filler apresenta um módulo de elasticidade superior em relação à amostra com cinza de cal. Como visto anteriormente, aos 28 dias de cura a diferença entre a massa volúmica, da amostra com filler e da amostra com cinza de cal não é significativa, apesar de a amostra com cinza de cal apresentar uma massa volúmica ligeiramente superior. Porém a velocidade da onda ultrassónica para a amostra com filler é superior, como dito anteriormente, a correlação do módulo de elasticidade com a velocidade da onda ultrassónica é superior, portanto, apesar da maior massa volúmica da amostra com cinza de cal, é justificável que a amostra com filler apresente um módulo de elasticidade superior.

Situação semelhante é verificada nas amostras retiradas da betonagem dos pilares. A amostra com cinza de cal apresenta uma massa volúmica inferior à amostra com filler, apesar disso apresenta uma velocidade da onda ultrassónica superior, portanto apresenta um módulo de elasticidade ligeiramente superior.

De salientar que estes resultados podem ser afetados pela compactação e vibração das amostras aquando da produção das peças pré-fabricadas.

3.5.2.4. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é um dos mecanismos fundamentais de penetração de água. As estruturas de betão estão sujeitas a fenómenos de absorção de água por capilaridade ciclicamente, causados sobretudo pela chuva.

A absorção de água por capilaridade foi obtida através de provetes sujeitos a um processo de cura de 28 dias.

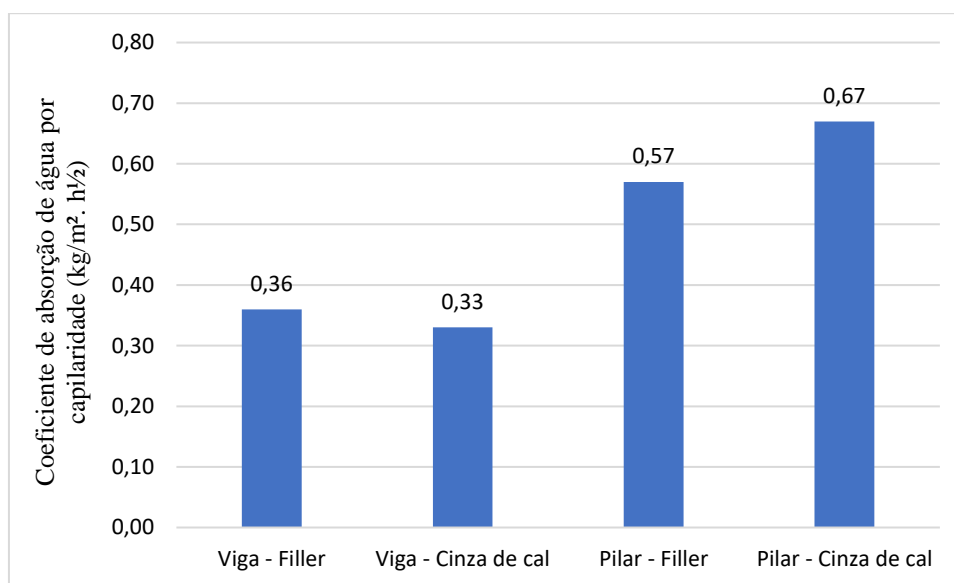


Figura 38 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes de betão

O ensaio da absorção de água por capilaridade foi efetuado durante 120 minutos.

As amostras retiradas da betonagem das vigas registam coeficientes de absorção de água por capilaridade inferiores às amostras retiradas da betonagem dos pilares.

Nas amostras das vigas verifica-se que a amostra com cinza de cal apresenta um coeficiente de absorção de água por capilaridade de 0,33 kg/m²·h^{1/2} e a amostra com filler apresenta um coeficiente de absorção de água por capilaridade de 0,36 kg/m²·h^{1/2}. Isto significa que durante os 120 minutos do ensaio a amostra com cinza de cal absorveu uma menor quantidade de água. A substituição do filler pela cinza de cal apresentou uma melhoria de 8% no coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Nas amostras dos pilares não se verifica o mesmo, a amostra com cinza de cal apresenta um coeficiente de absorção de água por capilaridade superior à amostra com filler. A absorção de água por capilaridade depende de diversos fatores, como a idade, relação água/ligante e da compacidade do provete. Esta amostra é a que apresenta maior coeficiente de absorção de água por capilaridade, tal é justificado com a baixa massa volúmica que apresenta. A massa volúmica é correlacionada com a absorção de água por capilaridade, as amostras com

maior massa volumica são as que apresentam menor coeficiente de absorção de água por capilaridade.

3.5.3. Monotorização dos pórticos

Na monotorização dos pórticos é medida a variação de extensões nos betões. Nas primeiras idades e até à montagem das vigas, a variação de extensão é devida à retração do betão. A retração do betão consiste na variação de volume de um elemento de betão, provocada principalmente pela secagem do betão durante a fase de cura e durante o endurecimento ao longo dos anos. A retração do betão tem influência direta sobre a deformação das estruturas, podendo dar origem a fissurações.

O fenómeno da retração é condicionado por fatores como a relação água/ligante, as propriedades dos constituintes, as condições de cura, as condições ambientais e a geometria do elemento de betão. A retração é, sobretudo, consequência da evaporação da água não fixada pelo ligante e da diminuição da temperatura do elemento de betão (consequência da dissipação do calor devido à presa).

A retração do betão é tanto maior quanto maiores forem a quantidade e finura do cimento, o volume de água de amassadura, a idade do betão e quanto menor for a humidade relativa do ar. A retração diminui com o aumento da espessura do elemento de betão e com a existência de armadura, (Barbosa, 2013).

Para analisar os dados obtidos pelos sensores instalados importa destacar dois períodos diferentes. O primeiro período tem início na data da betonagem, a betonagem da viga com cinza de cal foi efetuada no dia 16 de janeiro de 2020, a betonagem da viga com filler foi efetuada no dia 17 de janeiro de 2020. No primeiro período, os sensores internos registaram valores desde a data da betonagem até ao dia 31 de janeiro de 2020. Após essa data os sensores tiveram de ser desligados para se proceder à movimentação das peças. A montagem dos pórticos foi efetuada no dia 24 de fevereiro de 2020, apesar disso, por questões logísticas os sensores apenas foram ligados no dia 23 de março de 2020. Neste segundo período existem registos dos sensores desde 23 de março de 2020 até 22 de abril de 2020.

De seguida serão apresentados os dados obtidos pelos sensores instalados. Tendo em consideração os dois períodos acima mencionados, primeiro serão apresentados os dados obtidos pelos sensores após a betonagem (primeiro período) e por fim serão apresentados os dados após a montagem dos pórticos (segundo período).

Os dados da temperatura apresentados são os dados relativos ao interior da estrutura, registados pelos sensores de embeber. Observando a temperatura registada, verifica-se que ao longo do tempo não existe uma diferença significativa das amostras com cinza de cal e das amostras com filler.

Observa-se que existem ciclos de aumento e diminuição de temperatura, essa variação está relacionada com o ciclo diário, durante a tarde a temperatura tende a aumentar, após as 20 horas a temperatura tende a diminuir.

Algumas horas após a betonagem, o betão começa a endurecer, durante o endurecimento do betão é libertado calor. As reações de hidratação são exotérmicas, ou seja, existe libertação de calor devido às reações de hidratação, (Coutinho, 2002b). Ao observar a Figura 39 verifica-se que existiu um aumento da temperatura nos instantes iniciais seguido de uma ligeira diminuição de temperatura, segundo Coutinho 2002, essa diminuição de temperatura é designada de “período dormente”. A seguir ao “período dormente” a taxa de libertação de calor aumenta rapidamente, o que justifica o aumento de temperatura registado pelos sensores. Após o pico a temperatura vai decrescendo gradualmente. Analisando a Figura 39 conclui-se que a cinza de cal e o filler usado apresentam um calor de hidratação semelhante, os sensores registam temperaturas e ciclos de temperatura muito semelhantes.

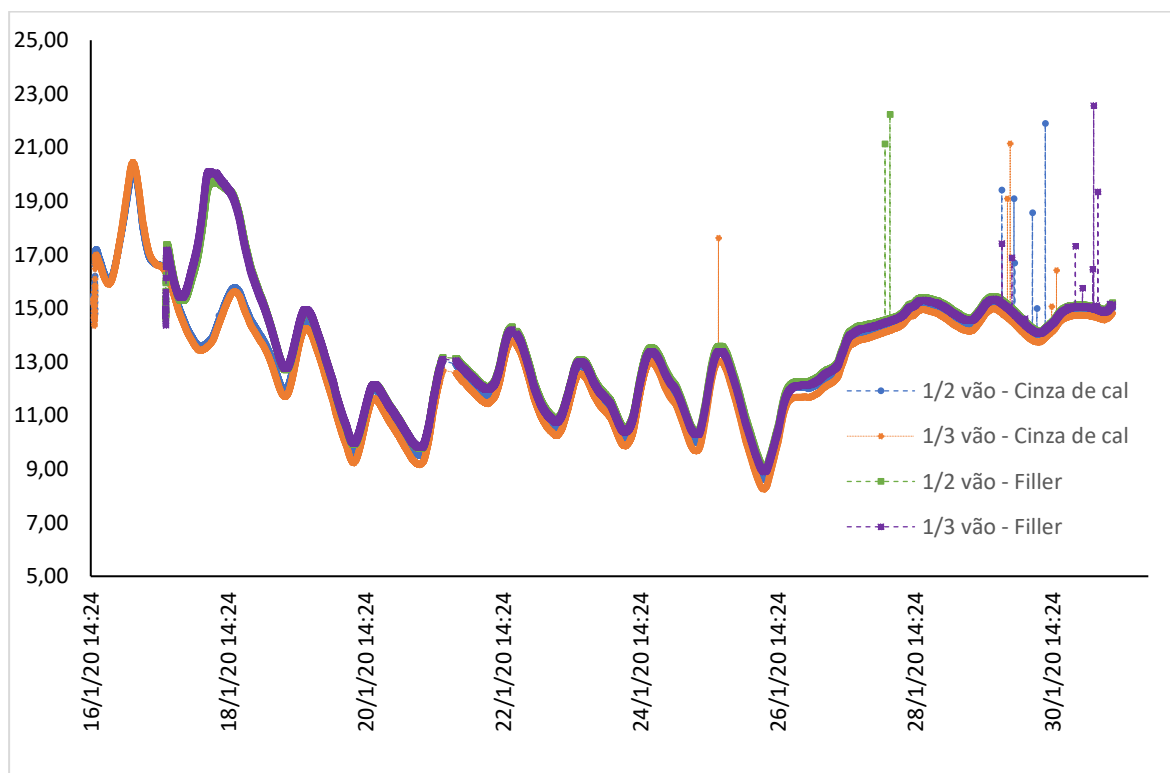


Figura 39 – Temperatura registada pelos sensores após a betonagem

Na Figura 40 estão representadas as extensões registadas após a betonagem.

Como indicado anteriormente, é possível verificar que a viga com cinza de cal foi betonada um dia antes da viga com filler.

Observa-se que nos instantes iniciais existem algumas perturbações no registo, devendo-se ao processo de betonagem e à vibração da viga. Estes processos interferem com os valores recebidos pelos sensores. Após os instantes verifica-se que o betão começa a retrair forma constante ao longo do tempo. Observa-se que o registado na viga com cinza de cal é muito semelhante ao registado na viga com filler. Na viga com cinza de cal, observa-se que o sensor colocado a um terço do vão apresenta uma retração menor que todos os outros sensores, no entanto o comportamento é semelhante. Na fase final do registo, observa-se que a extensão apresenta um comportamento mais constante.

A transferência do pré-esforço deu-se no dia 20 de janeiro de 2020. Observando a Figura 40 verifica-se que durante o dia 20 de janeiro de 2020 todos os sensores registaram um aumento da retração. Apesar das vigas terem sido betonadas em dias diferentes, a transferência do pré-esforço ocorre no mesmo dia porque as vigas estão na mesma pista de pré-esforço.

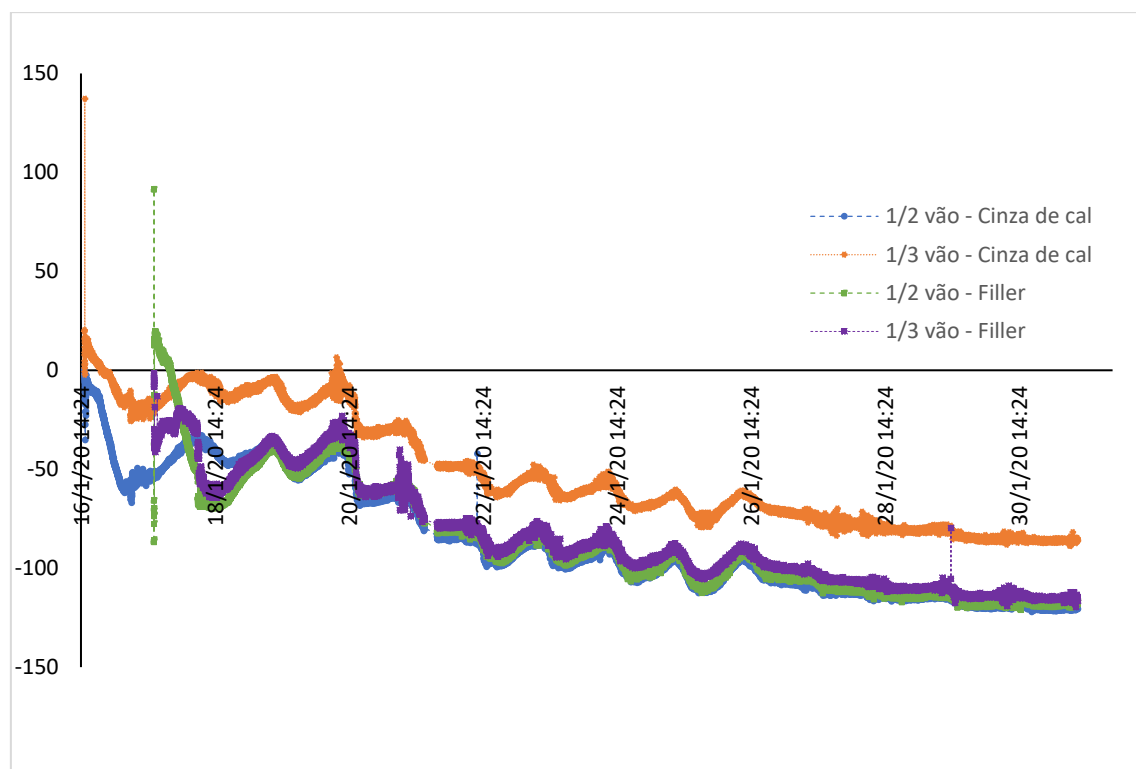


Figura 40 – Extensões registadas pelos sensores após a betonagem

Após a montagem dos pórticos, os sensores foram ligados novamente.

Na Figura 41 e Figura 42, observa-se a temperatura registada pelos sensores interiores colocados a meio vão e a um terço do vão da viga.

Observando os sensores colocados a meio vão, verifica-se que não existe uma diferença significativa entre a temperatura registada na viga com filler e na viga com cinza de cal. No entanto verifica-se que nos picos de temperatura, a viga com filler apresenta sempre uma temperatura ligeiramente superior. Existem variações de temperatura ao longo do registo, que como referido anteriormente, estão relacionadas com o ciclo diário.

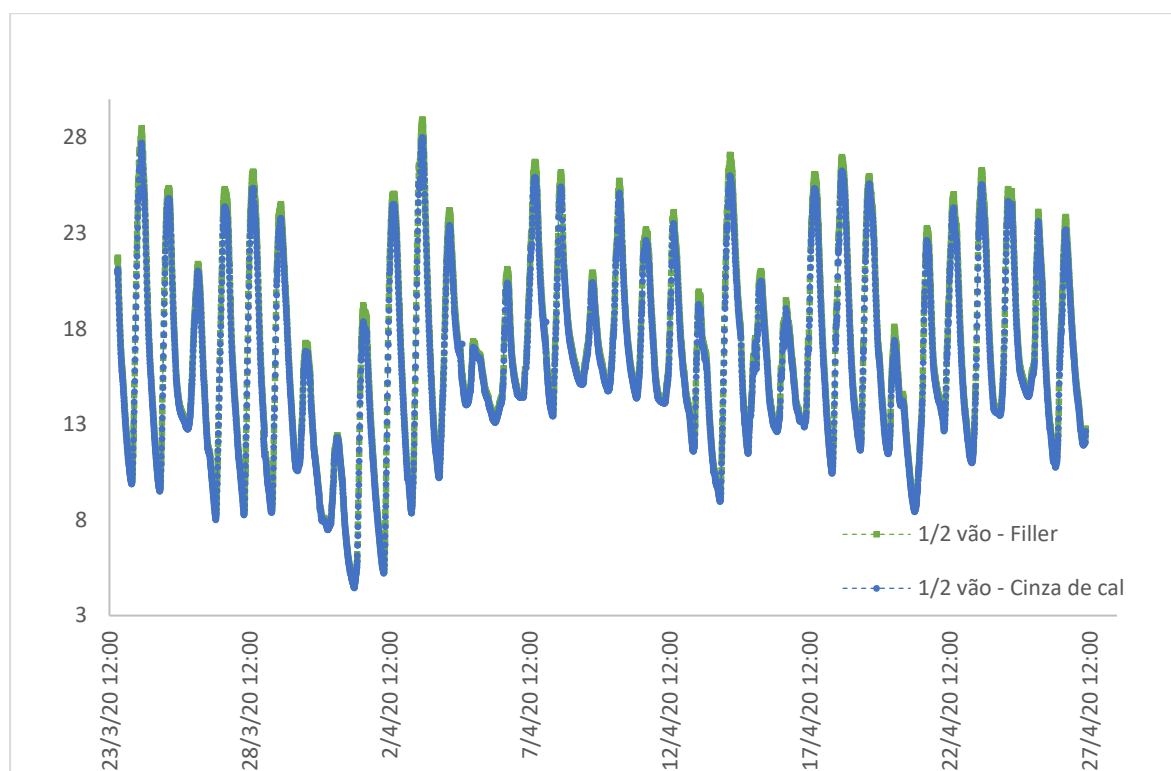


Figura 41 – Temperatura registada pelos sensores interiores a meio vão da viga

Observando a Figura 42, verifica-se que o registado é análogo ao referido sobre as temperaturas registadas a meio vão. Também a um terço do vão da viga, nos picos de temperatura, verifica-se que a viga com filler apresenta uma temperatura ligeiramente superior.

Entre o registado a meio vão viga e a um terço do vão da viga não se observam diferenças.

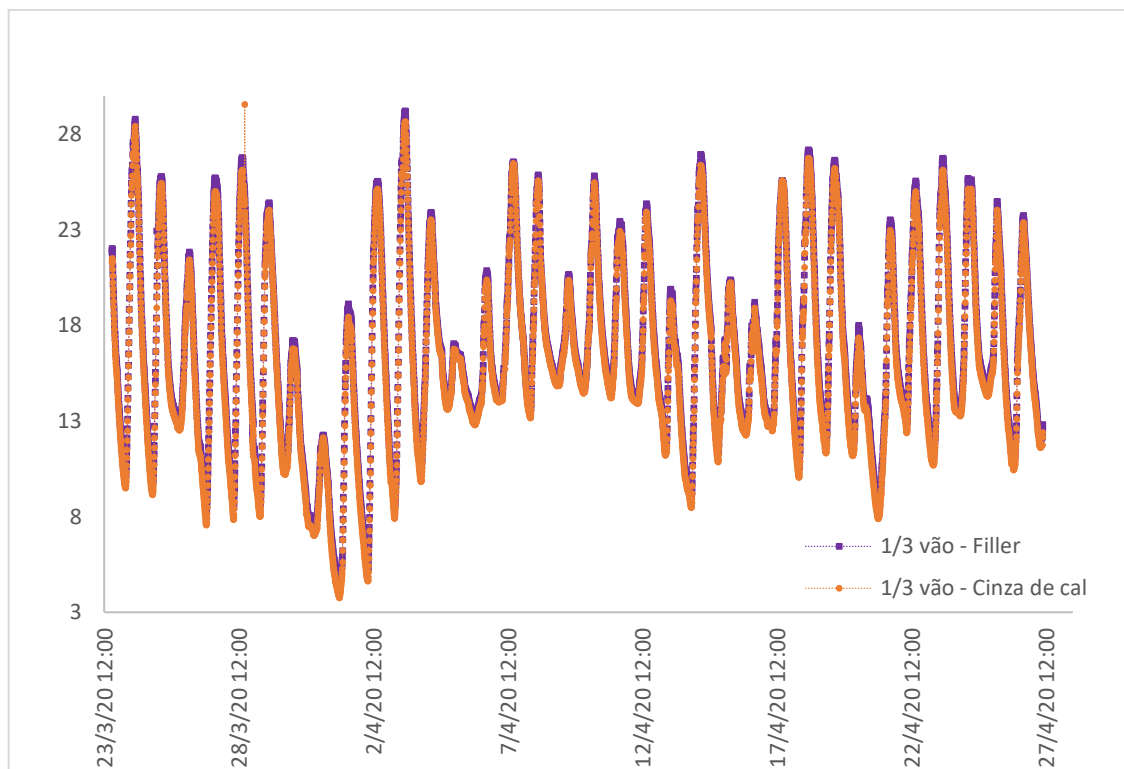


Figura 42 – Temperatura registada pelos sensores internos a um terço do vão da viga

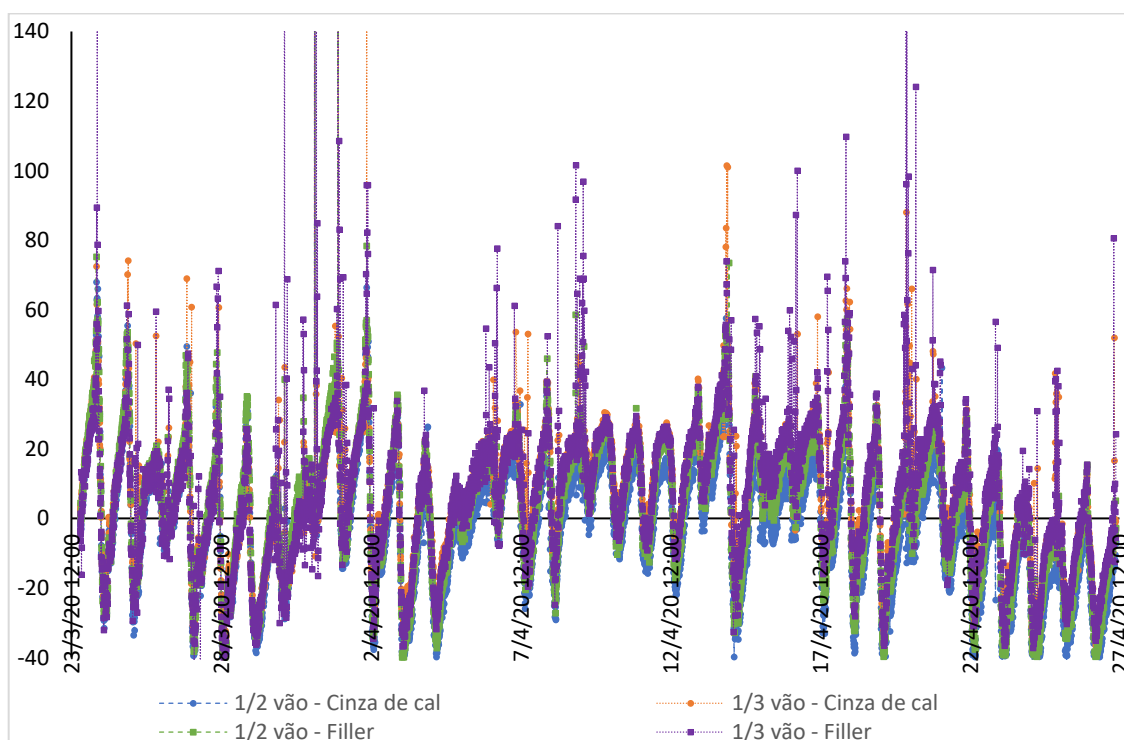


Figura 43 – Extensões registadas pelos sensores interiores

Analisando a Figura 43, observa-se que as extensões registadas pelos sensores interiores a meio vão da viga e a um terço do vão da viga são idênticas na viga com cinza de cal e na viga com filler. Constata-se também, que existem algumas perturbações ao longo do registo. Observando a Figura 41 e a Figura 42, verifica-se que entre o dia 28 de março e o dia 2 de abril ocorre uma diminuição de temperatura. Através da Figura 43 verifica-se que nesse intervalo existe um ligeiro aumento da extensão do betão.

Analisando os dados obtidos pelos sensores exteriores, colocados transversalmente a meio vão da viga, verifica-se que nas temperaturas registadas não se observam diferenças entre a viga com cinza de cal e a viga com filler. As temperaturas registadas em todos os sensores são muito próximas e apresentam os mesmos ciclos de aumento e diminuição de temperatura.

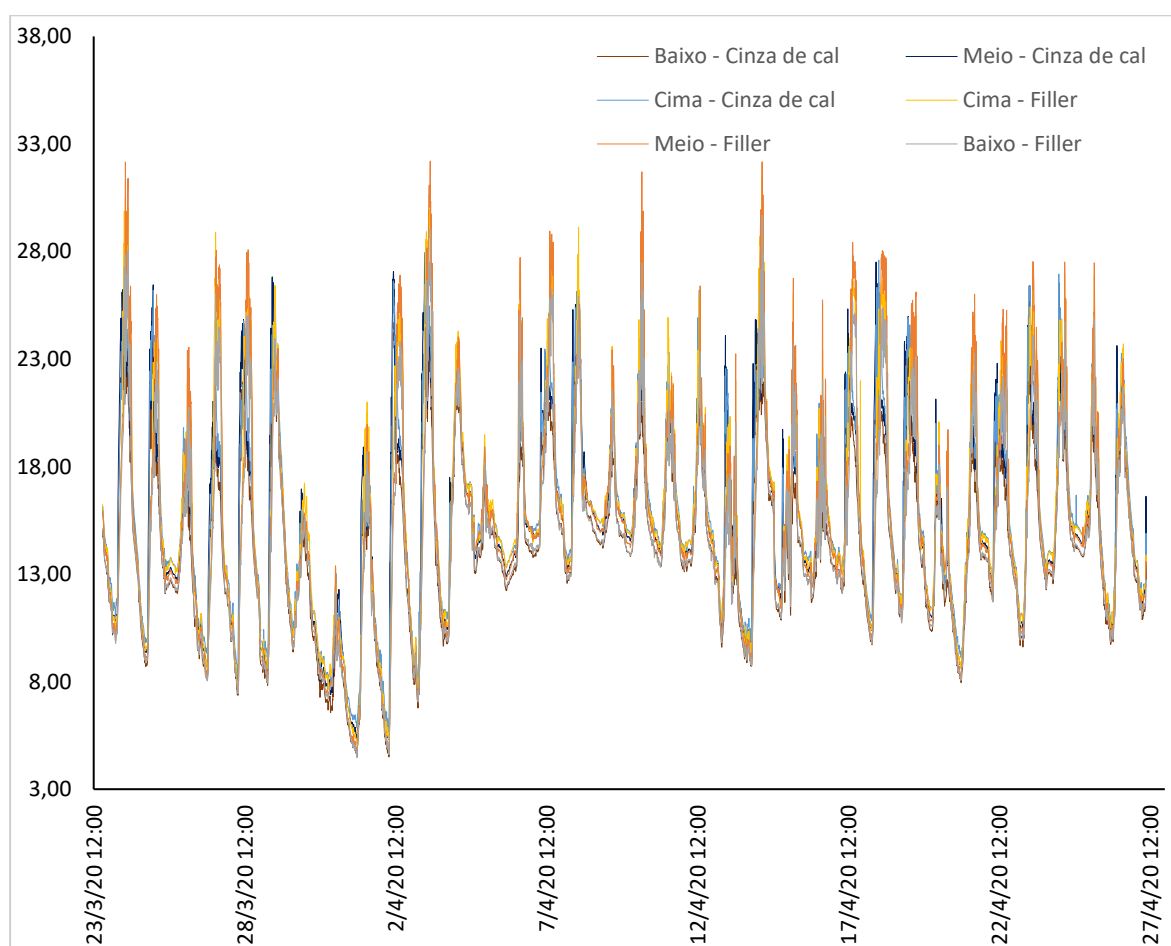


Figura 44 – Temperaturas registadas pelos sensores exteriores

Verificando as extensões registadas pelos sensores exteriores colocados transversalmente a meio vão das vigas, observa-se que não existem diferenças significativas entre a viga com filler e a viga com cinza de cal. Ao longo do tempo as diferenças entre as extensões vão

sendo inferiores. Verifica-se que o sensor colocado no topo da viga com cinza de cal apresenta várias perturbações no fim do registo, podendo dever-se a problemas na fixação do sensor.

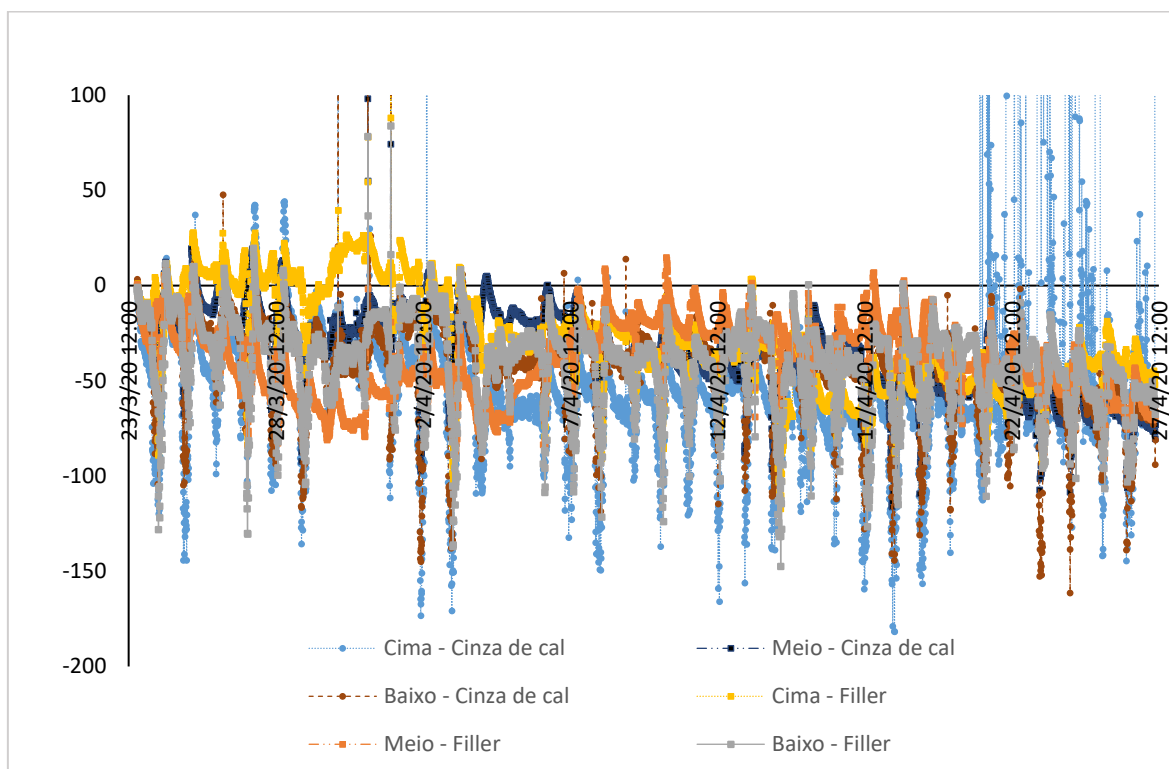


Figura 45 – Extensões registadas pelos sensores exteriores

4. UTILIZAÇÃO DE BIOCHAR EM ARGAMASSAS

Neste capítulo é efetuada uma apresentação da metodologia experimental aplicada, bem como os materiais utilizados e os ensaios laboratoriais realizados. Todos os materiais utilizados são caracterizados química e fisicamente e os ensaios laboratoriais devidamente explicados. Por fim é feita a análise e discussão dos resultados obtidos

4.1. Metodologia experimental

A presente dissertação tem como um dos objetivos avaliar a incorporação de biochar de casca de arroz e biochar de caroço de azeitona em argamassas, substituindo o cimento. Para tal é necessário estudar as propriedades do biochar e posteriormente incorporar o biochar na argamassa e estudar o seu efeito no estado fresco e no estado endurecido.

A formulação ideal de uma argamassa é um processo complexo uma vez que são diversas as exigências funcionais a que se deve atender. A dosagem (proporção dos componentes da mistura numa argamassa) tem grande influência na qualidade de uma argamassa; se a dosagem for muito magra, obter-se-á uma argamassa de baixa resistência mecânica, mesmo que o ligante seja de boa qualidade. O mesmo acontece se a quantidade de água da amassadura for muito elevada ou muito baixa. A produção de uma argamassa, independentemente do uso a que se destina, deve realizar-se com o máximo cuidado, (Ceríaco Cruz, 2008; Costa Braga, 2010; A. M. M. Martins, 2008).

Uma argamassa é constituída por água, areia, ligantes e adjuvantes, este trabalho experimental tem como objetivo substituir parcialmente o ligante por um quinto constituinte, o biochar, e avaliar o seu efeito nas argamassas.

Foi necessário fixar as quantidades de ligantes, areia, água e adjuvante, por forma a definir a composição da argamassa.

A designação de ligante deve-se à propriedade que tem de poder aglomerar os agregados, conferindo uma grande coesão e resistência, (Flores & Brito, 2003).

Os ligantes podem dividir-se em hidráulicos, aéreos e orgânicos. Neste trabalho experimental apenas foi usado um ligante hidráulico, o cimento Portland.

Os agregados podem ser classificados como grossos e/ou finos (areias). As areias são materiais granulados finos que constituem o esqueleto das argamassas. A NP EN 12620 (2003) define areia como o agregado de dimensões inferiores ou iguais a 4 mm.

A água é um elemento fundamental na formulação das argamassas dado que reage com os ligantes hidráulicos, promovendo a sua hidratação, pondo em evidência as suas propriedades aglutinantes e conferindo ainda a consistência necessária à sua aplicação, (Flores & Brito, 2003). A água utilizada na produção das argamassas provém da rede pública de abastecimento.

Os adjuvantes são produtos químicos adicionados a betões ou argamassas, em pequenas quantidades relativas à massa do cimento (inferiores a 5%), antes ou durante a amassadura, com o objetivo de melhorar uma ou mais propriedades, (Flores & Brito, 2003). Nas formulações foi utilizado um superplastificante, com base na gama de valores recomendado pelo fabricante.

Com o intuito de analisar quimicamente e fisicamente o biochar foram efetuados vários ensaios. A massa volúmica do biochar e do cimento foram determinadas pelo picnómetro de hélio, o tamanho das partículas foi determinado pelo método de Coulter, para obter a análise química do biochar foi efetuada uma fluorescência de raios x, foi também determinada a área superficial específica através do método B.E:T.

A análise da argamassa foi feita em estado fresco e estado endurecido. Em estado fresco foi avaliada a massa volúmica e a consistência por espalhamento. A caracterização das argamassas em estado endurecido foi feita através da massa volúmica, absorção de água por capilaridade e resistência à flexão e compressão. Era previsto avaliar a condutividade térmica das argamassas, no entanto devido ao estado de emergência decretado em resultado da pandemia de Covid- 19, não foi possível realizar, no entanto todo o processo que estava planeado será descrito.

O procedimento de produção das argamassas e de todos os ensaios efetuados será explicado detalhadamente mais à frente.

Este trabalho experimental teve por base argamassas com dois traços, 1:3 e 1:4. Consideraram-se os traços de 1:3 com 0%, 0,6% e 1,5 % de superplastificante, e o traço 1:4 com 0% e 0,9% de superplastificante. Estas formulações foram obtidas de forma experimental, de modo a encontrar a formulação de argamassas com trabalhabilidade adequada. Apenas foram aceites argamassas com valores de espalhamento de 140 ± 10 mm. Os rácios de água das argamassas variam conforme a quantidade de superplastificante aplicada e o traço da argamassa.

Neste trabalho experimental apenas se efetuou a substituição de 2% da massa do cimento pelo biochar, no entanto era previsto fazer a substituição com mais percentagens, como por

exemplo, 5%, 8%, e 10%, porém devido ao estado de emergência decretado em resultado da pandemia de Covid- 19 não foi possível realizar as restantes amostras planeadas.

De forma a obter uma designação para cada amostra, doravante o biochar de caroço de azeitona será designado de “B1” e o biochar de casca de arroz de “B2”.

As designações das amostras indicam a percentagem de superplastificante utilizado, seguido da percentagem de biochar incorporado e qual o biochar, no caso das amostras de controlo, amostras sem biochar, serão designadas de “0B”. Por exemplo, a amostra designada de “0,6 SP- 2%B2”, significa que a sua formulação contém 0,6%, da massa do cimento, de superplastificante e contém 2% da massa de cimento de biochar de casca de arroz.

Na Tabela 8 encontra-se a composição das argamassas produzidas.

Tabela 8 – Composição das argamassas

Traço	Formulações	Rácio água/cimento	Biochar (%)	Superplastificante (%)
1:3	0 SP - 0B	0,57	0	0
	0 SP - 2% B1	0,57	2	0
	0 SP - 2% B2	0,57	2	0
	0,6 SP - 0B	0,5	0	0,6
	0,6 SP - 2% B1	0,5	2	0,6
	0,6 SP - 2% B2	0,5	2	0,6
	1,5 SP - 0B	0,45	0	1,5
	1,5 SP - 2% B1	0,45	2	1,5
	1,5 SP - 2% B2	0,45	2	1,5
1:4	0 SP - 0B	0,75	0	0
	0 SP - 2% B1	0,75	2	0
	0 SP - 2% B2	0,75	2	0
	0,9 SP - 0B	0,65	0	0,9
	0,9 SP - 2% B1	0,65	2	0,9
	0,9 SP - 2% B2	0,65	2	0,9

4.1.1. Pirólise

Como foi dito anteriormente, os vários tipos de pirólise são usados para diferentes fins. A pirólise rápida e a pirólise instantânea são usadas na produção de gás e bio óleo, a pirólise lenta é usada na produção de biochar, (D. N. Bastos, 2016; Conz, 2015; Gupta & Kua, 2019b).

De acordo com vários autores, na pirólise, o rendimento da biomassa em biochar diminui com o aumento da temperatura a partir de 500°C, (Choi et al., 2012; Conz, 2015; Gupta & Kua, 2019b; Gupta, Kua, & Pang, 2018).

Para a produção do biochar foi escolhida a pirólise lenta, por ser a que apresenta maiores rendimentos na produção do biochar. Gupta & Kua, 2019b, no seu estudo efetuaram uma pirólise lenta, por ser a que oferecer melhor rendimento de biochar.

O biochar usado neste estudo foi obtido de uma pirólise lenta de biomassa de casca de arroz e caroço de azeitona. A pirólise decorreu a uma temperatura de 450°C com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Depois de produzido, o biochar é retirado do reator para arrefecer e é armazenado num recipiente hermético, para evitar a contaminação por poluentes.

O reator usado para a pirólise foi um reator de leito fixo. Este reator é alimentado com a biomassa de uma forma contínua. Os gases produzidos durante a pirólise são direcionados para um queimador a gás.

Na literatura disponível, vários autores efetuaram pirólises a diferentes temperaturas, com diferentes taxas de aquecimento, com diferentes biomassas e em diferentes reatores.

A biomassa contém hemicelulose, celulose e lignina. Durante a pirólise cada um desses constituintes são decompostos a diferentes temperaturas. À temperatura de 120°C a matéria orgânica começa a ser termicamente decomposta. A hemicelulose é degradada a temperaturas entre os 200°C e os 260°C, a celulose entre os 240°C e os 350°C e a lignina entre os 280°C e os 500°C, (Conz, 2015).

Durante a pirólise os voláteis e a matéria orgânica da biomassa serão libertados, criando poros no biochar.

A pirólise lenta, comparando com a pirólise rápida origina biochar com distribuição dos poros mais uniforme e é mais eficiente a reduzir os radicais de carbono livre, resultando em biochar com menor inflamabilidade. Baixa inflamabilidade é uma das propriedades necessárias para o biochar poder ser aplicado na construção, (Gupta & Kua, 2017, 2019b).

Na Figura 46 pode observar-se as biomassas usadas e o aspeto visual do biochar produzido.

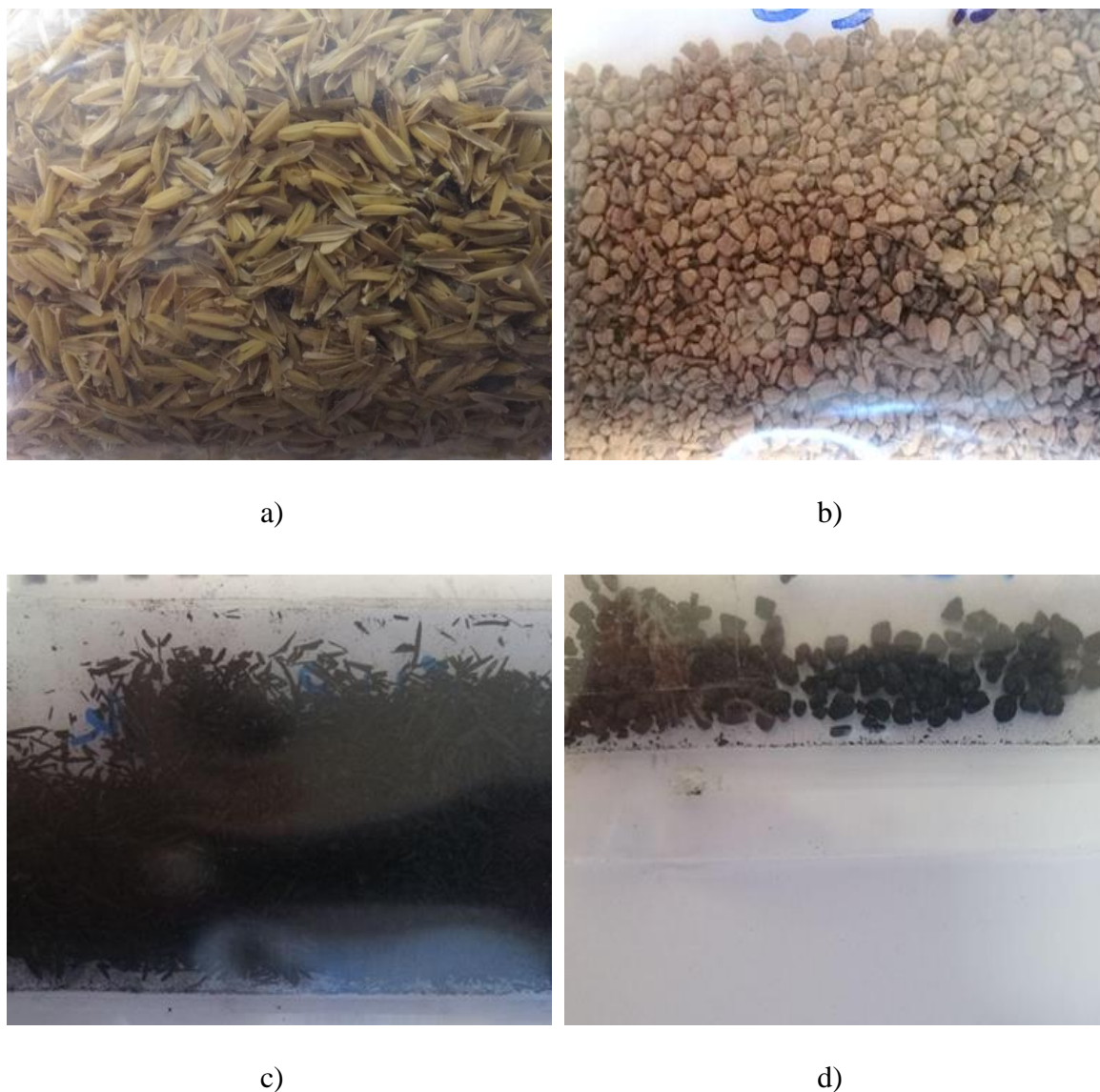


Figura 46 - Diferentes biomassas e biochar: a) Biomassa de casca de arroz; b) Biomassa de caroço de azeitona; c) Biochar de casca de arroz; d) Biochar de caroço de azeitona;

Durante a pirólise o carbono da biomassa, que de outra forma seria libertado para a atmosfera, é sequestrado na estrutura química do biochar, no entanto a percentagem de carbono sequestrado varia consoante a temperatura da pirólise, (Choi et al., 2012; Dixit, Gupta, Pang, & Kua, 2019).

4.1.2. Caraterização geral dos materiais

Neste subcapítulo são caraterizados os materiais usados no fabrico das argamassas. Para um estudo mais detalhado o biochar será abordado noutra subcapítulo.

Será apresentada a descrição dos ensaios realizados à areia, no caso do superplastificante e do cimento a informação apresentada é a presente nas fichas técnicas.

4.1.2.1. Areia

Dos materiais que constituem uma argamassa, a areia é aquela a que corresponde a maior quantidade. Por esta razão, influencia a estrutura do material endurecido, (Ceríaco Cruz, 2008). Para o estudo da caracterização da areia foi levado a cabo uma análise granulométrica.

A distribuição granulométrica é importante na determinação de características das argamassas, influenciando diretamente a trabalhabilidade, o consumo de cimento, a resistência mecânica, a absorção de água e a permeabilidade, (Costa Braga, 2010; Zordan, 1997).

A areia usada nas argamassas apresenta dimensões conforme o ASTM C33. A areia foi disponibilizada pelo Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, uma vez que a areia disponível apresentava dimensões superiores a 4 mm foi necessário corrigir a sua granulometria.

Este ensaio é realizado de acordo com a EN 933- 1 de 2000 e a EN 933- 2 de 1999 e tem como objetivo determinar a curva da distribuição granulométrica da areia usada na produção das argamassas.

O equipamento necessário para a realização do ensaio é:

- Peneiros com aberturas conforme a EN 933- 2;
- Tabuleiros e escovas;
- Máquina de peneiração;
- Estufa;
- Balança com precisão de 0,1 g;

A norma EN 933-1 de 2000, indica que a primeira etapa do processo é a lavagem da amostra, no entanto como não existem torrões e a lavagem pode alterar as características da amostra optou-se por fazer a peneiração a seco, tal como indicado pela norma.

A amostra foi seca em estufa a uma temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até se alcançar uma massa constante.

Os peneiros usados são os especificados na EN 933- 2, no entanto como a máxima dimensão dos agregados era menor de 4 mm, para a máquina de peneiração apenas foram usados os peneiros com abertura inferior a 4 mm, como apresentado na Figura 47. Os peneiros usados foram os peneiros com as seguintes aberturas: 0,063 mm, 0,125 mm, 0,250 mm, 0,500 mm, 1 mm, e 2 mm.

Os peneiros usados estão em conformidade com a ISSO 3310- 1 e a ISSO 3310- 2.

Os peneiros foram encaixados uns nos outros de acordo com a sua abertura, a amostra é colocada no peneiro com a abertura superior, e colocam-se na máquina de peneiração.

Passados 3 minutos, os peneiros são retirados da máquina de peneiração e a massa do agregado retido em cada peneiro é pesada.

A massa total da amostra testada foi de 400 gramas, tendo em conta a máxima dimensão do agregado e que para este tipo de agregados a EN 933- 1 exige um mínimo de 200 gramas, a massa testada está conforme o exigido pela EN 933-1 de 2000.



Figura 47 - Máquina de peneiração



Figura 48 - Areia peneirada e separada após a pesagem

4.1.2.2. Cimento

O cimento usado foi o cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5N, certificado segundo a NP EN 197-1. Este cimento é composto por 65% a 79% de clínquer e 21% a 35% de calcário.

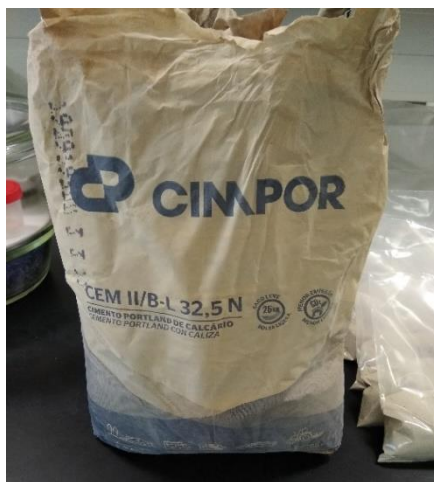


Figura 49 - Cimento Portland CEM II/B-L 32,5 N

Para além dos dados da ficha técnica, com o intuito de uma correta comparação com o biochar, o cimento foi caracterizado através do picnómetro de hélio, foi também calculada a área superficial específica do cimento, pelo mesmo método do biochar.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas

Dias	Resistência à compressão (Mpa)
7	16,0
28	32,5

Tabela 10 – Propriedades físicas

Propriedade	Valor
Início de presa	≥ 75 min
Expansibilidade	≤ 10 mm

Tabela 11 – Propriedades químicas

Propriedade	Valor
Teor de Sulfatos (SO_3)	$\leq 3,5\%$
Teor de Cloretos (Cl)	$\leq 0,10\%$

4.1.2.3. Superplastificante (SP)

O agente redutor de água de amassadura (superplastificante) usado foi o Glenium 52 da BASF. Este adjuvante permite diminuir a água da amassadura sem afetar a trabalhabilidade tal como permite aumentar a trabalhabilidade sem subir a dosagem de água.

Este superplastificante tem uma densidade de $1,05 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$.

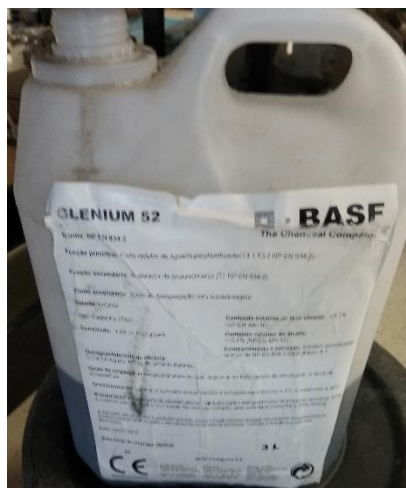


Figura 50 – Superplastificante usado

A dosagem de superplastificante (SP) usada nas argamassas foi estabelecida com base na gama de valores recomendado pelo fabricante, tendo por base a percentagem de ligante (cimento). Nas amostras com biochar e cimento, a dosagem do superplastificante tem por base ambos os constituintes.

O impacto da introdução do superplastificante foi verificado de forma experimental, efetuaram-se diversos testes para alcançar formulações com a trabalhabilidade desejada.

4.1.3. Caracterização do Biochar

4.1.3.1. Moagem do biochar

As amostras de biochar de casca de arroz e de caroço de azeitona, após a pirólise apresentam uma granulometria grande e irregular que irá afetar a compacidade da argamassa. Dado que o biochar será um substituído parcial do cimento pretende-se que apresentem uma granulometria idêntica, desse modo, o biochar foi moído com auxílio a um moinho de argolas.

O procedimento consiste em colocar cerca de 50 gramas da amostra em ambos os anéis, confirmando que não existe amostra na parte superior do mesmo.

Cada moagem teve um tempo de duração de 10 minutos, a 700 rotações por minuto. O tempo de moagem foi obtido por via experimental.

Após a moagem, com auxílio de um pincel, retira-se o biochar moído dos anéis.

Como apresentado na Figura 51, a parte superior da tampa encontrava-se danificada, para não contaminar a amostra, após cada moagem, toda a amostra que estava na tampa era rejeitada.

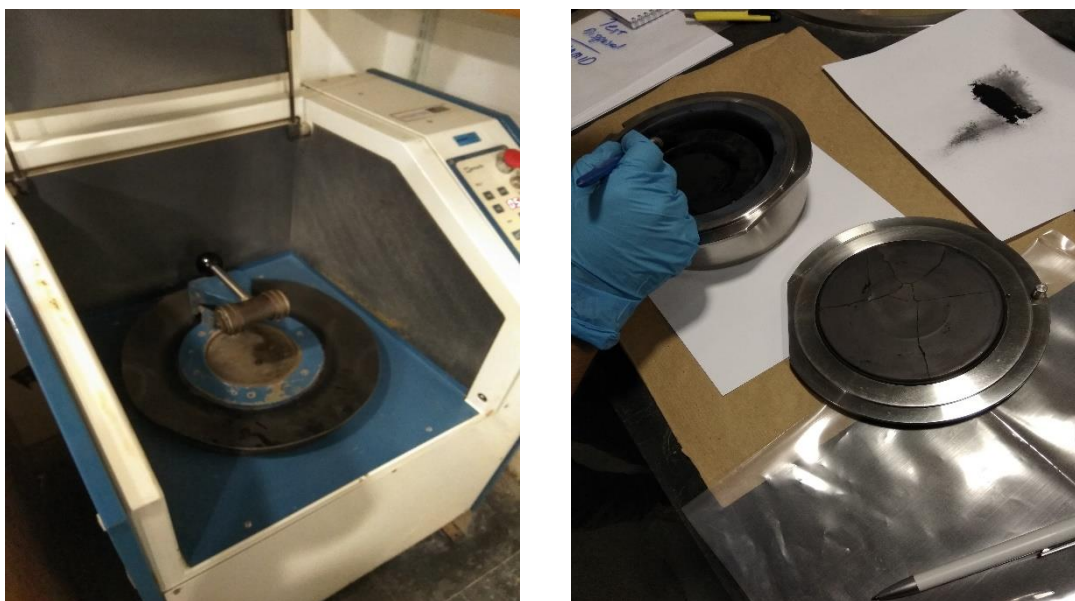


Figura 51 - Moinho de argolas

Após a moagem no moinho de argolas, as amostras foram deixadas durante 24 horas numa estufa a secar à temperatura de 60°C. Depois de secas, as amostras, foram passadas nos peneiros. Apenas foram aceites as amostras que passavam no peneiro com abertura de 0,150 mm. Todas as amostras que foram rejeitadas neste processo foram moídas novamente no moinho de argolas até passarem no peneiro com abertura de 0,150 mm.

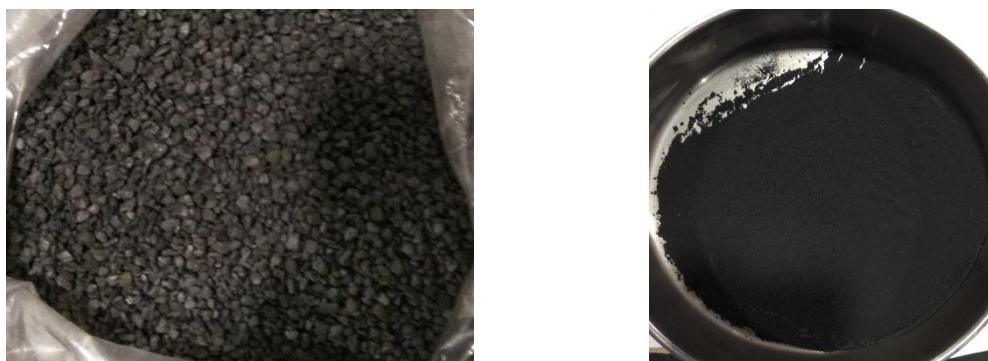


Figura 52 – Biochar antes e depois de moído

4.1.3.2. Massa volúmica

O picnómetro de gás determina o volume verdadeiro de um sólido, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido. Normalmente utiliza-se hélio, porque este gás além de inerte, penetra facilmente nos poros da amostra, devido ao pequeno tamanho dos seus átomos, permitindo assim, determinar o volume do sólido com maior rigor, (Moura & Figueiredo, 2002).

O picnómetro de hélio é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos, por calibração prévia. Antes de iniciar a análise a amostra é sujeita a um processo de desgaseificação, para remoção de impurezas que possa conter. De forma a remover a humidade presente na amostra, a amostra foi deixada no forno durante 24 horas a uma temperatura de 60°C.

A principal vantagem deste método reside na capacidade de medir apenas o volume da substância, descontando o volume total da amostra todos os poros, (Moura & Figueiredo, 2002).

Para este ensaio foram necessárias 10 gramas de cada amostra.



Figura 53 – Picnómetro de hélio

4.1.3.3. Análise da distribuição granulométrica pelo método de Coulter

De forma a quantificar e determinar o tamanho das partículas através de uma curva de distribuição granulométrica do material foi utilizado o método de Coulter.

O método de Coulter, também usado na caracterização dos materiais no caso circular 1A do PaperChain, foi anteriormente explicado. O princípio do método de Coulter é o mesmo em ambos os casos.

Para este ensaio foram necessárias 5 gramas de cada amostra. É necessário conhecer a massa volúmica das amostras e que se encontrem devidamente secas, para tal as amostras foram deixadas a secar durante 24 horas a 70°C.



Figura 54 – Equipamento de análise granulométrica, (Marianito Ascensão, 2015)

4.1.3.4. Microscópio eletrónico de varrimento (MEV)

O microscópio eletrónico de varrimento é um microscópio capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra, (H. H. Ferreira, 2016; Macedo, 2016). O biochar foi analisado no microscópio eletrónico de varrimento para obter o seu aspeto morfológico. No microscópio eletrónico de varrimento, um feixe de eletrões altamente energético percorre a superfície das amostras ponto por ponto, linha a linha (varrimento). Os eletrões secundários ou retrodifundidos pela amostra são detetados por detetores de eletrões, através do contraste, o sinal é tratado de forma a criar uma imagem 2D num ecrã, (H. H. Ferreira, 2016; Macedo, 2016; Sousa, 2005).

O biochar é depositado num suporte de amostra de alumínio, em fita de carbono.

Este ensaio exige uma quantidade muito reduzida de amostra para ser realizado. Foi apenas necessária 1 grama de cada amostra, previamente secas a 70°C durante 24 horas.



Figura 55 - Microscópio eletrônico de varrimento

4.1.3.5. Fluorescência de Raios-X (FRX)

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica que permite a análise elementar qualitativa e quantitativa de amostras em pó. A FRX é uma técnica com alta precisão e exatidão, (Macedo, 2016).

O processo deste ensaio, consiste em incidir feixes de raios X, nas amostras. A energia destes feixes é suficiente para tornar os átomos da amostra instáveis, fazendo com que os elétrons internos, com baixo nível de energia, sejam desalojados. O espaço deixado pelos elétrons internos que saíram são preenchidos por elétrons externos, com níveis de energia mais altos. Quando este processo acontece, a energia é libertada devido á diminuição da ligação do orbital interno do elétron em comparação com o externo. Estas mudanças nos níveis de energia causam diferenças de energia, resultando na libertação de raios X secundários, que são característicos de um elemento em específico, permitindo detetar os elementos presentes e a sua abundância na amostra, (Macedo, 2016).

Para este ensaio foram necessárias 15 gramas de cada amostra, previamente seca a 70°C durante 24 horas.



Figura 56 - Espectrómetro de fluorescência de raios X

4.1.3.6. Difração de Raios X (DRX)

Como dito anteriormente, a difração de raios X (DRX) é uma técnica não destrutiva importante para caracterizar os materiais, pois permite identificar e quantificar suas fases cristalinas. É utilizada na identificação, caracterização e determinação da estrutura cristalográfica dos minerais, (Gemusse, 2014; Macedo, 2016).

A difração de raios x usada no biochar é idêntica à usada na caraterização das cinzas de cal no PaperChain.

Para a caraterização do biochar, através da difração de raio x, apenas se identificaram os minerais e a sua estrutura cristalina, não foi necessário obter a composição química. A composição química do biochar foi determinada pela fluorescência de raios x.

Para este ensaio foram necessárias 10 gramas de cada amostra, previamente seca a 70°C durante 24 horas.



Figura 57 - Difratómetro de raios x

4.1.3.7. Área superficial específica

A área superficial específica é definida como a razão entre a área absoluta da superfície de um sólido e a sua massa, (Macedo, 2016).

À semelhança do cálculo da área superficial específica no PaperChain, a área superficial específica do biochar também foi calculada recorrendo à teoria de B.E.T. (Brunauer-Emmett-Teller).

Antes de a amostra ser testada é desgaseificada. Para a realização deste ensaio foi necessário 1 grama de cada amostra previamente secas a 70°C durante 24 horas.

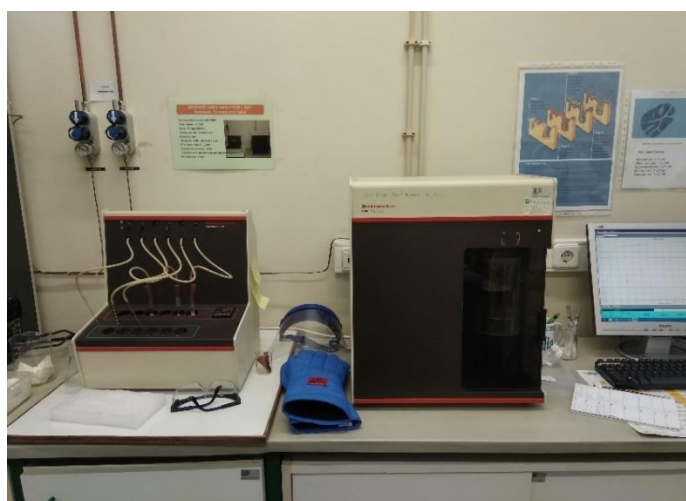


Figura 58 - Equipamento para o cálculo da área superficial específica

4.1.4. Caraterização das argamassas no estado fresco

4.1.4.1. Preparação das argamassas

As argamassas foram preparadas segundo a norma EN 1015-2 de 1998.

A quantidade de água necessária para as argamassas foi determinada experimentalmente, de modo a obter argamassas trabalháveis, com valores de espalhamento de 140 ± 10 mm.

A adição do superplastificante à mistura é feita conforme a indicação do fabricante.

O procedimento adotado para a realização das misturas é o seguinte:

- Todos os constituintes são pesados numa balança com precisão de 0,01 g;
- Introduce-se no recipiente da misturadora a água, previamente pesada, de seguida o superplastificante é adicionado, como indica o fabricante, para diluir o superplastificante, com o auxílio de uma vareta agita-se ligeiramente a mistura;
- Os constituintes sólidos que foram previamente homogeneizados manualmente são adicionados ao recipiente, procede-se a uma mistura manual para a molhagem dos sólidos;
- Coloca-se o recipiente na misturadora e liga-se a uma velocidade lenta, durante 60 segundos;
- Retira-se o recipiente e com recurso a uma espátula, mistura-se ligeiramente a pasta manualmente, esta etapa tem como objetivo obter uma mistura mais homogénea e uma melhor ligação entre os constituintes;
- Coloca-se novamente o recipiente na misturadora e põe-se em funcionamento em velocidade lenta por mais 60 segundos;
- Após a preparação da amostra e antes de ser ensaiada, deve-se ser agitada suavemente com o auxílio de uma colher de pedreiro, cerca de 5 a 10 segundos, para neutralizar qualquer falso ajustamento;



Figura 59 – Misturadora usada na preparação da argamassa

Depois de a argamassa estar misturada é feito o ensaio da consistência por espalhamento, seguido da colocação da argamassa nos moldes. Os moldes utilizados são moldes metálicos, prismáticos com dimensões de 160 mm x 40 mm x 40 mm, conforme especificado na norma EN 1015-11 de 1999.

Os moldes foram preparados de acordo com a EN 1015-11, no entanto de forma a obter provetes mais compactos, homogêneos e com o máximo de vazios eliminados, optou-se por usar também uma mesa de vibração.

O procedimento adotado para a realização dos provetes prismáticos é o seguinte:

- Coloca-se a argamassa nos moldes previamente limpos e lubrificados com óleo desconfrante, em duas camadas, ambas compactadas 25 vezes com um pilão;
- Eleva-se cada lado do molde de forma a dar-se quatro pancadas e eliminar os vazios existentes, coloca-se o molde na mesa de vibração, durante 30 segundos;
- Com o auxílio de uma espátula a superfície é alisada, retirando o excedente de argamassa;
- As amostras são devidamente identificadas e procede-se ao processo de cura dos provetes;

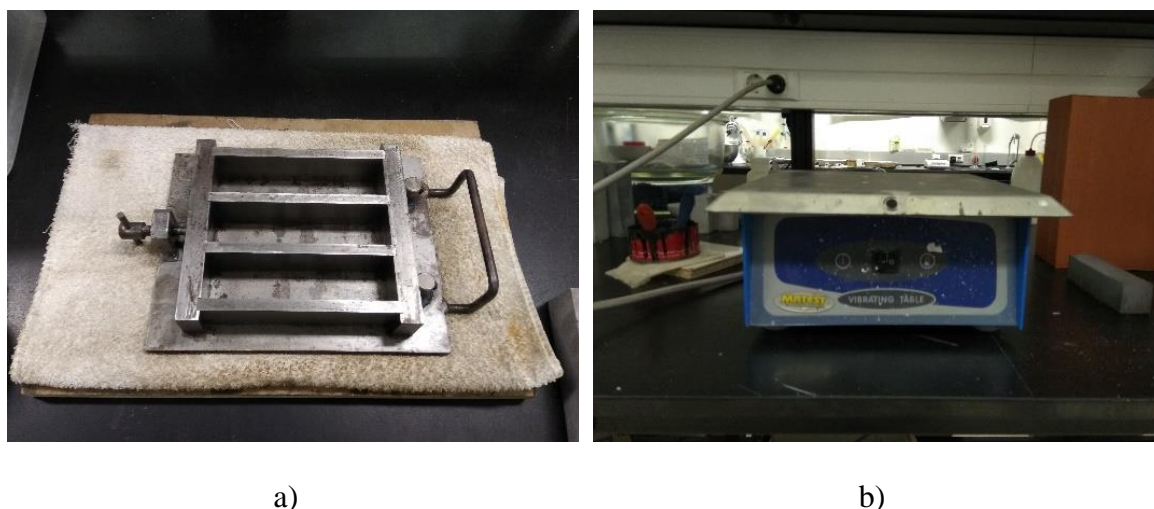


Figura 60 - Preparação dos provetes: a) Moldes utilizados; b) Mesa de vibração

Depois de preparados, os moldes são colocados durante 2 dias a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $95 \pm 5\%$, através da colocação num saco de plástico de polietileno. Passados os 2 dias os provetes são desmoldados e são transferidos para uma câmara climática com atmosfera controlada, onde permanecem nas mesmas condições climáticas até completar 7 dias de cura e 28 dias de cura.



Figura 61 - Provetes em câmara climática

Na cura húmida, os poros da argamassa estão constantemente saturados e os seus componentes hidratados, tornando a argamassa mais impermeável por redução do volume de capilares e diminuição dos acessos de água. Na cura a seco, a água da argamassa evapora, criando poros, (Gupta & Kua, 2018; Paiva, 2013).

4.1.4.2. Consistência por espalhamento

O ensaio que permite avaliar a trabalhabilidade das argamassas é o da consistência por espalhamento.

De acordo com a EN 1015- 3 de 1999, o espalhamento é uma medida de fluidez de uma argamassa fresca e avalia a sua trabalhabilidade.

A trabalhabilidade de uma argamassas está diretamente relacionada com o seu uso ou finalidade, a consistência é apenas um valor numérico de caracterização da fluidez. Uma dada consistência pode então resultar numa boa ou má trabalhabilidade, consoante o fim a que se destina, (Ceríaco Cruz, 2008).

A trabalhabilidade da argamassa condiciona fortemente a sua aplicabilidade em obra estando intrinsecamente associada a propriedades como a consistência, a coesão e a plasticidade, (Marianito Ascensão, 2015).

O valor do espalhamento é medido pelo diâmetro da amostra de argamassa fresca, que é colocada sobre a mesa de espalhamento.

Este ensaio é realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-3 e serve para acertar a quantidade de água adicionada à mistura e assim obter-se a consistência e a trabalhabilidade pretendidas para a argamassa.

O equipamento necessário para a realização do ensaio é:

- Colher de pedreiro;
- Espátula;
- Craveira digital;
- Pilão;
- Molde tronco cónico;
- Mesa de espalhamento;

O procedimento adotado para a realização do ensaio é o seguinte: (Costa Braga, 2010)

Antes do ensaio, limpa-se com um pano a superfície da mesa e as bordas do molde, se a mesa não tiver sido utilizada nas últimas 24h, deve-se dar 10 pancadas antes da sua utilização. Centra-se o molde na mesa de espalhamento e coloca-se a argamassas em duas camadas, sendo cada uma compactadas por 10 pequenas pancadas com o pilão, para assegurar o enchimento uniforme do molde. Retira-se a argamassa em excesso com a espátula e limpa-se a área livre da mesa;

Após aproximadamente 15 segundos, cuidadosamente levanta-se o molde na vertical, e espalha-se a argamassa rodando a manivela 15 vezes, com uma frequência constante de cerca de uma por segundo.

Com recurso à craveira, mede-se o diâmetro (em mm) da argamassa espalhada.

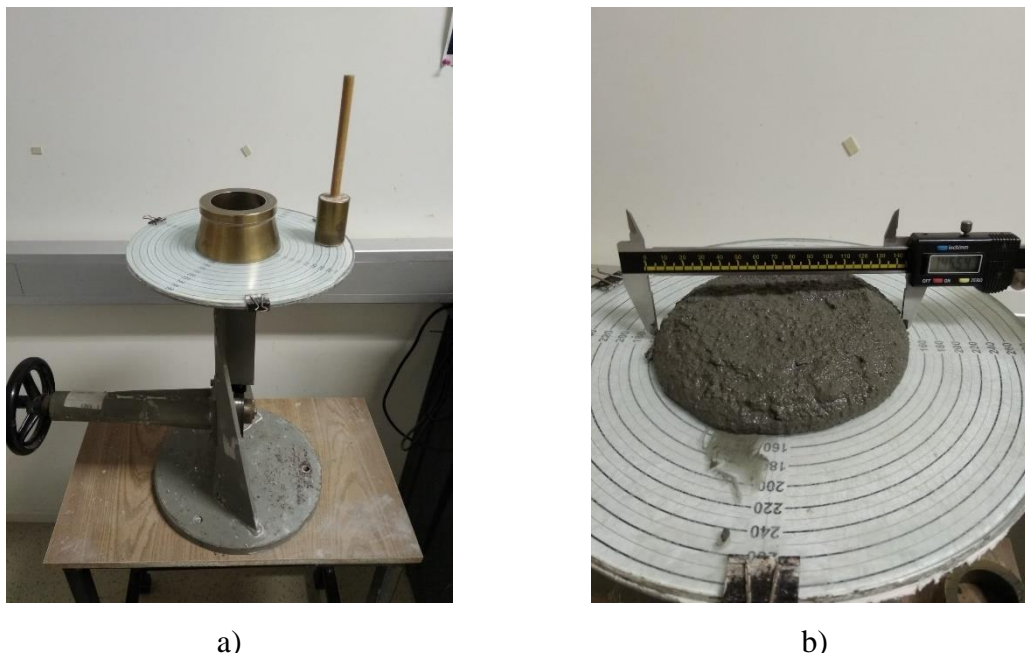


Figura 62 – Mesa de espalhamento (a) e método de medição (b)

4.1.4.3. Massa Volúmica

Este ensaio é realizado de acordo com a norma EN 1015-6- 1998 e serve para determinar, a massa volúmica da argamassa em estado fresco, através do quociente entre a massa da amostra e o volume por si ocupado, conhecido à partida.

A realização deste ensaio tem como objetivo verificar qual a influência do biochar na argamassa.

O equipamento necessário para a realização do ensaio é:

- Recipiente cilíndrico;
- Espátula;
- Balança com precisão de 0,1 g;
- Colher de pedreiro;

O procedimento adotado para a realização do ensaio é o seguinte: Enche-se o recipiente cilíndrico até cerca de metade da sua capacidade e compacta-se com 10 pequenas pancadas realizadas a partir da oscilação do recipiente em lados alternados

Enche-se o recipiente até à sua capacidade máxima e volta-se a compactar da mesma forma. Com o auxílio de uma espátula o excedente de argamassa é retirado até ao nível da aresta superior do recipiente. Para finalizar, limpa-se a parte de fora do recipiente e pesa-se.

A massa volúmica da argamassa em estado fresco é dada pela equação:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad (3)$$

Em que:

ρ_m - Massa volúmica da argamassa em estado fresco (kg/m³)

m_1 - Massa do recipiente cilíndrico vazio (kg)

m_2 - Massa do recipiente cilíndrico com argamassa (kg)

V_v - Volume do recipiente cilíndrico (m³)

4.1.5. Caracterização das argamassas em estado endurecido

Neste capítulo são apresentados todos os ensaios que serão usados para caracterizar a argamassa em estado endurecido. Todos os processos são devidamente explicados.

4.1.5.1. Massa volúmica

Este ensaio é realizado de acordo com a norma EN 1015-10- 1999.

O equipamento necessário para a realização do ensaio é:

- Craveira digital;
- Balança com precisão de 0,1 g;
- Serra de corte;

Utilizando uma craveira, são medidas a largura, espessura e comprimento de cada provete. Através de uma balança com erro não superior a 0,1g é determinada a massa de cada provete. A massa volúmica no estado endurecido é calculada a partir da relação da massa com o volume exterior dos prismas de argamassa

O resultado para cada argamassa é a média das três medições individuais, arredondada para duas casas decimais

A realização deste ensaio tem como objetivo verificar a influencia da incorporação do biochar nas argamassas.



a)



b)



c)



d)

Figura 63 – Processo para o cálculo da massa volúmica: a) Retificação dos provetes; b) Pesagem dos provetes; c) e d) Medição dos provetes

4.1.5.2. Absorção de água por capilaridade

A capacidade de um material, não saturado, absorver água e escoar água por sucção capilar denomina-se de capilaridade. Esta característica é importante para avaliar o comportamento das argamassas à água, (Costa Braga, 2010).

As argamassas mais porosas são mais permeáveis à água, o que contribui para uma má durabilidade. A durabilidade decresce com o aumento da capilaridade, (Ceríaco Cruz, 2008).

O coeficiente de absorção de água por capilaridade serve para quantificar a capilaridade e é dado pela massa de água absorvida por capilaridade num dado intervalo de tempo, por unidade de área da superfície do provete em contacto com a água, (Costa Braga, 2010).

O procedimento adotado para este ensaio segue a norma EN 1015-18 de 2002.

O equipamento necessário para a realização do ensaio é:

- Serra de corte;
- Tina com profundidade mínima de 20 mm;
- Balança com precisão de 0,1 g;
- Cronómetro;
- Estufa;
- Papel Absorvente;

Para este ensaio é apenas necessária metade de cada provete prismático, no entanto todas as faces têm de estar regulares. Após o ensaio da resistência à flexão, uma das metades resultantes, é cortada, com o auxílio de uma serra elétrica, de forma a todas as faces ficarem regulares.

Os provetes são colocados a secar em estufa, à temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Após atingirem uma massa constante (variação de massa inferior a 0,1%) são retirados da estufa e deixados a arrefecer no exsiccador até atingirem o valor da temperatura ambiente.

Após o seu arrefecimento, os provetes foram pesados e colocados, com a face cortada virada para baixo, em cima de um esfregão, dentro de um tabuleiro com cerca de 5 mm de água. Os provetes devem ficar imersos a uma profundidade entre 5 a 10 mm. No decorrer do ensaio o nível da água foi sempre verificado, garantindo uma altura de água constante.

Procedeu-se o ensaio, pesando-se várias vezes os provetes até apresentarem massa constante. Ao retirar os provetes para a pesagem é necessário limpar a superfície imersa com papel absorvente.

O valor do coeficiente, de acordo com a EN 1015-18 de 2002, é obtido pela equação:

$$C = 0,1 * (M_2 - M_1) \quad (4)$$

Em que:

M_2 - Massa do provete decorridos 90 minutos;

M_1 - Massa do provete decorridos 10 minutos;

O coeficiente de capilaridade reporta a uma primeira fase de absorção de água, representando a velocidade com que a água é inicialmente absorvida pela argamassa. Para além dessa primeira fase é necessário considerar a quantidade de água absorvida por unidade de superfície do provete, ou seja, a quantidade máxima de água absorvida por uma determinada área exposta á presença de água. Para obter a quantidade máxima de água absorvida é utilizada a seguinte equação:

$$M_i = \frac{m_i - m_0}{A} \quad (5)$$

Em que:

M_i - Quantidade de água absorvida por unidade de superfície (kg/m²);

m_i - Massa do provete saturado (kg);

m_0 - Massa do provete seco (kg);

A - Área da secção do provete em contato com a água (m²)

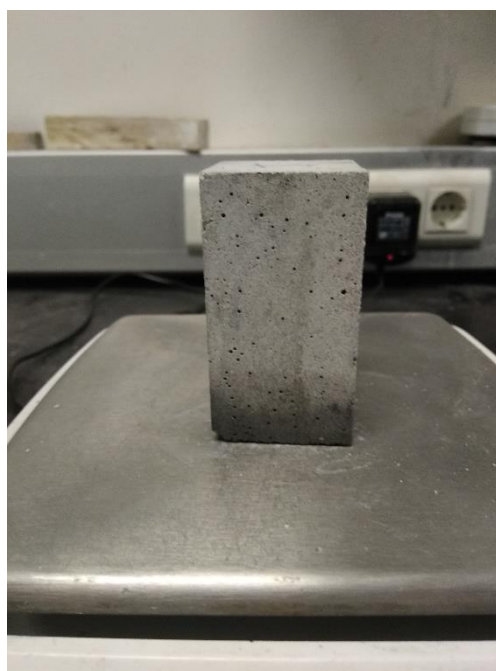


Figura 64 – Provetes no tabuleiro com água e pesagem

4.1.5.3. Resistência à compressão e flexão

A resistência à compressão e flexão é uma medida de durabilidade e permite avaliar o risco de introdução de tensões no suporte, (Costa Braga, 2010).

O procedimento adotado para este ensaio segue a norma EN 1015-11 de 1999.

O ensaio é realizado aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura. Por cada tipo de argamassa foram testados 3 provetes.

O procedimento adotado para a realização do ensaio é o seguinte:

Para a resistência à flexão, o ensaio consiste em assentar uma face lateral dos provetes em dois apoios cilíndricos de forma a que fiquem perpendiculares ao seu eixo longitudinal e submetê-los a forças gradualmente crescentes exercidas a meio vão, até à rotura por flexão. Como indica a norma EN 1015-11 de 1999 a velocidade de aplicação da força é de 50 N/s. Considera-se a resistência à flexão a média aritmética dos valores de resistência à flexão obtidos para os 3 provetes testados.

De forma a os resultados não serem influenciados pela face rugosa, ao assentar os provetes na prensa de flexão teve-se o cuidado de a face rugosa não ficar em contacto com os apoios.



Figura 65 - Acessórios usados para o teste de flexão



Figura 66 – Provede a ser testado

Para o ensaio da resistência à compressão, à semelhança do ensaio da resistência à flexão, o procedimento adotado segue a norma europeia EN 1015-11 de 1999.

Este ensaio segue o mesmo procedimento, no entanto com algumas diferenças. No ensaio de resistência à compressão, são utilizadas as metades dos provetes resultantes do ensaio de resistência à flexão.

Como se pode observar na Figura 65 e na Figura 67 os semi prismas são colocados na mesma máquina, no entanto os acessórios do teste são diferentes.

Como indica a norma EN 1015-11 de 1999 a velocidade de aplicação da força é de 500 N/s.



Figura 67 - Acessórios usados para o teste de compressão



Figura 68 – Semi prisma a ser testado

4.1.5.4. Condutividade térmica

A redução do consumo de energia assume uma importância cada vez maior para a União Europeia. Em 2018, foi fixado um objetivo de redução do consumo de energia de pelo menos, 32,5 % até 2030. A eficiência energética é uma das prioridades estratégicas da EU. A Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios contém várias disposições destinadas a melhorar a eficiência energética dos edifícios novos e existentes, (Parlamento Europeu, 2020).

Os edifícios representam 40 % do consumo de energia e 36 % das emissões de CO₂ na UE. A melhoria da eficiência energética dos edifícios poderá fazer baixar o consumo total de energia na UE em 5-6 % e as emissões de CO₂ em cerca de 5 %, (Parlamento Europeu, 2020).

O desempenho energético tornou-se crucial para avaliar a sustentabilidade energética dos edifícios. As transferências de calor entre o interior do edifício e o ambiente exterior são muito dependentes do desempenho térmico do edifício, (Gomes, Flores-Colen, Manga, Soares, & de Brito, 2017). Edifícios com mau desempenho térmico levam a um aumento dos consumos energéticos, quer na estação de aquecimento, quer na estação de arrefecimento, (Gaspar, 2016).

A temperatura interior dos edifícios depende essencialmente das condições climáticas e das propriedades termofísicas. Como não é possível alterar as condições climáticas, devem ser feitos estudos das propriedades dos materiais. As propriedades termofísicas referem-se à condutividade térmica dos materiais e ao coeficiente de transmissão térmica das soluções da envolvente. O coeficiente de condutividade térmica é a propriedade que caracteriza a maior ou menor facilidade de transferência de calor por condução e depende não só da densidade, mas também da dimensão dos poros e do tipo de estrutura interna, (Silva, 2017).

Gupta & Kua, 2017, afirmam que a estrutura porosa do biochar garante melhorias no isolamento dos edifícios, reduzindo assim o consumo de energia no aquecimento e arrefecimento de edifícios.

O estudo da condutividade térmica das argamassas com biochar era um dos parâmetros que estava previsto ser avaliado, porém devido ao estado de emergência decretado em resultado da pandemia de Covid- 19 não foi possível ser realizado. No entanto será explicado todo o procedimento que estava previsto.

O teste da condutividade térmica é um ensaio não destrutivo. O equipamento que se previa utilizar neste ensaio (Mathis TCi) tem por base o método Modified Transient Plane Source. Este método consiste em aplicar uma quantidade de calor à amostra em estudo, através de um sensor. A amostra absorve parte do calor, dependendo da sua condutividade térmica, o restante calor irá causar um aumento da temperatura entre a face inferior da amostra e o sensor e uma diminuição da tensão do elemento do sensor. A taxa de diminuição da tensão é inversamente proporcional à capacidade de a amostra transferir calor. Os resultados são exibidos no software do sistema em tempo real, (Di Sipio et al., 2013; Thermal Analysis Labs, 2020b).

Como apresentado na Figura 70, para este ensaio foram produzidas amostras com dimensões mais adequadas ao ensaio (9 cm de diâmetro e 2 cm de altura). A preparação e o método de cura destas amostras foram as mesmas que as restantes amostras. As amostras para o teste apenas necessitam que as faces estejam regulares e lisas.

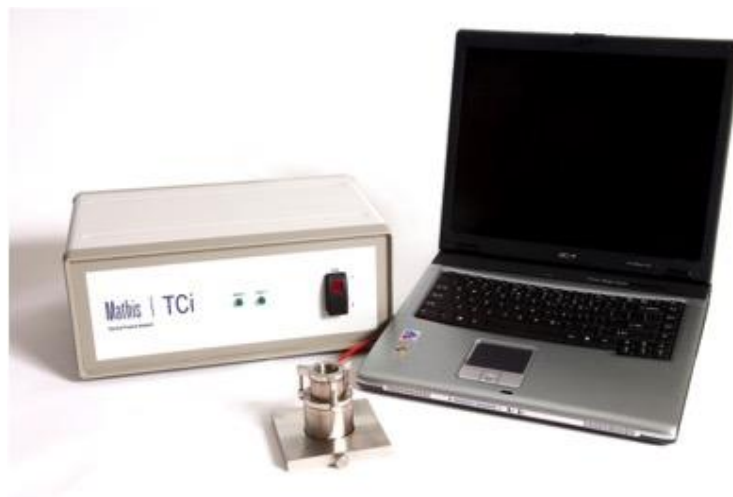


Figura 69 – Equipamento para a determinação do coeficiente de condutividade térmica, (Thermal Analysis Labs, 2020a)



Figura 70 - Provetes para realização do teste de condutividade térmica

4.2. Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios realizados, de forma a estudar a incorporação do biochar em argamassa. Serão caracterizadas as argamassas tal como os seus constituintes.

Os resultados serão expostos e discutidos recorrendo a representações gráficas e figuras.

4.2.1. Ensaio relativos aos materiais

Neste subcapítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos para a distribuição granulométrica da areia. É apresentada a curva de distribuição granulometria da areia usada neste estudo.

4.2.1.1. Análise granulométrica da areia

As areias usadas nas argamassas devem idealmente ter uma distribuição granulométrica contínua. O princípio para a distribuição granulométrica é que todos os espaços entre as maiores partículas sejam preenchidos por partículas mais finas, (Ceríaco Cruz, 2008).

Apresenta-se na Figura 71 a curva granulométrica obtida para a areia usada nas argamassas, verificando que apresenta uma distribuição granulométrica contínua.

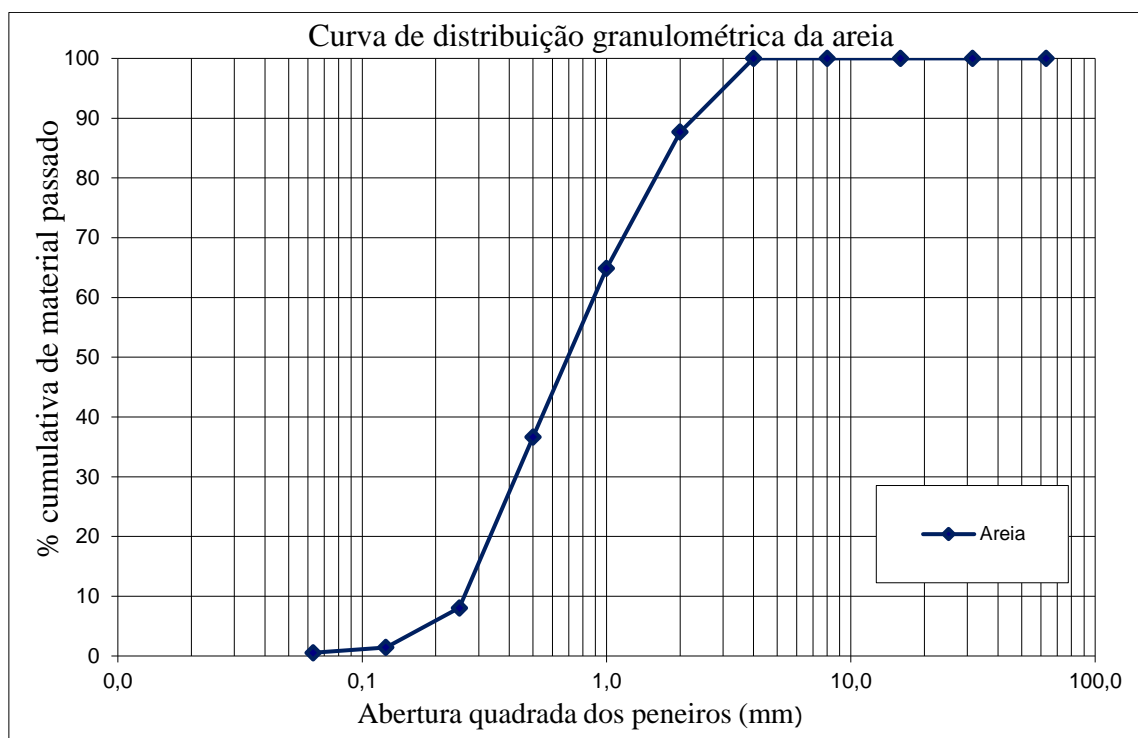


Figura 71 - Curva de distribuição granulométrica da areia usada

Importa definir a máxima e a mínima dimensão do agregado. A máxima dimensão do agregado representa a menor abertura do peneiro, da série de peneiros de referência, através do qual passa pelo menos 90% do agregado. A mínima dimensão do agregado representa a maior abertura do peneiro, da série de peneiros de referência, através do qual não passa mais do que 5% da massa do agregado.

Através da Tabela 12, observa-se que a máxima dimensão do agregado é 4 mm e a mínima dimensão do agregado é 0,125 mm.

Tabela 12 - Percentagem de massa acumulada nos peneiros

Abertura do peneiro (mm)	% Cumulativa de Material Passado
63,0	100,0
31,5	100,0
16,0	100,0
8,0	100,0
4,0	100,0
2,0	87,7
1,0	64,9
0,500	36,6
0,250	8,1
0,125	1,4
0,063	0,5

Visto que o objetivo desta dissertação prende-se com o estudo da influência do biochar nas argamassas e não com a influência dos agregados no comportamento das argamassas, não importa fazer variar a gama de granulometria da areia.

4.2.2. Caraterização do Biochar

Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos para a caracterização do biochar, para uma melhor comparação com o biochar, em alguns ensaios também se caraterizou o cimento. São apresentados os resultados obtidos para a massa volúmica, distribuição granulométrica, morfologia do biochar, composição química, estrutura cristalográfica e área superficial específica.

4.2.2.1. Picnómetro de hélio

Através do picnómetro de hélio foi possível determinar a massa volúmica do biochar e do cimento usado. Para a determinação da massa volúmica foram efetuadas 3 medições, o valor final é a media das 3 medições.

Tabela 13 – Massa volúmica do biochar e do cimento usado

Amostras	Massa volúmica (g/cm ³)
Biochar de caroço de azeitona (B1)	1,7
Biochar de casca de arroz (B2)	2,0
Cimento Portland CEM II/B-L 32,5N	3,1

Através da Tabela 13 conclui-se que o cimento é o que apresenta maior massa volúmica. Entre o biochar de casca de arroz e o biochar de caroço de azeitona, o biochar de casca de arroz é o que possui maior massa volúmica, apesar de a diferença não ser significativa.

Através da medição do picnómetro de hélio conclui-se que o cimento usado é mais denso que o biochar produzido. A densidade do biochar depende da biomassa usada e do processo de pirólise, quanto maior a temperatura da pirólise, maior será a densidade do biochar.

4.2.2.2. Análise da distribuição granulométrica pelo método de Coulter

Através da Tabela 14, conclui-se que o biochar de caroço de azeitona apresenta uma granulometria fina, sendo constituído por 50 % de partículas de dimensão inferior a 17,52 μm . O biochar de casca de arroz apresenta uma granulometria superior á do biochar de caroço de azeitona, sendo constituído 50% por partículas de dimensão inferior a 43,81 μm . É possível observar que em ambos os biochar todas as partículas apresentam uma dimensão inferior a 0,150 mm. É também possível verificar que 90 % das partículas do biochar de caroço de azeitona apresentam uma dimensão inferior a 69,92 μm . No caso do biochar de casca de arroz, visto que apresenta uma granulometria superior, 90 % das partículas apresentam uma dimensão inferior a 117,6 μm .

Pode concluir-se que o biochar apresenta uma granulometria inferior à do cimento. Através dos dados fornecidos pela Cimpor, verifica-se que apenas 10% das partículas apresentam uma dimensão inferior a 45 μm , no caso do biochar de caroço de azeitona, 75% das partículas apresentam uma dimensão inferior a 45 μm e no caso do biochar de casca de arroz 50% das partículas são inferiores a essa dimensão.

O método de Coulter permite também obter o tamanho médio das partículas, conclui-se que o tamanho médio das partículas de biochar de caroço de azeitona é de 17,52 μm e o de biochar de casca de arroz é de 43,81 μm .

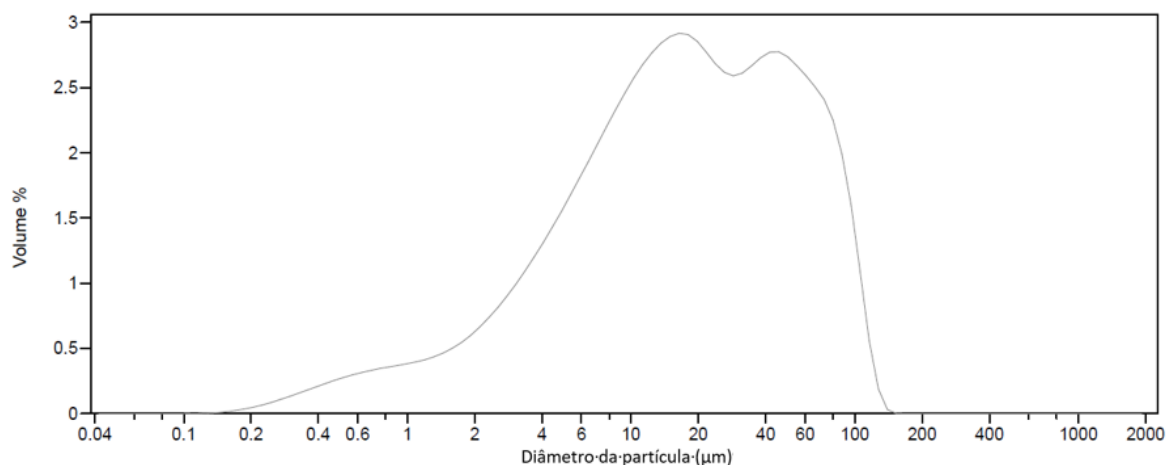


Figura 72 – Curva de distribuição granulométrica diferencial do biochar de caroço de azeitona

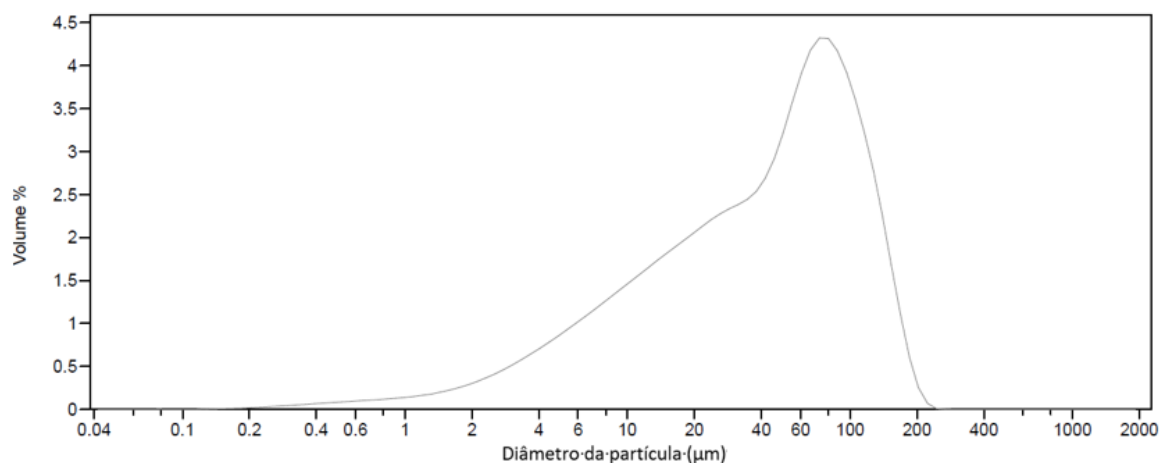


Figura 73 – Curva de distribuição granulométrica diferencial do biochar de casca de arroz

Tabela 14 – Distribuição granulométrica do biochar

Biochar caroço de azeitona (B1)		Biochar de casca de arroz (B2)
% <	Diâmetro da partícula (µm)	Diâmetro da partícula (µm)
10	2,714	5,871
25	7,175	15,67
50	17,52	43,81
75	41,39	81,59
90	69,92	117,6

4.2.2.3. Microscopia eletrônica de varrimento (MEV)

Através da microscopia eletrônica de varrimento, é possível observar a estrutura morfológica do biochar produzido, as mudanças estruturais pelo processo de pirólise e do processo de moagem. Através da Figura 74 e da Figura 75 pode observar-se a estrutura porosa do biochar. Os poros podem ser divididos em relação ao seu tamanho, os poros no biochar podem ser classificados em micro poros (0,0001 e 0,001 μm), meso poros (0,001 e 0,10 μm) e macro poros ($> 0,10 \mu\text{m}$), (Dixit et al., 2019).

Os poros presentes no biochar são criados pela libertação de matéria orgânica e volátil da biomassa durante a pirólise, (Gupta, Kua, & Low, 2018). Para as mesmas biomassas, caso a temperatura da pirólise fosse inferior, as amostras de biochar teriam menos poros e seriam mais espaçados. As condições da pirólise e o tipo de biomassa irão condicionar a estrutura morfológica do biochar produzido, (Gupta, Kua, & Pang, 2018).

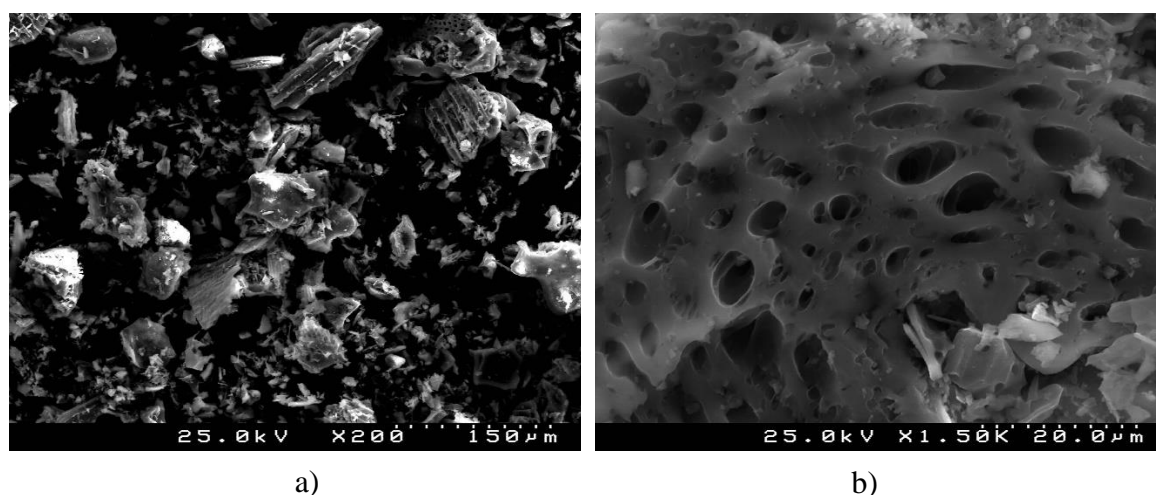


Figura 74 - Microscopia do Biochar de casca de arroz: a) Ampliação de 200x; b) Ampliação de 1500x;

O biochar de casca de arroz apresenta uma distribuição de poros muitas vezes designada por vários autores como favo de mel, (Gupta & Kua, 2019b).

Pode observar-se que os poros no biochar de casca de arroz são circulares, e com paredes finas, enquanto que no biochar de caroço de azeitona os poros não são tao regulares e apresentam maior diversidade de tamanhos. Esse fenómeno pode ser explicado pela libertação mais uniforme e mais completa de voláteis devido á pirólise de hemicelulose e celulose da biomassa de casca de arroz, (Gupta & Kua, 2018, 2019b).

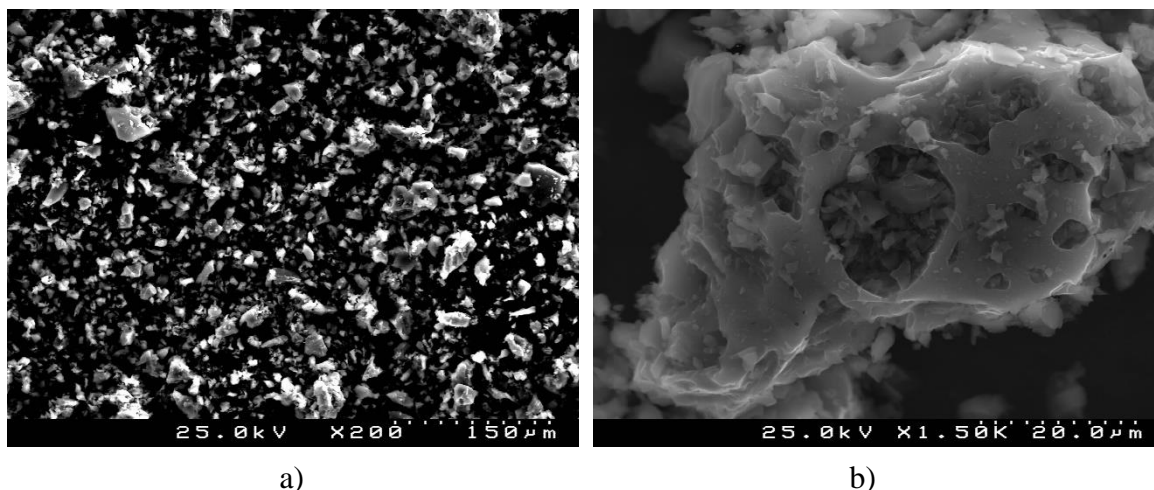


Figura 75 - Microscopia do Biochar de caroço de azeitona: a) Ampliação de 200x; b) Ampliação de 1500x;

Através da Figura 75 verifica-se que no biochar de caroço de azeitona, os poros das partículas são preenchidos por partículas mais pequenas.

Também é possível comparar a distribuição das partículas no biochar de caroço de azeitona com o biochar de casca de arroz, como já foi dito acima, através do método de Coulter, observou-se que as partículas do biochar de caroço de azeitona são mais finas que as do biochar de casca de arroz, a Figura 75 comprova-o. No entanto o biochar de casca de arroz apresenta partículas mais porosas e apresenta poros menos espaçados comparando com o biochar de caroço de azeitona.

Tanto no biochar de casca de arroz como no biochar de caroço de azeitona pode observar-se macro poros, no entanto a resolução máxima permitida pelo microscópio de varrimento eletrónico não permite observar poros de menores dimensões, (Choi et al., 2012; Dixit et al., 2019).

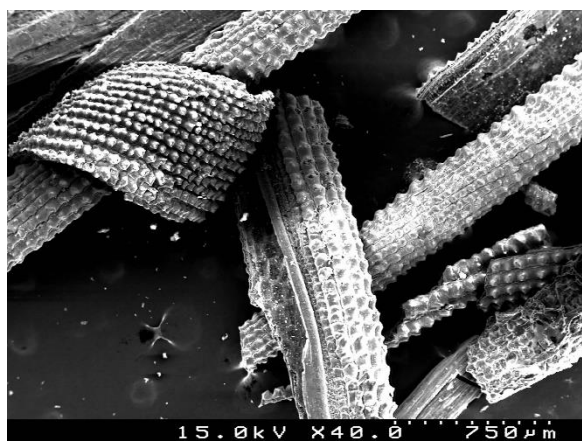


Figura 76 - Biochar casca de arroz antes de moído, ampliação de 40x

Para verificar qual o efeito que a moagem provoca na estrutura morfologia do biochar optou-se por analisar o biochar antes de moído. O biochar de casca de arroz antes de moído apresenta forma alongada com muito relevo, com superfície rugosa e não apresenta elevada quantidade de poros.

Como se pode observar na Figura 77 e de acordo com Sanginés, Domínguez, Sánchez, & San Miguel, 2015, o biochar de caroço de azeitona antes de moído apresenta células estreitas, transversalmente alongadas e muitos vazios. Observa-se que em ambos os biochar depois de moídos, as superfícies são irregulares e angulares.

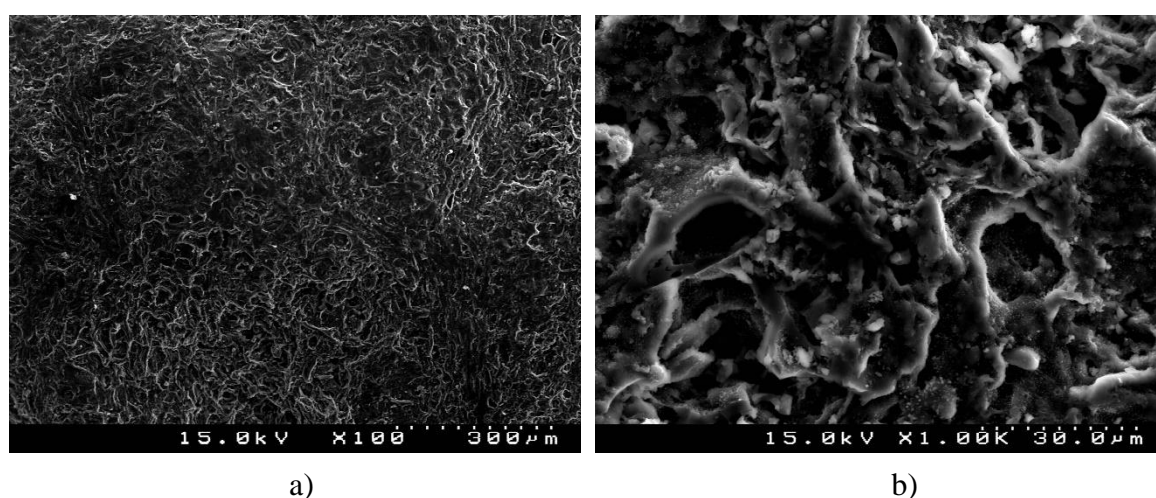


Figura 77 – Biochar caroço de azeitona antes de moído: a) Ampliação de 100x; b) Ampliação de 1000x

Em ambos os biochar como seria de esperar o processo de moagem resultou em partículas de menores dimensões, verificou-se também que o processo de moagem altera a estrutura morfologia e celular do biochar, (Choi et al., 2012).

4.2.2.4. Fluorescência de raio X (FRX)

Pela observação da Tabela 15 é possível verificar a caracterização química do biochar e do cimento usado.

O biochar de casca de arroz é composto maioritariamente por dióxido de silício (SiO_2) e óxido de potássio (K_2O) (cerca de 87,99 % do total). O biochar de caroço de azeitona é composto maioritariamente por óxido de potássio (K_2O) e óxido de cálcio (CaO), representando 79,29 % do total.

O cimento apresenta uma elevada quantidade de óxido de cálcio (CaO) e de dióxido de silício (SiO_2), representando 73,23 % do total.

Comparando os resultados obtidos com os resultados de outros autores conclui-se que para o biochar de casca de arroz vários autores obtiveram valores elevados de dióxido de silício (SiO_2), para o biochar de caroço de azeitona vários autores também obtiveram elevados valores de óxido de cálcio (CaO) e óxido de potássio (K_2O), (N. M. Al-Akhras & Abdulwahid, 2010; Alkheder et al., 2016; Asadi Zeidabadi et al., 2018; Muthukrishnan et al., 2019). No entanto importa salientar que a composição química do biochar depende da biomassa de origem e das condições da pirólise.

Comparando a composição química do cimento usado com o biochar, observa-se que o cimento apresenta maior percentagem de óxido de cálcio que ambos os biochar e maior percentagem de dióxido de silício que o biochar de caroço de azeitona.

Tabela 15 – Caraterização química do biochar e do cimento

Elemento	Biochar casca de arroz	Biochar caroço de azeitona	Cimento
Na_2O	0,165 %	3,293 %	0,11 %
MgO	1,111 %	1,314 %	1,59 %
Al_2O_3	0,182 %	0,574 %	3,93 %
SiO_2	74,572 %	1,250 %	13,99 %
SO_3	0,557 %	1,110 %	3,12 %
K_2O	13,418 %	52,718 %	1,30 %
CaO	4,080 %	26,569 %	59,24 %
TiO_2	0,028 %	—————	—————
Fe_2O_3	0,232 %	4,160 %	2,42 %
Cl	0,550 %	4,851 %	0,04 %
MnO	0,685 %	—————	1,59 %
P_2O_5	4,277 %	2,754 %	—————

4.2.2.5. Difração de raio x (DRX)

A difração de raio x foi efetuada com o intuito de verificar se o biochar produzido possuía fases cristalinas ou se era totalmente amorfo. O biochar é constituído na sua totalidade por material amorfo, isso deve-se à perda da estrutura cristalina da celulose e carbonização da biomassa durante a pirólise, (Dixit et al., 2019; Gupta & Kua, 2019a).

A degradação térmica de lenhina e hemicelulose provoca uma perda considerável de massa sob a forma de produtos voláteis, ficando para trás uma matriz rígida de material amorfo, designado por biochar, (D. N. Bastos, 2016; Mesquita Filho & Roberto Vieira, 2018).

Como esperado e pela observação das Figura 78 e Figura 79 o biochar produzido é totalmente amorfo.

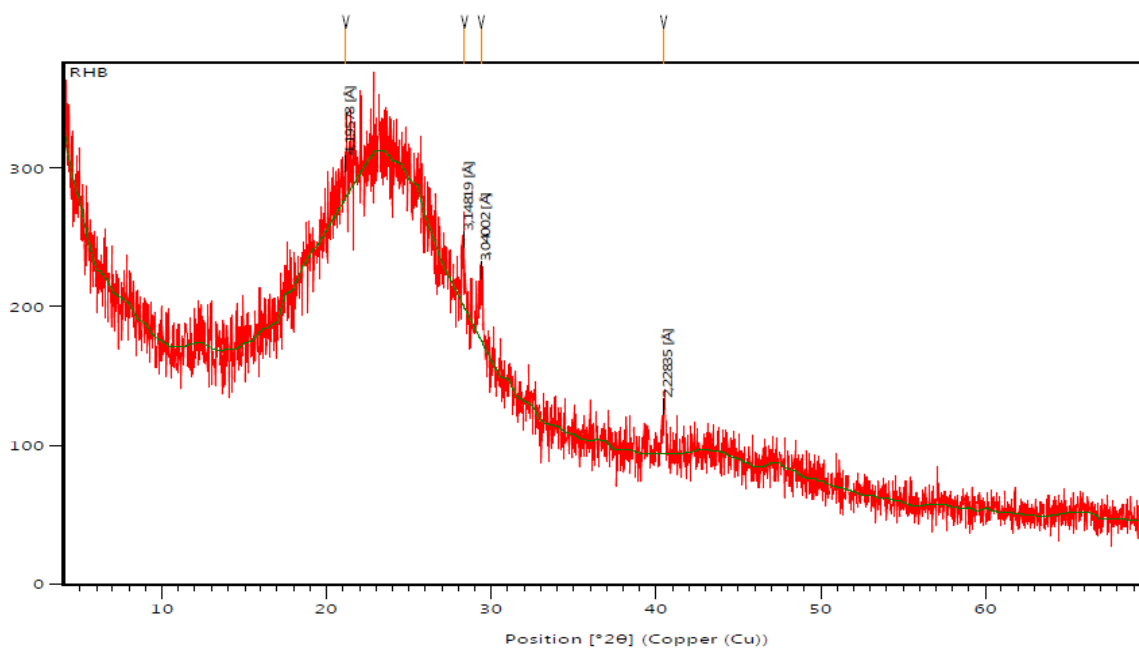


Figura 79 – Difratograma do biochar de casca de arroz

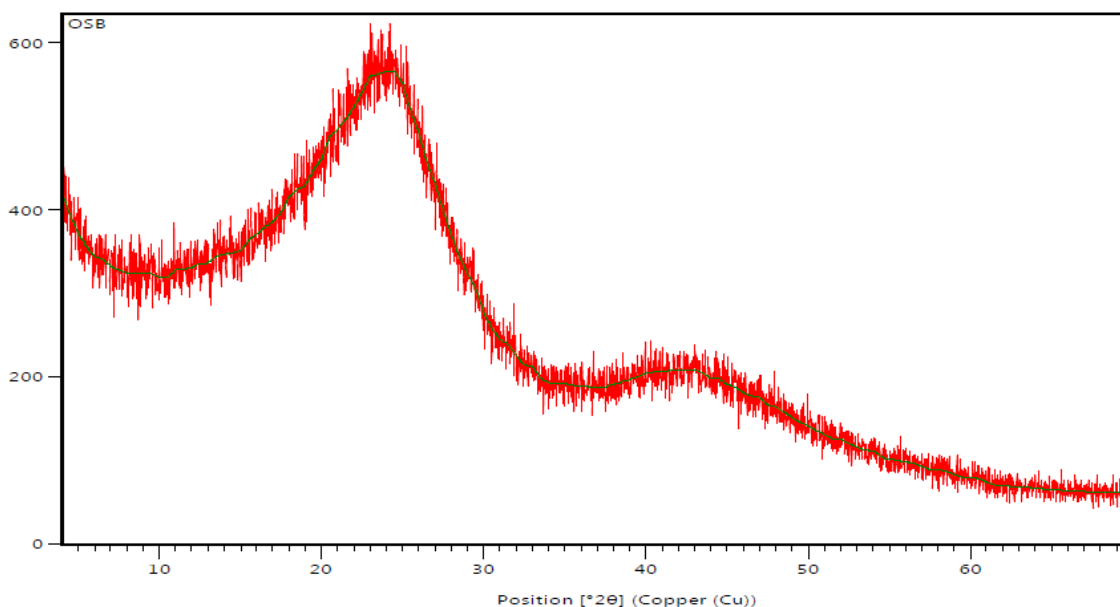


Figura 78 - Difratograma do biochar de caroço de azeitona

O difratograma do biochar de casca de arroz confirma o verificado pela caracterização química do biochar de casca de arroz, o seu maior constituinte é o dióxido de silício (SiO_2)

e o difratograma apresenta um pico na posição $2\theta = 22$ que é típico da sílica amorfa. O mesmo foi reportado por (Akhtar & Sarmah, 2018a; Asadi Zeidabadi et al., 2018; Muthukrishnan et al., 2019).

Através do difratograma é possível identificar a diferença entre o biochar e cinzas, enquanto o biochar apresenta um difratograma completamente amorfo, as cinzas apresentam natureza parcialmente cristalina. Na queima descontrolada, o controlo ineficaz da temperatura e o tempo de permanência insuficiente da temperatura, levam a cristalinidade parcial, (Muthukrishnan et al., 2019).

No caso do biochar de caroço de azeitona não foi possível identificar quais as substâncias que apresentam picos, no entanto é possível verificar que é amorfo, como esperado.

4.2.2.6. Área superficial específica

A área superficial específica foi determinada usando um método de adsorção de gás com recurso ao método B.E.T (Brunauer-Emmett-Teller).

A área superficial das partículas é o parâmetro mais importante para a avaliação da quantidade de água, no entanto características como a forma e textura também devem ser levadas em conta, pois formas irregulares requerem maiores quantidades de água. A água adsorvida é constituída por moléculas de água que estão fisicamente ligadas à superfície dos sólidos presentes na mistura, a quantidade de água adsorvida é proporcional à área superficial dos componentes presentes nas argamassas e nos betões, (Paiva, 2013).

Posto isto e através da análise da Tabela 16, verifica-se que o biochar de casca de arroz é o que apresenta maior área superficial e o cimento menor, portanto é de esperar que misturas com biochar de casca de arroz e de caroço de azeitona necessitem de mais água de amassadura.

Tabela 16 – Área superficial específica das amostras

Amostra	m ² /g
Biochar de caroço de azeitona (B1)	3,3830
Biochar de casca de arroz (B2)	9,4391
Cimento	1,3785

Como dito anteriormente na análise pelo microscópio eletrónico de varrimento, a resolução máxima não permite observar os poros de dimensões inferiores aos macro poros, no entanto

através do método B.E.T é possível obter a análise quantitativa dos poros. Através da absorção de gás observa-se que todas as três amostras possuem meso poros.

A área superficial específica do biochar depende da biomassa e da temperatura da pirólise, por exemplo, Shi et al., 2019, obteve um valor de área superficial de 0,632 m²/g para uma pirólise de biomassa de casca de arroz a 300°C, no entanto a uma temperatura de 500°C obteve uma área superficial de 45,274 m²/g e a 700°C uma área superficial de 193.149 m²/g. A área superficial do biochar aumenta com o aumento de temperatura da pirólise. Com o aumento da temperatura da pirólise serão criados mais e maiores poros na estrutura do biochar, aumentando assim a área superficial, (Shi et al., 2019; Tomczyk, Sokołowska, & Boguta, 2020). De acordo com Gupta & Kua, 2018 a área superficial do biochar deve-se maioritariamente aos seus poros. Como observado no microscópio eletrónico de varrimento, o biochar de casca de arroz em relação ao biochar de caroço de azeitona apresenta mais poros e os poros são mais circulares e regulares, a área superficial específica comprova isso, o biochar de casca de arroz possui maior área superficial do que o biochar de caroço de azeitona.

4.2.3. Ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco

O desempenho das argamassas no estado fresco, está estritamente ligado aos materiais utilizados, às proporções da mistura e a um correto procedimento de produção, (Costa Braga, 2010). O comportamento das argamassas no estado fresco é muito importante. As propriedades em estado fresco condicionam as propriedades do material em estado endurecido. É necessário tratar cuidadosamente as argamassas, de forma a obter argamassas endurecidas de boa qualidade e com bom desempenho, (Costa Braga, 2010; Paiva, 2013). Descrevem-se de seguida os resultados obtidos e as observações realizadas nas argamassas em estado fresco.

4.2.3.1. Consistência por espalhamento

Na Tabela 17 é possível encontrar os dados relativamente aos resultados obtidos neste ensaio. O valor do espalhamento apresentado é a média da medição do diâmetro da argamassa em quatro direções na mesa de espalhamento.

Através das medições realizadas e através da comparação das diferentes formulações é possível verificar que a maioria das amostras com biochar apresentam um espalhamento inferior ao espalhamento das amostras de controlo. De todas as amostras apenas 3 não

apresentam um espalhamento inferior à amostra de controlo, sendo que 1 amostra apresenta valor igual à amostra de controlo.

Apesar do interesse deste trabalho experimental ser o estudo da incorporação do biochar em argamassa, é apropriado verificar que a amostra com traço 1:3 sem superplastificante e sem biochar (0 SP – 0B) apresenta um espalhamento superior à amostra com traço 1:4 sem superplastificante e sem biochar (0 SP – 0B). A adição do superplastificante tem como objetivo reduzir a quantidade de água de amassadura mantendo a trabalhabilidade, porém é de extrema dificuldade ser preciso em manter a trabalhabilidade da amostra. No entanto os resultados obtidos com a adição do superplastificante são satisfatórios visto que a diferença de trabalhabilidade não é significativa.

Tabela 17 - Valores obtidos para o espalhamento

Traço	Amostra	Espalhamento (mm)
1:3	0 SP - 0B	145,7
	0 SP - 2% B1	147,9
	0 SP - 2% B2	144,1
	0,6 SP - 0B	141,2
	0,6 SP - 2% B1	133,8
	0,6 SP - 2% B2	132,8
	1,5 SP - 0B	142,1
	1,5 SP - 2% B1	150,1
	1,5 SP - 2% B2	138,5
1:4	0 SP - 0B	144,3
	0 SP - 2% B1	143,3
	0 SP - 2% B2	143,3
	0,9 SP - 0B	130,5
	0,9 SP - 2% B1	130,5
	0,9 SP - 2% B2	138,5

As argamassas com biochar apresentam menor espalhamento, isso é atribuído à sua estrutura macro porosa e à sua maior área superficial comparando com o cimento. O biochar absorve parte da água da mistura, reduzindo a quantidade de água disponível afetando a trabalhabilidade. Argamassas com biochar necessitam de maior quantidade de água de

amassadura, (Dixit et al., 2019; Gupta & Kua, 2018; Muthukrishnan et al., 2019). Através do microscópio eletrónico de varrimento observou-se que o biochar de casca de arroz apresentava mais poros e poros mais circulares que o biochar de caroço e azeitona, no cálculo do espalhamento observa-se que as argamassas com biochar de casca de arroz obtiveram menores valores de espalhamento, verificando que a estrutura porosa afeta o espalhamento. Importa salientar que este ensaio apresenta uma sensibilidade considerável e é pouco preciso, podendo existir uma diferença de valores obtidos para a mesma formulação. Este ensaio depende de vários fatores incontroláveis, como por exemplo, a percentagem de humidade no ar, o erro humano na frequência das pancadas na mesa de espalhamento e a compactação da argamassa no molde tronco cónico com o pilão. Posto isto, é possível justificar o facto de 3 argamassas terem dado valores superiores à argamassa de controlo, quando era esperado ser inferior.

Caso a percentagem de substituição do cimento pelo biochar tivesse sido aumentada era esperado que o espalhamento diminui-se com o aumento da percentagem de substituição, como observado por Choi et al., 2012; Dixit et al., 2019; Gupta & Kua, 2018; Gupta, Kua, & Low, 2018; Gupta, Kua, & Pang, 2018; Muthukrishnan et al., 2019.

4.2.3.2. Massa Volúmica

Através da Tabela 18, verifica-se um aumento da massa volúmica da argamassa em estado fresco com a incorporação de biochar. As argamassas em estado fresco que contêm biochar apresentam uma maior massa volúmica. Apenas não é verificado em 2 situações, ambas com traço 1:4 designadas por 0 SP - 2% B1 e 0,9 SP - 2% B2. No entanto é necessário salientar que o aumento da massa volúmica em estado fresco das argamassas com biochar não é significativo, visto que o maior aumento, verificado na amostra com traço 1:3, designada por 0 SP - 2% B2, é de 4% em relação à argamassa de controlo.

Apesar de a diferença não ser significativa é importante salientar que era esperado que a massa volúmica das argamassas com biochar fossem inferiores às argamassas de controlo, visto que a massa volúmica do biochar é inferior à do cimento.

Visto que a diferença não é significativa, à semelhança da mesa de espalhamento, poderá dever-se a erros humanos na realização das pancadas de compactação. No entanto poderá dever-se também pelo facto de o biochar apresentar uma granulometria mais fina que o cimento, preenchendo os espaços vazios, tendo assim um efeito filler, garantindo maior

compacidade, (Farinha, de Brito, & Veiga, 2015; Fernández-Ledesma, Jiménez, Ayuso, Corinaldesi, & Iglesias-Godino, 2016).

Tabela 18 – Massa volúmica em estado fresco

Traço	Amostra	Massa Volúmica (Kg/m ³)
1:3	0 SP - 0B	2167,5
	0 SP - 2% B1	2170,7
	0 SP - 2% B2	2176,2
	0,6 SP - 0B	2104,2
	0,6 SP - 2% B1	2179,1
	0,6 SP - 2% B2	2193,7
	1,5 SP - 0B	2232,2
	1,5 SP - 2% B1	2233,6
	1,5 SP - 2% B2	2241,1
1:4	0 SP - 0B	2122,4
	0 SP - 2% B1	2122,2
	0 SP - 2% B2	2155,3
	0,9 SP - 0B	2178,5
	0,9 SP - 2% B1	2183,3
	0,9 SP - 2% B2	2166,1

Outros autores obtiveram resultados diferentes, verificando que com a adição de biochar a massa volúmica da argamassa em estado fresco diminui. Gupta & Kua, 2018, observaram que a adição de biochar diminui a massa volúmica da argamassa em estado fresco, fundamentando essa diminuição pela estrutura porosa do biochar e menor massa volúmica em relação ao cimento. Gupta, Kua, & Low, 2018, obtiveram uma ligeira redução da massa volúmica em estado fresco com a adição de biochar, relacionando essa diminuição com a estrutura porosa do biochar.

4.2.4. Ensaios de caracterização das argamassas em estado endurecido

A caracterização das argamassas em estado endurecido foi efetuada a partir da sua massa volúmica, absorção de água por capilaridade e da sua resistência mecânica à flexão e compressão.

4.2.4.1. Massa volúmica

Para este ensaio foram utilizados três provetes para cada tipo de argamassa, submetidos a um processo de cura de 28 dias, os resultados apresentados na Tabela 19 são a média aritmética dos três provetes. Como esperado a massa volúmica das amostras no estado endurecido é inferior à massa volúmica das amostras em estado fresco. Em estado fresco a mistura ainda contém água, no estado endurecido parte da água evapora.

Como o biochar apresenta uma massa volúmica inferior à do cimento é expectável que as amostras com biochar apresentem uma massa volúmica inferior à amostra de controlo. A densidade relativamente baixa para uma resistência similar em comparação à amostra de controlo pode reduzir potencialmente o peso próprio, (Gupta & Kua, 2017, 2019b).

Tabela 19 – Massa volúmica em estado endurecido

Traço	Amostra	Massa Volúmica (Kg/m ³)
1:3	0 SP - 0B	2026,3
	0 SP - 2% B1	2038,6
	0 SP - 2% B2	2015,8
	0,6 SP - 0B	2070,7
	0,6 SP - 2% B1	2075,3
	0,6 SP - 2% B2	2064,5
	1,5 SP - 0B	2175,1
	1,5 SP - 2% B1	2149,0
	1,5 SP - 2% B2	2164,7
1:4	0 SP - 0B	1958,7
	0 SP - 2% B1	1948,2
	0 SP - 2% B2	1961,6
	0,9 SP - 0B	2017,9
	0,9 SP - 2% B1	2028,9
	0,9 SP - 2% B2	2009,7

A argamassa com traço 1:3, designada por 0 SP - 2% B1, apresenta maior espalhamento que a amostra de controlo, verificando a massa volúmica no estado endurecido é possível observar que apresenta uma massa volúmica superior. É plausível que esta situação seja explicada pela maior trabalhabilidade e conseqüente melhor compactação, no entanto essa relação não é verificada nas restantes amostras que apresentaram um espalhamento superior à amostra de controlo.

Importa salientar que apesar das amostras com biochar apresentarem predominantemente menor massa volúmica em estado endurecido, a diferença em relação às amostras de controlo não são significativas, visto que a maior diferença observada é de 1,2%, verificada na amostra com traço 1:3, designada de 1,5 SP - 2% B1.

Como dito anteriormente, visto que o biochar apresenta uma massa volúmica inferior ao cimento, era esperado que as amostras com biochar apresentassem uma massa volúmica em estado endurecido inferior às amostras de controlo, porém não se verifica na totalidade das amostras. Durante o processo de compactação das argamassas tentou seguir-se o mesmo procedimento e o mesmo tempo de vibração para todas as argamassas, apesar disso, a mesa de vibração utilizada não possui qualquer tipo de fixação para o molde, sendo necessário o operador segurar o molde durante a compactação, não conseguindo garantir uma boa transmissão e distribuição regular da vibração.

Os resultados obtidos estão em conformidade com os resultados obtidos com os vários autores, Gupta, Kua, & Pang, 2018 verificaram uma diminuição da massa volúmica endurecida com a adição de 5% e 8% de biochar, atribuindo esse fenómeno á baixa massa volúmica do biochar, acrescentando que a menor trabalhabilidade da argamassa com biochar poderá afetar a compactação. Gupta, Kua, & Low, 2018, observaram que argamassas com 2% de biochar reduzem a massa volúmica em estado endurecido devido à porosidade e baixa massa volúmica do biochar.

4.2.4.2. Absorção de água por capilaridade

Os provetes utilizados neste ensaio foram submetidos a um processo de cura de 28 dias. Os valores apresentados para cada argamassa são a média aritmética de três provetes.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade traduz a velocidade com que a absorção se processa nos instantes iniciais, tendo-se considerado, para o efeito, os primeiros 10 minutos e 90 minutos de ensaio, como indicado pela norma EN 1015 – 18 de 2002, (A. M. M. Martins, 2008; Rato, 2006). Baixos coeficientes de absorção de água por capilaridade são importantes para assegurar a durabilidade das argamassas, (Dixit et al., 2019).

Na Figura 80 e Figura 81 estão representadas as curvas de absorção de água por capilaridade das amostras aos 28 dias de cura. Para uma melhor visualização dos gráficos optou-se apenas por colocar uma curva para cada formulação.

É visível o troço inicial, que define o coeficiente de capilaridade das argamassas, dado pela inclinação da reta, assim como o troço final, em que os valores começam a convergir.

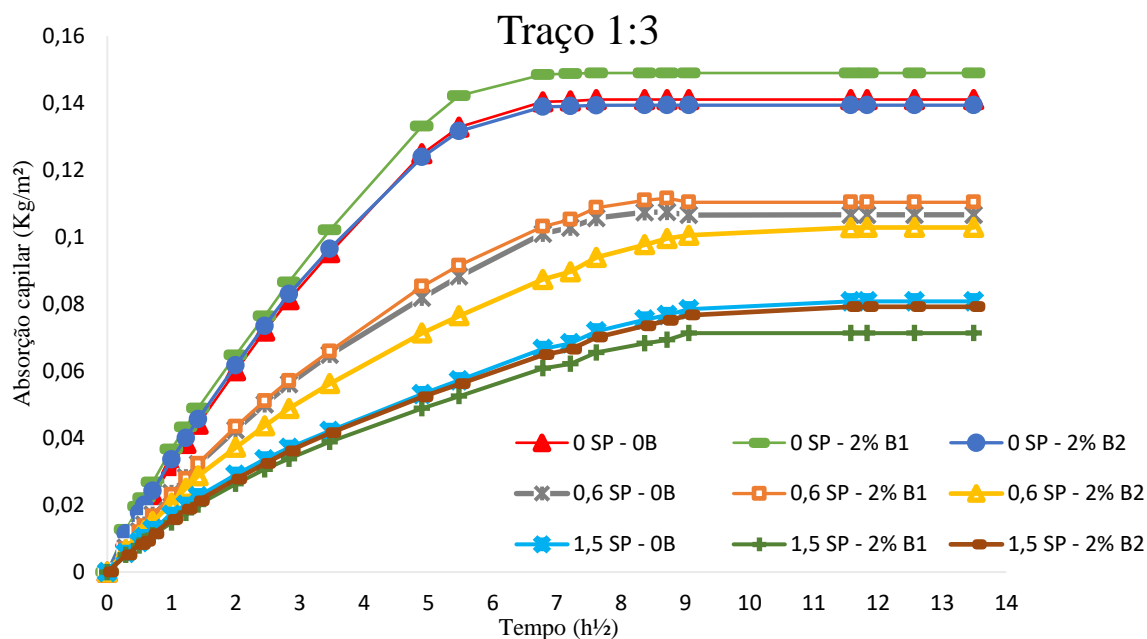


Figura 80 - Absorção de água por capilaridade das argamassas com traço 1:3

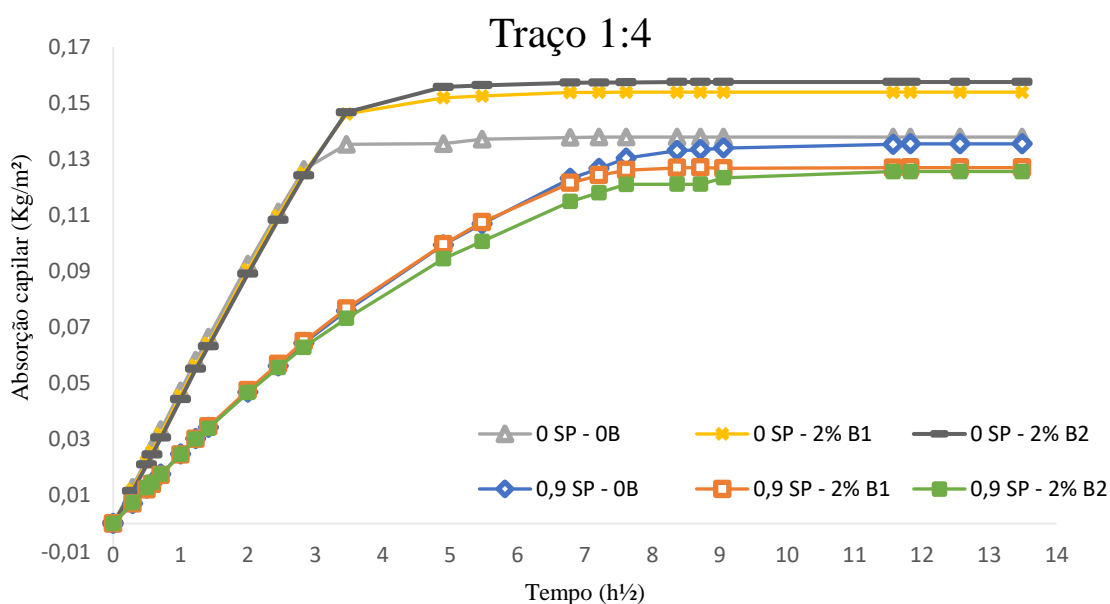


Figura 81 - Absorção de água por capilaridade das argamassas com traço 1:4

O coeficiente de absorção de água por capilaridade é tanto maior quanto mais rápida for a absorção de água da argamassa. A água absorvida é a variação de massa relativamente à massa inicial depois de atingir massa constante (troço final, em que os valores começam a convergir, observado na Figura 80 e Figura 81), este parâmetro representa a quantidade total de água absorvida em relação à área de contacto com a água, (Monteiro, 2015).

Tabela 20 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Traço	Amostra	Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m ² . h ^{1/2})	Água absorvida (kg/m ²)
1:3	0 SP - 0B	0,464	14,33
	0 SP - 2% B1	0,5	15,08
	0 SP - 2% B2	0,471	14,38
	0,6 SP - 0B	0,338	10,65
	0,6 SP - 2% B1	0,327	11,36
	0,6 SP - 2% B2	0,311	10,51
	1,5 SP - 0B	0,217	8,14
	1,5 SP - 2% B1	0,209	7,33
	1,5 SP - 2% B2	0,215	8,00
1:4	0 SP - 0B	0,726	13,91
	0 SP - 2% B1	0,72	15,66
	0 SP - 2% B2	0,726	16,05
	0,9 SP - 0B	0,372	13,58
	0,9 SP - 2% B1	0,371	12,99
	0,9 SP - 2% B2	0,379	12,53

Ao analisar a Figura 80, observa-se que as algumas curvas de absorção de água por capilaridade apresentam troços iniciais e finais idênticos. Nos instantes iniciais o declive das curvas é diferente, as curvas com o declive maior correspondem às argamassas sem superplastificante (maior coeficiente de absorção de água por capilaridade), o declive menor corresponde às argamassas com maior quantidade de superplastificante, sendo verificado tanto nas argamassas com traço 1:3 como nas argamassas com traço 1:4. Observando o troço

final das curvas é possível concluir que as argamassas sem superplastificante levaram aproximadamente 3 dias a ficarem totalmente saturadas, enquanto que as argamassas com superplastificante ficaram totalmente saturadas após aproximadamente 6 dias. Com este estudo é possível concluir que as amostras com superplastificante apresentam um coeficiente de absorção de água por capilaridade inferior. Este facto pode ser explicado pela diminuição de água nas amostras com superplastificante, visto que existe uma tendência para um aumento do coeficiente de absorção de água por capilaridade com o aumento de água de amassadura, (Costa Braga, 2010; A. M. M. Martins, 2008).

Verifica-se que as argamassas com menor coeficiente de absorção de água por capilaridade são argamassas com biochar. Na quase totalidade das argamassas, as amostras com biochar apresentam menores coeficientes de absorção de água por capilaridade. É possível concluir que a incorporação de biochar nas argamassas reduz o coeficiente de capilaridade, ou seja, afeta a absorção inicial, representada pelo declive nos instantes iniciais das curvas de absorção de água por capilaridade.

Como dito anteriormente o biochar tem a capacidade de absorver parte da água de amassadura, reduzindo a quantidade de água livre na mistura (reduzindo a razão água/cimento) e a quantidade de água que será evaporada. Este fenómeno leva a que a argamassa endurecida apresente menor quantidade de poros formados pela evaporação de água livre durante o endurecimento. A formação desses poros é proporcional à absorção de água por capilaridade. Como as argamassas com biochar, devido à sua capacidade de reduzir a quantidade de água livre na mistura, apresentam menor quantidade de poros formados pela evaporação é expectável uma diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade, (Gupta & Kua, 2019a; Gupta, Kua, & Low, 2018).

O coeficiente de absorção de água por capilaridade depende diretamente do volume de poros abertos, poros de menor raio provocam maior pressão ascensão capilar, originando velocidade iniciais de absorção superior. Por sua vez, poros de maior tamanho aumentam a quantidade de água absorvida mas com taxas de absorção inferiores, como é o caso das argamassas com biochar, (Marianito Ascensão, 2015).

A diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade em relação à amostra de controlo apenas não se verifica em três argamassas, no entanto a diferença não é significativa.

Apesar da diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade, é possível verificar que as amostras com biochar apresentam uma quantidade de água absorvida superior. Gupta, Kua, & Pang, 2018, obtiveram resultados idênticos, justificando que as

argamassas com biochar apesar de apresentarem menor coeficiente de absorção de água por capilaridade, devido aos macro poros do biochar conseguem absorver uma maior quantidade de água. De acordo com Rato, 2006, a quantidade de água absorvida depende da porosidade aberta. A porosidade aberta aumenta à medida que diminui o teor em cimento, argamassas com compactação menos eficaz apresentam maior porosidade aberta e argamassas com material poroso representam uma maior porosidade aberta. Visto que o biochar é um material poroso, os maiores valores de água absorvida pelas amostras com biochar são justificados. Nas argamassas com traço 1:4 verifica-se um aumento na quantidade de água absorvida, visto que as argamassas com este traço apresentam um menor teor de cimento, a porosidade aberta aumenta, aumentando a quantidade de água absorvida.

É possível concluir que a incorporação de biochar nas argamassas estudadas, diminui o coeficiente de absorção de água por capilaridade, conseguido atingir uma melhoria na ordem dos 8% (maior melhoria obtida), no entanto a quantidade de água absorvida em relação à área de contacto com a água é superior.

4.2.4.3. Resistência à compressão e flexão

A resistência mecânica, no estado endurecido, é uma das propriedades mais importantes para a caracterização das argamassas e diz respeito à capacidade de suportar os esforços mecânicos que sobre ela atuam, (A. M. M. Martins, 2008).

Com estes ensaios pretende-se avaliar as propriedades mecânicas da argamassa, analisando a influência da dosagem de cimento e a influência da adição do biochar no comportamento das argamassas.

Vários autores defendem que a água absorvida pelo biochar durante a amassadura, irá garantir boas condições de cura à argamassa, podendo agir como agente de cura interna, (Choi et al., 2012; Gupta, Kua, & Low, 2018).

Efetuada o estudo da resistência à flexão e compressão aos 7 dias cura e aos 28 dias de cura é possível observar que a resistência mecânica aumenta ao longo do tempo devido à hidratação do ligante. Os resultados apresentados correspondem à média de três ensaios.

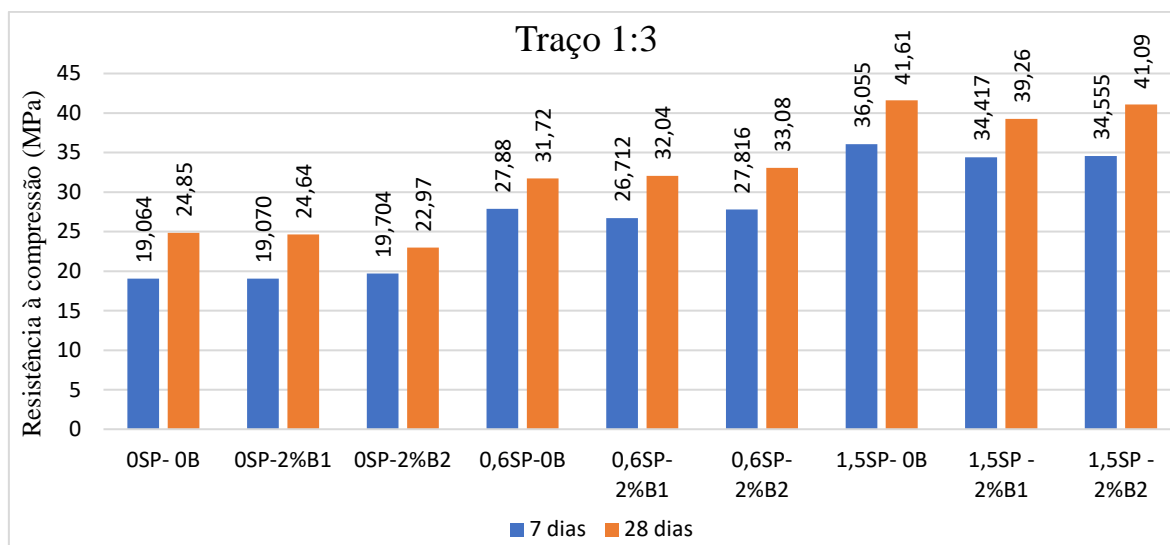


Figura 82 – Resistência à compressão das argamassas com traço 1:3

Observando a Figura 82 verifica-se que a incorporação de biochar nas argamassas não induz alterações significativas. A argamassa com maior diminuição de resistência à compressão foi a argamassa designada de “1,5 SP – 2% B1”, obtendo uma diminuição de 5,6% em relação à amostra de controlo. A argamassa designada de “0,6 SP – 2% B2” apresenta uma resistência à compressão 4,3% superior à amostra de controlo.

De salientar que na formulação com 0,6% de superplastificante todas as amostras com biochar, aos 28 dias de cura, apresentam uma resistência superior à amostra de controlo.

Comparando as resistências à compressão da argamassa com traço 1:4 com as 1:3 verifica-se que se obtém uma diminuição da resistência à compressão, diminuição que é justificada com a diminuição do teor em cimento.

Nas argamassas com traço 1:4 observa-se que aos 7 dias de cura, as argamassas com 0,9% de superplastificante apresentam uma resistência à compressão inferior à amostra de controlo, no entanto aos 28 dias de cura a diferença é inferior, nota-se uma maior evolução da resistência à compressão nas amostras com biochar.

É possível verificar que aos 28 dias de cura, nas argamassas com traço 1:4 a argamassa designada de “0 SP – 2% B2” é a única argamassa que apresenta maior resistência à compressão em relação à amostra de controlo. Aos 7 dias de cura, todas as argamassas com traço 1:4 apresentam uma resistência à compressão inferior à amostra de controlo.

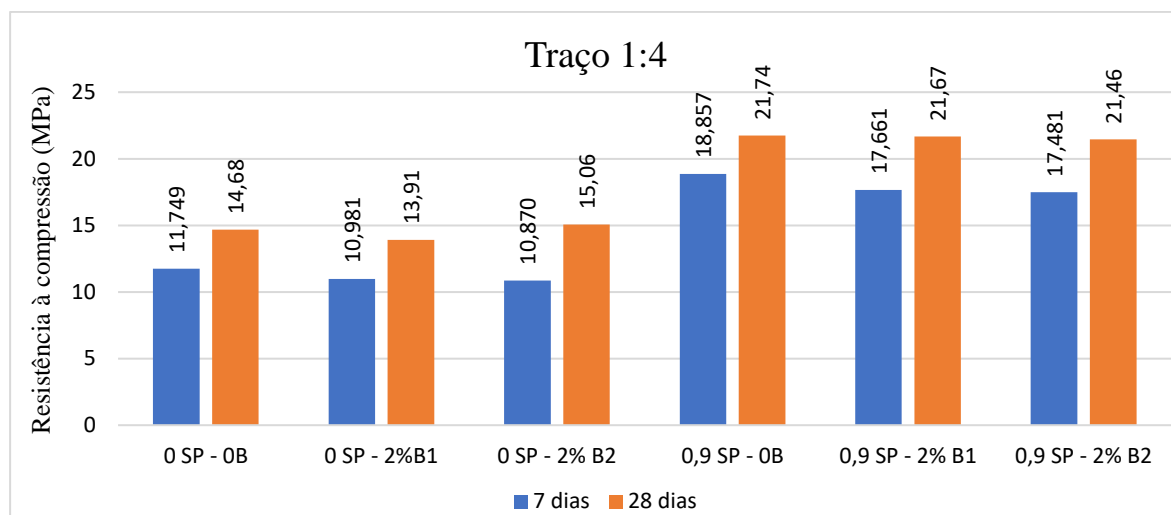


Figura 83 – Resistência à compressão das argamassas com traço 1:4

Observando a Figura 82 e Figura 83, conclui-se que o biochar não induz nenhuma alteração significativa à argamassa, observa-se que as amostras com biochar apresentam uma menor resistência à compressão aos 7 dias, no entanto aos 28 dias, a diferença entre as amostras de controlo e as amostras com biochar são inferiores. Akhtar & Sarmah, 2018a; Gupta, Kua, & Low, 2018, obtiveram resultados semelhantes.

Relativamente aos resultados obtidos para o ensaio de resistência à flexão, observando a Figura 84 verifica-se que as argamassas com biochar não apresentam diferenças significativas em relação às amostras de controlo.

Aos 7 dias de cura todas as amostras com biochar apresentam resistência à flexão inferior à amostra de controlo, exceto nas argamassas com 1,5% de superplastificante, onde ambas as amostras com biochar apresentam maior resistência à flexão em relação à amostra de controlo, no entanto aos 28 dias de cura apresentam menor resistência à compressão na ordem dos 7%.

Nas amostras com 0,6% de superplastificante verifica-se que apesar de aos 7 dias de cura ambas as argamassas com biochar apresentarem uma resistência à flexão 5% inferior à amostra de controlo, aos 28 dias de cura apresentam uma resistência à flexão superior à amostra de controlo.

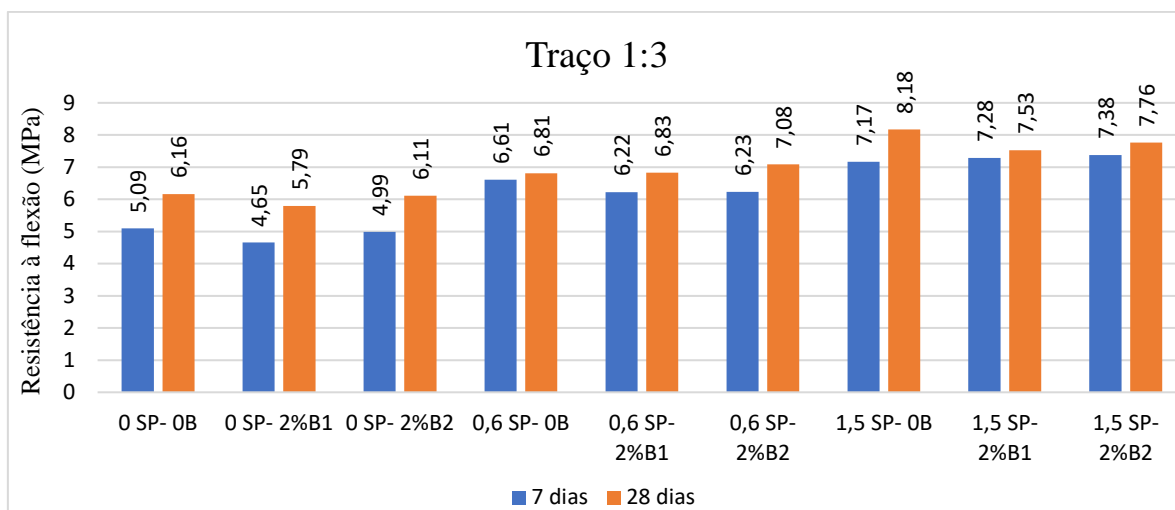


Figura 84 – Resistência à flexão das argamassas com traço 1:3

Na Figura 85, como as amostras apresentam uma quantidade de ligante inferior verifica-se que a resistência à flexão é inferior às argamassas com traço 1:3.

Mais uma vez é possível verificar que aos 7 dias de cura todas as argamassas apresentam uma resistência inferior à amostra de controlo. A argamassa designada de “0,9 SP – 2% B2” é a que apresenta a maior variação, apresentando uma resistência à compressão cerca de 17% inferior à amostra de controlo. Tendo em conta que em todas as amostras ensaiadas não se obteve variações tão elevadas, considera-se que poderá ter ocorrido algum erro.

Aos 28 dias de cura, as argamassas com biochar e sem superplastificante apresentam uma maior resistência à flexão que a amostra de controlo. A argamassa que aos 7 dias de cura apresentavam um decréscimo de resistência à flexão de 17%, aos 28 dias de cura apresenta um decréscimo de apenas 4% em relação à amostra de controlo.

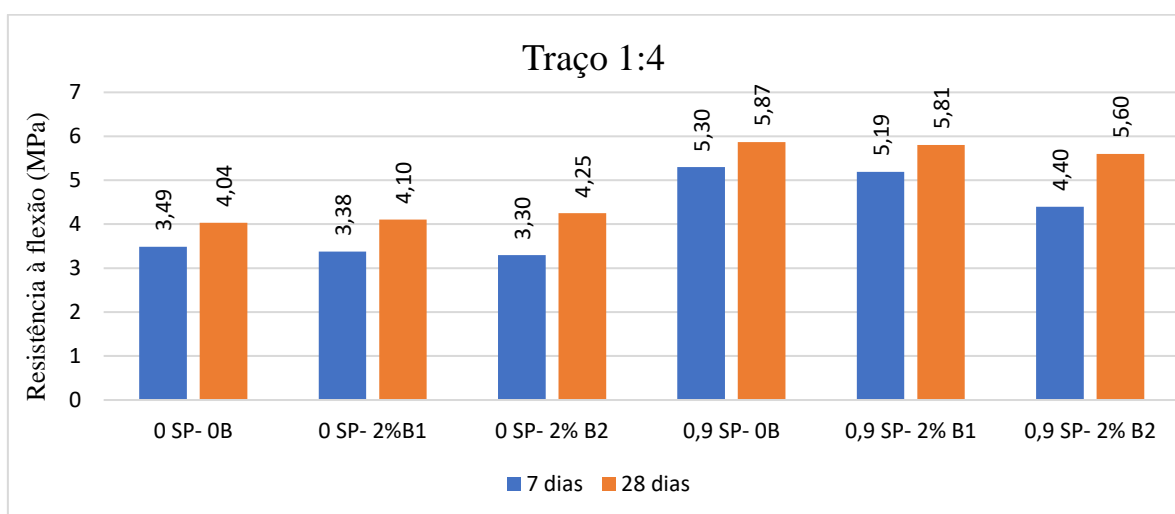


Figura 85 - Resistência à flexão das argamassas com traço 1:4

Gupta, Kua, & Low, 2018, verificaram que a adição de biochar não apresenta nenhuma diferença significativa na resistência à flexão.

Como observado, as argamassas de biochar apresentam uma menor resistência à flexão e compressão aos 7 dias de cura em relação à amostra de controlo, no entanto aos 28 dias de cura, essa diferença é reduzida. Vários autores indicam que as amostras com biochar apresentam uma hidratação mais lenta na fase inicial do endurecimento da argamassa, justificando que devido ao biochar conter compostos siliciosos, como a sílica amorfa, poderá apresentar reatividade pozolânica, no entanto baixa, (Akhtar & Sarmah, 2018b; Gupta, Kua, & Low, 2018; Muthukrishnan et al., 2019).

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A indústria da construção é importante para o desenvolvimento da economia, no entanto o impacto ambiental que apresenta é considerável. Ao longo desta dissertação foi estudada a incorporação de resíduos, que de outra forma seriam depositados em aterro, em betões e argamassas.

É necessário criar uma simbiose entre o crescimento da indústria da construção e a sustentabilidade. Assim compreende-se a importância do estudo desta dissertação.

5.1. Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo acompanhar o caso circular 1A do projeto PaperChain que aborda a substituição do filler por cinzas de cal em elementos de betão pré-esforçado e a incorporação de biochar em argamassas.

No caso circular 1A do PaperChain foram acompanhados os ensaios efetuados aos materiais, a produção dos elementos pré-fabricados, os ensaios aos betões, a montagem dos pórticos e a sua monitorização.

Através da caracterização dos materiais, conclui-se que o tamanho médio das partículas do filler é de 5,260 μm e o tamanho médio das partículas da cinza de cal é de 9,970 μm . Pela difração de raios x, verificou-se que no difratograma do filler 100% dos picos detetados são picos de carbonato de cálcio, enquanto que no difratograma das cinzas de cal 94% dos picos detetados são picos típicos do carbonato de cálcio e 4% dos picos detetados são picos típicos do óxido de cálcio.

Durante a betonagem das vigas e dos pilares foram retirados moldes cúbicos de forma a avaliar as características do betão. As características do betão foram analisadas aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura.

Nos moldes cúbicos retirados da betonagem das vigas, em ambas as idades de cura as amostras com cinzas de cal apresentam uma resistência à compressão superior às amostras com filler. O maior aumento da resistência à compressão nos moldes retirados da betonagem das vigas foi de 7,5%.

Por outro lado, nos moldes cúbicos retirados da betonagem dos pilares, em ambas as idades de cura as amostras com cinzas de cal apresentam uma resistência à compressão inferior em

relação à amostra com filler. O verificado nos moldes cúbicos retirados da betonagem das vigas não é análogo ao verificado nos moldes cúbicos retirados da betonagem dos pilares, porque a formulação do betão e a classe do cimento usado nas vigas é diferente da formulação do betão e da classe do cimento usado nos pilares.

Na massa volúmica em estado endurecido, nas amostras retiradas da betonagem das vigas, não se observam diferenças significativas entre as amostras com cinzas de cal e as amostras com filler. Nas amostras retiradas da betonagem dos pilares, verifica-se que em ambas as idades de cura as amostras com cinzas de cal apresentam uma massa volúmica endurecida inferior às amostras com filler. No entanto, a diminuição registada não é significativa, posto que a maior diminuição registada foi de 3%, aos 28 dias de cura.

Através do ensaio de ultrassons verificou-se que o módulo de elasticidade das amostras com cinzas de cal e com filler não apresentam diferenças significativas. Pelos critérios de avaliação do betão com base na velocidade da onda ultrassónica, o betão das vigas e pilares apresentam uma qualidade excelente.

Pelo ensaio da absorção de água por capilaridade, verificou-se que nos moldes cúbicos retirados da betonagem das vigas a substituição do filler pelas cinzas de cal apresenta uma melhoria do coeficiente de absorção de água por capilaridade, no entanto, nos moldes cúbicos retirados da betonagem dos pilares, a substituição do filler pela cinza de cal provoca um aumento do coeficiente de absorção de água por capilaridade.

De forma a monitorizar os pórticos foram instalados sensores interiores e exteriores. Os sensores interiores foram colocados a meio do vão da viga e a um terço do vão da viga. Os sensores exteriores foram instalados lateralmente a meio vão da viga. Na monitorização dos pórticos foi medida a variação de extensões nos betões.

Através dos resultados obtidos pelos sensores instalados, verifica-se que a amostra com cinzas de cal e a amostra com filler apresentam um calor de hidratação semelhante, tal como registaram temperaturas e ciclos de temperaturas semelhantes. As extensões registadas pelos sensores são muito semelhantes em todos os sensores.

Na incorporação de biochar em argamassas, foi utilizado o biochar de caroço de azeitona e o biochar de casca de arroz, duas biomassas que são produzidas em elevada quantidade em Portugal e que tem como destino final predominante o aterro.

Inicialmente efetuou-se uma vasta pesquisa bibliográfica que permitiu analisar e obter um sentido crítico das investigações já realizadas na área em estudo e conhecer os resultados

obtidos e procedimentos adotados. Com base nas investigações já realizadas foram definidos todos os ensaios a ser executados, os procedimentos adotados e as normas a seguir.

Através dos ensaios realizados para caracterização do biochar conclui-se que o biochar de caroço de azeitona e o biochar de casca de arroz apresentam uma massa volúmica inferior ao cimento usado. Verificou-se também que as partículas do biochar apresentam uma granulometria inferior ao cimento usado. Através da microscopia eletrônica de varrimento, observou-se que o biochar apresenta uma estrutura porosa, tal como esperado. Os poros no biochar de casca de arroz são circulares, os poros do biochar de caroço de azeitona não são tao regulares e apresentam maior diversidade de tamanhos.

A difração de raio x permitiu concluir que o biochar é totalmente amorfo, como esperado.

A área superficial específica do biochar é superior ao cimento, portanto é de esperar que as misturas com biochar necessitem de mais água de amassadura. As propriedades do biochar que foram estudadas ajudaram a justificar alguns dos resultados obtidos.

As argamassas produzidas foram estudadas no estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco foi estudada a consistência por espalhamento e a massa volúmica. Na consistência por espalhamento, verificou-se que as amostras com biochar apresentam maioritariamente um espalhamento inferior, justificado com a maior área superficial específica do biochar e a sua estrutura porosa. Para obter a mesma trabalhabilidade ou uma trabalhabilidade semelhante à amostra de controlo, as amostras com biochar necessitam de mais água de amassadura.

Os resultados obtidos da massa volúmica das argamassas em estado fresco não são os esperados, era esperado obter uma diminuição nas amostras com biochar, devido à menor massa volúmica do biochar, no entanto com a incorporação do biochar nas argamassas verificou-se um aumento da massa volúmica da argamassa em estado fresco. A discordância entre o resultado esperado e o resultado obtido poderá dever-se a erros humanos na realização das pancadas de compactação.

Em estado endurecido foi estudada a massa volúmica, a absorção de água por capilaridade, a resistência à flexão e a resistência à compressão. Os resultados obtidos para a massa volúmica em estado endurecido mostram que a incorporação do biochar nas argamassas não induz alterações significativas, a maior redução obtida foi de 1,2% em relação à amostra de controlo.

Na absorção de água por capilaridade, com a incorporação do biochar nas argamassas, regista-se uma redução do coeficiente de absorção de água por capilaridade. Apenas não foi verificada uma melhoria na absorção de água por capilaridade nas argamassas com traço 1:3 e com 1,5% de superplastificante. Apesar das argamassas com biochar apresentarem uma melhoria da absorção de água por capilaridade, após a fase inicial de absorção, as argamassas com biochar tem uma maior capacidade para absorver maior quantidade de água.

Os resultados obtidos na resistência à compressão e à flexão demonstram que apesar de a maioria das argamassas com biochar não apresentarem um aumento da resistência à flexão e da resistência à compressão, a redução que apresentam não é significativa. A máxima diminuição da resistência à compressão foi de 5%, o maior aumento registado foi de 4%. Na resistência à flexão, a maior diminuição foi de 8% e o maior aumento foi de 5%.

Face aos resultados obtidos na substituição do filler pelas cinzas de cal em elementos de betão pré-esforçado, considera-se que as cinzas de cal apresentam um elevado potencial para substituir o filler. No entanto, os dados analisados na monitorização dos pórticos representam apenas um curto intervalo, como previsto no caso circular 1A do projeto PaperChain, os pórticos serão monitorizados até dezembro de 2020. Após o fim da monitorização será possível obter dados e conclusões mais representativas.

Os resultados obtidos na incorporação de biochar nas argamassas, permitem concluir que as propriedades das argamassas não apresentam alterações consideráveis, no entanto, a absorção de água por capilaridade apresenta melhorias com a incorporação do biochar. A resistência à compressão e a resistência à flexão também não apresentam alterações significativas.

Analisados os resultados obtidos, conclui-se que a cinza de cal, o biochar de caroço de azeitona e o biochar de casca de arroz podem ser valorizados na indústria da construção. A utilização destes resíduos na indústria da construção apresenta benefícios ambientais e económicos sem afetar as características dos betões e argamassas. Com a incorporação de resíduos em betões e argamassas, a quantidade de resíduos depositados em aterros é reduzida, tal como o teor de cimento e filler é reduzido, reduzindo assim as emissões de gases com efeitos de estufa associados à sua produção. Comprova-se assim que estas soluções de valorização são viáveis.

5.2. Proposta de trabalhos futuros

A presente dissertação permitiu analisar a viabilidade da substituição do filler usado em elementos de betão pré-esforçado, por cinzas de cal e a viabilidade da substituição parcial do cimento por biochar de caroço de azeitona e biochar de casca de arroz em argamassas.

Tendo em conta o trabalho desenvolvido e em consonância com os resultados obtidos, será relevante futuramente desenvolver os seguintes trabalhos:

- Monitorizar os pórticos, como previsto, até dezembro de 2020;
- Produzir biochar a diferentes temperaturas e verificar a influência nas propriedades das argamassas;
- Efetuar e analisar o comportamento da substituição de mais percentagens do cimento por biochar, como por exemplo, 1%, 5%, 8% e 10% da massa do cimento;
- Estudar a incorporação de biochar de outras biomassas nas argamassas;
- Avaliar a condutividade térmica das argamassas com incorporação de biochar;
- Caso a condutividade térmica apresente melhorias, a substituição do cimento pelo biochar em produtos pré-fabricados, como por exemplo, blocos de cimento e tijolos cerâmicos seria uma proposta de futuro desenvolvimento;
- Avaliar os custos inerentes à produção do biochar;
- Estudar a incorporação do biochar em betões;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIONA. (2019). PAPERCHAIN. Retrieved November 23, 2019, from <https://www.accion-construccion.com/es/innovacion/proyectos-de-innovacion/materiales/paperchain/>

Agência Portuguesa do Ambiente. (2019a). Resíduos de Construção e Demolição. Retrieved November 18, 2019, from <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283>

Agência Portuguesa do Ambiente. (2019b). Taxa de Gestão de Resíduos (TGR) . Retrieved November 18, 2019, from <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=1118&sub3ref=1119>

AICEP. (2018). Do lixo ao luxo: economia circular e simbiose industrial. Retrieved January 30, 2020, from <http://www.portugalglobal.pt/PT/PortugalNews/Paginas/NewDetail.aspx?newId=%7BB188830B-7A77-4AAB-BC18-FC1B0DAB0745%7D>

Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018a). Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties. *Science of the Total Environment*, 616–617, 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.319>

Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018b). Strength improvement of recycled aggregate concrete through silicon rich char derived from organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 196, 411–423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.044>

Al-Akhras, N. M., & Abdulwahid, M. Y. (2010). Utilisation of olive waste ash in mortar mixes. *Structural Concrete*, 11(4), 221–228. <https://doi.org/10.1680/stco.2010.11.4.221>

- Al-Akhras, Nabil M. (2012). Performance of olive waste ash concrete exposed to alkali-silica reaction. *Structural Concrete*, 13(4), 221–226. <https://doi.org/10.1002/suco.201100058>
- Al-Akhras, Nabil M., Al-Akhras, K. M., & Attom, M. F. (2008). Performance of olive waste ash concrete exposed to elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 44(3), 370–375. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.08.006>
- Alkheder, S., Obaidat, Y. T., & Taamneh, M. (2016). Effect of olive waste (Husk) on behavior of cement paste. *Case Studies in Construction Materials*, 5, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.05.001>
- Aprianti, E., Shafigh, P., Bahri, S., & Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes. *Construction and Building Materials*, 74, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010>
- Arraja, L., Louro, M., & Capela, I. (2005). Gestão integrada de resíduos em fábricas de pasta para papel em Portugal. *O Papel*, 66, 48–55.
- Asadi Zeidabadi, Z., Bakhtiari, S., Abbaslou, H., & Ghanizadeh, A. R. (2018). Synthesis, characterization and evaluation of biochar from agricultural waste biomass for use in building materials. *Construction and Building Materials*, 181, 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.271>
- Barbosa, M. V. C. (2013). *O betão : Definição , caracterização e propriedades*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Bastos, D. N. (2016). *Avaliação do desempenho dum processo industrial de pirólise de biomassa*. Universidade de Aveiro.
- Bastos, D. R. S. (2014). *Avaliação de casos de valorização de resíduos de celulose em materiais de construção*.

- Benachour, Y., Davy, C. A., Skoczylas, F., & Houari, H. (2008). Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 727–736. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.02.007>
- Brewer, C. E., & Brown, R. C. (2012). Biochar. *Comprehensive Renewable Energy*, 5, 357–384. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00524-2>
- Brito, R. (2016). Valorização Integrada de Resíduos e Subprodutos da Extração do Azeite: Extração e Caracterização de Compostos Bioativos do Bagaço de Azeitona. Universidade do Algarve.
- Buruberri, L. H. (2014). Uso de lamas e cinzas da indústria da celulose em clínquer. Universidade de Aveiro.
- Carvalho, C. S. M. (2014). Barreiras à valorização dos resíduos da produção e processamento do arroz. 111.
- Castro, A. M. N. de. (2013). Mecanismos de Decomposição Pirolítica de Resíduos com PVC com vista à sua Valorização. Universidade do Minho.
- CELPA. (2018). Boletim estatístico da CELPA - Industria Papeleira Portuguesa. Retrieved from http://www.celipa.pt/wp-content/uploads/2018/10/Boletim_WEB-2.pdf
- CEPI. (2018). Key statistics 2018.
- Ceríaco Cruz, N. T. C. (2008). Estudo da influência da granulometria das areias no desempenho de rebocos de ligante hidráulico. Instituto Superior Técnico.
- Choi, W. C. Y., Lee, H. Do, & Yeon, J. (2012). Mechanical Properties of Mortar Containing Bio-Char From Pyrolysis. 67–74.

Circular Economy Portugal. (2019). Sobre Economia Circular – Circular Economy Portugal. Retrieved November 25, 2019, from <https://www.circulareconomy.pt/sobre-economia-circular/>

Comissão Europeia. (2015). An ambitious EU circular economy package. Retrieved from https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/circular-economy-factsheet-general_en.pdf

COMPETE. (2019). Valorização da Casca de Arroz Português. Retrieved November 28, 2019, from <http://pofc.qren.pt/media/noticias/entity/valorizacao-da-casca-de-arroz-portugues>

CONFAGRI. (2017). CONFAGRI - Seis dos sete grandes países produtores de azeite aumentam produção na próxima campanha. Retrieved December 3, 2019, from <https://www.confagri.pt/seis-dos-sete-grandes-paises-produtores-azeite-aumentam-producao-na-proxima-campanha/>

Conz, R. F. (2015). Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura.

Corrêa Silva, L., Costa Roza, B., & Rathmann, R. (2012). Gestão de resíduos sólidos urbanos na cidade do porto. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 6(2), 60. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v6i2.372>

Cosentino, I., Restuccia, L., & Ferro, G. A. (2019). Type of materials , pyrolysis conditions , carbon content and size dimensions : the parameters that influence the mechanical properties of biochar cement-based composites. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 102261. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102261>

Costa Braga, M. B. da. (2010). Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão. Instituto Superior Técnico.

- Coutinho, J. de S. (2002a). Agregados para argamassas e betões.
- Coutinho, J. de S. (2002b). Ciência de materiais - 1ª Parte. Retrieved from http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMateriais/apontamentos/teorica_20022003/JSC_065A088.pdf%5Cnhttp://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMateriais
- Di Sipio, E., Chiesa, S., Destro, E., Galgaro, A., Giaretta, A., Gola, G., & Manzella, A. (2013). Rock thermal conductivity as key parameter for geothermal numerical models. *Energy Procedia*, 40(April), 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.011>
- Dias, A. D. C. M. (2011). Estudo da valorização de cinzas de biomassa na produção de materiais para a construção de recifes artificiais. Universidade Nova de Lisboa.
- Dixit, A., Gupta, S., Pang, S. D., & Kua, H. W. (2019). Waste Valorisation using biochar for cement replacement and internal curing in ultra-high performance concrete. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117876. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117876>
- E.U. Combater as alterações climaticas. , (2019).
- Earth Overshoot Day. (2020). Earth Overshoot Day – #MoveTheDate of Overshoot! Retrieved January 26, 2020, from <https://www.overshootday.org/>
- Embopar. (2019). Boletim Informativo nº 80.
- Eroğlu, H., Acar, H. H., Üçüncü, O., & Imamoğlu, S. (2006). Soil stabilization of forest roads sub-base using lime mud waste from the chemical recovery process in alkaline pulp mill. *Journal of Applied Sciences*, 6(5), 1199–1203. <https://doi.org/10.3923/jas.2006.1199.1203>
- Eroğlu, H., Acar, H. H., Üçüncü, O., & Imamoğlu, S. (2007). The Effect of Dry Sludge Addition Supplied from Pulp Mill on The Compressive Strength of Cement. *Jornal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 42(January 2007), 169–174.

Retrieved from http://router.uctm.edu/journal/j2007-2/07-EROGLU_169-174.pdf

EuroNews. (2016). A Europa começa a girar em torno da economia circular | Euronews. Retrieved January 27, 2020, from <https://pt.euronews.com/2016/01/25/a-europa-comeca-a-girar-em-torno-da-economia-circular>

European Commission. (2019). New market niches for the Pulp and Paper Industry waste based on circular economy approaches. Retrieved November 18, 2019, from <https://cordis.europa.eu/project/rcn/210515/factsheet/en>

FAOSTAT. (2019). Top 20 Commodities Production in Portugal 2017. Retrieved November 28, 2019, from http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities_by_country

Farinha, C., de Brito, J., & Veiga, R. (2015). Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars. *Construction and Building Materials*, 83, 194–206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.028>

FCT. (2019). Agenda Temática de Investigação e Inovação Economia Circular. <https://doi.org/https://doi.org/10.34621/fct.edicoes.agendastematicas-1>

Fernández-Ledesma, E., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Corinaldesi, V., & Iglesias-Godino, F. J. (2016). A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. *Materiales de Construcción*, 66(321). <https://doi.org/10.3989/mc.2016.08414>

Ferraz, M. (2012). Contribuição para o estudo do tratamento de efluentes de lagares de azeite. Universidade Nova de Lisboa.

Ferreira, H. H. (2016). Importância do estudo em Microscopia Eletrónica de Varrimento de amostras incluídas em parafina para fins de diagnóstico.

Ferreira, L. M. M. (2007). Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão: Influência da pré-saturação (Instituto Superior Técnico da

Universidade Técnica de Lisboa). Retrieved from <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/146641/1/dissertacao.pdf>

Ferreira, M. (2017). Análise experimental de estruturas de betão. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Flores, I., & Brito, J. de. (2003). Execução de estruturas de betão. (May). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4058.6725>

Freitas, M. R. De. (2007). Avaliação Do Potencial Energético Dos Resíduos Sólidos Dos Lagares Do Alentejo (Universidade Técnica de Lisboa). Retrieved from <https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/570/1/DISSERTAÇÃO DO MESTRADO.pdf>

Gaspar, H. E. (2016). Melhoria da eficiência energética de edifícios existentes – Análise técnico-económica. Retrieved from <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/18284/10/Hugo-Eduardo-Gabriel-Gaspar.pdf>

Gemusse, U. G. O. (2014). Prospecção Geológica dos pegmatitos de Mogovolas-Moma-Moçambique. Universidade de Aveiro.

Global Footprint Network. (2018). Earth Overshoot Day - Global Footprint Network. Retrieved January 26, 2020, from <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/>

Gomes, M. G., Flores-Colen, I., Manga, L. M., Soares, A., & de Brito, J. (2017). The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars. *Construction and Building Materials*, 135, 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.166>

- Gupta, S., & Kua, H. W. (2017). Factors Determining the Potential of Biochar As a Carbon Capturing and Sequestering Construction Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9), 04017086. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001924](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001924)
- Gupta, S., & Kua, H. W. (2018). Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 159, 107–125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.095>
- Gupta, S., & Kua, H. W. (2019a). Carbonaceous micro-filler for cement: Effect of particle size and dosage of biochar on fresh and hardened properties of cement mortar. *Science of the Total Environment*, 662, 952–962. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.269>
- Gupta, S., & Kua, H. W. (2019b). Combination of Biochar and Silica Fume as Partial Cement Replacement in Mortar: Performance Evaluation Under Normal and Elevated Temperature. *Waste and Biomass Valorization*, 0(0), 0. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00573-x>
- Gupta, S., Kua, H. W., & Low, C. Y. (2018). Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, 87, 110–129. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.009>
- Gupta, S., Kua, H. W., & Pang, S. D. (2018). Biochar-mortar composite: Manufacturing, evaluation of physical properties and economic viability. *Construction and Building Materials*, 167, 874–889. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.104>
- Instituto Pedro Nunes. (2020). Determinação da área superficial específica de sólidos por adsorção de azoto. Retrieved February 17, 2020, from <https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/56>
- Ithaka Institute. (2013). The use of biochar as building material – cities as carbon sinks. Retrieved November 28, 2019, from <http://www.ithaka-journal.net/pflanzenkohle->

zum-hauser-bauen-stadte-als-kohlenstoffsinken?lang=en

Khan, M. N. N., Jamil, M., Karim, M. R., & Zain, M. F. M. (2014). Strength and Durability of Mortar and Concrete Containing Rice Husk Ash: A Review. *World Applied Sciences Journal*, 32(5), 752–765. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.32.05.984>

Khunton, S., Nilpairach, S., & Sangsuk, S. (2014). Using lime mud waste from pulp mill as an additive in brick clay. *Key Engineering Materials*, 608, 3–7. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.608.3>

Laínez, J. M., Pérez-Fortes, M., Bojarski, A. D., & Puigjaner, L. (2018). PaperChain D2.3. (Vol. 64). https://doi.org/10.1007/978-0-85729-540-8_3

Lisboa, S. (2008). Dissolução e precipitação de xilanas durante o cozimento Kraft de E. globulus. Universidade de Aveiro.

Lourenço, C. S. C. (2016). Estudo do desempenho de betões com incorporação de agregados finos provenientes de resíduos industriais. Instituto Politécnico de Viseu.

Macedo, T. S. O. (2016). Improvement of ageing resistance os 2YSZ ceramicz. Universidade de Aveiro.

Marianito Ascensão, G. A. (2015). Desenvolvimento e caracterização de argamassas multifuncionais. Universidade de Aveiro.

Mario A. Heredia Salgado, & Tarelho, L. A. C. (2018). Producción de biochar como alternativa para la valorización energética de la biomasa residual generada en el sector agroindustrial Ecuatoriano : un enfoque participativo. *Grupo Español Del Carbón*, 49(September), 6–11.

Marketing Agrícola. (2017). O Cultivo do Arroz . Retrieved November 29, 2019, from <https://marketingagricola.pt/o-cultivo-do-arroz/>

- Marques Silva, A. R. (2009). Simulação da combustão de biomassa em leito fluidizado – balanço de massa.
- Martins, A. M. M. (2008). Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco.
- Martins, D. (2016). Valorização de resíduos da indústria do azeite: análise do potencial da recuperação de antioxidantes. Universidade de Coimbra.
- Mesquita Filho, J. DE, & Roberto Vieira, F. (2018). Estudo experimental da pirolise lenta da casca de arroz em reator de leito fixo (Universidade Estadual Paulista). Retrieved from https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/153632/vieira_fr_me_guara.pdf?sequence=3
- Ministério do Ambiente e da Acção Climática. (2020). Recivalongo e os próximos passos na ação nacional sobre aterros.
- Modolo, R. C. E. (2006). Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil. Universidade de Aveiro.
- Modolo, R. C. E. (2014). Valorization of solid wastes from cellulose and paper industry (Universidade de Aveiro). Retrieved from <http://ria.ua.pt/handle/10773/13961>
- Monteiro, M. M. (2015). Caracterização de Argamassas com Incorporação de Resíduos de Casca e Palha de Arroz. Universidade de Coimbra - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Moura, M., & Figueiredo, M. (2002). Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de *E. globulus*. Silva Lusitana.
- Muthukrishnan, S., Gupta, S., & Kua, H. W. (2019). Application of rice husk biochar and thermally treated low silica rice husk ash to improve physical properties of cement

mortar. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 102376.
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102376>

Oliveira, V. (2009). *Valorização de Resíduos da Indústria da Pasta e Papel*. Universidade do Algarve.

Paiva, H. M. da C. (2013). *Correlação entre argamassas e betões com base em análise reométrica*. Universidade de Aveiro.

PaperChain. (2019a). Circular Case 1 - paperChain. Retrieved November 23, 2019, from <https://www.paperchain.eu/circular-cases/circular-case-1/>

PaperChain. (2019b). Circular Case 2 - paperChain. Retrieved November 23, 2019, from <https://www.paperchain.eu/circular-cases/circular-case-2/>

PaperChain. (2019c). Circular Case 3 - paperChain. Retrieved November 23, 2019, from <https://www.paperchain.eu/circular-cases/circular-case-3/>

PaperChain. (2019d). Circular Case 4 - paperChain. Retrieved November 23, 2019, from <https://www.paperchain.eu/circular-cases/circular-case-4/>

PaperChain. (2019e). Circular Case 5 - paperChain. Retrieved November 23, 2019, from <https://www.paperchain.eu/circular-cases/circular-case-5/>

PaperChain. (2019f). The Project - paperChain. Retrieved November 22, 2019, from <https://www.paperchain.eu/the-project/>

Parlamento Europeu. (2019). *UE e Acordo de Paris: a caminho da neutralidade carbónica | Atualidade | Parlamento Europeu*. Retrieved January 21, 2020, from <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20191115STO66603/ue-e-acordo-de-paris-a-caminho-da-neutralidade-carbonica>

Parlamento Europeu. (2020). Eficiência energética (Vol. 2011).

Plaza, M. G., González, A. S., Pis, J. J., Rubiera, F., & Pevida, C. (2014). Production of microporous biochars by single-step oxidation: Effect of activation conditions on CO₂ capture. *Applied Energy*, 114(2014), 551–562. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.058>

PORDATA. (2019a). Produção de azeitona – Continente. Retrieved December 3, 2019, from <https://www.pordata.pt/Portugal/Produção+de+azeitona+--+Continente-3362>

PORDATA. (2019b). Superfície das principais culturas agrícolas. Retrieved December 3, 2019, from <https://www.pordata.pt/Portugal/Superfície+das+principais+culturas+agrícolas-3352-303482>

Rama, J. (2014). Eco-painéis construídos a partir de madeira e resíduos de palha / casca de arroz.

Rato, V. (2006). Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Rego, A. F. H. (2015). Avaliação do potencial para biomassa da estilha de culturas intensivas de choupo.

Roig, A., Cayuela, M. L., & Sánchez-Monedero, M. A. (2005). An overview on olive mill wastes and their valorisation methods. *Waste Management*, 26(9), 960–969. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.024>

Sampaio, C. (2010). Caracterização Do Betão Através De Técnicas Não-Destrutivas. Univerisade do Porto - Faculdade de Engenharia.

- Sanginés, P., Domínguez, M. P., Sánchez, F., & San Miguel, G. (2015). Slow pyrolysis of olive stones in a rotary kiln: Chemical and energy characterization of solid, gas, and condensable products. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(4). <https://doi.org/10.1063/1.4923442>
- Sempiterno, C., & Fernandes, R. (2014). Utilização de subprodutos da indústria de extração de azeite como matéria fertilizante. 46.
- Shi, J., Fan, X., Tsang, D. C. W., Wang, F., Shen, Z., Hou, D., & Alessi, D. S. (2019). Removal of lead by rice husk biochars produced at different temperatures and implications for their environmental utilizations. *Chemosphere*, 235, 825–831. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.237>
- Siddique, R., Singh, K., Kunal, P., Singh, M., Corinaldesi, V., & Rajor, A. (2016). Properties of bacterial rice husk ash concrete. *Construction and Building Materials*, 121, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.146>
- Silva, F. S. B. da. (2017). Condutibilidade térmica de argamassas térmicas com eps e aerogel de sílica.
- Sousa, S. P. B. (2005). Betão eco-eficiente com cinza de casca de arroz (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Teixeira, L., Leitão, L., Faria, R., & Azenha, M. (2012). Ensaio de restrição axial controlada para caraterização do betão tracionado devido à retração impedida.
- Teodoro, R., Carasek, H., & Oswaldo, C. (2019). Uso de pulso ultrassônico para avaliação de concretos contendo diferentes tipos de metacaulim de alta reatividade. XXXVI – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, (January).
- The Navigator Company. (2019). O Processo Produtivo do Papel. Retrieved November 19, 2019, from <http://www.thenavigatorcompany.com/Pasta-e-Papel/Papel/O-Processo->

Produtivo-do-Papel

Thermal Analysis Labs. (2020a). Mathis TCi Thermal Conductivity Analyzer (First Generation). Retrieved April 21, 2020, from <http://thermalanalysislabs.com/inventory/mathis-tci-thermal-conductivity-analyzer-first-generation/>

Thermal Analysis Labs. (2020b). Modified Transient Plane Source (MTPS). Retrieved April 21, 2020, from <http://thermalanalysislabs.com/thermal-conductivity/modified-transient-plane-source-mtps/>

Thomas, B. S. (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(October 2017), 3913–3923. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>

Thomas, B. S., & Chandra Gupta, R. (2016). Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 113, 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>

Tomeczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19(1), 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>

Vieira, A. M. D. (2017). Utilização de biochar na remediação de solos vitícolas contaminados por cobre. Universidade de Aveiro.

Vuk, T., Tinta, V., Gabrovšek, R., & Kaučič, V. (2001). The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 135–139. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00427-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00427-0)

Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217(December 2017), 240–261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>

Zordan, S. E. (1997). A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil.