

Incorporação de resíduos orgânicos em blocos de betão

Carolina Gavron Siqueira

Trabalho realizado sob a orientação de

Professora Doutora Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira – IPB

Professora Doutora Eduarda Cristina Pires Luso – IPB

Professor Doutor Rodrigo Scoczynski Ribeiro – UTFPR

Bragança

Outubro 2020

Incorporação de resíduos orgânicos em blocos de betão

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do **Grau de Mestre em Engenharia da Construção** no âmbito da **Dupla Diplomação** com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Carolina Gavron Siqueira

Outubro 2020

Agradecimentos

Em todos os percursos da vida, nenhum é percorrido sozinho. Este espaço é dedicado aos meus sinceros agradecimentos a todos que passaram pelo meu caminho. Agradeço primeiro e acima de tudo à Deus, meu sustento e minha fortaleza, que me deu bases fortes para ter a coragem de ir além e a perseverança para nunca desistir independente de qualquer adversidade. Obrigada por ser presença real em mim.

Aos meus pais, Gilson e Sueli, pois se cheguei aqui foi graças a vocês. Obrigada por me ensinarem sobre os valores essenciais da vida e serem exemplo de esforço e dedicação. Às minhas irmãs, Camila e Carina, por serem parte de mim e me ensinarem que amar significa respeitar as diferenças e individualidades do outro. Ao meu cunhado Alex que chegou para acrescentar e ser exemplo de alegria e competência. Às minhas sobrinhas, Ana Cecília e Maria Antônia, que completam a família e são o meu tesouro mais precioso. A vocês, minha motivação diária, todo o meu amor e gratidão.

Às minhas orientadoras de Portugal, Prof. Dra. Debora Macanjo e Prof. Dra. Eduarda Luso, e ao orientador do Brasil Prof. Dr. Rodrigo Ribeiro, por todo o conhecimento passado, correção e ajuda, mesmo com todas as dificuldades impostas pelo momento difícil no mundo.

À minha amiga Andressa Delafiori, agradeço por ser meu apoio em todo o desenvolvimento do trabalho e dividir comigo todas as preocupações. É mais fácil quando sentimos que não estamos sozinhos! Também agradeço aos técnicos do laboratório, Sr. João e Sr. Otávio, pelo auxílio nos ensaios laboratoriais, bem como às representantes da Pavimir, Dra Anabela Carlão e Eng. Sónia Mendonça pela solicitude para o progresso do trabalho, além da empresa Resíduos do Nordeste pelo fornecimento do resíduo orgânico utilizado.

À minha família de Portugal, Mariana, Fernanda, Guilherme, Ary e Leonardo, vocês ajudaram a tornar essa experiência muito mais leve e divertida. Saibam que cresci muito com a nossa convivência. Desejo a vocês todo o sucesso do mundo! Às instituições de ensino das quais me orgulho em fazer parte, UTFPR – Guarapuava, pelos anos de aprendizado e pela oportunidade de participar do programa de Dupla Diplomação e ao Instituto Politécnico de Bragança, pela acolhida e estrutura de internacionalização que me permitiu intenso crescimento pessoal e profissional. A todos que me acompanharam ao longo desses anos, toda a minha família e amigos que me deram força para seguir na busca pela realização dos meus sonhos.

Resumo

Diante da necessidade de ações para o desenvolvimento sustentável, o presente trabalho aborda duas problemáticas, sendo elas: a indústria da construção civil como uma importante fonte poluidora e a dificuldade dos municípios no gerenciamento dos resíduos municipais gerados pela população. Dessa forma, é realizado o estudo do betão incorporado com quantidades pré-definidas de resíduos orgânicos, aplicado na produção de blocos comerciais sem função estrutural, como uma proposta de um material contribuinte para a construção sustentável. O composto orgânico foi fornecido pela empresa Resíduos do Nordeste e a composição do bloco de referência é produzida pela empresa Pavimir. Foram produzidos provetes com as percentagens de 0%, 5%, 10% e 15% de resíduo em substituição à areia, ao cimento e em acréscimo à composição sem retirada de nenhum outro material. Observou-se uma interferência importante da matéria orgânica na estrutura do betão, sendo descartada a possibilidade da presença do resíduo em quantidades superiores a 5%. A retirada das partículas mais finas por meio de peneiramento e o pré-umedecimento do resíduo auxiliou no melhor desempenho dos provetes quanto à resistência à compressão. Nesse quesito, as menores reduções em relação ao provete de referência (C_{Ref}) foram encontradas para as composições com 5% de substituição do cimento (CR_5) e 5% de acréscimo de resíduo ($+R_5$), para as quais foram realizados ensaios complementares. A consistência do betão nas composições avaliadas é seca. CR_5 apresentou a menor massa volúmica e menor taxa de absorção de água entre as três composições e houve redução da resistência à tração em relação à C_{Ref} , nas percentagens de 7,77% e 17,29% aos 28 dias para CR_5 e $+R_5$, respectivamente. A utilização da incorporação de resíduos orgânicos na produção de blocos apresenta-se como uma solução significativamente vantajosa a nível ambiental e económico, representando uma alternativa adicional para a destinação dos resíduos orgânicos municipais e influenciando na competitividade das empresas que fabricam e comercializam tais elementos, visto a relevância do tema no cenário atual.

Palavras-chave: Blocos; betão; resíduos orgânicos; construção sustentável

Abstract

Faced with the need for actions related to sustainable development, the present work addresses two issues, namely: the construction industry as an important polluting source and the difficulty of cities in managing municipal waste generated by the population. Thus, the study of concrete incorporated with pre-defined amounts of organic waste is carried out, applied in the production of non-load bearing commercial blocks, as a proposal for a material that contributes to sustainable construction. Organic compost was supplied by the company Resíduos do Nordeste and the composition of the reference block is given by the company Pavimir. Samples were produced with the rates of 0%, 5%, 10% and 15% of waste in substitution for sand, cement and in addition to the composition without removing any other material. There was an important interference of organic matter in the concrete structure, discarding the possibility of the presence of the waste in quantities greater than 5%. Removal of the finer particles through sieving and the pre-wetting of the waste helped in the better performance of the samples in terms of compressive strength. In this regard, the smallest reductions in relation to the reference sample (C_{Ref}) were found for compositions with 5% of cement replacement (CR_5) and 5% of waste addition ($+R_5$) for which complementary test were performed. Concrete consistency in the evaluated compositions is dry. CR_5 had the lowest density and lowest water absorption rate among the three compositions and there was a reduction in tensile strength compared C_{Ref} , in rates of 7,77% and 17,29% at 28 days of age for CR_5 and $+R_5$, respectively. The use of incorporating organic waste in the production of blocks means an advantageous solution at an environmental and economic level, representing an additional alternative for the disposal of municipal organic waste and influencing the competitiveness of companies that manufacture and sell such elements, given the relevance of the theme in the current scenario.

Keywords: Blocks; concrete; organic waste; sustainable construction

Conteúdo

1	Introdução.....	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Enquadramento do tema	2
1.3	Objetivos.....	6
1.4	Estrutura da dissertação.....	7
2	Estado da Arte	9
2.1	Resíduos inorgânicos	11
2.1.1	Resíduos de Construção e Demolição (RCD).....	11
2.1.2	Vidro	13
2.1.3	Cerâmica	13
2.1.4	Borracha.....	14
2.1.5	Têxtil.....	15
2.1.6	PET	16
2.1.7	Ferro.....	17
2.2	Resíduos orgânicos	17
2.2.1	Compostagem.....	18
2.2.2	Digestão anaeróbia.....	19
2.2.3	Incineração	20
2.2.4	Constituinte do betão	20
2.2.4.1	Casca de pinheiro	21
2.2.4.2	Cinza de casca de arroz	23
2.2.4.3	Casca de coco.....	25
2.2.4.4	Cinza de bagaço de cana.....	26
2.2.4.5	Cortiça	28
2.2.4.6	Cinza de casca de amendoim	30
2.2.4.7	Resíduos municipais.....	31

2.3	Blocos de betão.....	37
2.3.1	Requisitos para blocos de betão	38
2.3.1.1	Dimensões dos blocos e percentagem de furação	39
2.3.1.2	Massa volúmica dos blocos	40
2.3.1.3	Absorção de água por imersão dos blocos.....	40
2.3.1.4	Resistência à compressão dos blocos	40
2.3.1.5	Resistência à tração dos blocos.....	41
3	Estudo Prévio.....	43
3.1	Caracterização do bloco comercial objeto de estudo	43
3.2	Caracterização do resíduo orgânico utilizado.....	47
3.2.1	Comparação da granulometria do resíduo orgânico com os agregados	50
3.3	Estudo da composição de referência	52
3.4	Provetes com incorporação de resíduos	56
3.4.1	Ensaio de resistência à compressão	59
3.4.1.1	Fase 1: Resíduos secos em estufa.....	59
3.4.1.2	Fase 2: Resíduos úmidos	60
3.4.1.3	Fase 3: Resíduos úmidos e sem finos.....	62
4	Análise Experimental Complementar.....	64
4.1	Teor de umidade	64
4.2	Vebê test	65
4.3	Massa volúmica do betão endurecido	66
4.4	Absorção de água.....	70
4.5	Resistência à tração por compressão diametral	72
4.6	Análise do consumo de resíduo e economia de cimento.....	74
4.6.1	CR ₅	75
4.6.2	+R ₅	76
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	78
5.1	Trabalhos desenvolvidos	78

5.2	Trabalhos futuros	80
	Referências Bibliográficas	1

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Requisitos para os blocos vazados de betão da NBR 6136	38
Tabela 2 - Tolerâncias das dimensões exteriores da NP EN 771-3.....	39
Tabela 3 - Requisitos geométricos do Eurocodigo 6	39
Tabela 4 - Características do bloco de referência.....	44
Tabela 5 - Composição do betão para a produção do bloco de referência.....	45
Tabela 6 - Características dos agregados	47
Tabela 7 - Caracterização do resíduo orgânico	48
Tabela 8 - Teor de umidade do resíduo orgânico	49
Tabela 9 - Baridade do resíduo orgânico	49
Tabela 10 – Coeficientes de uniformidade e curvatura.....	52
Tabela 11 - Composição utilizada para o fabrico dos provetes.....	53
Tabela 12 - Provede com relação a/c de 0,75.....	55
Tabela 13 - Teor de umidade do betão sem resíduos.....	56
Tabela 14 - Composição adotada sem incorporação de resíduos (C_{Ref})	56
Tabela 15 - Taxas de incorporação de resíduo orgânico	57
Tabela 16 - Composição em percentagem para a produção dos provetes (%).....	57
Tabela 17 - Resistência à compressão dos provetes com resíduos secos em estufa	59
Tabela 18 - Resistência à compressão dos provetes com resíduos úmidos.....	61
Tabela 19 - Resistência à compressão dos provetes com resíduos úmidos e sem finos ..	63
Tabela 20 - Resistência à compressão das composições AR ₅ , CR ₅ e +R ₅	63
Tabela 21 - Teor de umidade das composições	64
Tabela 22 - Tempo Vebê Test	65
Tabela 23 - Massa volúmica do betão endurecido (kg/m ³)	68
Tabela 24 - Absorção de água por imersão (%)	70
Tabela 25 - Variação das taxas de absorção de água aos 7 e 28 dias de idade.....	71
Tabela 26 - Variação da taxa de absorção de água em relação à referência	72
Tabela 27 - Resistência à tração indireta e direta	73
Tabela 28 - Comparativo entre o betão produzido sem resíduos e a composição CR ₅ ..	75

Tabela 29 - Economia de cimento na produção de blocos com a composição CR₅ 76
Tabela 30 - Resíduo utilizado na produção de blocos com a composição +R₅..... 76
Tabela 31 - Impacto da inclusão de resíduos na produção de blocos 77

Lista de Figuras

Figura 1 - Eventos relacionados ao Desenvolvimento Sustentável	3
Figura 2 - Classificações da Sustentabilidade	4
Figura 3 - Princípios e prioridades para uma construção sustentável.....	5
Figura 4 - Casca de pinheiro no estado natural e granular	22
Figura 5 - Granulado obtido com o triturador e com o moinho picador	23
Figura 6 – (a) Casca de arroz (b) Cinza de casca de arroz queimada (c) Cinza de casca de arroz após moagem	24
Figura 7 – (a) Casca de coco natural (b) Casca de coco triturada (c) Partículas graduadas	25
Figura 8 - Cinza de bagaço de cana-de-açúcar	27
Figura 9 - Processamento da cortiça e seu tamanho de partícula	29
Figura 10 - Casca de amendoim	30
Figura 11 - Resíduo municipal gerado na UE em 2005 e 2018 (kg per capita)	32
Figura 12 - Evolução da produção de resíduos municipais e capitação anual em Portugal	32
Figura 13 - Caracterização física dos resíduos municipais produzidos em Portugal, 2018	33
Figura 14 - Destinos finais dos resíduos municipais em Portugal, 2018	33
Figura 15 - Geração de resíduos urbanos no Brasil	34
Figura 16 - Disposição final dos resíduos municipais no Brasil, 2017 e 2018	34
Figura 17 - Bloco vazado de vedação	43
Figura 18 - Maquinário de produção de blocos.....	45
Figura 19 - Curva granulométrica da Gravelha 4/8.....	46
Figura 20 - Curva granulométrica da Areia 0/4.....	46
Figura 21 - Curva granulométrica do Pó de Areia 0/6.....	46
Figura 22 - Composto orgânico	47
Figura 23 - Curva granulométrica do resíduo orgânico	50

Figura 24 - Comparação entre as curvas granulométricas do resíduo com os agregados	51
Figura 25 - Provetes produzidos em molde polimérico e em mesa vibratória	54
Figura 26 - (a) Compactação manual (b) Moldes metálicos com adaptação de XPS.....	54
Figura 27 - (a) Provetes vibrados (b) Provetes compactados	55
Figura 28 - Processo de produção dos provetes com resíduo.....	58
Figura 29 - Provetes com pouca coesão entre os materiais	60
Figura 30 - Resíduo úmido	61
Figura 31 - (a) Finos retirados (b) Resíduo sem finos (c) Resíduo úmido após a retirada dos finos	62
Figura 32 - Vebê Test.....	65
Figura 33 - Procedimento para o ensaio de massa volúmica	66
Figura 34 - Massa volúmica do betão endurecido aos 7 dias	68
Figura 35 - Massa volúmica do betão endurecido aos 28 dias	69
Figura 36 - Comparação entre os resultados de absorção de água	71
Figura 37 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	72
Figura 38 - Resistência à tração indireta e direta.....	74

Abreviações

Abrelpe – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

CIB – Conselho Internacional de Construção

CMAD – Comissão Mundial para o Ambiente e Desenvolvimento

CNUAH – Conferência das Nações Unidas Sobre o Ambiente Humano

CNUMAD – Conferencia das nações unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento

EPS – Poliestireno expandido

EVE – Eliminação/valorização energética

FEDER – Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

FEPICOP – Federação Portuguesa da Indústria da Construção e Obras Públicas

INE – Instituto Nacional de Estatística

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ODS – Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

PERSU – Plano Estratégicos para os Resíduos Urbanos

PET – Politereftalato de etileno

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

RCP – Regulamento de Produtos da Construção

UE – União Europeia

UPV – Velocidade de pulso ultrassônico

UTMB – Unidade de Tratamento Mecânico e Biológico

XPS – Poliestireno extrudido

Símbolos

a/c – Relação água/cimento

λ – Condutibilidade térmica

h – Teor de umidade

ρ_b – Baridade

C_u – Coeficiente de uniformidade

C_c – Coeficiente de curvatura

f_c – Resistência à compressão

D – Massa volúmica do betão endurecido

A_i – Taxa de absorção de água por imersão

f_{ct} – Resistência à tração por compressão diametral

C_{Ref} – Composição de referência

AR_5 – Composição com 5% de resíduo orgânico em substituição à areia

AR_{10} – Composição com 10% de resíduo orgânico em substituição à areia

AR_{15} – Composição com 15% de resíduo orgânico em substituição à areia

CR_5 – Composição com 5% de resíduo orgânico em substituição ao cimento

CR_{10} – Composição com 10% de resíduo orgânico em substituição ao cimento

CR_{15} – Composição com 15% de resíduo orgânico em substituição ao cimento

$+R_5$ – Composição com 5% de adição de resíduo orgânico

$+R_{10}$ – Composição com 5% de adição de resíduo orgânico

$+R_{15}$ – Composição com 5% de adição de resíduo orgânico

Terminologias

Para a facilitar a compreensão de algumas nomenclaturas que divergem entre o português do Brasil e o português de Portugal, faz-se a presente lista de terminologias.

Português (Brasil)

Adensamento
Aditivo
Chorume
Concreto
Corpo-de-prova
Déficit
Densidade
Lixão à céu aberto
Vedação

Português (Portugal)

Compactação
Adjuvante
Lixiviado
Betão
Provete
Défice
Baridade
Lixeira à céu aberto
Compartimentação

Capítulo 1

1 Introdução

Ao longo dos anos, a concepção do desenvolvimento associado à sustentabilidade vem sendo disseminada extensivamente por efeito da percepção de que o uso irresponsável dos recursos e má gestão de resíduos gerados traz consequências de extrema gravidade ao ambiente. Com o desenvolvimento de estudos relacionados à aplicação de novos materiais e ao uso e reaproveitamento eficiente dos recursos, é possível alcançar propriedades mais otimizadas, melhorar a performance e agregar valor a materiais comumente utilizados, como é o caso do betão, enquanto são minimizados os impactos ambientais [1].

1.1 Considerações iniciais

O presente estudo vem dar continuidade ao Projeto VALORCOMP, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) por meio do Programa Interreg VA Espanha-Portugal (POCTEP) 2014-2020 que promove projetos de cooperação transfronteiriça com o apoio da União Europeia.

O VALORCOMP visava contribuir de forma cooperativa para a valorização de composto e de outros resíduos gerados no tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, propondo soluções tecnológicas e inovadoras orientadas para a produção de bioenergia, biomateriais e produtos agronômicos. Nos trabalhos desenvolvidos neste projeto, relacionados à incorporação destes resíduos em blocos de solo-cimento, obtiveram-se resultados muito positivos, pelos quais pretende-se verificar efeitos semelhantes em outros materiais [106], [156], [157].

O composto orgânico utilizado para o desenvolvimento experimental provém da Resíduos do Nordeste, empresa intermunicipal de gestão de resíduos e limpeza urbana, uma das beneficiárias do projeto VALORCOMP. O estudo também inclui a colaboração da empresa PAVIMIR Belmiro & Barreira Lda, cuja área de atuação é pautada na pré-fabricação de elementos de betão para construção, arranjos exteriores, hidráulica, saneamento e drenagem. A Pavimir é fabricante do bloco comercial de referência e fornecedora dos materiais utilizados para o fabrico do betão estudado.

1.2 Enquadramento do tema

Os intensos avanços tecnológicos observados nas últimas décadas evidenciaram a evolução da sociedade, o que despertou no homem o anseio de controlar a natureza ao seu redor. O acentuado crescimento populacional e o decorrente crescimento das cidades, principalmente a partir da década de 70, associados à maior utilização dos recursos ambientais, inevitavelmente, ocasionaram alterações significativas na constituição da biosfera, trazendo danos ambientais cada vez mais visíveis [2].

A percepção de tal problemática instaurou na sociedade o início de um debate relacionado com a demanda do crescimento econômico e o modo de vida baseado no consumo que, ao interferirem no equilíbrio ecológico, comprometem a segurança do planeta. Surge dessa circunstância, a inspiração para a inserção do conceito de sustentabilidade e a necessidade de promover um desenvolvimento sustentável [3].

A primeira manifestação significativa de preocupação com a situação e futuro do meio ambiente no planeta, deu- em 1972 com a Conferência das Nações Unidas Sobre o Ambiente Humano (CNUAH), em Estocolmo. A partir desta ocasião, inúmeros eventos marcaram a sucessão de ações voltadas à ideia de que o ambiente é uma questão absolutamente inerente ao desenvolvimento. A Figura 1 apresenta um quadro com alguns destes principais acontecimentos.

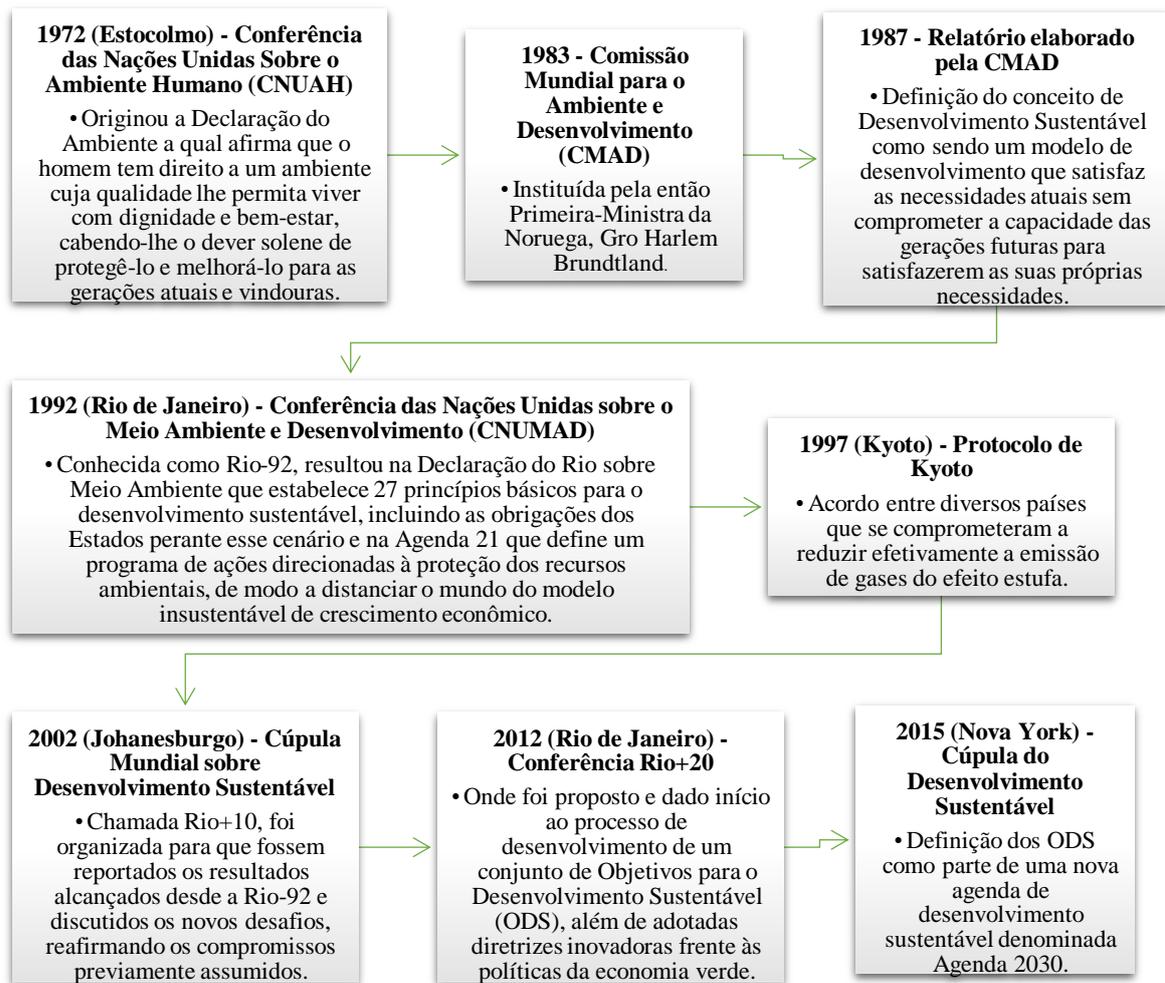


Figura 1 - Eventos relacionados ao Desenvolvimento Sustentável

Fonte: adaptado de [3], [2], [4]

Diante da evolução histórica de discussões relacionadas com a temática, a qual corrobora a crescente preocupação ambiental presente na sociedade, percebe-se que, sendo este um processo de aprendizagem a longo prazo direcionado por políticas públicas, é adequado planejar o desenvolvimento levando-se em consideração os aspectos correlacionados à sustentabilidade [5].

Neder (1994) [6] divide o conceito de sustentabilidade em cinco partes, facilitando a compreensão dos pormenores envolvidos nesse tema, citados na Figura 2.

Sustentabilidade ecológica	• Refere-se ao uso consciente dos recursos naturais;
Sustentabilidade ambiental	• Prioriza a preservação do meio ambiente com o uso sustentável dos recursos;
Sustentabilidade social	• Busca a distribuição equilibrada dos recursos independente de classes sociais;
Sustentabilidade política	• Relacionada ao processo de tomada de decisões no desenvolvimento das cidades;
Sustentabilidade econômica	• Vincula a gestão eficiente dos recursos ao crescimento sustentável de lucros.

Figura 2 - Classificações da Sustentabilidade

Fonte: adaptado de [7].

Em vista disso, é possível caracterizar, no âmbito ambiental, alguns fatores que atuam como condicionantes para um assíduo desenvolvimento sustentável. Em geral, esses fatores estão relacionados com a ineficaz gestão de resíduos, riscos identificados ao patrimônio natural e à biodiversidade, excessiva dependência energética, gestão ineficiente dos recursos hídricos e elevados níveis de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa [8].

Torna-se perceptível o fato de que a indústria da construção civil assume um papel fundamental nesse cenário, pois exerce influência sobre todas as classificações de sustentabilidade acima dispostos e caracteriza-se como um dos setores que impactam de maneira considerável o meio ambiente, seja no consumo de recursos e matérias-primas ou na liberação de poluentes e geração de resíduos sólidos [9].

Segundo os dados da Euroconstruct (2020) [10], o ciclo de expansão do setor da construção registrou um crescimento de 2,9% no ano de 2019 em toda a Europa, comparado ao ano de 2018, com destaque para as infraestruturas e construções residenciais que cresceram 3,9%. Com a crise decorrente do Covid-19, naturalmente é previsto um grande declínio dos indicativos em geral. Porém, há uma visão fragmentada entre os países sobre os impactos causados pelo coronavírus. Enquanto o Reino Unido e a Irlanda prevêm a maior queda, em torno de 33 e 38%, respectivamente, Portugal e Polônia esperam um crescimento contínuo mesmo durante a crise. Entretanto, espera-se uma recuperação geral do setor já no ano de 2021 de cerca de 6% e um crescimento de 3% em 2022, atingindo um nível semelhante ao ano de 2018.

Por essa razão, é extremamente relevante considerar o conceito de construção sustentável, que foi definido pelo Conselho Internacional da Construção (CIB), como “a criação e manutenção responsáveis de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e no projeto baseado em princípios ecológicos” [11].

Kibert (2008) [11] cita os sete princípios básicos, também estabelecidos pelo CIB, que objetivam a prática de tal concepção e, a partir destes princípios, Mateus (2009) [12] relaciona as prioridades que devem estar presentes na fase de projeto de uma edificação. Os princípios e prioridades para uma construção sustentável estão indicados na Figura 3.

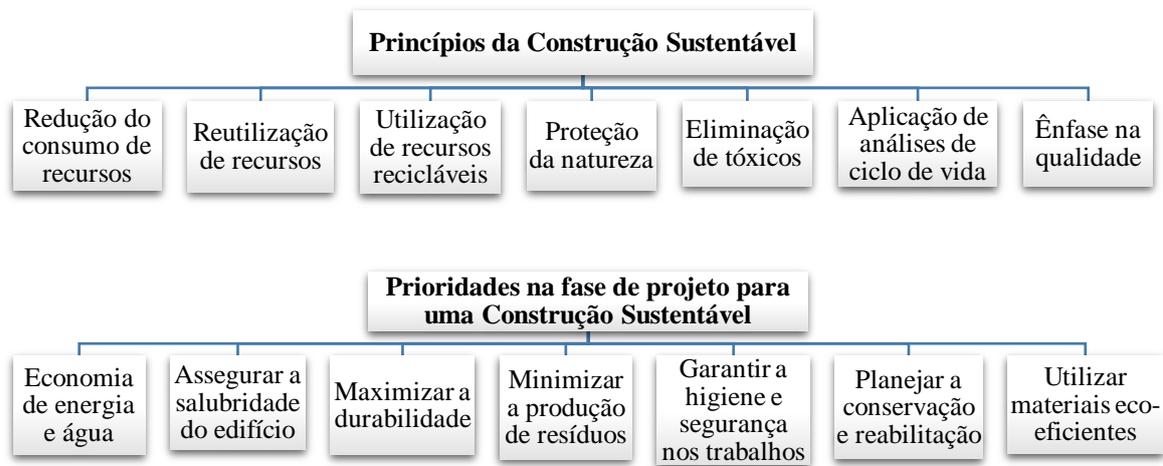


Figura 3 - Princípios e prioridades para uma construção sustentável

Fonte: adaptado de [11], [12]

Por estes tópicos, observa-se a necessidade de avaliar a escolha dos materiais utilizados, os quais impactam expressivamente no resultado final da edificação acerca da esfera sustentável. É importante ultrapassar os parâmetros de estética e funcionalidade que priorizam a rapidez de construção e a redução de custo, e levar em consideração a origem do material, os efeitos da sua extração no ambiente, o nível de energia envolvida no processo de produção, a distância que será percorrida pelo material até o seu destino final, a quantidade de resíduos gerados em decorrência da utilização do mesmo, além do seu potencial de reaproveitamento [8], [7].

Inserido nesse contexto, encontra-se o fato de o betão ser o material mais consumido no planeta, perdendo apenas para a água [8]. Ou seja, ainda é o preferido na ocasião de escolha do material construtivo pelos profissionais em geral. Isso ocorre justamente pelo conjunto das propriedades mecânicas alcançadas e da questão econômica, aliadas à falta de critérios para a seleção de soluções cujo comportamento seja mais equilibrado a nível

ambiental e até mesmo a falta de confiabilidade no desempenho a longo prazo de novos materiais [12].

Além do consumo de recursos naturais, o grande problema da produção do cimento está associado ao processo de fabrico que consome aproximadamente 12 a 15% do uso total de energia industrial, fazendo com que a indústria cimenteira seja uma importante fonte poluidora, o que, conseqüentemente, gera impactos na saúde da população [13].

Para identificar estratégias dentro desta indústria que incluam a implantação de novos processos produtivos relacionados com a reciclagem, reutilização e reaproveitamento, uma das alternativas promissoras envolve a utilização de resíduos provenientes de diversos meios na produção de betão [14].

De acordo o relatório divulgado pelo World Bank (2018), sem ações efetivas, a quantidade de resíduos produzidos globalmente sofrerá um acréscimo de 70% até 2050. Em 2016, a quantidade gerada foi de 2,01 bilhões de toneladas e a previsão indica um salto para 3,40 bilhões nos próximos 30 anos. Dentre os principais tipos de resíduos gerados, os orgânicos representam aproximadamente 44% do total e, por isso, assumem um importante papel na busca por um gerenciamento eficaz [15].

O desenvolvimento de estudos relacionados com a adição de resíduos que permitam a substituição parcial do cimento ou dos agregados naturais, colabora significativamente para a problemática da deposição e gestão dos mesmos no meio ambiente, além de representar uma redução substancial da extração de matéria-prima e da queima em fornos de altas temperaturas [14].

Apesar dos obstáculos e limitações que dificultam a validação desses materiais em relação, principalmente, à resistência e durabilidade a longo prazo, os resultados dos estudos têm apresentado boa viabilidade. Há diversos subprodutos com grande potencial, porém, pouco investigados, que corroboram as boas perspectivas do uso de resíduos com a finalidade de assegurar uma construção mais eficiente a nível ambiental, social, técnico e econômico [16].

1.3 Objetivos

O desenvolvimento do presente trabalho visa avaliar o comportamento do betão produzido para blocos comerciais de compartimentação sem função estrutural,

incorporado com quantidades pré-definidas de resíduos orgânicos. Para tanto, o estudo engloba os seguintes objetivos específicos:

- Elaborar uma revisão da bibliografia existente que ofereça subsídios para o desenvolvimento de estudos direcionados a novos materiais de construção aliados à sustentabilidade;
- Caracterizar o resíduo orgânico utilizado por meio da sua composição, análise granulométrica e baridade;
- Definir a composição do betão produzido em laboratório, buscando características semelhantes ao betão utilizado na produção de blocos comerciais em fábrica;
- Avaliar as percentagens pré-definidas de resíduos incorporados aos provetes quanto à resistência à compressão;
- Caracterizar os provetes com melhor desempenho à compressão, por meio dos ensaios de consistência (Vebê test), determinação do teor de umidade, determinação da massa volúmica, absorção de água por imersão e resistência à tração por compressão diametral;
- Avaliar quantitativamente o consumo de resíduo nas composições com melhores desempenhos.

1.4 Estrutura da dissertação

A estrutura do trabalho corresponde a cinco capítulos. Destes, o primeiro refere-se à introdução que inclui algumas considerações iniciais e abrange o enquadramento do tema ao explicar o contexto de desenvolvimento e construção sustentável, além dos objetivos pretendidos.

O capítulo 2 expõe a problemática a respeito do gerenciamento de resíduos e traz um estado da arte relacionado aos estudos desenvolvidos acerca da adição de resíduos inorgânicos e orgânicos no betão. Quanto aos orgânicos, são comentadas as possíveis utilizações para evitar que sua destinação final seja os aterros. Também são expostos alguns dados relativos à produção de resíduos municipais nos últimos anos, sendo esta a classificação de material orgânico utilizada no presente trabalho.

No capítulo 3 é apresentado o estudo prévio realizado, que inicialmente inclui as informações referentes ao bloco tomado como referência para este estudo e as

características do resíduo orgânico utilizado. A composição do referido bloco é reproduzida em laboratório, ainda sem incorporação de resíduos, realizando-se as adaptações necessárias para aproximar-se dos resultados alcançados na produção industrial da empresa fabricante. Em seguida, é definida a composição para a produção dos provetes com incorporação de material orgânico e avaliado qual das propostas apresenta melhor desempenho quanto à resistência à compressão.

Os demais ensaios de caracterização física e mecânica do betão nas composições escolhidas são descritos no capítulo 4, destinado às avaliações observadas e comparação entre os resultados obtidos, além da análise quantitativa da incorporação de resíduo orgânico na produção dos blocos comerciais.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do estudo e algumas sugestões para trabalhos futuros que possam agregar no conjunto de informações relativas ao comportamento deste tipo de resíduo no betão.

Capítulo 2

2 Estado da Arte

Segundo a Federação Portuguesa da Indústria da Construção e Obras Públicas (FEPICOP), no início de 2020 estimava-se um crescimento de 5,5% nas atividades do setor da construção civil ao longo do ano. Com a pandemia, naturalmente os indicativos foram afetados. No entanto, este panorama que em condições normais considera crescimento, está associado aos impactos ambientais causados pelo aumento do uso de matérias-primas, consumo de energia e outros componentes envolvidos nos processos de produção e transporte, além da geração de resíduos.

Os resíduos sólidos são materiais provenientes de atividade humana ou animal que se caracterizam como não úteis a quem os possui e, por essa razão, serão descartados [17]. No Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de junho [18], são classificados de acordo com a sua procedência em: urbano, industrial, inerte, perigoso, hospitalar, agrícola e de construção e demolição.

Outra classificação concebível refere-se aos termos orgânico e inorgânico. Os orgânicos são materiais de origem biológica que se decompõem com mais facilidade como, por exemplo, restos de alimentos, papéis, madeira e fibras naturais. Já os inorgânicos são materiais sintéticos, produzidos pelo homem, e apresentam longo processo de decomposição, como os vidros, metais e plásticos [19]. Separar estes dois tipos de resíduos é uma atitude simples, porém, muito significativa na contribuição para a coleta seletiva e reciclagem.

As classificações dos resíduos, ao indicar que eles estão presentes em todos os meios da sociedade, reflete o fato de que o crescimento populacional, o progresso dos centros urbanos e a própria expansão da economia, induzem a um considerável aumento da quantidade de resíduos gerados [20]. Com esse crescimento, torna-se evidente o desafio

enfrentado pelos municípios no que se refere ao gerenciamento eficiente dos resíduos sólidos gerados nos limites de sua abrangência [21].

Diante da complexidade da gestão de resíduos, associada a visão do fim dos recursos naturais e da superlotação dos locais de disposição final, o reaproveitamento de materiais surge como uma alternativa que proporciona equilíbrio entre obtenção, produção e consumo, de maneira a harmonizar a relação entre o homem e a natureza e propiciar o desenvolvimento sustentável das indústrias [22].

Legislações estabelecidas com o intuito de incentivar práticas nesse sentido, fundamentam o manejo adequado dos resíduos. Na União Europeia, a Diretiva 2008/98/CE de 19 de novembro [23] define a obrigação de tratamento e prescreve uma hierarquia que prioriza os princípios de: prevenção e redução, preparação para reutilização, reciclagem, outros tipos de valorização como a energética e, como último recurso, a eliminação.

Em 2018, a Diretiva (UE) 2018/851 de 30 de maio [24] fortaleceu os aspectos propostos na orientação anterior e enfatizou a necessidade de ações centradas em todo o ciclo de vida dos produtos, de modo a garantir que os resíduos sejam reconhecidos como recursos, promovendo um modelo de economia verdadeiramente circular. O ciclo de vida é definido pela ISO 14040:2014 [25] como os estágios sucessivos de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou geração de recursos naturais até a disposição final.

A ISO 14040:2014 [25], juntamente com a ISO 14044:2014 [26], regulamenta a avaliação do ciclo de vida (ACV), sendo esta uma técnica que compila e avalia as entradas e saídas de um produto ou serviço, resultando em sua pegada de carbono, ou seja, o impacto ambiental causado pela emissão de gases do efeito estufa envolvidos no processo. A ACV adota uma abordagem abrangente e sistêmica da avaliação ambiental e, por esse motivo, é crescente o interesse em desempenhar métodos de ACV na construção civil, a fim de apoiar as decisões relacionadas à seleção de produtos ambientalmente preferíveis e otimizar os processos de construção [27].

Além disso, o RCP N.º 305/2011 (Regulamento de Produtos da Construção) [28], legislação da UE que estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção, contribuindo para a definição dos padrões de qualidade desses produtos, incluiu o uso sustentável dos recursos naturais como um requisito básico, de maneira a fomentar práticas nesse sentido [29].

As preocupações dos governos demonstradas pelos incentivos e criações de políticas que objetivam o desenvolvimento de uma economia aliada à capacidade ambiental, ratificam a relevância de estudos associados ao reuso de materiais, os quais pretendem manter o valor dos produtos e recursos o máximo possível ao passo que a quantidade de elementos descartados é reduzida ao mínimo [30].

Devido ao seu protagonismo dentro da gama de materiais de construção e do volume consumido no mundo, o betão assume um potencial expressivo para uma participação positiva nas questões ambientais e nas ações para a reutilização de materiais. Tanto resíduos inorgânicos quanto orgânicos são estudados como alternativas que visam reduzir os impactos causados pela indústria da construção civil e contribuir para um desenvolvimento mais sustentável.

2.1 Resíduos inorgânicos

Os resíduos inorgânicos, inertes e não biodegradáveis, compõem uma variedade de elementos que podem ser utilizados em substituição aos agregados ou ao cimento, como por exemplo: resíduos de construção e demolição (RCD), vidro, cerâmica, borracha, têxtil, politereftalato de etileno (PET) e ferro [31].

2.1.1 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

A utilização dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como agregados reciclados, atua como um dos meios mais promissores para alcançar uma construção sustentável. O RCD consiste nos resíduos provenientes de construções, reparos, manutenções, demolições ou ruínas de obras civis e, por esse motivo, inclui uma grande variedade de materiais em sua composição [32].

Em teoria, todos os projetos de construção deveriam elaborar planos para reciclagem dos resíduos gerados, identificando os tipos e o correto procedimento de disposição. No entanto, pela falta de informação, fiscalização e custos, em muitas ocasiões esses materiais acabam sendo descartados em aterros. Esse fato torna-os uma proeminente alternativa na busca por soluções que reduzam os impactos ambientais e econômicos da construção [33], [34].

Batayneh et al. (2007) [33] utilizaram betão reciclado triturado em substituição ao agregado grosso, a uma taxa de até 20%. Os resultados obtidos demonstraram que na medida em que a percentagem de substituição é elevada, o valor do *Slump Test*, ensaio que caracteriza a consistência do material do betão, é reduzido. Tal alteração da consistência do material ocorre devido à maior absorção de água se comparado ao agregado natural, além da irregularidade do betão reciclado que também afeta a trabalhabilidade. Por esse motivo, recomenda-se o uso de aditivos superplastificantes.

Os agregados provenientes de resíduos de construção e demolição tendem a apresentar uma quantidade de partículas finas superior aos agregados convencionais, o que pode levar a uma diminuição na resistência à compressão do produto final devido à excessiva absorção de água por estes finos [35]. Uma solução para atenuar este efeito seria um pré-umedecimento no momento da preparação do betão, conforme descrito por Eckert e Oliveira (2017) [36].

Shahidan et al. (2016) [37] trataram os resíduos de construção e demolição com resina epoxy a fim de diminuir as alterações consequentes do aumento da absorção de água. Nesse estudo, avaliou-se o comportamento do agregado reciclado classificado em dimensões de 5,0 mm, 10,0 mm, 14,0 mm, 20,0 mm e 37,5 mm. Os autores observaram que a taxa de absorção aumentou em proporção direta ao tamanho das partículas.

Quanto à resistência à compressão, Batayneh et al. (2006) [33] encontraram no betão com 20% de agregado reciclado, uma redução de 13% em relação ao betão normal, o que pode ser considerado aceitável se essa informação for levada em consideração na fase de projeto. Testes em amostras com substituição de 25% e 50% do agregado grosso natural por reciclado também foram realizados por Shaikh e Nguyen (2013) [38], cuja resistência à compressão sofreu redução com o aumento da proporção do material reutilizado, levando a resultados semelhantes para resistência à tração e à flexão. Os pesquisadores também verificaram que o betão com 25% de RCD em sua mistura manteve um comportamento próximo ao encontrado em betões com agregados naturais e, portanto, passível de ser utilizado.

Em resumo, os resíduos de construção e demolição podem ser considerados para a construção de estradas, trabalhos com betão maciço, seções levemente reforçadas, entre outras aplicações que exijam um betão menos resistente, o que representa grande utilidade para o gerenciamento de resíduos, tanto a nível ambiental quanto econômico [39], [32].

Para elementos estruturais, Dong et al. (2014) [40] identificaram um melhor desempenho quanto à resistência ao fogo, em pilares compostos por betão feito de agregados reciclados

do que em pilares feitos com betão convencional, devido à menor taxa de penetração da temperatura nos pilares que continham material reciclado sob condições de aquecimento.

2.1.2 Vidro

Outro produto inorgânico possível de ser incorporado no betão é o vidro, material incolor, duro e frágil que pode ser utilizado nas formas de agregado de vidro grosso, agregado de vidro fino e pó de vidro. A sílica é um constituinte fundamental do vidro e, dessa forma, é possível que a alcalinidade da matriz cimentícia cause uma reação mais rápida entre álcalis e sílica. O resultado dessa reação é um gel expansivo pela absorção de água que compromete a resistência mecânica do betão produzido [31]. No entanto, o vidro fino, em oposição ao grosso, é menos propenso à reação álcali-sílica. Além disso, a natureza pozolânica do vidro, evidenciada nos vidros finos ou pós, permite a substituição parcial também do cimento [41].

Cordeiro e Montel (2015) [42] substituíram parcialmente o agregado fino (areia) por agregado reciclado de vidro, nas proporções de 5%, 10% e 15% para determinação da resistência à compressão do betão. Os resultados indicaram um desempenho superior ao provete de referência, sem incorporação do resíduo. Gautam et al. (2012) [43] concluíram que 10% seria o nível ótimo de substituição de agregado fino por resíduo de vidro.

2.1.3 Cerâmica

Estudos envolvendo o uso de materiais cerâmicos como agregado fino e grosso também foram desenvolvidos. Os cerâmicos são um material não metálico e inorgânico e os seus resíduos são provenientes do seu processo de fabrico, durante ou depois da queima, devido a erros humanos, erros de fabricação e muitos são resultantes das construções e demolições [31].

Tavakoli et al. (2013) [31] examinaram o efeito da cerâmica no betão, utilizando-a como agregado grosso a uma taxa de 0% a 40% de substituição e como agregado fino a uma taxa de 0% a 100%. Os resultados mostraram que não houve efeito negativo significativo nas propriedades do betão. As melhores percentagens testadas de substituição do resíduo cerâmico em alternativa a areia foram 25% e 50% e para a utilização em substituição ao agregado grosso foram 10% e 20%. As percentagens citadas significaram aumento na

resistência à compressão das amostras avaliadas em relação a amostra de controle, sem resíduos.

Além disso, os resíduos cerâmicos proporcionam diminuição do peso específico e podem diminuir o efeito da absorção de água [44]. Portanto, é possível utilizar esse material na fabricação do betão, com a ressalva de serem realizados testes antes da produção, pois o tipo de queima e demais condições da cerâmica, até mesmo o tipo de mistura considerado, são fatores que exercerão influência no comportamento do mesmo [31].

2.1.4 Borracha

Borracha de pneu é outro produto abordado como um possível complemento ao betão devido, especialmente, ao seu descarte que representa uma séria ameaça ecológica [45]. A utilização desse material elastômero em matriz cimentícia ocorre principalmente em função da redução da rigidez do betão, tornando-o mais flexível, e da melhora de sua resistência ao fogo [46].

Zunaithur Rahman et al. (2016) [47] estudaram a substituição parcial de agregado grosso por resíduos de borracha de pneu com espessura correspondente a 20 mm, nas proporções de 10%, 20% e 30%. Os resultados mostraram que conforme a quantidade de resíduos aumenta, a trabalhabilidade do betão diminui, de acordo com os valores obtidos pelo slump test realizado ao betão no estado fresco. Em relação à resistência à compressão, as amostras com 10% e 20% de borracha incorporada apresentaram um leve aumento, sendo 10% a percentagem ótima.

No entanto, a resistência da amostra com 30% de resíduo decaiu consideravelmente, comprovando que o desempenho do betão decresce com o aumento da percentagem deste material, devido à fraca ligação entre a pasta de cimento e a borracha. Essa adesão pode ser melhorada com o uso de sílica ativa, de acordo com o estudo realizado por Sohrabi e Karbalaie (2011) [48]. A densidade das amostras aos 28 dias também foi avaliada, a qual decresceu com a inclusão da borracha.

Como substituto do agregado fino, Liu et al. (2016) [49] realizam estudos que resultaram na redução da resistência à compressão com o aumento do teor de borracha triturada de 0% a 20%. Porém, a resistência mínima exigida foi atendida mesmo ao nível de substituição de 20%. Silva et al. (2019) [50] utilizaram resíduo de borracha de pneu em betão de alto desempenho, observando que com a substituição de 15% de agregado fino

por resíduo, a mistura mostrou-se dentro da classificação padrão de resistência mecânica para esse tipo de betão.

2.1.5 Têxtil

Ainda com o intuito de reduzir o descarte de materiais em aterros e fornecer novas alternativas para a indústria da construção, resíduos têxteis também são considerados no estudo de reforços em materiais de construção. Tais resíduos são subprodutos inevitáveis no processo de fabricação de roupas e crescem em quantidade com o aumento da demanda [51].

Por exemplo, resíduos de corte de tecidos foram misturados com resina epóxi e areia de fundição, compondo um material compósito exclusivo que pode ser utilizado para construção leve em betão polimérico. Esse tipo de betão é elaborado pela combinação de polímeros e minerais, a fim de obter melhores propriedades. As fibras têxteis, em geral, não provocam aumento na resistência à compressão e flexão do betão polimérico, mas a sua adição à mistura auxilia na eliminação dos sinais de comportamento frágil [52].

Pessôa et. al. (2014) [53] adicionaram quantidades de resíduos têxteis, provenientes da indústria de vestuário, a uma composição base de um betão referencial com resistência a compressão de 30 MPa. As adições de 400 g/m³ e 600 g/m³ de tecido apresentaram pequeno aumento no valor de resistência, enquanto que a adição de 900 g/m³ resultou em uma leve redução de tal valor em comparação à amostra sem incorporação de resíduo. Os resultados demonstraram que o material pode ser utilizado na composição de betões não estruturais.

O uso do pó oriundo do processamento de resíduos têxteis de poliamida/poliéster em substituição parcial ao agregado fino natural (areia) também foi estudado por Andrade et al. (2015) [54]. Foram testados provetes cilíndricos com 0%, 5% e 15% de pó em relação a massa de cimento. Os valores para a resistência à compressão dos provetes aos 28 dias apresentaram um pequeno aumento gradual conforme aumentou-se o percentual de substituição, comprovando a viabilidade técnica da aplicação.

2.1.6 PET

O Politereftalato de etileno (PET), outro tipo de polímero utilizado em resinas para garrafas e na própria fabricação de fibras de poliéster, por exemplo, também é considerado promissor para a contribuição ecológica visto o seu expressivo uso. Rahmani et al. (2013) [55] testaram a inserção de partículas processadas de resíduo de PET, com no máximo 7,00 mm de espessura, em substituição a 0%, 5%, 10% e 15% do volume de agregado fino na produção de betão.

Foram observadas alterações na trabalhabilidade do betão, a qual diminuiu à medida que o conteúdo de PET aumentou, devido à maior área superficial dessas partículas em comparação com a areia. A resistência à tração, o módulo de elasticidade e a densidade das amostras com resíduos apresentaram redução gradual conforme o percentual de PET aumentava. O comportamento referente às resistências à compressão e à flexão indicou uma tendência crescente com a taxa de substituição de 5%, mas diminuiu nas substituições seguintes, de 10% e 15% [55].

Tal comportamento ocorre visto que, para baixas percentagens, quando a carga máxima é atingida, cresce a probabilidade de intertravamento entre as partículas de PET na superfície fraturada devido à forma e flexibilidade do polímero. No entanto, quando a quantidade de incorporação aumenta, a fraca coesão entre a pasta de cimento e as partículas de PET faz com que elas atuem como barreiras, impedindo a adesão da pasta ao agregado natural. Além disso, deve ser considerado que as diferentes propriedades das partículas utilizadas também exercem influência nos resultados [55].

De acordo com Janfeshan Araghi et al. (2015) [31], outra característica do betão associado ao PET, é a sua boa reação ao ataque de ácido sulfúrico. Os experimentos realizados com amostras constituídas de percentagens de 0% a 15% de partículas do polímero em substituição à areia foram imersos em uma solução com 5% de ácido. Nos intervalos de 15, 30 e 60 dias as amostras foram retiradas da solução, secas e testadas quanto à carga de ruptura, mudança de peso e velocidade de onda ultrassônica. Os melhores resultados foram obtidos para a amostra com 15% de substituição, comprovando o benefício do incremento do PET.

2.1.7 Ferro

Resíduos de ferro, subprodutos das fábricas de aço, são mais uma alternativa para a incorporação em betão como substituto parcial da areia. Noori e Ibrahim (2018) [56], aplicaram diferentes percentagens (6%, 12%, 18%, 24% e 30%) de resíduos de ferro em amostras de um betão projetado para fornecer 33 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de cura. Os valores referentes à resistência à compressão e à flexão dos provetes aumentaram até o percentual de 12% de resíduo, comportando-se de maneira decrescente após esse percentual. O melhor resultado representou um aumento de 15% de resistência à compressão em comparação ao betão normal.

Em suma, é perceptível a ampla gama de resíduos inorgânicos que se tornam promissoras alternativas para o desenvolvimento de novos materiais que, além de representarem possível melhora em algumas propriedades do betão, são ecologicamente benéficos tendo em vista a dificuldade de descarte destes elementos não-biodegradáveis. Ainda são necessários estudos com o intuito de agregar informações ao comportamento relacionado com as diversas características do betão, sua durabilidade a longo prazo e até mesmo avaliar o uso de combinações de resíduos que possam corrigir as fraquezas encontradas na incorporação [31].

2.2 Resíduos orgânicos

Os resíduos orgânicos são biodegradáveis, constituídos basicamente de restos de origem animal ou vegetal descartados de atividades humanas. São provenientes, por exemplo, de residências ou do meio urbano em geral (restos de comida), da agricultura ou indústrias (resíduos da agroindústria alimentícia e indústria madeireira) e do saneamento básico (lodos de estações de tratamento de esgoto). Dessa forma, são gerados de maneira inevitável e tendem a aumentar progressivamente com o aumento da população [57], [58]. Os materiais orgânicos degradam-se naturalmente e reciclam os nutrientes nos processos da natureza. No entanto, em ambientes urbanos, o grande volume gerado, a falta de tratamento, separação e disposição incorreta constituem um sério problema ambiental que resulta na produção de chorume, odores desagradáveis, poluição de águas subterrâneas, emissão de metano na atmosfera e favorece a proliferação de vetores de doenças [59].

Por esse motivo destiná-los para aterros sanitários torna-se um grande desperdício econômico e ambiental. Para preservar a sua função natural nos ciclos dos nutrientes, uma forma de gestão que pode ser adotada consiste em separar os resíduos em três frações: recicláveis secos, orgânicos e rejeitos. Essa triagem atende às necessidades atuais de separação dos resíduos e apresenta-se adequada à valorização dos orgânicos uma vez que facilita a sua reutilização e diminui a contaminação dos recicláveis secos, além de permitir que sejam encaminhados ao aterro apenas os rejeitos, ou seja, os materiais que realmente não podem ser reaproveitados [60].

Em Portugal, os aterros são regulamentados pelo Decreto-Lei n.º 152/2002 de 23 de novembro [61] e correspondem aos maiores receptores de resíduos, após os lixões a céu aberto serem totalmente erradicados desde 2002. Esse documento também traz um especial enfoque às metas que visam reduzir o material biodegradável desses locais. Além disso, com o direcionamento estabelecido pelo Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU), a eliminação progressiva da fração depositada diretamente em aterro passou a ser estimulada em consonância com a estratégia nacional para o desenvolvimento sustentável [62].

O lixo orgânico não pode ser visto simplesmente como rejeito a ser eliminado em aterros ou incineradores, pois tais práticas não são congruentes às necessárias soluções ambientais que devem ser consideradas. Ao contrário, a matéria orgânica gerada assume o papel de um recurso valioso cuja estratégia relacionada com a sua gestão deve considerar prioritariamente o processamento destes resíduos e possíveis transformações através da aplicação de abordagens e tecnologias inovadoras para a reutilização em energia, fertilizantes, ração animal, entre outros [63].

Alguns métodos são utilizados atualmente para o aproveitamento dos resíduos orgânicos, tais como: compostagem, digestão anaeróbia, incineração e como constituinte do betão.

2.2.1 Compostagem

O método mais comum considerado ambientalmente adequado para o tratamento de resíduos orgânico é a compostagem. Essa técnica constitui-se em um processo biológico aeróbio, exotérmico e controlado, no qual substratos orgânicos são decompostos através da ação de microrganismos, gerando um produto estável, rico em matéria orgânica e humificado [64], [58].

Resulta, a nível local, em um composto eficaz para uso como fertilizante e a nível municipal prolonga a vida dos aterros sanitários uma vez que esse tipo de resíduo, fração significativa dos resíduos sólidos urbanos coletados, deixa de ocupar espaço nas células do aterro. Quando aplicada em maior escala, a compostagem reduz potencialmente a geração de gases do efeito estufa pois, o gás carbônico produzido na aplicação da referida técnica é aproximadamente vinte vezes menos poluente que o metano, emitido no processo anaeróbio convencional que ocorre nos aterros [58], [65].

Vale ressaltar que para a realização da compostagem, algumas características devem ser ponderadas. Inicialmente, é necessário que haja uma análise gravimétrica dos resíduos sólidos gerados, de maneira a obter uma estimativa do volume de resíduo reciclável, orgânico e rejeito, a fim de identificar a existência de uma quantidade orgânica suficiente para a aplicação da técnica. Além disso, por se tratar de um processo biotecnológico, a eficiência da compostagem depende de condições favoráveis relacionadas com a temperatura, aeração, umidade, relação carbono/hidrogênio, pH, granulometria do material e inexistência de componentes que poluam e contaminem o solo, para a ação e interação satisfatória dos microrganismos [58].

2.2.2 Digestão anaeróbia

Os resíduos orgânicos também podem ser submetidos à digestão anaeróbia, um tratamento cuja decomposição dos resíduos biodegradáveis ocorre na ausência de oxigênio. O material converte-se em biocombustíveis, como biogás e etanol, que podem ser usados para a geração de eletricidade e calor ou como combustíveis de motores à combustão [66], [67].

O biogás, subproduto deste processo anaeróbio, é considerado uma fonte alternativa de energia. Sua composição depende da eficiência do processo de biodigestão com percentuais entre 50% e 70% de metano, 25% e 45% de dióxido de carbono e quantidade vestigiais de outros gases, como nitrogênio, oxigênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono e amoníaco [68].

O processo anaeróbio é dividido em quatro etapas sequenciais no interior do biodigestor: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Para que essas etapas ocorram de maneira eficiente, favorecendo a produção de biogás, é necessária a observação de alguns fatores de maior relevância que incluem: temperatura, pH, quantidade de nutrientes,

tempo de detenção hidráulica, relação carbono/nitrogênio (C/N) e concentração de sólidos [69].

O etanol, biocombustível na forma líquida, pode ser produzido a partir de três tipos principais de material orgânico, aqueles: contendo açúcar (cana de açúcar e melão), contendo carboidratos (mandioca, milho e batata) e contendo celulose (madeira ou resíduos agrícolas). Exceto os que já possuem compostos de açúcar fermentáveis, os produtos orgânicos que contêm carboidratos, não facilmente fermentáveis, necessitam ser inicialmente submetidos a um processo bioquímico de conversão em açúcares. Em seguida, são fermentados por leveduras e finalmente destilados a fim de remover água e outros produtos da fermentação. O etanol também é utilizado na indústria química, farmacêutica e cosmética [66].

2.2.3 Incineração

Outra alternativa à destinação final de resíduos orgânicos é a incineração e consiste na queima controlada que resulta na geração de energia elétrica, energia térmica e cinzas. Esse método tem como principal vantagem a diminuição do volume e da periculosidade dos resíduos, porém, significa o desperdício dos nutrientes contidos nos mesmos. A incineração também é um processo complexo, de modo que a operação segura de um incinerador torna o tratamento mais oneroso comparado a outras alternativas, além dos gases gerados no processo que contaminam a atmosfera [60].

2.2.4 Constituinte do betão

Na busca por alternativas que contribuam para a solução da problemática ligada à produção crescente e ao gerenciamento dos resíduos orgânicos, surge a possibilidade de aliar tais materiais à indústria da construção que também demanda soluções mais benéficas ambientalmente. Uma das opções consiste em converter resíduos orgânicos em partículas equivalentes à areia que assumem o papel do agregado fino no betão [70].

Os resíduos coletados para este fim passam por um processo de higienização, são triturados e peneirados de acordo com a espessura desejada. Em seguida, a mistura é esterilizada através de um autoclave para neutralizar as bactérias presentes e convertido em partículas compatíveis com a areia. São inúmeras as vantagens alcançadas com essa

utilização, incluindo a questão econômica sustentável, aumento da vida útil dos aterros e preservação dos recursos naturais [70].

Outros materiais de origem vegetal, animal ou de processos geológicos que podem ser utilizados com o intuito de melhorar as propriedades do betão, são as chamadas fibras naturais, como por exemplo: fibras de sisal, casca de arroz, linho, banana, óleo de palma, bagaço de cana e coco. As fibras oferecem ao betão um método prático, econômico e eficiente para superar deficiências como as microfissuras e melhorar seu desempenho mecânico, visto que detêm boas características relacionadas com a resistência à tração [70].

Diversos resíduos orgânicos foram considerados para a utilização no betão que, além do agregado fino citado anteriormente, também pode ser uma alternativa de substituição parcial do cimento, agregado grosso ou como material de reforço [71]. O pó residual obtido a partir de material orgânico apresenta-se como uma possibilidade que em substituição ao cimento, em pequenas proporções, melhora as propriedades do betão, uma vez que reduz a quantidade de vazios, resultando em uma maior densidade no material [72].

Das pesquisas já realizadas, justifica-se uma exploração adicional dos inúmeros resíduos orgânicos que podem ser utilizados, a fim de proporcionar maior segurança no seu uso oportuno como composto do betão. Na sequência, são explanados alguns dos resíduos estudados disponíveis na literatura.

2.2.4.1 Casca de pinheiro

O pinheiro-bravo é uma espécie conífera, resinosa, considerada abundante na flora portuguesa e com grande importância à nível ambiental, ecológico e patrimonial. A casca de pinheiro exerce a função de proteger a parte interior da árvore e transporta a seiva das folhas até o lenho. Dessa forma, é um resíduo de origem natural, utilizado comumente em jardins, para decoração e produção de calor. Devido à sua leveza e propriedades, sua aplicação é promissora em blocos para paredes de compartimentação e placas de revestimento interior, em substituição aos inertes nestes elementos de construção leve [73].

A casca de pinheiro também é aplicada ao solo com o intuito de proteger as raízes das plantas do frio e do calor excessivos. A partir da presente propriedade térmica, Marcos (2016) [74] investigou a possibilidade deste resíduo atuar como material alternativo de isolamento térmico na indústria da construção, observando que o mesmo possui uma

microestrutura alveolar perfeita, semelhante ao do Poliestireno extrudido (XPS). Ainda neste estudo, conclui-se que a casca de pinheiro, entre os materiais investigados, é o que apresenta maior densidade (250 kg/m^3) e maior condutibilidade térmica ($\lambda = 0,069 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$). A Figura 4 apresenta a casca de pinheiro estudada e seu respectivo granular.



Figura 4 - Casca de pinheiro no estado natural e granular

Fonte: [74]

Chege et al. (2014) [75] estudou a incorporação de um líquido extraído da casca de pinheiro processada em um digestor usando água, calor e pressão, como aditivo no betão, nas percentagens de 10%, 20%, 30%, 40% e 47,5% em relação ao teor de cimento. Para cada dosagem foram realizados testes de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 61 dias. Em comparação ao betão de referência, observou-se um aumento da trabalhabilidade em todas as dosagens, com uma relação água/cimento (a/c) estabelecida de 0,6055. A percentagem ótima encontrada foi de 20% de aditivo, que representou um aumento de resistência à compressão em relação ao betão de referência em todas as idades testadas e alcançou o maior valor aos 61 dias entre as amostras, de 54,5 MPa. Para o controle, a resistência nessa mesma idade era de 48,0 MPa.

O potencial de utilização da casca de pinheiro em elementos de construção também foi analisado por Fernandes (2019) [73]. Em dois processos de granulação, com o auxílio de um triturador e um moinho picador, foram obtidas partículas com diferentes granulometrias, conforme indica a Figura 5.



Figura 5 - Granulado obtido com o triturador e com o moinho picador

Fonte: [73]

Observou-se que o segundo processo de granulação resultou em uma maior quantidade de finos. No entanto, os dois métodos resultaram em um material contínuo com variabilidade de dimensões, fator favorável para a compacidade do produto final e redução do volume de vazios. Os provetes estudados foram compostos de água, granulado de casca de pinheiro e cimento e entre as composições testadas, a mais indicada para o estudo das propriedades, por apresentar-se mais vantajosa em termos de leveza e consistência e não evidenciar sinais de desintegração, refere-se a uma relação água/cimento de 0,40 e casca/cimento de 0,50 [73].

Dentre os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização física e mecânica, foi observado um coeficiente de capilaridade considerado elevado de $0,53 \text{ mg}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$. Esse valor qualifica o elemento como baixa qualidade, segundo a classificação estabelecida por Coutinho (1998) [76], que propõe os valores de $0,1 \text{ mg}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$ a $0,2 \text{ mg}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$ para elementos de elevada a média qualidade. Porém, os provetes mantiveram sua integridade após o contato com água.

Quanto à resistência ao fogo, o efeito foi considerado satisfatório, visto que não ocorreu propagação da chama. Resultados positivos também foram constatados referentes à resistência à compressão e os ensaios de comportamento térmico demonstraram que os valores obtidos para o coeficiente de condutibilidade térmica foram muito próximos dos coeficientes encontrados para lã de vidro, lã de rocha, XPS ou Poliestireno expandido (EPS), isolantes térmicos correntes [73].

2.2.4.2 Cinza de casca de arroz

Da produção de uma tonelada de arroz, são gerados aproximadamente 200 kg de casca [77]. Esse resíduo orgânico, subproduto agrícola produzido nas plantas de moagem,

torna-se um problema significativo nas áreas de cultivo, pois não é utilizado de maneira lucrativa e é geralmente queimado após a colheita, atuando de maneira negativa à nível ambiental. Dessa forma, outras soluções são acrescentadas a sua aplicação como, por exemplo, um material cimentício suplementar. Sua composição química varia dependendo do tipo de arroz, ano de colheita, clima e condições geográficas [78].

O estudo realizado por Habeeb e Mahmud (2010) [78], utilizou as cinzas de casca de arroz (Figura 6) moídas por diferentes períodos de tempo para serem obtidos diferentes tamanhos médios de partículas. A influência destas no betão foi analisada nos teores de 5%, 10%, 15% e 20% em substituição ao cimento. Os betões que incorporaram resíduos com a espessura mais fina, apresentaram-se mais densos. Para manter a trabalhabilidade, a adição de um superplastificante foi aumentada juntamente com a finura e a percentagem de cinza, pois o aumento da área específica de superfície, aumenta a demanda de água e a presença de cinza leva a uma hidratação mais rápida [79].

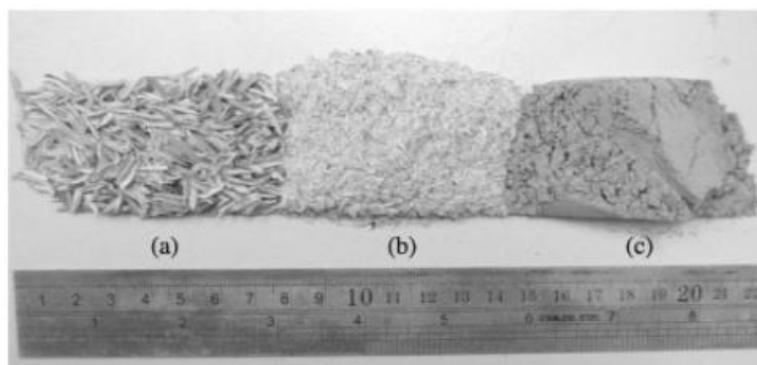


Figura 6 – (a) Casca de arroz (b) Cinza de casca de arroz queimada (c) Cinza de casca de arroz após moagem

Fonte: [78]

A resistência à compressão com 10% de substituição aumentou significativamente e a maior espessura de partícula apresentou os maiores valores de resistência alcançados. Pereira et al. (2015) [79] também encontraram resultados satisfatórios nos teores de substituição testados (0%, 5% e 10%) em relação ao ganho de resistência à compressão, que chegou ao percentual de 24% de aumento aos 28 dias. Neste estudo, a granulometria ideal encontrada para o uso da cinza foi de 12 μm , obtida após a moagem em um tempo de 30 minutos. Quanto ao módulo de elasticidade, observaram-se reduções pouco expressivas nos moldes com resíduo incorporado.

Zareei et al. (2017) [77] realizaram testes em proporções de 0% a 25% de cinza de casca de arroz em substituição ao cimento, com adição de 10% de micro-sílica em peso de

cimento e relação água/cimento de 0,40. A micro-sílica foi adicionada a fim de conferir ao betão melhora na resistência à corrosão, redução da taxa exotérmica, menor permeabilidade, mais durabilidade e menor interação entre o cimento alcalino e os agregados. As misturas com 25% de substituição apresentaram as menores proporções de absorção de água.

Devido às suas características pozolânicas, a cinza de casca de arroz pode ser utilizada para melhorar a área superficial da zona de transição entre a estrutura microscópica da pasta de cimento e o agregado no betão de alto desempenho. Houve melhora também na resistência à compressão e à tração, com os valores ótimos encontrados para a substituição de 20%. À compressão, aos 28 dias, o aumento ocorreu de 83,39 MPa (com 0% de casca) para 93,28 MPa (com 20% de casca) e à tração, também aos 28 dias, o crescimento foi de 5,83 MPa para 6,52 MPa [77].

2.2.4.3 Casca de coco

A casca de coco é um dos resíduos sólidos agrícolas mais comuns em muitos países tropicais. Depois que o coco é retirado, a casca é geralmente descartada, o que gera uma grande quantidade de lixo não explorado comercialmente e acumulado em aterros. Seu uso como material de construção, adicionado ao betão como um agregado leve, é um tópico interessante para estudos adicionais. A Figura 7 ilustra esse resíduo nas formas natural, triturada e em partículas graduadas.



Figura 7 – (a) Casca de coco natural (b) Casca de coco triturada (c) Partículas graduadas

Fonte: [80]

As propriedades do betão utilizando casca de coco como agregado grosso foram investigadas por Gunasekaran et al. (2011) [81], com um máximo de 12,0 mm de comprimento das partículas, cuja superfície côncava apresentava-se bastante lisa e a face convexa áspera. Os agregados utilizados estavam na condição de superfície saturada, pois a capacidade de absorção de água da casca de coco é relativamente alta em comparação ao agregado convencional. A experiência comprovou que as cascas cumprem os

requisitos para uso como agregado leve. O betão incorporado demonstrou melhor trabalhabilidade, resistência ao impacto mais alta e as resistências à compressão, tração e flexão comparáveis aos betão convencional. As melhores propriedades mecânicas foram encontradas para o traço 1:1,47:0,65:0,42 (cimento:agregado fino:casca de coco: água). Tendo em vista as vantagens da utilização deste resíduo como constituinte do betão, que incluem eficiência na utilização da casca que seria descartada e redução do esgotamento de fontes naturais, Kanojia e Jain (2017) [82] estudaram as quantidades viáveis de substituição dos agregados convencionais. Em um primeiro momento, a pesquisa considerou um betão de controle com resistência à compressão de 20 MPa e as proporções de 10%, 20%, 30% e 40% de substituição em volume de agregado convencional por resíduo, mantendo-se a relação a/c de 0,55. Na segunda etapa, foram variadas as proporções de agregado convencional e resíduo em seis taxas (0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de resíduo) com três diferentes relações a/c (0,55; 0,50; 0,45).

Foi observada uma redução na resistência à compressão, com o máximo de 22% de redução para 40% de substituição. A redução da relação a/c permite maior aproximação da resistência obtida para o betão convencional, possibilita maior taxa de resíduo adicionado, o que aumenta o consumo de cimento. No entanto, para a substituição de 5% não é necessário cimento adicional e para 10% é necessário apenas 3,6% de adição de cimento [82].

Betão com adição de fibras de coco também pode apresentar características promissoras. Conforme o estudo realizado por Silva et al. (2015) [83], os betões com adição de fibra sem tamanhos definidos e com uma quantidade de 2,4 kg/m³ de betão, apresentaram aumento na resistência à compressão, além de uma redução no número de fissuras observadas em relação aos provetes sem adição de fibra.

É possível, ainda, utilizar casca de coco em pó como material de enchimento no betão. Leman et al. (2017) [84] inseriram taxas de 1%, 3% e 5%, as quais alcançaram uma resistência à compressão de 47,65 MPa, 45,6 MPa e 40,55 MPa, respectivamente. O acréscimo de 3% demonstrou ser uma boa opção visto que obteve a menor taxa de absorção de água, aliada a resistência alcançada. Misturas sem o pó da casca de coco como material de enchimento resultaram em uma resistência de 42,30 MPa.

2.2.4.4 Cinza de bagaço de cana

O bagaço é gerado como resíduo do processamento do açúcar e do álcool. É utilizado para cogeração de energia por meio da queima em caldeiras, que resultam ao final nas

cinzas residuais do bagaço da cana-de açúcar. Essas cinzas podem ser aproveitadas como adubação orgânica no cultivo da cana, embora seja um material com poucos nutrientes [85]. Figura 8 mostra a cana-de açúcar natural, o bagaço obtido da cana e as cinzas de bagaço utilizadas como material suplementar na produção de betão.



Figura 8 - Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Fonte: [92]

Lima et al. (2011) [85] avaliaram a durabilidade de betões que utilizaram cinza de bagaço de cana em substituição ao agregado fino. Foram produzidos traços com 0%, 30% e 50% de substituição. Os betões elaborados com cimento do tipo CP II E 32 (cimento Portland composto com escória, segundo a denominação brasileira normalizada pela NBR 11578 (1991) [86]) com presença de cinza alcançaram maiores resistências à compressão e abrasão em relação ao betão de referência. Posteriormente, Almeida et al. (2019) [87] verificaram que, em uma proporção de até 30% em substituição ao agregado fino, a cinza também contribui para reduzir a profundidade de penetração de cloretos e retarda o início da corrosão em betões produzidos à base de cimento que contém escória de alto-forno.

Fernandes et al. (2015) [30], em seu estudo, concluíram que o betão com 20% de cinza de bagaço de cana em substituição ao agregado fino, demonstrou melhor desempenho, com as resistências à compressão e à tração maiores em relação ao padrão. Quanto à penetração de cloretos, esse traço apresentou uma média 30,30% menor que o traço de referência, indicando que as amostras de cinza possuem baixa acidez, o que influencia o aumento da alcalinidade do betão e dificulta o avanço da frente de carbonatação.

Os valores de resistência ao ataque químico (ácido láctico) assemelham-se ao betão convencional. Menor desgaste superficial também foi observado para o material com a percentagem de 20% de resíduo. Apenas no ensaio de absorção por capilaridade foi encontrado um melhor desempenho do traço de referência, sem adição de cinza. Entretanto, tendo em vista o desempenho geral do betão incorporado, os valores foram considerados equivalentes entre si.

A cinza de bagaço de cana também pode ser utilizada como substituto parcial do cimento. Zareei et al. (2018) [88] examinaram essa adição no betão comum, leve e autoadensável. Em geral, a presença do resíduo melhorou o desempenho do betão leve mais do que os outros tipos estudados (comum e autoadensável). Os resultados para a resistência à tração e à compressão indicou que a taxa de 5% de substituição melhorou as propriedades mecânicas do betão comum e do betão leve. Além disso, com a taxa de 5%, a resistência ao impacto do betão leve e autoadensável aumentou em 50%. Observou-se também, um aumento pela demanda de água com a presença da cinza devido ao teor de carbono e à irregularidade e porosidade do resíduo utilizado. Os testes de velocidade de pulso ultrassônico (UPV), indicaram bons resultados para os três tipos analisados, nas substituições de 5%, 10% e 15%.

Batool et al. (2020) [89] substituíram o cimento por cinzas de bagaço de cana em taxas de 5% a 30%, por peso, a serem comparados com um betão de referência produzido com 100% de cimento. As cinzas utilizadas foram obtidas do bagaço queimado, seco em estufa e posteriormente peneirado a fim de remover o material não queimado e alcançar um tamanho máximo de partículas de 150 μm . Nenhum superplastificante foi utilizado e a relação a/c era de 0,50, com um traço de 1:2:4 (cimento: agregado fino: agregado grosso). O estudo permitiu constatar que a cinza atende os requisitos de propriedades pozolânicas e, portanto, pode ser utilizado como uma material cimentício suplementar. Verificou-se que a trabalhabilidade do betão é aumentada com a presença da cinza e a substituição de 10% pode ser considerada ideal para obter melhor desempenho quanto à resistência à compressão, à tração e à flexão. A condutividade térmica demonstrou uma queda consistente com o maior teor de cinzas, mostrando-se eficaz para fins de isolamento térmico [89].

2.2.4.5 Cortiça

A cortiça é um material leve, renovável e biodegradável extraído da casca do sobreiro (Figura 9). Possui baixa densidade e comportamento viscoelástico, além de características isolantes, com baixa condutividade térmica, boa absorção sonora e resistência à água. Os sobreiros atuam na conservação do solo e retenção de dióxido de carbono e, portanto, a extração da cortiça constitui uma prática que permite obter um produto valioso enquanto mantém as funções ecológicas. A indústria da cortiça envolve a produção de derivados de cortiça natural (rolhas e discos de cortiça natural) e de granulados e aglomerados (rolhas técnicas, painéis, placas, entre outros). Tal produção gera subprodutos compostos

de materiais granulados ou em pó que são, por exemplo, rejeitados na etapa de seleção da produção de rolhas ou resíduos da fase de corte [90], [91].



Figura 9 - Processamento da cortiça e seu tamanho de partícula

Fonte: [92]

Panesar e Shindman (2012) [90] estudaram o impacto da cortiça no betão, verificando que tamanhos mais finos desse resíduo levam à melhores propriedades mecânicas. A saturação de umidade da cortiça antes da sua utilização também mostrou efeitos favoráveis. A melhor percentagem encontrada foi de 10% de substituição de areia por resíduos de 0,50 mm a 1,00 mm, a qual resultou em um betão de resistência considerada normal. Maiores espessuras de partículas diminuem a resistência e aumentam a porosidade total. Além disso, a condutividade térmica dos compósitos diminui à medida que a densidade do betão também diminui, isto é, conforme aumenta-se o teor de cortiça. A resistência térmica medida para o betão contendo 20% de cortiça foi 46% maior em comparação ao betão de controle.

Costa et al. (2013) [93] submetem betão com diferentes percentagens (20%, 25%, 30% e 40%) de substituição da areia por um granulado de cortiça expandida, a temperaturas de 90 °C a 600 °C. Os resultados revelaram que a presença da cortiça produz um efeito positivo no desempenho do betão submetido a altas temperaturas visto que, apesar da menor resistência inicial, a resistência à compressão decai a uma taxa mais baixa conforme ocorre o aumento da temperatura.

Boussetoua et al. (2020) [94] também verificaram a inserção de 25%, 50% e 75% de cortiça relativamente à areia. No estudo, observou-se que a resistência mecânica e a condutividade térmica diminuem com o aumento do conteúdo de cortiça. Para um volume mais alto de cortiça, o material pode ser usado para fins não estruturais, comportando-se como um bom isolante térmico e um bom regulador para variações internas de umidade relativa. Com menor volume de cortiça, o material pode ser classificado como betão estrutural e isolante.

Parra et al. (2019) [95] avaliaram betão de alto desempenho com substituição de 48% dos agregados por agregados leves (30% polipropileno e 18,5% cortiça). Substituir agregado tradicional pelo plástico não demonstrou grandes alterações na resistência, enquanto que a cortiça reduziu significativamente a densidade. A combinação de ambos os agregados leves permitiu equilibrar a densidade e resistência para obter betão leve estrutural.

2.2.4.6 Cinza de casca de amendoim

A casca é a camada externa do amendoim e constitui certa de 25-35% da cápsula (Figura 10). O restante é a porção preenchida pela semente (65-75%). No cultivo do amendoim, a casca é considerada um resíduo sólido e, por esse motivo, compõe um material com potencial para promover a gestão de resíduos a baixo custo, reduzir a poluição e auxiliar economicamente o agricultor, incentivando a produção. A casca de amendoim também é utilizada como combustível em moinhos de óleo, por exemplo. Este tipo de utilização gera cinzas que podem atuar como um material alternativo a ser aplicado de maneira vantajosa na indústria da construção [96], [97].



Figura 10 - Casca de amendoim

Fonte: [92]

A casca de amendoim pode ser utilizada como substituto parcial dos agregados finos no betão. Sada et al. (2013) [97] obtiveram cascas secas e trituradas para reduzi-las a tamanhos compatíveis com os compostos finos. Várias taxas de substituição foram testadas, observando que aumentar a percentagem deste resíduo nos provetes, resulta em uma redução das densidades e valores de resistência à compressão. A partir de 25% de presença de casca de amendoim, o betão constitui-se leve, cuja utilização compreende locais com pouca tensão requerida. A casca de amendoim reduz a trabalhabilidade do betão devido à alta absorção de água e, dessa forma, o umedecimento prévio do resíduo pode contribuir nesse quesito.

A alteração de agregado fino por casca de amendoim também foi testada por Tata et al. (2015) [98] a taxas de 0% a 100%. Verificou-se que os percentuais que podem ser usados para substituir a areia por resíduo encontram-se na faixa de 30% a 70%, de forma a se enquadrarem nas densidades adequadas para betão leve. Ainda, o betão incorporado com casca pode ser usado para funções não estruturais ou isolantes devido à baixa resistência à compressão e baixa densidade.

Olutoge et al. (2013) [99] investigaram a mistura da cinza de casca de amendoim com cimento na produção de betão, expostos a ambientes de sulfato. O resultado mostrou que o betão com 10% de substituição do cimento por casca obteve o melhor desempenho nas soluções químicas testadas ($MgSO_4$, $NaSO_4$ e $CaSO_4$), com um aumento na resistência à compressão comparáveis aos alcançados com o uso de apenas cimento comum.

Lakshmi e Sagar (2017) [96] observaram que 10% de cinza de casca de amendoim em substituição ao cimento, com um traço de 1:2:4 (cimento:agregado fino:agregado grosso) e relação a/c de 0,60, alcançou as melhores resistências à compressão e à tração. A substituição de 15% apresentou o melhor desempenho para a resistência à flexão.

2.2.4.7 Resíduos municipais

Os resíduos urbanos ou municipais, são definidos pelo Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de setembro [100] como "o resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações". Ou seja, são resultantes da atividade doméstica e comercial dos centros urbanos, não abrangendo os veículos em fim de vida, óleos usados, pneus usados, resíduos de construção e demolição, resíduos provenientes da produção industrial, da agricultura, silvicultura, das fossas sépticas e das redes de esgoto e tratamento, conforme cita o Decreto-Lei n.º 152-D/2017 de 11 de dezembro [101].

De acordo com os dados divulgados pela EUROSTAT (2019) [102], a quantidade de resíduos municipais gerados por pessoa na União Europeia em 2018, alcançou 489 kg, aproximando-se do resultado relativo a 2017, de 487 kg por pessoa. A Figura 11, apresenta o comportamento relativo a esta geração para cada um dos Estados-Membro, nos anos de 2005 em comparação a 2018, exceto para o Reino Unido, Grécia, Irlanda e Chipre, para os quais constam dados de 2017.

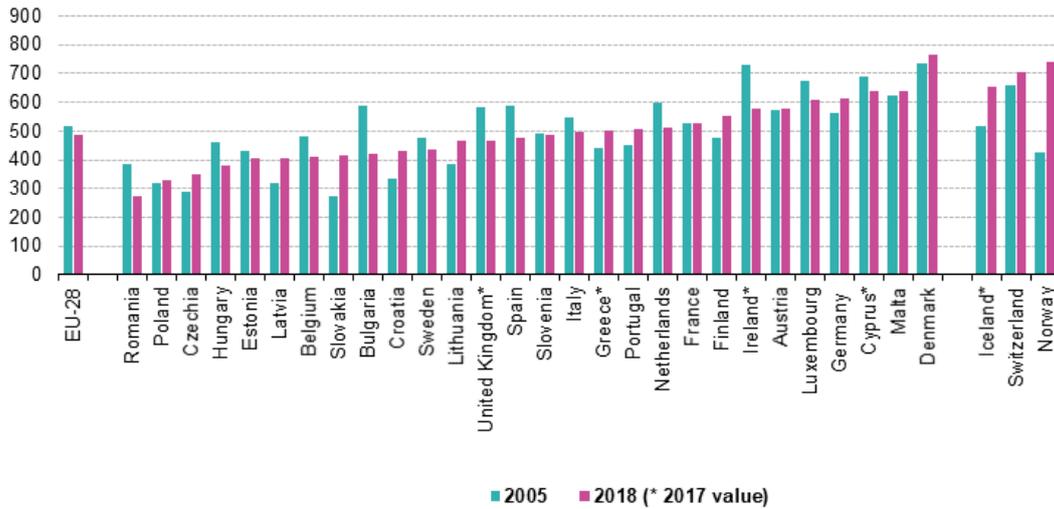


Figura 11 - Resíduo municipal gerado na UE em 2005 e 2018 (kg per capita)

Fonte: [102]

Em Portugal, o ano de 2018 representou um aumento de 4,2% de resíduos municipais gerados em relação ao ano anterior. Este aumento possivelmente está associado ao crescimento econômico, o que evidencia a dificuldade em atingir o objetivo de dissociar a produção de resíduos da melhoria da situação econômica [103]. A Figura 12 traz a evolução dos números de produção e captação anuais no país.

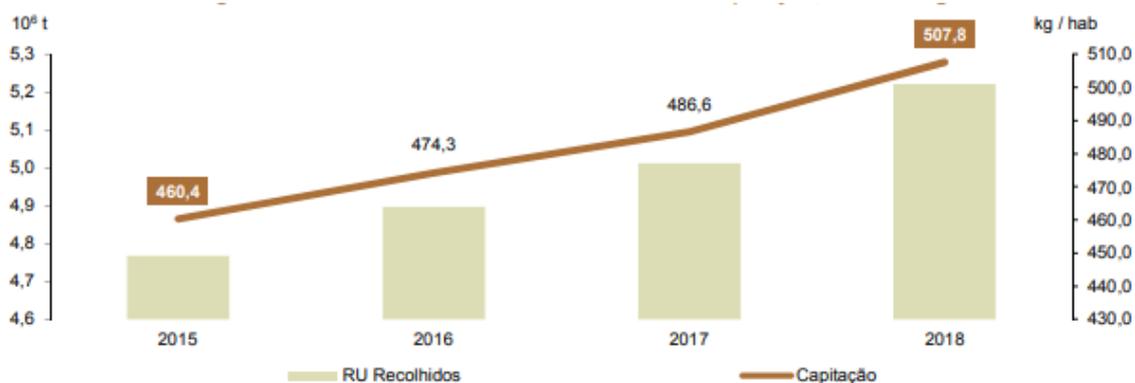


Figura 12 - Evolução da produção de resíduos municipais e captação anual em Portugal

Fonte: [104]

Pela definição, os resíduos municipais incluem também variedades de materiais inorgânicos produzidos nos domicílios, comércio e nos centros urbanos em geral. Entretanto, a maior parte caracteriza-se como resíduo orgânico, sendo os bioresíduos protagonistas desta produção, conforme exemplifica a Figura 13. O conceito de bioresíduos é estabelecido pela Diretiva (UE) 2018/851 de 30 de maio [24], como os

resíduos biodegradáveis de jardins e parques, os resíduos alimentares e de cozinha das habitações, dos escritórios, restaurantes e similares das unidades de transformações de alimentos.

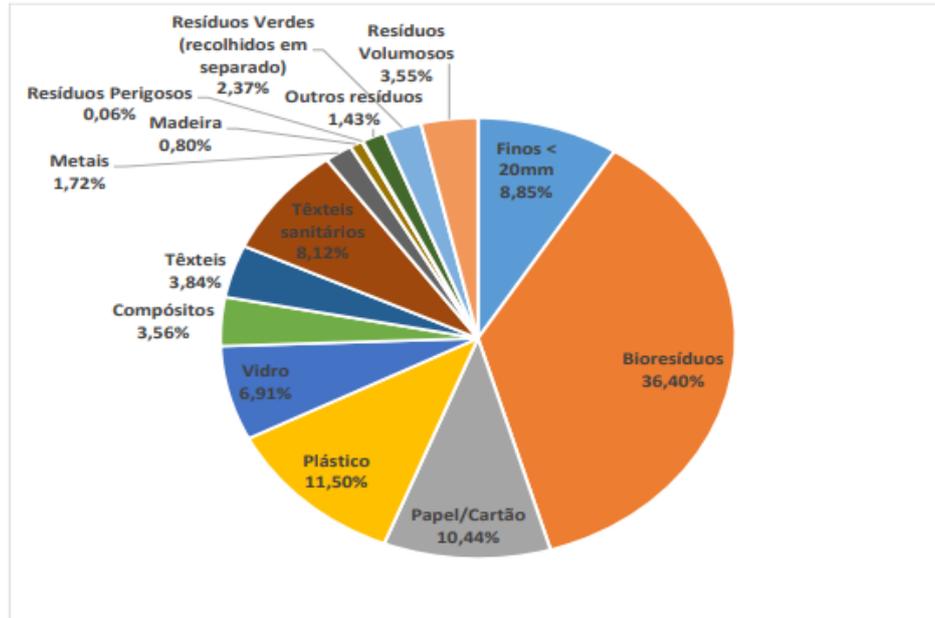


Figura 13 - Caracterização física dos resíduos municipais produzidos em Portugal, 2018

Fonte: [103]

A grande maioria dos resíduos gerados têm como destino final os aterros, seguido da eliminação/valorização energética (EVE), reciclagem, compostagem/digestão anaeróbia e outras valorizações, como indica a Figura 14.

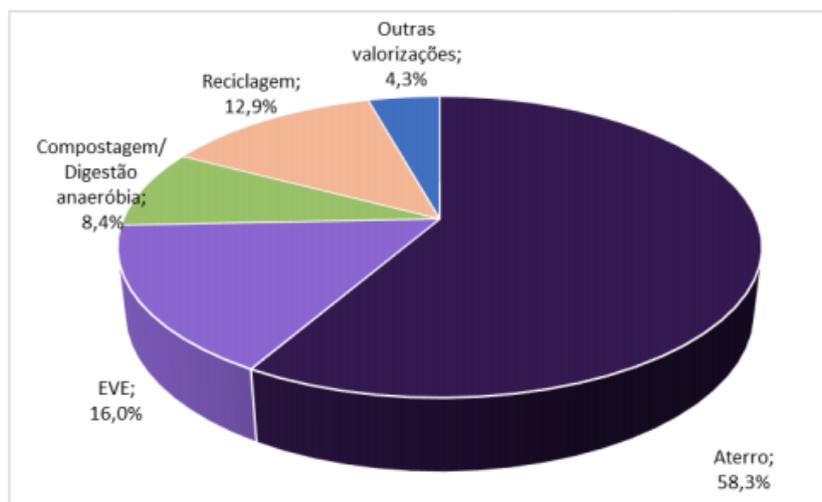


Figura 14 - Destinos finais dos resíduos municipais em Portugal, 2018

Fonte: [103]

No Brasil, segundo a Abrelpe - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2019) [105], foram geradas 79 milhões de toneladas de resíduos urbanos em 2018, uma média de 380 kg por pessoa no ano, que representa um aumento de pouco menos de 1,0% em relação ao ano de 2017. A Figura 15 apresenta a diferença observada entre os anos e aponta que cada brasileiro gerou pouco mais de um quilo de resíduos diários, em média.

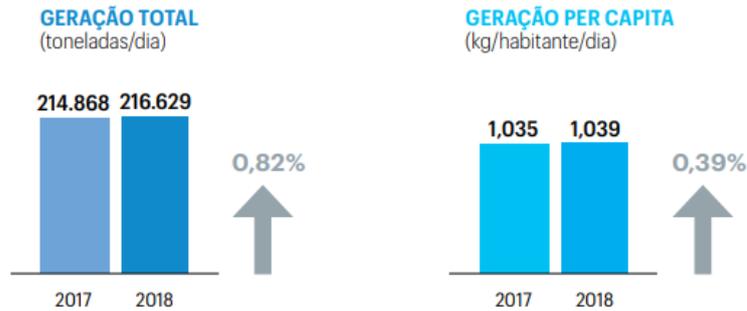


Figura 15 - Geração de resíduos urbanos no Brasil

Fonte: [105]

Quanto à destinação final, os aterros receberam 59,5% dos resíduos coletados. O restante (40,5%) foi despejado em locais inadequados, ou seja, 29,5 milhões de toneladas acabaram em lixões à céu aberto ou aterros controlados, locais em que não há a aplicação de medidas necessárias para garantir a saúde da população e conter os danos ao meio ambiente.

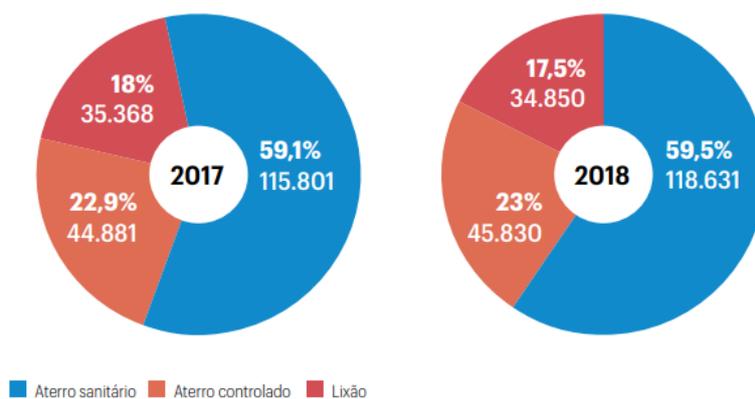


Figura 16 - Disposição final dos resíduos municipais no Brasil, 2017 e 2018

Fonte: [105]

Tais estatísticas demonstram a tendência de crescimento na geração dos resíduos urbanos no país que pode alcançar a quantidade de 100 milhões de toneladas por volta de 2030. O

Brasil ainda enfrenta um grande déficit na coleta seletiva, distante de ser universalizada, pouco crescimento nos índices de reciclagem, além da presença de lixões em muitas regiões [105].

Apesar de o mundo avançar em direção a um modelo mais moderno e sustentável na gestão dos resíduos, é importante destacar a dificuldade, evidenciada pelos dados, de reduzir a quantidade de resíduos gerados enquanto ocorre crescimento da população nos municípios. Por esse motivo, os resíduos urbanos caracterizam-se como um material que deve ser inserido no campo de soluções para reutilização. Integrada ao contexto da incorporação de resíduos em materiais alternativos e sustentáveis para a construção, esta categoria de resíduos, ainda pouco utilizada, é objeto de estudo experimental do presente trabalho.

Dentre as pesquisas desenvolvidas com resíduos municipais, Izquierdo e Ramalho (2016) [72] estudaram a viabilidade de incorporar ao betão pó residual obtido do tratamento de resíduos orgânicos municipais, em substituição a parte do cimento. Os resíduos utilizados foram inicialmente dispostos em um tapete magnético para extração de materiais metálicos. Em seguida, os materiais inorgânicos, como vidro, plástico e borracha foram segregados manualmente. Desse processo, restaram apenas os orgânicos sujeitos a um moinho para reduzir o tamanho das partículas.

Posteriormente, os mesmos foram submetidos a uma câmara com adição de reagentes químicos, a fim de estabilizar resíduos gordurosos e de origem humana ou animal, bem como encapsular quimicamente os metais pesados. A reação química ocorreu por aproximadamente 40 minutos até obter-se uma massa isenta de contaminantes químicos, biológicos e patogênicos. Por fim, o material foi seco ao ar livre, microionizado e transformado em pó.

A partir do tratamento e análise relativa à composição química e ao tamanho de partículas do material, avaliou-se que o pó residual é inerte, não contaminante e adequado para uso em betão. Das proporções de substituição utilizadas, com uma relação água/cimento de 0,70 e relação agregado/cimento de 10,00, a taxa de 5% demonstrou o melhor desempenho, resultando no aumento da densidade e melhora das propriedades mecânicas do betão, visto que as partículas residuais tendem a ocupar os vazios na pasta de cimento. Resíduos orgânicos municipais também foram adicionados na fabricação de blocos de solo-cimento com as caracterizações realizadas a partir dos padrões de três países, nomeadamente Brasil, Espanha e Alemanha. As três composições avaliadas consideraram 10% de cimento sem resíduos, 10% de cimento com 20% de resíduos e esta última

composição com a adição de 1% de sílica ativa em relação ao cimento. A sílica ativa foi inserida para melhorar as características dos blocos com resíduos, porém, não foi uma solução eficiente. Os blocos atenderam os requisitos de absorção de água e resistência à compressão e os testes de resistência à compressão sob alta temperatura demonstraram ganhos em todos os blocos a partir de 200°C [106].

Nesta pesquisa, o composto foi combinado com carvão ativado devido à presença consideravelmente elevada de odores. A melhor proporção encontrada foi de 1:2 (2 partes de resíduo para cada parte de carvão). No entanto, esta solução não foi utilizada na sequência do trabalho devido às quantidades requeridas aliadas ao fator econômico [106]. Na tentativa de minimizar os impactos causados pelos aterros sanitários e reduzir o volume dos resíduos municipais destinados a estes locais, a incineração apresenta-se como um elemento integrante da gestão de resíduos no mundo. As cinzas obtidas desse processo foram utilizadas em substituição parcial da areia natural para produção de betão por Graupmann et al. (2019) [107]. As cinzas passaram por secagem, com uma umidade final em torno de 15%. Por conterem elementos não incinerados totalmente, a amostra passou por peneiração e foi adicionado ao betão nas percentagens de 5%, 10% e 15% em relação ao agregado fino, com um traço de 1:2:3 (cimento:agregado fino:agregado grosso) e relação a/c de 0,60. Para a resistência à compressão, o teor de 5% de cinza apresentou os valores mais elevados, próximos ao traço de referência (apenas com agregado natural), principalmente nas idades iniciais.

Czop e Łażniewska-piekarczyk (2020) [108] estudaram a valorização da escória obtida do processo de incineração de resíduos municipais, como complemento do cimento em argamassas e betões. Para verificar sua influência, o teor de 30% de escória em relação ao cimento foi adicionado à composição. Os resultados obtidos possibilitam o uso desse resíduo na indústria da construção, não sendo recomendado a utilização para a produção de betão reforçado ou expostos a umidade permanente acima de 75%, pois os mesmos tendem a alterar o volume sob condições de umidade, devido à presença de carvão não queimado. Vale ressaltar que a composição da escória depende dos resíduos municipais destinados a incineração, por isso devem ser conduzidos testes relativos à variabilidade do conteúdo químico do subproduto em questão.

2.3 Blocos de betão

A alvenaria pode ser definida como a obra constituída por unidades artificiais ou naturais sobrepostas, organizadas e fixadas por argamassa ou encaixe conforme o modelo da unidade utilizada [109]. Essa técnica é um dos mais clássicos sistemas construtivos da contemporaneidade, porém, desde as idades mais antigas são relatados exemplos de construções em alvenaria, como é o caso das pirâmides de Gizé, que não são estruturalmente complexas, mas tornam-se admiráveis pela falta de conhecimento técnico, dificuldade na execução e desconhecimento das propriedades dos materiais encontrados na época aproximada de 2600 a.C [110].

As unidades de alvenaria são disponíveis na forma de tijolos e blocos, produzidas com argila, betão ou silicato de cálcio. Os blocos de betão podem ser caracterizados, segundo Medeiros e Sabbatini (1993) [111], por dimensões superiores a 120x55x250 mm, constituídos pela mistura homogênea e adequadamente proporcionada de cimento Portland, agregado fino e grosso, conformada por vibração e prensagem.

A produção dos blocos de betão inclui as etapas de:

- Proporcionamento e mistura dos materiais;
- Moldagem do material através de vibração e prensagem; e
- Cura, iniciada após a desmoldagem dos blocos.

Andolfato et al. (2002) [112], após um estudo sobre a dosagem dos blocos, concluíram que a quantidade de cimento tem forte influência da rigidez dos blocos e pequena influência na sua resistência à compressão, além de que a relação a/c não afeta significativamente a resistência à compressão, como ocorre no betão plástico. Desse estudo também se obteve a informação de que o grau de compactação, que está relacionado com a quantidade de água da mistura, tem grande influência na resistência final dos blocos e, desse modo, é importante a determinação da umidade ótima para cada traço que apresente diferentes relações entre cimento, agregado grosso e agregado fino.

Os principais insumos empregados na fabricação dos blocos de betão, segundo Medeiros e Sabbatini (1993) [111] são: pedra britada de graduação zero e pedregulho natural para a fração grossa; areia natural e areia artificial para a fração fina; cimento Portland para a função aglomerante; água e, conforme a necessidade, podem ser acrescentados aditivos (redutores de água e plastificantes, por exemplo).

Os blocos de betão produzidos deverão adequar-se a um conjunto de requisitos gerais e específicos, função da tecnologia de produção, do seu destino e das exigências funcionais que se pretendem satisfazer. Normalmente, a fixação dessas características, bem como dos ensaios necessários à sua determinação é realizada em normas que incluem exigências geométricas, físicas e mecânicas [109].

2.3.1 Requisitos para blocos de betão

A NBR 6136 (2016) [113] estabelece requisitos para a produção e aceitação de blocos vazados de betão simples no Brasil. Segundo a referida norma, o bloco vazado de betão é o componente para execução de alvenaria, com ou sem função estrutural, vazado nas faces superior e inferior, cuja área líquida (descontadas as áreas dos vazios) é igual ou inferior a 75% da área bruta (área da seção perpendicular aos eixos dos furos, sem desconto das áreas dos vazios).

De acordo com a norma, os blocos devem atender aos limites de resistência, absorção e retração linear por secagem, estabelecidos na Tabela 1, sendo subdivididos em três classes de acordo com a função.

Tabela 1 - Requisitos para os blocos vazados de betão da NBR 6136

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial (aos 28 dias) (MPa)	Absorção (%)				Retração (%)
			Agregado normal		Agregado leve		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$			
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$			
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$

Fonte: [112]

Em Portugal, os blocos de betão são normalizados pela NP EN 771-3 (2016) [114], que contém algumas especificações para as unidades de alvenaria, além do Eurocódigo 6 (2005) [115] que estabelece regras gerais para estruturas de alvenaria reforçada e não reforçada. Na sequência são apresentadas algumas características referentes à dimensão dos blocos, percentagem de furação, massa volúmica dos blocos, absorção de água por imersão e resistência à compressão e à tração dos blocos.

2.3.1.1 Dimensões dos blocos e percentagem de furação

A NP EN 771-3 (2016) [114] recomenda que os blocos devem apresentar reentrâncias ou dispositivos de encaixe das juntas, sendo que a espessura mínima dos septos interiores e exteriores na face de apoio não deve ser inferior a 20 mm ou a 1,5 vezes a máxima dimensão do agregado. O documento também fixa exigências para as arestas e para a ortogonalidade das faces, bem como a sua regularidade plana, admitindo tolerâncias para as dimensões exteriores, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Tolerâncias das dimensões exteriores da NP EN 771-3

Tipo de tolerância	Dimensão resultante da superfície do molde	Dimensão resultante do molde
Normal	4 mm	5 mm
Fina	2 mm	3 mm

Fonte: [114]

A norma portuguesa ainda classifica os blocos em função da percentagem de furação:

- Blocos maciços ou equivalentes: furação vertical limitada a 25%;
- Blocos perfurados: furação vertical entre 25% e 50%;
- Blocos vazados: furação vertical superior a 50%; e
- Blocos furados horizontalmente: furação horizontal não superior a 50%.

O Eurocodigo 6 (2005) [115] define o agrupamento das unidades de alvenaria, apresentados na Tabela 3, em função da furação vertical e da espessura da paredes exteriores e septos interiores.

Tabela 3 - Requisitos geométricos do Eurocodigo 6

	Grupo 1	Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
		Furação vertical		Furação horizontal			
Volume de todos os furos (% de volume total)	≤ 25	> 25; ≤ 55		> 25; ≤ 70		> 25; ≤ 50	
Volume de cada furo (% do volume total)	≤ 12,5	≤ 30		≤ 30		≤ 25	
		septo	parede	septo	parede	septo	parede
Espessura das paredes e septos (mm)	-	≥ 15	≥ 18	≥ 15	≥ 15	≥ 20	≥ 20
Espessura combinada das paredes e septos (mm)	-	≥ 18		≥ 15		≥ 45	

Fonte: [114]

2.3.1.2 Massa volúmica dos blocos

Nos blocos, a massa volúmica é determinada pela NP EN 772-13 (2002) [116] e é obtida através do quociente entre a massa do bloco e o volume de betão que o compõe. De acordo com Oliveira (1995) [117], os blocos de betão normal deverão possuir uma massa volúmica de 2200 kg/m³ a 2500 kg/m³ e os blocos de betão leve uma massa volúmica de 400 kg/m³ a 1800 kg/m³. Smith e Andres (1988) [118] definiram que para o betão normal a massa volúmica corresponde a um valor maior ou igual a 2000 kg/m³, enquanto os blocos de betão leve possuem valor inferior a 1680 kg/m³.

A NP EN 206-1 (2007) [119] que especifica requisitos para o betão, também traz parâmetros relacionados com a massa volúmica, sendo considerado o intervalo de 800 kg/m³ a 2000 kg/m³ para o betão leve, 2000 kg/m³ a 2600 kg/m³ para betão normal e valores superiores a 2600 kg/m³ para betão pesado.

2.3.1.3 Absorção de água por imersão dos blocos

Para obter a absorção máxima de água por imersão dos blocos pode ser determinada segundo a orientação dada pela NP EN 1097-6 (2016) [120]. A determinação desse parâmetro é função da massa específica do betão endurecido constituinte e sua apresentação pode ser feita em percentagem ou em massa por volume, desde que seja conhecido o volume dos respectivos blocos. A norma brasileira NBR 12118 (2013) [121] também estabelece um método para determinar a absorção de água de blocos de betão simples.

A especificação LNEC E 394 (1993) [122] estabelece um processo para determinar a absorção do betão endurecido por imersão, normalmente aplicado em provetes de betão, mas que pode igualmente ser utilizado para blocos. De acordo com Smith e Andres (1989) [118], os blocos de betão normal apresentam uma capacidade de absorção entre 112 kg/m³ e 160 kg/m³.

2.3.1.4 Resistência à compressão dos blocos

A determinação da resistência à compressão dos blocos de betão segue as especificações da NP EN 772-1 (2011) [123] que recomenda a execução do ensaio em uma amostra de dez blocos desde que a variação de resultados seja inferior a 15%. Para calcular o valor médio de cada amostra é efetuado o quociente entre a carga de compressão e a área de bloco carregada de acordo com as suas dimensões. Os valores obtidos devem ser

corrigidos através do fator de forma para que seja encontrada a resistência normalizada da amostra.

A norma portuguesa não estabelece valores para a resistência à compressão, sendo este um valor normalmente declarado pelo fabricante dos blocos. Em geral, são encontradas fichas técnicas que apresentam resistências superiores a 2,0 MPa (para betão leve) e 3,5 MPa (para betão normal). Esses valores dependem da forma de compactação aplicada, geometria dos agregados e da utilização dos blocos para funções estruturais ou não.

Para provetes produzidos a fim de classificar o betão em relação à sua resistência à compressão, a NP EN 206-1 (2007) [119] estabelece classes para provetes de forma cilíndrica, com dimensões de 15x30 cm, e cúbica, com dimensões de 15x15x15 cm, elaborados com betão de massa volúmica normal, pesado e leve. Para provetes cúbicos, utilizados no presente estudo, as classes pertencem a uma escala de no mínimo 10 MPa e no máximo 115 MPa.

Abd e Habeeb (2014) [124], realizaram estudos para relacionar as classes normalizadas com provetes de dimensões menores, nomeadamente 10x10x10 cm. Com uma composição de betão normal a relação entre a resistência à compressão do provete 10x10x10 cm e a resistência à compressão do provete 15x15x15 cm resultou em 1,07 aos 28 dias de idade. Rajiv Banarjee et al. (2015) [125] também realizaram ensaios com diferentes misturas de betão para definir uma relação entre os provetes com as dimensões distintas e encontraram valores que variam de 1,01 a 1,03 aos 28 dias.

2.3.1.5 Resistência à tração dos blocos

De acordo com Medeiros e Sabbantini (1993) [111], as principais limitações estruturais da alvenaria estão relacionadas às tensões de tração, apesar dos principais critérios de projeto e classificação dos blocos de betão levarem em consideração a sua resistência à compressão. Shrive (1982) [126] relata que as tensões de tração concentram-se nos septos dos blocos e são diretamente responsáveis pela ruptura da alvenaria carregada axialmente à compressão. Desse modo, o entendimento da resistência à tração torna-se importante para o conhecimento dos mecanismos de falha, sendo que quanto maior a resistência à tração do bloco, maior é a resistência da alvenaria.

Os ensaios de resistência à tração podem ser realizados com a unidade ou com pedaços retirados das unidades, conforme Drysdale et al. (1994) [127]. Os autores citam o ensaio de resistência à flexão baseado na teoria elástica linear e o ensaio de tração indireta (por compressão diametral) que permitem obter uma medida comparativa com a resistência à

tração. Esses ensaios levam a resultados em torno de 10% da resistência à compressão das unidades.

A resistência do betão à tração indireta (por compressão diametral) é determinada de acordo com a NP EN 12390-6 (2011) [128]. Segundo a NBR 6118 (2014) [129], a resistência do betão à tração direta pode ser considerada igual a 0,9 da tração indireta.

Capítulo 3

3 Estudo Prévio

Após o levantamento da bibliografia existente acerca da utilização de resíduos orgânicos como constituintes do betão, é realizado um estudo prévio. Este capítulo engloba as características do bloco comercial de referência, fabricado pela empresa Pavimir, bem como uma caracterização do composto orgânico oriundo da empresa Resíduos do Nordeste. O desenvolvimento é composto por duas etapas: 1) o estudo da composição de referência e 2) as fases do estudo das composições com as quantidades pré-definidas de resíduo incorporado.

3.1 Caracterização do bloco comercial objeto de estudo

A elaboração do presente estudo possui como base a composição do bloco de compartimentação para alvenaria de uso corrente, não estrutural, apresentado na Figura 17, produzido e comercializado pela empresa Pavimir.

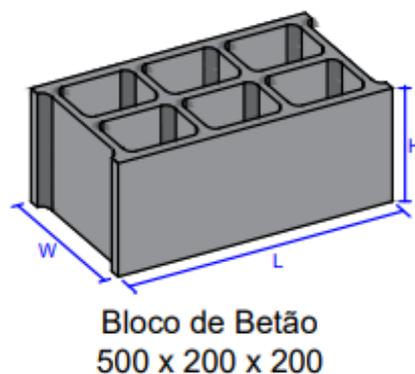


Figura 17 - Bloco vazado de vedação

Fonte: [130]

As características referentes ao bloco são descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características do bloco de referência

Tipo de betão	Normal ($\rho \approx 2100\text{kg/m}^3$)
Designação	500x200x200
L (mm)	500
H (mm)	195
W (mm)	200
Massa volúmica aparente seca (kg/m^3)	937
Percentagem de furação	63%
Espessura mínima dos septos interiores (mm)	15
Espessura mínima dos septos exteriores (mm)	15
Massa (kg)	$\approx 17,00$
Volume (cm^3)	7215
Resistência à compressão média (MPa)	$\geq 3,50$

Fonte: [130]

O bloco em questão está em conformidade com a NP EN 772-1 (2011) [123] e com a norma brasileira NBR 6136 (2016) [113], a qual estabelece a resistência característica à compressão mínima de 3,00 MPa aos 28 dias para blocos vazados de betão enquadados na classe C, sem função estrutural e para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo.

O processo de fabrico dos blocos faz-se recorrendo a sistemas automáticos e compactação pesada, conforme exemplifica a Figura 18. O betão produzido é seco, decorrente da tecnologia envolvida para a produção de blocos que, diferente da produção de betão estrutural convencional, compreende uma quantidade de água significativamente menor, apesar dos materiais constituintes serem semelhantes. Isso ocorre para que seja possível realizar a desmoldagem dos blocos logo após a compactação do betão no molde. Desse modo, o betão utilizado na fabricação de blocos apresenta uma consistência bastante seca, ao contrário do betão armado utilizado em estruturas que detém características plásticas [131].

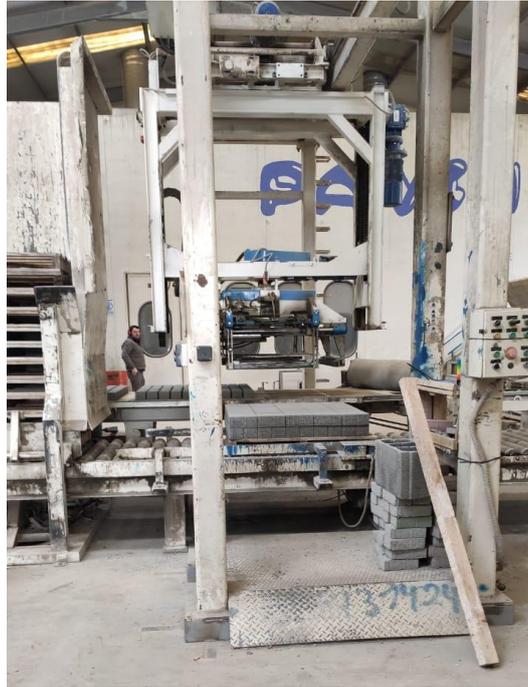


Figura 18 - Maquinário de produção de blocos

A composição relativamente a 1 m³ de produção, bem como a percentagem equivalente de cimento, materiais granulares e o traço do betão, encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição do betão para a produção do bloco de referência

Material	Cimento	Gravilha	Areia	Pó	Água (L)
Quantidade (kg)	160	830	700	70	30 a 40
Percentagem de material	9,09%	47,16%	39,77%	3,98%	-
Traço do betão	1 : 0,4375 : 4,3750 : 5,1875 (cimento:pó:areia:gravilha)				

O cimento utilizado possui a designação Cimento Portland de Calcário CEM II/A-L 42,5 R, constituído por clínquer e filler, certificado segundo a NP EN 197-1 (2012) [132]. O agregado grosso é a gravilha com dimensão nominal 4/8 e os agregados finos são a areia com dimensão nominal 0/4 e o pó de areia 0/6. Na Figura 19, Figura 20 e Figura 21, observam-se as curvas granulométricas dos referidos agregados, obtidas em laboratório de acordo com as recomendações da NP EN 933-1 (2014) [133].

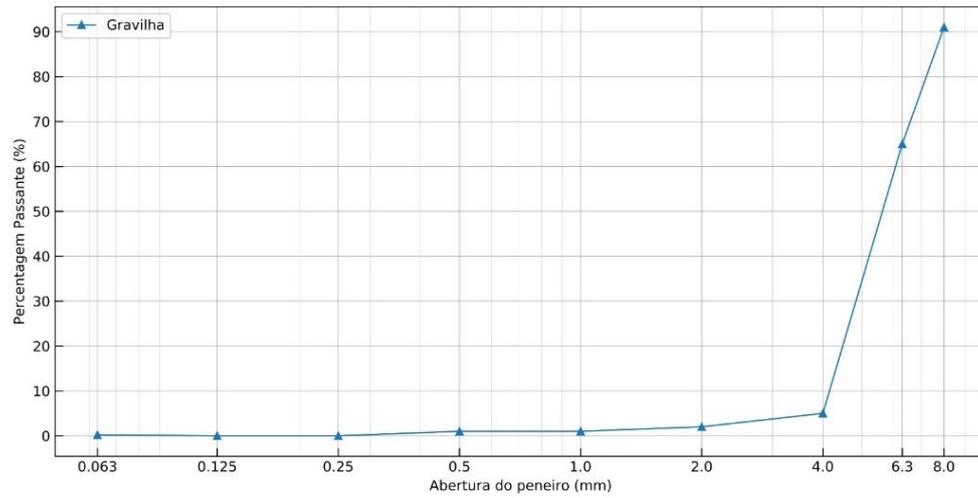


Figura 19 - Curva granulométrica da Gravelha 4/8

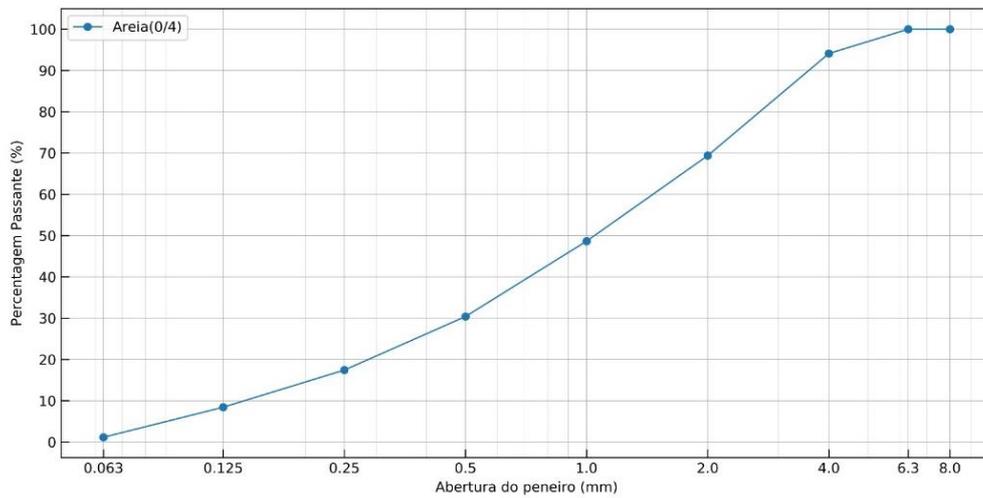


Figura 20 - Curva granulométrica da Areia 0/4

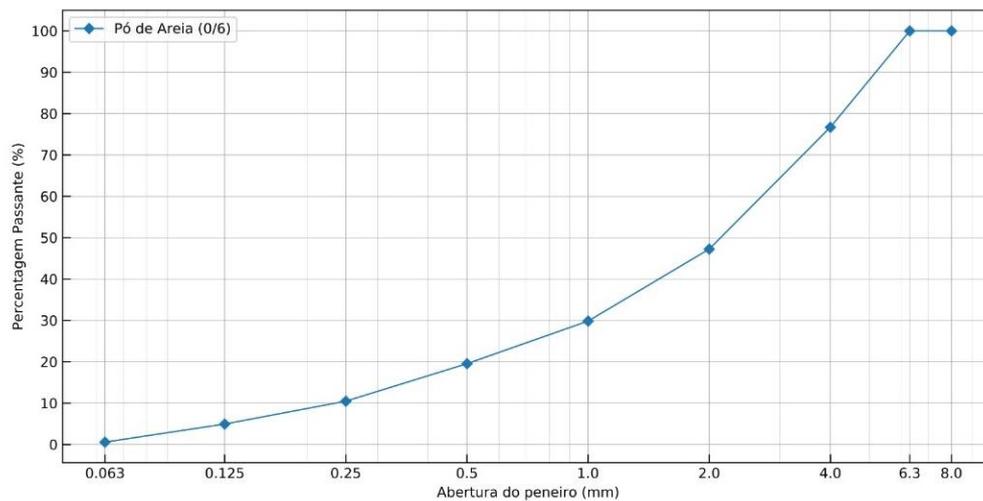


Figura 21 - Curva granulométrica do Pó de Areia 0/6

A Tabela 6 traz algumas características desses materiais.

Tabela 6 - Características dos agregados

Especificação		Gravilha	Areia 0/4	Pó de Areia 0/6
Baridade (kg/m ³)		1250	1530	1614
Massa volúmica (kg/m ³)	Material impermeável	2650 ± 50	2680 ± 50	2680 ± 50
	Partículas secas em estufa	2590 ± 50	2640 ± 50	2610 ± 50
	Partículas saturadas	2620 ± 50	2650 ± 50	2630 ± 50
Absorção de água (%)		≤ 1	≤ 1	1,20 ± 0,20
Retração por secagem (%)		< 0,075	< 0,075	< 0,075

Fonte: [134], [135]

Todos os materiais descritos foram viabilizados pela Pavimir, com o intuito de aproximar o resultado dos blocos aos provetes produzidos em laboratório. Ressalta-se que a quantidade de água é variável, regulada por uma análise visual, a depender das condições do betão no momento da produção.

3.2 Caracterização do resíduo orgânico utilizado

O composto orgânico utilizado, fornecido pela empresa Resíduos do Nordeste, é mostrado na Figura 22.



Figura 22 - Composto orgânico

Para resultar na forma adquirida e empregue nos experimentos, os resíduos provenientes dos municípios são conduzidos até a Unidade de Tratamento Mecânico e Biológico

(UTMB), umas das infraestruturas da empresa, por meio dos veículos de recolha indiferenciada. A UTMB permite a gestão integrada dos resíduos urbanos e a redução significativa da quantidade de resíduos depositados em aterro.

Após a pesagem no controle de entrada, os veículos encaminham o material para o pré-tratamento, depositando-os em fossos de recepção, dos quais são direcionados ao tratamento mecânico. O tratamento mecânico consiste na triagem dos resíduos em três categorias: orgânico, reciclável e rejeito. A matéria orgânica é tratada de forma biológica através de compostagem, que resulta no composto utilizado neste estudo (Figura 22), e digestão anaeróbia, sendo destinados ao aterro apenas os rejeitos.

Na digestão anaeróbia, o material passa pelo módulo de biometanização, onde é encaminhado aos biodigestores com capacidade de dez mil toneladas. Deste processo resulta o biogás que servirá para produzir energia elétrica e térmica. No módulo de compostagem, a matéria previamente separada com granulometria entre 40 mm e 90 mm, sofre um processo de degradação aeróbia controlada em túneis. Ao final, ocorre a fase de maturação e afinação da matéria fermentada dos procedimentos anteriores até que se obtenha um composto considerado de qualidade pela empresa.

A caracterização do composto é apresentada na Tabela 7 e foi realizada pela equipe de investigação pertencente a Fundação CIDAUT, em Valladolid - Espanha.

Tabela 7 - Caracterização do resíduo orgânico

Parâmetro	Unidades	Composto fino
Humidade	%	13,60
Cinzas	% bs*	57,80
Carbono	% bs	24,60
Hidrogênio	% bs	2,80
Nitrogênio	% bs	1,74
Enxofre	% bs	0,48
Cloro	% bs	0,64
Oxigênio	% bs	11,94
Poder calorífico superior (PCS)	MJ/kg bs	9,46
Poder calorífico inferior (PCI)	MJ/kg bs	8,86

*base seca

Fonte: [136]

O teor de umidade do composto orgânico natural, calculado pela Equação 1, é expresso na Tabela 8.

$$h = \frac{P_A}{P_S} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

P_A corresponde a massa da água, em g; e

P_S corresponde a massa dos sólidos secos, em g.

Tabela 8 - Teor de umidade do resíduo orgânico

Teor de umidade	
Massa úmida (g)	59,06
Massa seca (g)	45,96
Massa da água (g)	13,10
h (%)	28,50

A baridade do material seco encontra-se na Tabela 9, determinada conforme estabelece a NP EN 1097-3 (2002) [137], considerando o preenchimento total de um dado recipiente com volume conhecido, utilizando a Equação 2.

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V_a} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

ρ_b é a baridade, em g/cm³;

m_2 é a massa do recipiente preenchido, em g;

m_1 é a massa do recipiente vazio, em g; e

V_a é a capacidade do recipiente, em cm³.

Tabela 9 - Baridade do resíduo orgânico

Baridade	
Massa do recipiente preenchido (g)	4989,30
Massa do recipiente vazio (g)	3699,30
Capacidade do recipiente (cm ³)	3036,00
ρ_b (g/cm³)	0,42

Da análise do resultado apresentado na Tabela 9, é possível afirmar que o resíduo comporta-se como um agregado leve de acordo com a NBR 12655 (2015) [138] e segundo

a classificação apresentada por Coutinho (1988) [139], que estabelece o intervalo de 0,30 g/cm³ a 1,20 g/cm³ para a referida classe. Esta designação aplica-se a agregados com funções de isolamento térmico e diminuição do peso próprio do betão, podendo também assumir função resistente.

3.2.1 Comparação da granulometria do resíduo orgânico com os agregados

Incluída no estudo da caracterização do resíduo, a análise granulométrica do composto seco em estufa, baseada na NP EN 933-1 (2014) [133], resultou na curva granulométrica presente na Figura 23.

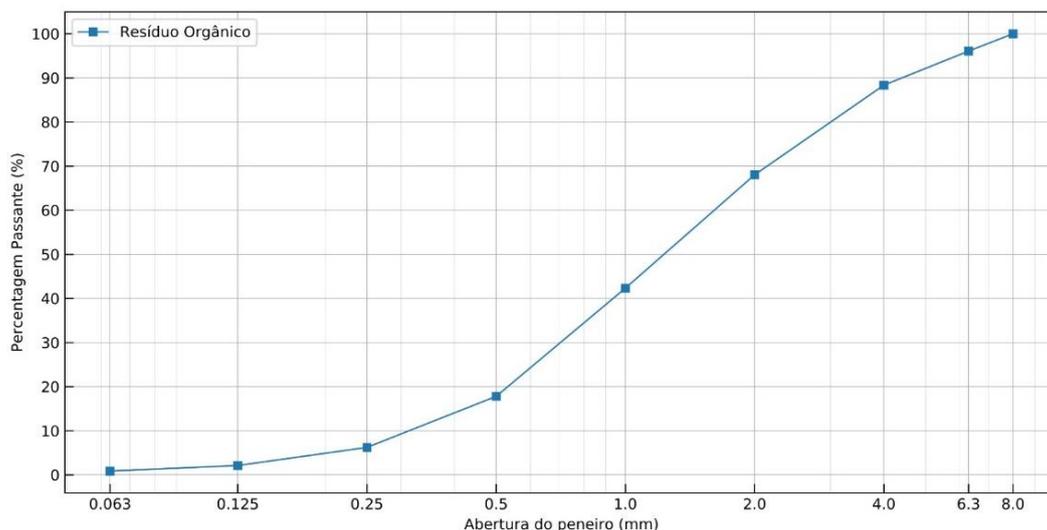


Figura 23 - Curva granulométrica do resíduo orgânico

O material analisado, por suas dimensões, possui partículas que podem ser classificadas segundo a NP EN 12620 (2013) [140] como areia e, em menor quantidade, como agregado grosso e filler.

A fim de verificar a possibilidade de substituição de parte dos agregados pelo resíduo, as curvas granulométricas dos referidos materiais foram sobrepostas, conforme verifica-se na Figura 24.

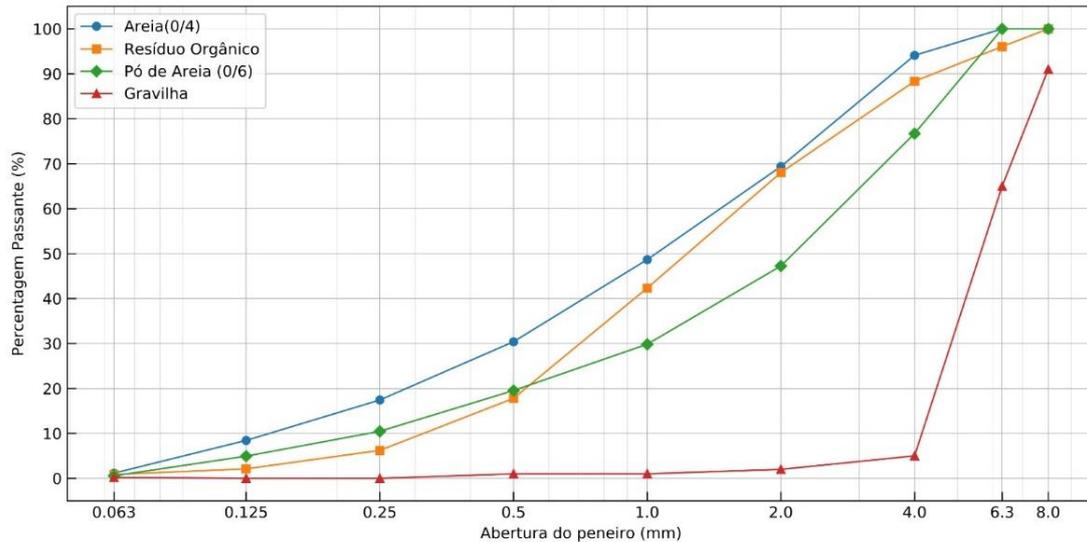


Figura 24 - Comparação entre as curvas granulométricas do resíduo com os agregados

Com base na NBR 6502 (1995) [141], para auxiliar na interpretação do gráfico e na identificação das características de uniformidade e graduação das partículas do resíduo orgânico comparadas com os agregados constituintes do betão, são calculados os coeficientes de uniformidade e curvatura, com o auxílio da Equação 3 e Equação 4. O coeficiente de uniformidade fornece a ideia da variedade das dimensões que as partículas de um material possuem e o coeficiente de curvatura está relacionado ao formato da curva que permite detectar discontinuidades no conjunto.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{Equação 3})$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

D_{10} é o diâmetro efetivo, correspondente aos 10% mais finos na curva granulométrica, em mm;

D_{30} é o diâmetro de partículas correspondente aos 30% mais finos nesta curva, em mm;

D_{60} é o diâmetro de partículas correspondente aos 60% mais finos nesta curva, em mm.

Os valores calculados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Coeficientes de uniformidade e curvatura

Material	Diâmetros (mm)		Coeficiente de uniformidade (Cu)	Coeficiente de curvatura (Cc)
Resíduo	D ₁₀	0,33	5,12	1,01
	D ₃₀	0,75		
	D ₆₀	1,69		
Areia 0/4	D ₁₀	0,15	10,33	1,03
	D ₃₀	0,49		
	D ₆₀	1,55		
Pó de Areia 0/6	D ₁₀	0,24	11,96	1,48
	D ₃₀	1,01		
	D ₆₀	2,87		
Gravilha 4/8	D ₁₀	4,19	1,46	0,96
	D ₃₀	4,96		
	D ₆₀	6,11		

Dos resultados obtidos na Tabela 10, nota-se que os materiais analisados, com exceção da gravilha 4/8, podem ser considerados medianamente uniformes de acordo com a NBR 6502 (1995) [141], pois $5 < Cu < 15$. O valor de Cc indica que o resíduo, a areia 0/4 e o pó de areia 0/6 são bem graduados, pertencendo ao intervalo $1 < Cc < 3$. Já a gravilha caracteriza-se como um solo uniforme, com $Cu < 5$ e mal graduado, com $Cc < 1$.

Pelas características semelhantes quanto ao tipo de partícula e comportamento da curva granulométrica, considera-se que, entre os agregados, a substituição mais coerente para incorporação de resíduo no betão está relacionada ao agregado fino areia 0/4.

3.3 Estudo da composição de referência

A partir da composição inicial descrita na Tabela 5 foi realizada uma série de ensaios prévios, ajustando a quantidade de água e a forma de compactação, de modo a obter um provete de referência o mais próximo possível das características do material que constitui os blocos fabricados na empresa Pavimir.

Reproduzir betões secos em laboratório abrange certa dificuldade devido ao fato de que a energia de prensagem de equipamentos industriais empregues na fabricação de blocos não é facilmente reproduzível, tornando mais complexo alcançar as mesmas características [142]. Por esse motivo, incluiu-se neste estudo prévio alguns procedimentos com o intuito de ajustar uma composição de referência, sem a incorporação de resíduos, próxima à composição utilizada em fábrica.

Inicialmente, as quantidades de materiais informadas na Tabela 5 foram reduzidas para a porção em peso necessária à fabricação de um provete cúbico com dimensões de 100x100x100 mm. As dimensões do molde baseiam-se na NP EN 12390-1 (2012) [143] que especifica os requisitos para o ensaio de provetes e respectivos moldes. A norma estabelece que a menor dimensão dos provetes deve ser igual ou superior a três vezes e meia o valor da máxima dimensão do agregado do betão ($D_{m\acute{a}x}$). Sendo $D_{m\acute{a}x}$ correspondente a 8 mm, as dimensões do molde de 100 mm cumprem os requisitos normativos.

As medidas resultantes foram acrescidas de 15% para incluir as perdas e os valores utilizados na fabricação são os apresentados na Tabela 11. Considerou-se o valor máximo de água, 40 L.

Tabela 11 - Composição utilizada para o fabrico dos provetes

Material	Quantidade por provete
Cimento (kg)	0,1790
Gravilha (kg)	0,9300
Areia (0/4) (kg)	0,7840
Pó de Areia (kg)	0,0784
Água (L)	0,0450

Utilizando as mesmas quantidades de material foram produzidos diversos provetes com variação da porção de água, nas relações a/c de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,00. Os testes com acréscimo de água justificam-se devido à dificuldade citada de reprodução fiel do betão seco em laboratório, além do fato de que os agregados empregues na empresa, armazenados em grande quantidade, se encontrarem dispostos em ambiente externo, sujeitos às ações climáticas. Em contrapartida, os agregados acondicionados no laboratório foram secos em estufa, a fim de proporcionar melhor controle da umidade.

Além da quantidade de água, o modo de adensamento foi alternado, sendo alguns provetes compactados em mesa vibratória e outros compactados manualmente através da liberação de um peso sobre um bloco de aço, conforme se verifica na Figura 25 e na Figura 26, respectivamente. Os dois modos de adensamento foram executados em três camadas aproximadamente iguais de material, com 5 segundos de vibração para cada camada na compactação em mesa vibratória e 10 golpes por camada na compactação manual.

No caso dos provetes vibrados, o molde utilizado foi o de material polimérico, mais leve e nas medidas corretas para as dimensões definidas do provete. No entanto, a

compactação manual gera maior pressão contra as paredes do molde polimérico, impedindo a remoção dos provetes sem os danificar. Portanto, para os cubos compactados manualmente, foram utilizados moldes metálicos com paredes removíveis, adicionando-se uma adaptação constituída de Poliestireno Extrudido (XPS) (Figura 26), a fim de manter as dimensões de 100 mm para o cubo.



Figura 25 - Provetes produzidos em molde polimérico e em mesa vibratória



Figura 26 - (a) Compactação manual (b) Moldes metálicos com adaptação de XPS

As composições com 0,25 e 0,50 de relação a/c foram desconsideradas devido à baixa coesão e conseqüente desagregação das partículas que resultam em baixa resistência. O

melhor comportamento observado e aparência mais próxima do betão para blocos produzidos na fábrica, corresponde à composição com 0,75 de relação a/c (Figura 27). Os resultados obtidos para a resistência à compressão destes provetes são mostrados na Tabela 12.

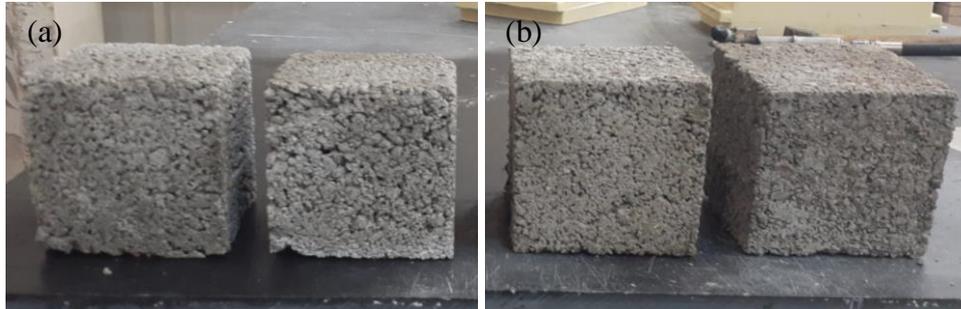


Figura 27 - (a) Provetes vibrados (b) Provetes compactados

Tabela 12 - Provede com relação a/c de 0,75

Composição	Adensamento	Provede	Massa (g)	Resistência à compressão (MPa)				
				Aos 7 dias	Média	Aos 28 dias	Média	
Relação a/c 0,75	Vibrado em 3 camadas	1	1724,4	2,35		3,14		
		2	1802,1	3,29	3,13	4,68	4,34	
		3	1849,3	3,74		5,21		
	Compactado em 3 camadas e 10 golpes por camada	1	2231,3	8,38			12,93	
		2	2256,5	9,12	9,18		13,03	13,49
		3	2302,7	10,03			14,52	

No betão convencional os espaços entre os agregados é praticamente preenchido na totalidade pela pasta de cimento e água, enquanto no betão para blocos a quantidade de ar na mistura é mais significativa [144]. Por esse motivo, a compactação do material no molde assume um papel fundamental para o controle da forma, densidade e especialmente, para a resistência à compressão dos blocos, sendo este parâmetro diretamente proporcional à energia de compactação utilizada [145]. Justifica-se, dessa forma, o desempenho significativamente melhor do provede compactado manualmente que se enquadra na classe C8/10 da NP 206-1 [119], pela qual é estabelecida a resistência mínima de 10 MPa para provedes cúbicos aos 28 dias, considerando a relação estudada por Abd e Habeeb (2014) [124] entre os provedes normalizados de 15x15x15 cm e os provedes experimentais de 10x10x10 cm. A relação identificada por Abd e Habeeb (2014) [124] foi próxima a 1,00, ou seja, os valores obtidos com provedes cúbicos de 10,0 cm podem ser avaliados como similares a valores que poderiam ser obtidos com provedes cúbicos de 15,0 cm.

Além disso, no betão seco a relação a/c não regula necessariamente sua resistência, como ocorre para o betão estrutural convencional. Ao contrário, nesta formulação, maior quantidade de água significa mais resistência, dentro de um limite máximo. A água melhora de maneira considerável a trabalhabilidade da mistura, diminuindo o atrito interno entre as partículas e facilitando a sua compactação [146]. Portanto, em betões secos o teor de umidade da mistura é mais relevante, variando de 5% a 8% da massa total, dependendo do equipamento utilizado [147].

O teor de umidade do betão produzido, calculado por meio da Equação 1, encontra-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Teor de umidade do betão sem resíduos

Teor de umidade	
Massa úmida (g)	532,50
Massa seca (g)	506,60
Massa da água (g)	25,90
h (%)	5,11

A partir dos testes realizados, a composição base adotada (C_{Ref}) para a consecutiva incorporação de resíduos é a descrita na Tabela 14.

Tabela 14 - Composição adotada sem incorporação de resíduos (C_{Ref})

Material	Quantidade	Composição em percentagem
Cimento (kg)	0,179	8,50%
Gravilha (kg)	0,930	44,18%
Areia (0/4) (kg)	0,784	37,24%
Pó de Areia (kg)	0,078	3,71%
Água (L)	0,134	6,37%
Tipo de Compactação	Manual (com 3 camadas e 10 golpes por camada)	

3.4 Provetes com incorporação de resíduos

Após a definição da composição de referência do betão (C_{Ref}) bem como a análise do resíduo a incorporar, os provetes foram produzidos em moldes cúbicos, metálicos estanques e não absorventes, de 100 mm de aresta, em conformidade com a NP EN 12390-1 (2012) [143].

A incorporação de resíduo tendo como base a C_{Ref} foi realizada considerando-se três formas: i) em substituição ao agregado fino (Areia 0/4), obtendo-se composições denominadas por AR; ii) em substituição ao cimento, obtendo-se as composições CR; e iii) acréscimo do resíduo sem substituição de qualquer material, obtendo-se as composições denominadas por +R, nas proporções de 5%, 10% e 15% em peso, conforme indicado na Tabela 15. Não foram estabelecidas percentagens maiores para o estudo devido à previsão de redução do desempenho do betão com base nas pesquisas publicadas na literatura.

Tabela 15 - Taxas de incorporação de resíduo orgânico

Material substituído	Percentagem de substituição	Denominação do provete
Agregado fino (Areia 0/4)	5%	AR ₅
	10%	AR ₁₀
	15%	AR ₁₅
Cimento	5%	CR ₅
	10%	CR ₁₀
	15%	CR ₁₅
Acréscimo de resíduo sem substituição	5%	+R ₅
	10%	+R ₁₀
	15%	+R ₁₅

A composição em percentagem para a produção dos provetes é apresentada na Tabela 16. As taxas de acréscimo de resíduo sem substituição de material foram consideradas em relação à quantidade de agregado fino (Areia 0/4).

Tabela 16 - Composição em percentagem para a produção dos provetes (%)

Proвете	Cimento	Gravilha	Areia (0/4)	Pó de Areia	Água	Resíduo orgânico
AR ₅	8,51	44,15	35,37	3,72	6,38	1,86
AR ₁₀	8,51	44,15	33,51	3,72	6,38	3,72
AR ₁₅	8,51	44,15	31,65	3,72	6,38	5,59
CR ₅	8,09	44,15	37,23	3,72	6,38	0,43
CR ₁₀	7,66	44,15	37,23	3,72	6,38	0,85
CR ₁₅	7,23	44,15	37,23	3,72	6,38	1,28
+R ₅	8,36	43,34	36,55	3,66	6,27	1,83
+R ₁₀	8,21	42,56	35,90	3,59	6,15	3,59
+R ₁₅	8,06	41,81	35,26	3,53	6,05	5,29

Para a confecção dos provetes, os agregados foram previamente secos em estufa, pesados separadamente nas devidas quantidades referentes à composição e inseridos no

misturador. Após uma breve mistura dos materiais secos, a água foi adicionada ao conjunto, seguida do acionamento do misturador até o material tornar-se homogêneo. Esse processo pode ser observado na Figura 28.



Figura 28 - Processo de produção dos provetes com resíduo

Conforme as recomendações da NP EN 12390-2 (2019) [148], os provetes foram mantidos por 24 horas nos moldes à temperatura ambiente, protegidos contra choque, vibração e desidratação. Após a remoção do molde, foram curados em câmara úmida com aspersão de água, com umidade mantida em 95% e temperatura de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ para posterior realização do ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Através da análise do comportamento à compressão das composições estabelecidas, pretendeu-se verificar qual apresenta melhor desempenho, ou seja, maior introdução de resíduos com a menor queda na resistência em comparação com a composição de referência.

No decorrer dos ensaios houve a necessidade de utilizar o resíduo em diferentes condições. Dessa forma, foram estabelecidas três fases para o fabrico dos provetes e respectivos resultados obtidos quanto à resistência à compressão: 1) Provetes incorporados com os resíduos secos em estufa; 2) Provetes incorporados com os resíduos úmidos; e 3) Provetes incorporados com o resíduos úmidos e sem as partículas mais finas. Ao todo foram produzidos 54 provetes, sendo 18 correspondentes à fase 1, 12 correspondentes à fase 2 e 24 referentes à fase 3.

3.4.1 Ensaio de resistência à compressão

O procedimento referente ao ensaio de resistência à compressão realizou-se com base na NP EN 12390-3 (2011) [149]. Previamente, os provetes foram retirados do processo de cura em câmara úmida e posicionados na prensa MATEST® (modelo C 85/5 293/94) de forma que a carga fosse aplicada perpendicularmente à direção de moldagem. A velocidade de aplicação da carga é constante de 13,0 MPa/s, programada para parar quando atinge a carga de ruptura. A resistência a compressão é dada pela Equação 5.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

f_c é a resistência à compressão, em MPa;

F é a carga máxima de ruptura, em N; e

A_c é a área da seção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada, em mm².

3.4.1.1 Fase 1: Resíduos secos em estufa

Inicialmente, foram fabricados dois provetes de cada composição utilizando o resíduo seco em estufa. Os resultados do ensaio à compressão, aos 7 e 28 dias de idade, estão descritos na Tabela 17.

Tabela 17 - Resistência à compressão dos provetes com resíduos secos em estufa

Provete	Resistência à compressão (MPa)	
	Aos 7 dias	Aos 28 dias
C _{Ref}	9,18	13,49
AR ₅	0,61	0,94
AR ₁₀	0,44	0,52
AR ₁₅	0,59	0,67
CR ₅	5,44	6,78
CR ₁₀	3,68	4,84
CR ₁₅	2,20	3,43
+R ₅	0,43	0,62
+R ₁₀	0,39	0,50
+R ₁₅	0,37	0,45

Verificou-se que as composições incorporadas com o composto orgânico em substituição à areia e em acréscimo sem substituição de material apresentaram pouca resistência, abaixo de 1,00 MPa, com pouca coesão entre os materiais constituintes da mistura, ocorrendo a total desagregação do provete logo após a realização do ensaio, conforme percebe-se na Figura 29.



Figura 29 - Provete com pouca coesão entre os materiais

Esse comportamento pode ter ocorrido em razão da presença do material orgânico que interfere no processo de hidratação do cimento ou pelo excesso de partículas finas que revestem as partículas dos agregados e, dessa forma, impedem a aderência da pasta de cimento com os agregados, enfraquecendo a estrutura do betão [150]. Ainda, a interferência da hidratação do cimento possivelmente está relacionada a alta absorção de água do composto orgânico, considerando que o mesmo foi seco em estufa antes de ser utilizado.

Para as composições referentes à substituição do cimento, o comportamento descrito (Figura 29) não foi observado, sendo esses os provetes que obtiveram melhor desempenho. Isso pode ter ocorrido pois, nesse caso, a percentagem de incorporação de resíduo foi calculada com base na quantidade de cimento da composição que é aproximadamente quatro vezes menor que a quantidade de areia. Desse modo, a menor presença de resíduo no provete tem consequente menor impacto no resultado final.

3.4.1.2 Fase 2: Resíduos úmidos

A fim de obter melhores resultados com uma solução de aplicação mais facilitada, optou-se por realizar um umedecimento prévio do material para então ser adicionado à mistura (Figura 30). Essa solução é adotada por diversos autores na utilização de agregados

reciclados que possuem uma taxa de absorção de água maior que os comumente empregados [151], [36].



Figura 30 - Resíduo úmido

Novos provetes foram produzidos com o resíduo úmido para testar o comportamento frente a essa alteração. Não foram produzidos provetes com todas as composições propostas para evitar desperdício de material caso a solução não fosse pertinente. Desse modo, a Tabela 18 traz os resultados obtidos para as composições testadas.

Tabela 18 - Resistência à compressão dos provetes com resíduos úmidos

Provete	Resistência à compressão (MPa)	
	Aos 7 dias	Aos 28 dias
C _{Ref}	9,18	13,49
AR ₅	3,77	4,41
AR ₁₀	1,01	1,36
AR ₁₅	-	-
CR ₅	6,49	8,93
CR ₁₀	3,99	5,47
CR ₁₅	-	-
+R ₅	5,36	7,58
+R ₁₀	0,70	0,91
+R ₁₅	-	-

“-“ provete não produzido

Observa-se que as substituições relativas a 10% de areia (AR₁₀) e 10% de acréscimo do resíduo (+R₁₀) apresentaram pequena melhora, mas ainda com valores muito baixos e permanência do comportamento verificado anteriormente, com desagregação do provete após o ensaio. Os provetes com 5% de substituição de areia e 5% de acréscimo de resíduo,

demonstraram uma melhora mais expressiva no desempenho aos 7 e 28 dias, porém, ainda baixa se comparado ao provete de referência sem resíduos (9,18 MPa e 13,49 MPa). Da mesma forma como na Fase 1, os provetes com substituição de cimento apresentaram melhor desempenho entre as composições devido a menor presença de resíduo incorporado.

3.4.1.3 Fase 3: Resíduos úmidos e sem finos

Tendo em vista os resultados ineficientes uma nova solução foi adotada, em caráter experimental, considerando a retirada das partículas mais finas do resíduo através do descarte do material passante nos peneiros 0,250 mm, 0,125 mm e 0,063, além do umedecimento antes da pesagem para adição na mistura (Figura 31).

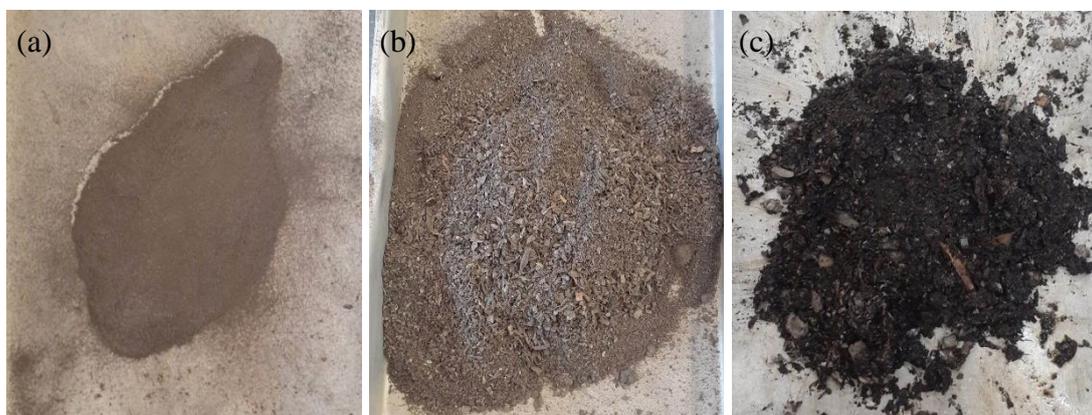


Figura 31 - (a) Finos retirados (b) Resíduo sem finos (c) Resíduo úmido após a retirada dos finos

A partir da percepção de que a menor percentagem de resíduo incorporado apresenta melhor comportamento, para essa alteração foram produzidos dois provetes relativos às composições (AR₅, CR₅ e +R₅), ensaiados aos 7 e 28 dias de idade e um provete para as demais composições, ensaiados aos 7 dias, resultando nas informações da Tabela 19.

Verifica-se que a percentagem passível de ser utilizada corresponde a 5%, a qual resulta nos melhores desempenhos entre as três modalidades propostas de incorporação à mistura, sendo que as demais quantidades afetam de maneira mais elevada a estrutura do betão na composição utilizada neste trabalho. Por esse motivo, foram produzidos mais quatro provetes para as composições AR₅, CR₅ e +R₅, cujos resultados são apresentados na Tabela 20 juntamente com o resultado obtido da Tabela 19 e respectivas médias das resistências alcançadas.

Tabela 19 - Resistência à compressão dos provetes com resíduos úmidos e sem finos

Provete	Resistência à compressão (MPa)	
	Aos 7 dias	Aos 28 dias
C _{Ref}	9,18	13,49
AR ₅	5,71	8,09
AR ₁₀	0,77	-
AR ₁₅	0,71	-
CR ₅	7,45	12,43
CR ₁₀	4,54	-
CR ₁₅	3,91	-
+R ₅	6,61	10,25
+R ₁₀	0,98	-
+R ₁₅	0,81	-

“-“ provete não produzido

Tabela 20 - Resistência à compressão das composições AR₅, CR₅ e +R₅

Provete	Resistência à compressão (MPa)					
	Aos 7 dias	Média	Desvio padrão	Aos 28 dias	Média	Desvio padrão
AR ₅	5,71	5,03	0,49	8,09	7,82	0,32
	4,80			8,01		
	4,58			7,37		
CR ₅	7,45	7,42	0,34	12,43	12,33	0,35
	7,81			12,71		
	6,99			11,86		
+R ₅	6,61	6,31	0,21	10,25	9,40	0,61
	6,20			9,07		
	6,12			8,88		

Nesse cenário, a substituição de 5% de areia (AR₅) representa uma redução de 45,21% na resistência em relação a C_{Ref}, a substituição de 5% de cimento (CR₅) equivale a uma redução de 19,17% e o acréscimo de 5% de resíduo (+R₅) representa 31,26% de redução. Aos 28 dias as reduções são de 42,03%, 8,60% e 30,32% para as composições AR₅, CR₅ e +R₅, respectivamente. Dessa forma, optou-se por aprofundar os estudos com a realização de ensaios complementares para CR₅ e +R₅.

Para essas composições, foram fabricados novos provetes a fim de realizar os demais ensaios de caracterização previamente definidos, nomeadamente, a determinação do teor de umidade, o Vebê test, determinação da massa volúmica do betão endurecido, absorção de água por imersão e resistência à tração por compressão diametral.

Capítulo 4

4 Análise Experimental Complementar

Este capítulo é reservado para a execução dos ensaios de caracterização física e mecânica da composição de referência e das composições escolhidas (CR₅ e +R₅), descrevendo os resultados obtidos e subsequente análise dos mesmos. Os resultados são comparados entre si e com os provetes fabricados sem incorporação de resíduo, a fim de avaliar se o desempenho obtido é considerado aceitável para uso prático. Além disso, é realizada uma análise relacionada ao consumo de resíduos na produção dos blocos.

4.1 Teor de umidade

O teor de umidade das composições foi determinado, resultando nas percentagens presentes na Tabela 21, que relaciona também o valor encontrado para a composição de referência.

Tabela 21 - Teor de umidade das composições

Composição	Teor de umidade
C _{Ref}	5,11%
CR ₅	7,71%
+R ₅	7,69%

Observa-se que as composições com a presença de resíduos apresentam um teor de umidade mais elevado. Esse aumento é justificado pelo fato de que os resíduos foram umedecidos antes da inserção à mistura, resultando em uma quantidade maior de água no material. Os valores calculados ainda encontram-se dentro do intervalo sugerido por

Fernandes (2008) [147], com taxas de 5% a 8% para o teor de umidade, normalmente considerado para betões de consistência seca.

4.2 Vebê test

O ensaio Vebê é indicado para determinar a consistência de betões muito secos, como é o caso do betão para blocos estudado no presente trabalho. Esse método, regulamentado pela NP EN 12350-3 (2009) [152], baseia-se no mesmo princípio do Slump Test, descrito pela NP 12350-2 (2009) [153], sendo mais vantajoso para amostras muito rígidas que não podem ser medidas pelo teste de queda padrão, devido à sua ação mecanizada.

Na realização deste ensaio, inicialmente o betão fresco foi inserido em um molde cônico em 3 camadas com 25 golpes por camada. O molde foi removido na vertical e, em seguida, um disco transparente, parte do conjunto de execução do ensaio, foi baixado cuidadosamente até entrar em contato com o betão. Posteriormente, ligou-se a mesa vibratória, medindo-se o tempo necessário para que a face inferior do disco transparente se encontrasse totalmente em contato com o betão, sem a presença de bolhas e vazios. A Figura 32 demonstra a realização do ensaio.



Figura 32 - Vebê Test

Na Tabela 22 estão incluídos os resultados obtidos para as composições C_{Ref} , CR_5 e $+R_5$.

Tabela 22 - Tempo Vebê Test

Composição	Tempo Vebê Test
C_{Ref}	35 s
CR_5	29 s
$+R_5$	27 s

O betão produzido com a composição de referência enquadra-se na classe V0 (≥ 31 s), presente na NP EN 206-1 (2007) [119], com um tempo de 35 s para o total assentamento do material abaixo do disco constituinte do equipamento de ensaio. Já as composições com a presença de resíduo orgânico, CR₅ e +R₅, enquadram-se na classe V1 (21 s a 30 s) da referida norma. A três composições são classificadas como betão extremamente seco segundo o ACI 211.3R-02 (2009) [154], que estabelece essa característica ao material com Vebê de 18 s até 32 s. Houve uma redução do tempo Vebê para CR₅ e +R₅ devido a maior quantidade de água presente na mistura, o que, para betões de consistência seca, representa melhoria na trabalhabilidade, facilitando a compactação do betão [146].

4.3 Massa volúmica do betão endurecido

Para determinar a massa volúmica do betão endurecido, foram seguidas as recomendações da NP EN 12390-7 (2009) [155]. A medição do volume pelo método da deslocação de água é o mais exato e, portanto, este foi o aplicado. Desse modo, cada provete foi inicialmente pesado e mergulhado em um tanque com água durante 24 horas, registrando-se a massa do provete na água. Para essa determinação, um estribo é imerso no tanque, sem tocar o fundo, medindo-se sua massa aparente. O provete é colocado no estribo submerso, conforme demonstra a Figura 33 e a massa do conjunto também é registrada.



Figura 33 - Procedimento para o ensaio de massa volúmica

Ao final desse período, a massa saturada do provete foi verificada, sendo limpa a água remanescente da superfície com um pano úmido antes da pesagem. Em seguida, o provete foi seco em uma estufa a $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ também durante 24 horas e seu peso devidamente registrado.

Para o cálculo do volume, utilizou-se a Equação 6.

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

V é o volume do provete, em m^3 ;

m_a é a massa do provete ao ar, em kg;

m_{st} é a massa aparente do estribo imerso, em kg;

m_w é a massa aparente do provete imerso, em kg; e

ρ_w é a massa volúmica da água, a 20°C , tomada como 998 kg/m^3 .

A massa volúmica do betão endurecido foi calculada utilizando a Equação 7.

$$D = \frac{m}{V} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

D é a massa volúmica relativa à condição do provete, em kg/m^3 ;

m é a massa do provete na sua condição do momento do ensaio, em kg; e

V é o volume determinado pelo método particular, em m^3 .

Foram produzidos três provetes para cada composição e o procedimento para determinação da massa volúmica foi realizado aos 7 dias de idade. Posteriormente, os provetes foram retornados para cura em câmara úmida e submetidos novamente aos procedimento descrito aos 28 dias de idade. A Tabela 23 traz as massas volúmicas determinadas nas condições dos provetes tais como recebidos, saturados e secos em estufa.

Tabela 23 - Massa volúmica do betão endurecido (kg/m³)

Provete	Aos 7 dias			Aos 28 dias			
	Ref	C5	R5	Ref	C5	R5	
Tal como recebido	1	2201,50	2224,80	2364,90	2152,00	2171,00	2278,00
	2	2184,46	2160,05	2209,12	2118,15	2093,38	2129,50
	3	2196,89	2181,56	2234,10	2136,57	2113,49	2152,10
	Média	2194,28	2188,80	2269,37	2135,57	2125,96	2186,53
	Desvio padrão	7,20	26,93	68,31	13,84	32,89	65,33
Saturado	1	2226,30	2246,60	2386,30	2222,60	2202,70	2275,20
	2	2232,80	2190,54	2239,29	2220,84	2181,46	2227,07
	3	2236,62	2214,73	2266,84	2230,94	2204,08	2255,17
	Média	2231,91	2217,29	2297,48	2224,79	2196,08	2252,48
	Desvio padrão	4,26	22,96	63,81	4,41	10,35	19,74
Seco em estufa	1	2109,90	2133,60	2256,00	2107,00	2081,70	2135,30
	2	2110,70	2087,00	2129,50	2102,20	2072,80	2114,90
	3	2097,25	2107,20	2152,10	2091,87	2098,30	2137,80
	Média	2105,95	2109,27	2179,20	2100,36	2084,27	2129,33
	Desvio padrão	6,16	19,08	55,08	6,31	10,57	10,26

Todos os valores encontrados estão enquadrados no intervalo de 2000 kg/m³ a 2600 kg/m³, considerados como betão normal segundo a classificação estabelecida pela NP EN 206-1 [118]. A Figura 34 e Figura 35 apresentam graficamente os valores encontrados para a massa volúmica das composições estudadas aos 7 e 28 dias de idade, respectivamente.

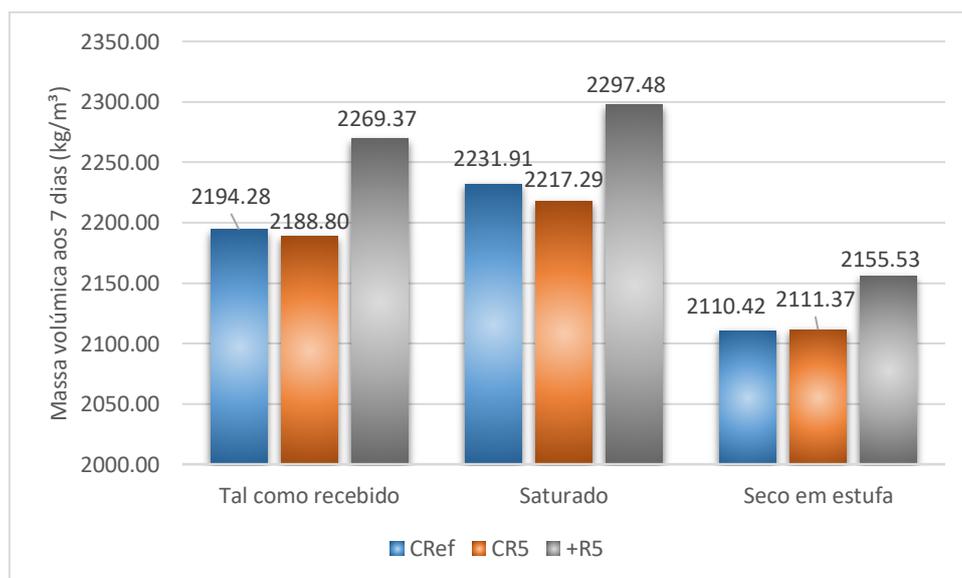


Figura 34 - Massa volúmica do betão endurecido aos 7 dias

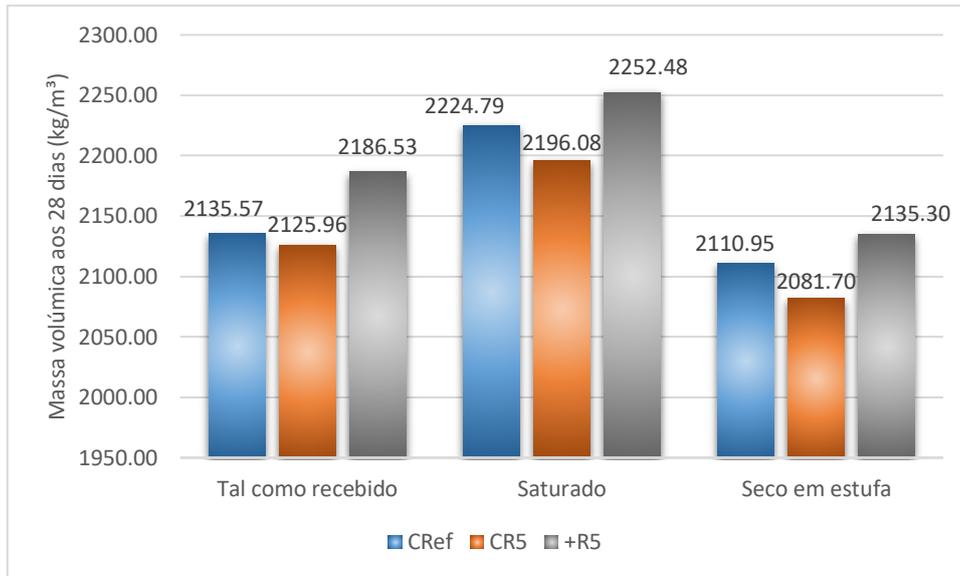


Figura 35 - Massa volúmica do betão endurecido aos 28 dias

Observa-se que, em geral, ocorre a redução da massa volúmica ao longo do tempo de cura, visto a desagregação de algumas partículas presentes na superfície dos provetes conforme o material é curado. Esse fato é acentuado considerando a composição mais seca do betão para blocos, que tem como consequência a maior facilidade de desagregação das partículas mais externas do elemento.

Nas duas idades estudadas, a massa volúmica de +R₅ nas três condições resultou nos valores mais altos devido a maior quantidade de material na mistura visto que o resíduo é adicionado à composição sem que haja a retirada de nenhum outro constituinte. A massa volúmica da composição CR₅ encontrou-se mais próxima da referência, no entanto, de um modo geral, apresentou valores menores devido à retirada de material da composição e substituição por resíduo orgânico que é um composto mais leve.

Deve-se considerar, ainda, que as condições de preparo, mistura e compactação dos materiais foram realizadas de maneira a evitar o maior número de alterações e interferências. No entanto, alguns fatores podem influenciar nos resultados, especialmente a compactação realizada manualmente que pode ter como consequência diferentes formas de assentamento das partículas, além de pequenas variações no volume dos provetes.

4.4 Absorção de água

A determinação da absorção de água por imersão baseou-se na metodologia descrita pela NP EN 1097-6 (2016) [120]. O procedimento consiste na inserção do provete na estufa por 24 horas e posterior pesagem do provete seco. Em seguida, o provete é imerso em água também por 24 horas. Após esse período, a água remanescente é retirada com o auxílio de um pano úmido, realizando-se a pesagem do provete. A taxa de absorção de água por imersão é encontrada através da Equação 8.

$$A_i = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

A_i é a taxa de absorção de água, em %;

m_1 é a massa do provete seco em estufa, em g; e

m_2 é a massa do provete saturada, em g.

O procedimento foi reproduzido para três provetes correspondentes a cada uma das composições (C_{Ref} , CR_5 e $+R_5$), testados aos 7 dias, retornados à cura em câmara úmida e testados novamente aos 28 dias, resultando nas informações presentes na Tabela 24.

Tabela 24 - Absorção de água por imersão (%)

Provete	Aos 7 dias			Aos 28 dias		
	C_{Ref}	C_5	R_5	C_{Ref}	C_5	R_5
1	5,52	5,30	5,78	5,44	5,81	6,35
2	5,78	4,96	5,16	5,64	5,24	5,30
3	5,66	5,10	5,33	5,59	5,04	5,49
Média	5,65	5,12	5,42	5,56	5,37	5,71
Desvio padrão	0,11	0,14	0,26	0,09	0,33	0,46

Todos os valores são adequados à classificação a qual pertencem os blocos em estudo, com base na NBR 6136 (2016) [113], que estabelece o máximo de 11% para a absorção dos blocos enquadrados na classe C, com ou sem função estrutural e produzidos com agregado normal. Portanto, sob este quesito não há impedimento para a aplicação do

resíduo no fabrico dos blocos. A Tabela 25 apresenta a variação das médias obtidas aos 7 e aos 28 dias de idade.

Tabela 25 - Variação das taxas de absorção de água aos 7 e 28 dias de idade

Composição	Absorção de água por imersão (%)		Variação
	Aos 7 dias	Aos 28 dias	
C _{Ref}	5,65	5,56	-1,70%
C ₅	5,12	5,37	4,79%
+R ₅	5,42	5,71	5,42%

Conforme ocorreu para a composição de referência, é esperado que haja a diminuição da taxa de absorção de água do material a medida que o tempo de cura aumenta, devido a diminuição dos poros e conseqüente menor entrada de água. No entanto, observa-se que para as composições com presença de resíduo houve aumento na referida taxa ao longo do tempo de cura, em razão da interferência gerada pela matéria orgânica nas reações de hidratação do cimento. Isso pode ser verificado pelo fato de que o maior crescimento relativo à taxa de absorção de água, ocorreu para a composição +R₅, que incorpora a maior quantidade de resíduo entre as composições avaliadas.

Na Figura 36 observa-se graficamente a comparação das médias obtidas.

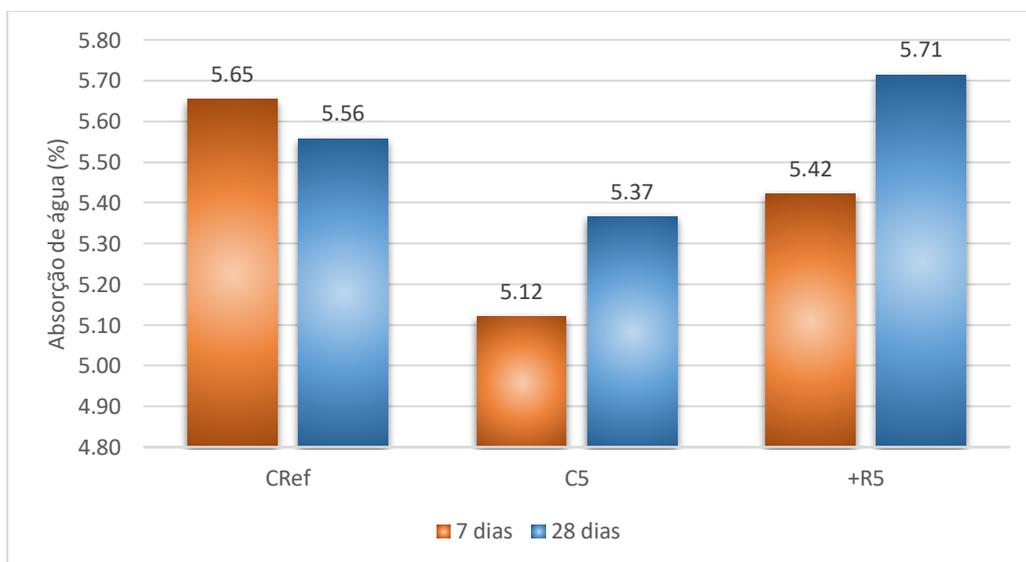


Figura 36 - Comparação entre os resultados de absorção de água

Como citado anteriormente, a composição de referência apresentou redução no valor da taxa de absorção ao longo do período de cura conforme o esperado, ao contrário das composições com incorporação de resíduo orgânico, nos quais a referida taxa aumentou.

Apesar disso, constata-se que a composição com substituição de cimento alcançou a menor taxa entre as três composições, significando uma característica vantajosa em relação à C_{Ref} , já que menor absorção de água se relaciona a uma maior durabilidade. A Tabela 26 apresenta percentagem de variação de C_5 e $+R_5$ em comparação à referência.

Tabela 26 - Variação da taxa de absorção de água em relação à referência

Composição	Comparação com C_{Ref}	
	Aos 7 dias	Aos 28 dias
C_5	-9,38%	-3,41%
$+R_5$	-4,07%	2,70%

Já a composição $+R_5$ apesar de exibir uma taxa de absorção 4,07% menor do que C_{Ref} aos 7 dias, ao final de 28 dias aumentou 2,70% em relação a C_{Ref} , demonstrando a maior interferência da matéria orgânica presente em maior quantidade nessa composição.

Mesmo com as variações, as composições resultam abaixo do requisito estabelecido pela norma considerada.

4.5 Resistência à tração por compressão diametral

Para determinar a resistência à tração segundo a NP EN 12390-6 (2011) [128], foram fabricados provetes cilíndricos com 15,0 cm de diâmetro e 30,0 cm de comprimento, sendo dois provetes para cada composição (C_{Ref} , CR_5 e $+R_5$), testados aos 7 e 28 dias de idade. Neste ensaio, o provete é submetido a uma força de compressão aplicada em uma zona estreita ao longo do seu comprimento. A tensões ortogonais resultantes provocam a ruptura por tração. O ensaio é demonstrado na Figura 37.



Figura 37 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Após o provete ser colocado em posição central na máquina de ensaio, a carga foi aplicada a uma velocidade constante, aumentando-a de forma contínua até que não seja possível aplicar uma carga superior. A carga máxima aplicada foi registrada e a resistência à tração por compressão é dada pela Equação 9.

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (\text{Equação 9})$$

Em que:

f_{ct} é a resistência à tração por compressão, em MPa;

F é a carga máxima, em N;

L é o comprimento da linha de contato do provete, em mm; e

d é a dimensão da seção transversal designada, em mm.

Os resultados para a resistência à tração por compressão diametral (indireta) e a estimativa para a tração direta segundo a NBR 6118 (2014) [129], são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Resistência à tração indireta e direta

Provete	Aos 7 dias			Aos 28 dias		
	F (N)	Res. à tração por compressão diametral (indireta) (MPa)	Estimativa Res. à tração direta (MPa)	F (N)	Res. à tração por compressão diametral (indireta) (MPa)	Estimativa Res. à tração direta (MPa)
C _{Ref}	72370	1,02	0,92	92440	1,31	1,18
C ₅	61150	0,87	0,78	85260	1,21	1,09
+R ₅	53580	0,76	0,68	76460	1,08	0,97

O entendimento da resistência à tração é importante para o conhecimento dos mecanismos de falha dos blocos, já que as maiores limitações estruturais da alvenaria relacionam-se às tensões de tração, as quais concentram-se nos septos dos blocos e tornam-se responsáveis pela ruptura da alvenaria carregada axialmente à compressão [111], [126]. Desse modo, quanto maior a resistência à tração do bloco, maior é a resistência da alvenaria.

No caso das composições estudadas, observa-se a redução da resistência a tração das composições com presença de resíduos em relação à referência, sendo o menor valor

encontrado para a composição +R₅ que contém a maior quantidade de resíduo orgânico incorporado. A Figura 38 demonstra graficamente o comportamento observado.

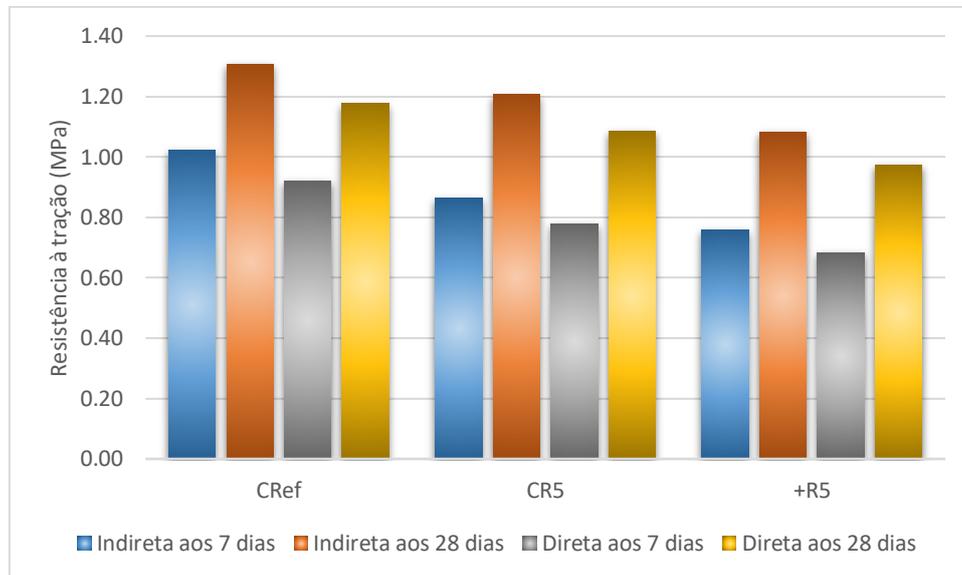


Figura 38 - Resistência à tração indireta e direta

A composição CR₅ reduziu sua resistência à tração em 15,50% em relação à C_{Ref} aos 7 dias e, para a mesma idade, +R₅ reduziu 25,96%. Aos 28 dias, houve a redução de 7,77% e 17,29% para as composições CR₅ e +R₅, respectivamente, em relação à C_{Ref}. Não há requisito normatizado para a resistência à tração mínima de blocos de betão, portanto, é possível considerar que a redução observada não impede a utilização do betão com resíduos, tendo em conta que os blocos estudados possuem apenas função de compartimentação, sem solicitação de carácter estrutural.

4.6 Análise do consumo de resíduo e economia de cimento

Na hipótese de aplicação das composições estudadas na produção dos blocos comerciais em fábrica, torna-se possível observar uma redução da quantidade de cimento utilizado, representando uma economia associada à produção, além de uma redução da quantidade de resíduo destinado ao aterro sanitário.

4.6.1 CR₅

O impacto ambiental causado pela indústria do cimento tem se tornado uma das principais questões a serem debatidas. Segundo a *International Energy Agency* (IEA), a estimativa da produção mundial de cimento em 2019 foi de 4,1 bilhões de toneladas. O grande problema está relacionado ao processo de fabricação do elemento fundamental do cimento, o clínquer, que envolve a combustão em altas temperaturas (em torno de 1450 °C), resultando na liberação de uma considerável quantidade de CO₂ na atmosfera.

Dessa forma, diminuir a demanda por cimento na indústria da construção é um importante factor para reduzir o consumo de energia do setor e as emissões de CO₂ e, portanto, quaisquer quantidades que possam ser reduzidas das composições de betão, representam um impacto significativo na busca por maior eficiência ambiental.

Por esse motivo, a composição estudada com substituição de 5% de cimento por resíduo orgânico reflete uma alternativa vantajosa não só do ponto de vista ambiental, pela redução da demanda de cimento, mas também do ponto de vista econômico. A Tabela 28, apresenta um resumo da quantidade de cimento utilizado e uma simulação do custo associado às composições C_{Ref} e CR₅.

Tabela 28 - Comparativo entre o betão produzido sem resíduos e a composição CR₅

Composição	Sem resíduos (C_{Ref})	5% de resíduo em substituição ao cimento (CR₅)
Quantidade de cimento/m³	160 kg	152 kg
Quantidade de resíduo/m³	0 kg	8 kg
Preço médio CEM II/A-L 42,5 R (kg)	0,14 €	0,14 €
Custo de cimento/m³	22,72 €	21,58 €

A partir do peso do bloco de referência, 17 kg, é possível determinar a quantidade de betão necessário para a produção de blocos. Segundo a composição fornecida pela Pavimir, cada metro cúbico de betão fabricado envolve 1800 kg de material, sendo 160 kg correspondentes ao cimento. Para CR₅, a quantidade de cimento é de 152 kg por metro cúbico e, com essas informações, pode-se encontrar o cimento utilizado para a fabricação

de mil, dez mil e cem mil blocos, bem como a quantidade reduzida do material em peso, conforme a Tabela 29.

Tabela 29 - Economia de cimento na produção de blocos com a composição CR₅

Blocos	Betão necessário (kg)	Cimento utilizado (kg)		Economia de cimento em peso (kg)
		Sem resíduos (C _{Ref})	5% de resíduo em substituição ao cimento (CR ₅)	
1000	17000	1511,11	1435,56	75,56
10000	170000	15111,11	14355,56	755,56
100000	1700000	151111,11	143555,56	7555,56

Para a produção de cem mil blocos, aproximadamente 151 sacos de cimentos (50 kg) seriam reduzidos em comparação à composição usual, sem resíduos. Essa redução torna-se muito significativa, principalmente se considerada a longo prazo para esta e outras empresas fabricantes deste elemento construtivo, visto que o cimento é o material com maior valor agregado entre os constituintes do betão.

4.6.2 +R₅

Como já citado ao longo do trabalho, a dificuldade enfrentada pelos municípios para gerenciar a grande quantidade de resíduos produzidos diariamente pela população é uma questão atual que demanda o estudo e desenvolvimento de novas soluções que visem o melhor aproveitamento para este material gerado, de maneira a evitar o seu descarte.

No caso da composição +R₅, não haveria redução de nenhum outro material na produção dos blocos, não sendo uma ação tão representativa do ponto de vista econômico para a empresa. No entanto, a quantidade de resíduo que teria uma destinação mais adequada e deixaria de ocupar aterros sanitários, significando uma outra alternativa para reutilização desse material, seria bastante considerável, especialmente a longo prazo. A Tabela 30 traz essa quantidade para a produção de mil, dez mil e cem mil blocos.

Tabela 30 - Resíduo utilizado na produção de blocos com a composição +R₅

Blocos	Betão necessário (kg)	Quantidade de resíduo acrescentado (kg)
1000	17000	330,56
10000	170000	3305,56
100000	1700000	33055,56

O dado divulgado pela Instituto Nacional de Estatística (INE) referente ao ano de 2018, descrito no estado da arte do presente trabalho, estimou que, em Portugal, foram produzidos 507,8 kg de resíduos por pessoa no ano, sendo que aproximadamente 36,40% são bioresíduos. Considerando somente os bioresíduos, que compõem o composto orgânico utilizado, pode-se afirmar que cada pessoa produziu 184,84 kg deste tipo de resíduo ao longo do ano de 2018. Dessa forma, a produção de cem mil blocos com a composição +R₅ representaria a utilização da quantidade de bioresíduos gerados por aproximadamente 179 pessoas em um ano.

Segundo informações fornecidas pela Pavimir, a quantidade de blocos fabricados por dia de produção é de 14950 unidades. Desse modo, é possível estimar o impacto dessa produção em relação à quantidade de resíduo utilizado, conforme a Tabela 31.

Tabela 31 - Impacto da inclusão de resíduos na produção de blocos

Produção (unidades)		Resíduo utilizado (kg)		Correspondência em pessoas	
Diária (8h de trabalho)	Mensal (20 dias de trabalho)	Em 1 mês	Em 6 meses	Em 1 mês	Em 6 meses
14950	299000	98836,11	593016,67	535	3208

Mesmo que a produção de blocos não ocorra diariamente, é possível supor uma simulação para análise significando que, em 6 meses, a quantidade de resíduo utilizado corresponderia aos bioresíduos gerados por aproximadamente 3208 pessoas em um ano. Ainda que a composição +R₅ não represente economia de material para a empresa, a análise confirma o impacto vantajoso da sua utilização pois, além da questão ambiental envolvida, essa alternativa também poderia ser explorada beneficemente pelo *marketing* da empresa, visto a importância dada pelo mercado para ações voltadas ao desenvolvimento sustentável.

Capítulo 5

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

No presente capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do estudo e algumas sugestões para trabalhos futuros que possam agregar no conjunto de informações relativas ao comportamento deste tipo de resíduo no betão.

5.1 Trabalhos desenvolvidos

No desenvolvimento do presente trabalho foi estudada a incorporação de resíduos orgânicos no betão utilizado para a fabricação de blocos de compartimentação a fim de reduzir a disposição dos resíduos em aterro, além de reduzir o consumo de materiais constituintes do betão. O composto orgânico fornecido pela empresa Resíduos do Nordeste classificou-se por sua baridade como agregado leve e por sua granulometria pode ser considerado medianamente uniforme e bem graduado. O betão para blocos possui composição seca e por esse motivo não é facilmente reproduzido em laboratório, especialmente pela alta energia de prensagem de equipamentos industriais. Dessa forma, o estudo inicial da composição de referência fornecida pela empresa Pavimir resultou na escolha da relação a/c 0,75 e compactação manual devido ao melhor desempenho quanto à resistência à compressão e aparência mais próxima do betão para blocos produzidos em fábrica.

Na produção dos provetes com as percentagens pré-definidas de resíduos foi constatada uma importante interferência da matéria orgânica na estrutura do betão que resultou na total desagregação do provete no momento do ensaio de resistência à compressão, sendo descartada a possibilidade de acrescentar quantidades superiores a 5% de resíduo na

mistura. A solução mais favorável para tentar reduzir os efeitos observados foi retirar as partículas mais finas do resíduo por meio do peneiramento e umedecê-lo antes de acrescentá-lo à mistura. Desse modo, as composições CR₅ e +R₅ apresentaram o melhor desempenho quanto à resistência à compressão e foram submetidas à realização de ensaios complementares.

A determinação do teor de umidade e o ensaio Vebê Test resultaram em valores que classificam tanto a composição de referência quanto as composições com resíduos, em betão de consistência seca. Observou-se que as duas composições com presença de resíduos apresentaram um aumento no teor de umidade e redução no tempo Vebê, comportamento justificado pelo pré-umedecimento do material.

Quanto à massa volúmica, as três composições (C_{Ref}, CR₅ e +R₅) classificam-se como betão normal, sendo a menor massa volúmica encontrada para CR₅ em razão da retirada de material e substituição pelo resíduo orgânico. O maior valor foi encontrado para +R₅ devido ao acréscimo de material sem a retirada de nenhum outro. Além disso, os provetes estudados apresentaram taxas de absorção de água inferiores ao máximo estabelecido por norma. Os provetes com resíduo orgânico apresentaram aumento da taxa de absorção ao longo do processo de cura, no entanto, CR₅ obteve o menor valor entre as três composições avaliadas. Houve redução da resistência à tração, sendo CR₅ a composição que obteve a menor redução em relação à referência pois contém a menor quantidade de resíduo incorporado.

Quanto a economia, para a produção de cem mil blocos com CR₅, aproximadamente 151 sacos de cimentos (50 kg) seriam reduzidos em comparação à composição usual, sem resíduos. E para +R₅, supondo uma produção diária de 14950 blocos, em 6 meses a quantidade de resíduo utilizado corresponderia aos bioresíduos gerados por aproximadamente 3208 pessoas em um ano.

Conclui-se que a redução de 5% de cimento do betão produzido em fábrica, representa, principalmente se considerado o longo prazo, uma alternativa vantajosa não só do ponto de vista ambiental, mas também do ponto de vista econômico, já que é atribuído ao cimento o maior custo entre os constituintes do betão. O acréscimo de resíduo sem a retirada de material, mesmo que não represente economia à produção de blocos, significa uma importante alternativa à destinação dos resíduos orgânicos, além de beneficiar o *marketing* da empresa em razão do viés sustentável envolvido.

5.2 Trabalhos futuros

Para aprofundar este estudo, pesquisas adicionais podem ser desenvolvidas conforme as sugestões citadas a seguir:

- Realizar testes com outras quantidades de resíduo orgânico que visem encontrar a percentagem ótima de incorporação;
- Verificar o comportamento do betão incorporado com resíduo orgânico em relação a outras características não estudadas, como a resistência ao fogo, comportamento térmico e acústico;
- Aprofundar os estudos quanto à quantidade ideal de água na composição do betão e no resíduo adicionado;
- Estudar a aplicação do resíduo orgânico em outras composições de betão fabricados para outros fins; e
- Aplicar a percentagem ótima de resíduo na produção de blocos em fábrica.

Referências Bibliográficas

- [1] H. Wang e J. L. Provis, “Development of Sustainable Cements and Concretes”, *J. Sustain. Cem.-Based Mater.*, vol. 1, nº 4, p. 153–153, dez. 2012, doi: 10.1080/21650373.2012.757416.
- [2] M. C. da S. A. D. Souza e C. A. Souza Armada, “DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E SUSTENTABILIDADE: Evolução epistemológica na necessária diferenciação entre os conceitos”, *Rev. Direito E Sustentabilidade*, vol. 3, nº 2, p. 17, dez. 2017, doi: 10.26668/IndexLawJournals/2525-9687/2017.v3i2.2437.
- [3] A. A. Feil e D. Schreiber, “Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: desvendando as sobreposições e alcances de seus significados”, *Cad. EBAPEBR*, vol. 15, nº 3, p. 667–681, jul. 2017, doi: 10.1590/1679-395157473.
- [4] T. Klarin, “The Concept of Sustainable Development: From its Beginning to the Contemporary Issues”, *Zagreb Int. Rev. Econ. Bus.*, vol. 21, nº 1, p. 67–94, maio 2018, doi: 10.2478/zireb-2018-0005.
- [5] G. S. Barbosa, “DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL”, vol. 1, p. 11, 2008.
- [6] R. T. Neder, “Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente”, *Rev. Adm. Empres.*, vol. 34, nº 2, p. 89–91, abr. 1994, doi: 10.1590/S0034-75901994000200011.
- [7] C. de Carli, L. R. D. Vecchia, e G. Batista, “ESTRATÉGIAS PARA UMA EDIFICAÇÃO MAIS SUSTENTÁVEL: AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL DISPONÍVEIS EM XANXERÊ, SC”, *Unoesc Ciênc. - ACET*, vol. 4, nº 2, p. 209–216, nov. 2013.
- [8] F. Pacheco-Torgal e S. Jalali, *A sustentabilidade dos materiais de construção*. Universidade do Minho. TecMinho, 2010.
- [9] R. M. V. Domingues, “Avaliação do potencial económico de implementação da construção em BTC”, 2015.

- [10] “EUROCONSTRUCT - PR2020_89”.
http://www.euroconstruct.org/jart/prj3/wifo/main.jart?rel=euroconstruct_en&reserve-mode=active&content-id=1591848018607 (acessado set. 22, 2020).
- [11] C. J. Kibert, *Sustainable construction: green building design and delivery*, Fourth edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016.
- [12] R. Mateus, “Avaliação da sustentabilidade na construção : propostas para o desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis”, set. 2009, Acessado: set. 23, 2020. [Online]. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/>.
- [13] N. A. Madloul, R. Saidur, M. S. Hossain, e N. A. Rahim, “A critical review on energy use and savings in the cement industries”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, nº 4, p. 2042–2060, maio 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.01.005.
- [14] M. B. Maury e R. N. Blumenschein, “Produção de cimento : impactos à saúde e ao meio ambiente”, 2012, Acessado: set. 23, 2020. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/12110>.
- [15] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata, e F. Van Woerden, “What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050”. Acessado: set. 23, 2020. [Online]. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>.
- [16] K. Sobolev, M. Kozhukhova, K. Sideris, E. Menéndez, e M. Santhanam, “Alternative Supplementary Cementitious Materials”, in *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials*, vol. 25, N. De Belie, M. Soutsos, e E. Gruyaert, Orgs. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 233–282.
- [17] M. A. T. Russo, “TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS”, p. 196.
- [18] *Decreto-Lei n.º 73/2011*. 2011.
- [19] M. M. M. Alencar, “RECICLAGEM DE LIXO NUMA ESCOLA PÚBLICA DO MUNICÍPIO DE SALVADOR”, *Rev. Virtual*, vol. 1, nº 2, p. 96–113, 2005.
- [20] H. I. Abdel-Shafy e M. S. M. Mansour, “Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization”, *Egypt. J. Pet.*, vol. 27, nº 4, Art. nº 4, 2018, doi: 10.1016/j.ejpe.2018.07.003.
- [21] “Angela Isabel Gonçalves da Costa Leal”, p. 103.
- [22] A. L. Lomasso, “BENEFÍCIOS E DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DA RECICLAGEM: UM ESTUDO DE CASO NO CENTRO MINEIRO DE REFERÊNCIA EM RESÍDUOS (CMRR)”, vol. 3, nº 2, p. 20.

- [23] *Diretiva 2008/98/CE relativa aos resíduos e que revoga certas diretiva*. 2008.
- [24] *Diretiva (UE) 2018/851 que altera a Diretiva 2008/98/CE relativa aos resíduos*. 2018.
- [25] “ISO 14040 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework”. 2014.
- [26] “ISO 14044 - Environmental Management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines”. 2014.
- [27] L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez, e A. Castell, “Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, p. 394–416, jan. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.037.
- [28] *REGULAMENTO (UE) N.º 305/2011 que estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção e que revoga a Diretiva 89/106/CEE do Conselho*. 2011.
- [29] B. Marques, A. Tadeu, J. Almeida, J. António, e J. de Brito, “Characterisation of sustainable building walls made from rice straw bales”, *J. Build. Eng.*, vol. 28, p. 101041, mar. 2020, doi: 10.1016/j.job.2019.101041.
- [30] S. E. Fernandes *et al.*, “Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade”, *Matér. Rio Jan.*, vol. 20, n° 4, p. 909–923, dez. 2015, doi: 10.1590/S1517-707620150004.0096.
- [31] D. Tavakoli, M. Hashempour, e A. Heidari, “Use of waste materials in concrete: A review”, *Pertanika J. Sci. & Technol.*
- [32] C. Dogan e İ. Demir, “Mechanical Properties of Recycled Aggregates From Construction Demolition Waste”, in *Proceedings [...]*, Afyonkarahisar, Turkey, 2019, vol. 1, p. 105–110.
- [33] M. Batayneh, I. Marie, e I. Asi, “Use of selected waste materials in concrete mixes”, *Waste Manag.*, vol. 27, n° 12, p. 1870–1876, jan. 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.07.026.
- [34] D. H. da Silva, E. da S. Santana, J. F. T. Silva, S. Almeida, e S. F. de Lima, “Cadernos de graduação: Ciências exatas e tecnológicas”, *Constr. Sustentável Na Eng. Civ.*, vol. 4, n° 2, p. 89–100, nov. 2017.
- [35] A. Hanif, Y. Kim, K. Lee, C. Park, e J. Sim, “Influence of cement and aggregate type on steam-cured concrete – an experimental study”, *Mag. Concr. Res.*, vol. 69, n° 13, p. 694–702, jul. 2017, doi: 10.1680/jmacr.17.00015.

- [36] M. Eckert e M. Oliveira, “Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 133, p. 416–424, fev. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.132.
- [37] S. Shahidan, M. A. M. Azmi, K. Kupusamy, S. S. M. Zuki, e N. Ali, “Utilizing Construction and Demolition (C&D) Waste as Recycled Aggregates (RA) in Concrete”, *Procedia Eng.*, vol. 174, p. 1028–1035, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.255.
- [38] F. U. A. Shaikh e H. L. Nguyen, “Properties of concrete containing recycled construction and demolition wastes as coarse aggregates”, *J. Sustain. Cem.-Based Mater.*, vol. 2, n° 3–4, p. 204–217, dez. 2013, doi: 10.1080/21650373.2013.833861.
- [39] J. V. Puthussery, R. Kumar, e A. Garg, “Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study”, *Waste Manag.*, vol. 60, p. 270–276, fev. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.06.008.
- [40] H. Dong, W. Cao, J. Bian, e J. Zhang, “The Fire Resistance Performance of Recycled Aggregate Concrete Columns with Different Concrete Compressive Strengths”, *Materials*, vol. 7, n° 12, p. 7843–7860, dez. 2014, doi: 10.3390/ma7127843.
- [41] N. Tamanna, “Utilization of Waste Glass in Concrete”, in *Proceedings [...]*, Kuching, Sarawak, Malaysia, 2013, vol. 1.
- [42] R. dos S. Cordeiro e A. L. B. Montel, “Estudo da viabilidade para a produção de concretos com adição de resíduos de vidro em substituição ao agregado miúdo na cidade de Palmas-TO”, *Desafios - Rev. Interdiscip. Universidade Fed. Tocantins*, vol. 2, n° Especial, p. 104–123, 2015, doi: 10.20873/uft.2359-3652.2015v2nespp104.
- [43] S. P. Gautam, V. Srivastava, e V. C. Agarwal, “Use of glass wastes as fine aggregate in Concrete”, vol. 1, p. 4, 2012.
- [44] C. Medina, P. F. G. Banfill, M. I. Sánchez de Rojas, e M. Frías, “Rheological and calorimetric behaviour of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demolition waste”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, p. 822–831, mar. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.112.
- [45] A. Sofi, “Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – A review”, *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, n° 4, p. 2691–2700, dez. 2018, doi: 10.1016/j.asej.2017.08.007.

- [46] F. Hernández-Olivares e G. Barluenga, “Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, nº 1, p. 109–117, jan. 2004, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00253-9.
- [47] D. Zunaithur Rahman, S. Jeyamugesh, S. Sivaranjani, e J. Vijayaraghavan, “Engineering & Technology in India”, *Study on Waste Rubber Tyre in Concrete for Eco-friendly Environment*, vol. 1, nº 5.
- [48] M. Sohrabi e M. Karbalaie, “International Journal of Civil & Environmental”, *Exp. Study Compressive Strength Concr. Contain. Crumb Rubber*, vol. 11, nº 3, p. 24–28, jun. 2011.
- [49] H. Liu, X. Wang, Y. Jiao, e T. Sha, “Experimental Investigation of the Mechanical and Durability Properties of Crumb Rubber Concrete”, *Materials*, vol. 9, nº 3, p. 172, mar. 2016, doi: 10.3390/ma9030172.
- [50] F. M. Silva, E. J. P. Miranda Jr., J. M. C. D. Santos, L. A. Gachet-Barbosa, A. E. Gomes, e R. C. C. Lintz, “The use of tire rubber in the production of high-performance concrete”, *Cerâmica*, vol. 65, nº suppl 1, p. 110–114, jan. 2019, doi: 10.1590/0366-6913201965s12598.
- [51] D. Bhatia, A. Sharma, e U. Malhotra, “International Journal of Fiber and Textile Research”, *Recycled fibers: An overview*, p. 77–82, 2014.
- [52] P. P. Pichardo, G. Martínez-Barrera, M. Martínez-López, F. Ureña-Núñez, e L. I. Ávila-Córdoba, “Waste and Recycled Textiles as Reinforcements of Building Materials”, in *Natural and Artificial Fiber-Reinforced Composites as Renewable Sources*, E. Günay, Org. InTech, 2018.
- [53] J. R. de Pessôa, G. de Carvalho, C. W. Santos, S. V. Aguiar, e J. T. Assis, “Aproveitamento de resíduo têxtil em material compósito (concreto).”, apresentado em 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, Brasil, nov. 2014.
- [54] D. G. Andrade, P. B. Machado, J. T. de Assis, J. R. de C. Pessoa, e G. de Carvalho, “UTILIZAÇÃO DE DESCARTE DE RESÍDUOS TÊXTEIS (POLIAMIDA/POLIÉSTER), COMO AGREGADO EM CONCRETO”, *Acta Sci. Tech.*, vol. 3, nº 2, 2015, doi: 10.5935/2317-8957.20150005.
- [55] E. Rahmani, M. Dehestani, M. H. A. Beygi, H. Allahyari, e I. M. Nikbin, “On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, p. 1302–1308, out. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.

- [56] K. M.-G. Noori e H. Ibrahim, “Mechanical Properties of Concrete Using Iron Waste as a Partial Replacement of Sand”, *Eurasian J. Sci. Eng.*, vol. 3, nº 3, 2018, doi: 10.23918/eajse.v3i3p75.
- [57] “Gestão de Resíduos Orgânicos”. <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gest%C3%A3o-de-res%C3%ADduos-org%C3%A2nicos.html#o-que-sao-residuos-organicos> (acessado set. 22, 2020).
- [58] T. C. Dal Bosco, F. Gonçalves, F. C. de Andrade, I. Taiatele Junior, J. dos S. Silva, e M. Sbizarro, “Contextualização teórica: compostagem e vermicompostagem”, in *Compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos: resultados de pesquisas acadêmicas*, 1º ed, Editora Blucher, 2017, p. 19–44.
- [59] P. K. Amritha e P. P. Anilkumar, “Development of Landscaped Landfills Using Organic Waste for Sustainable Urban Waste Management”, *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, p. 368–376, 2016, doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.016.
- [60] M. Temer, J. S. Filho, e M. Cruz, “República Federativa do Brasil”, p. 66.
- [61] *Decreto-Lei n.º 152/2002*. 2002.
- [62] D. M. M. de Jesus, “Aterros sanitários, um mal necessário ou uma fonte de energia alternativa?”, fev. 2018, Acessado: set. 23, 2020. [Online]. Disponível em: <https://repositorioaberto.uab.pt/handle/10400.2/7245>.
- [63] I. V. Muralikrishna e V. Manickam, “Solid Waste Management”, in *Environmental Management: Science and Engineering for Industry*, p. 431–462.
- [64] M. P. Bernal, S. G. Sommer, D. Chadwick, C. Qing, L. Guoxue, e F. C. Michel, “Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits”, in *Advances in Agronomy*, vol. 144, Elsevier, 2017, p. 143–233.
- [65] “Gases do efeito estufa: Dióxido de Carbono (CO₂) e Metano (CH₄) - ((o))eco”, *O ECO*, abr. 30, 2014. <https://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28261-gases-do-efeito-estufa-dioxido-de-carbono-co2-e-metano-ch4/> (acessado set. 22, 2020).
- [66] C. Polprasert e T. Koottatep, *Organic waste recycling: technology, management and sustainability*, Fourth edition. London: IWA Publishing, 2017.
- [67] M. S. Gonçalves, *Gestão de Resíduos Orgânicos*. Porto: Spi - Sociedade Portuguesa de Inovação, 2005.
- [68] C. A. G. Perlingeiro, *Biocombustíveis no Brasil: fundamentos, aplicações e perspectivas*. São Paulo: Synergia, 2014.

- [69] G. L. Sant'Anna Jr, "Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações", *Eng. Sanit. E Ambient.*, vol. 16, nº 2, p. IV–IV, jun. 2011, doi: 10.1590/S1413-41522011000200002.
- [70] Kalaivani, Shena, S. Anisha, S. Gokul Prasad, K. Vignesh, e S. Muthulakshmi, "Application of Organic Waste in Concrete", *Int. J. Innov. Sci. Res. Technol.*, vol. 4, nº 4, p. 61, 2019.
- [71] N. Belapure e B. Adinarayana, "Strength Characteristics of Organic Waste Concrete", vol. 02, nº 09, p. 6.
- [72] I. Soto Izquierdo e M. A. Ramalho, "Use of residual powder obtained from organic waste to partially replace cement in concrete", *DYNA*, vol. 83, nº 195, p. 147–155, fev. 2016, doi: 10.15446/dyna.v83n195.44725.
- [73] C. Ribeir. Fernandes, "Madeira e seus derivados na construção – Caso de estudo de proposta de um material alternativo", Dissertação (Mestrado), Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro, Vila Real, 2019.
- [74] J. S. L. Marcos, "Materiais naturais alternativos de isolamento térmico", jun. 2016, Acessado: set. 24, 2020. [Online]. Disponível em: <http://repositorio.utad.pt/handle/10348/6054>.
- [75] J. Chege, W. Oyawa, e G. Mang'uriu, "The Effects of Pine (*Pinus Canariensis*) Tree Bark Extract on the Properties of Fresh and Hardened Concrete", *Civ. Environ. Res.*, vol. 6, nº 9, p. 70–83, 2014.
- [76] M. J. Á. R. de S. Coutinho, "Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem", 1998, Acessado: set. 24, 2020. [Online]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11906>.
- [77] S. A. Zareei, F. Ameri, F. Dorostkar, e M. Ahmadi, "Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties", *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 7, p. 73–81, dez. 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.05.001.
- [78] G. A. Habeeb e H. B. Mahmud, "Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material", *Mater. Res.*, vol. 13, nº 2, p. 185–190, jun. 2010, doi: 10.1590/S1516-14392010000200011.
- [79] A. M. Pereira *et al.*, "Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz", *Matér. Rio Jan.*, vol. 20, nº 1, p. 227–238, mar. 2015, doi: 10.1590/S1517-707620150001.0023.

- [80] K. Gunasekaran, R. Annadurai, e P. S. Kumar, “A study on some durability properties of coconut shell aggregate concrete”, *Mater. Struct.*, vol. 48, nº 5, p. 1253–1264, maio 2015, doi: 10.1617/s11527-013-0230-2.
- [81] K. Gunasekaran, P. S. Kumar, e M. Lakshmipathy, “Mechanical and bond properties of coconut shell concrete”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, nº 1, p. 92–98, jan. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.053.
- [82] A. Kanojia e S. K. Jain, “Performance of coconut shell as coarse aggregate in concrete”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, p. 150–156, jun. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.066.
- [83] E. Silva, M. L. Marques, C. Fornari Junior, e F. Velasco, “Technical analysis for the reuse of coconut fiber in construction industry”, *Ambiência*, vol. 11, nº 3, 2015, doi: 10.5935/ambiencia.2015.03.11.
- [84] A. S. Leman *et al.*, “Durability of coconut shell powder (CSP) concrete”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 271, p. 012007, nov. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/271/1/012007.
- [85] S. A. Lima, A. Sales, F. do C. R. Almeida, J. P. Moretti, e K. F. Portella, “Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão”, *Ambiente Construído*, vol. 11, nº 2, p. 201–212, jun. 2011, doi: 10.1590/S1678-86212011000200014.
- [86] “NBR 11578 - Cimento Portland Composto”. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, jul. 1991.
- [87] F. C. R. Almeida, A. Sales, J. P. Moretti, e P. C. D. Mendes, “Use of sugarcane bagasse ash sand (SBAS) as corrosion retardant for reinforced Portland slag cement concrete”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 226, p. 72–82, nov. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.217.
- [88] S. A. Zareei, F. Ameri, e N. Bahrami, “Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, p. 258–268, set. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153.
- [89] F. Batool, A. Masood, e M. Ali, “Characterization of Sugarcane Bagasse Ash as Pozzolan and Influence on Concrete Properties”, *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 45, nº 5, p. 3891–3900, maio 2020, doi: 10.1007/s13369-019-04301-y.
- [90] D. K. Panesar e B. Shindman, “The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork”, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, nº 9, p. 982–992, out. 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.06.003.

- [91] M. C. Pacheco Menor, P. Serna Ros, A. Macías García, e M. J. Arévalo Caballero, “Granulated cork with bark characterised as environment-friendly lightweight aggregate for cement based materials”, *J. Clean. Prod.*, vol. 229, p. 358–373, ago. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.154.
- [92] J. K. Prusty, S. K. Patro, e S. S. Basarkar, “Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review”, *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 5, n° 2, p. 312–333, dez. 2016, doi: 10.1016/j.ijse.2016.06.003.
- [93] E. B. da Costa, T. R. S. Nobre, A. Q. Guerreiro, M. Mancio, e A. P. Kirchheim, “Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental”, *Ambiente Construído*, vol. 13, n° 2, p. 75–86, jun. 2013, doi: 10.1590/S1678-86212013000200007.
- [94] H. Boussetoua, C. Maalouf, M. Lachi, A. Belhamri, e T. Moussa, “Mechanical and hygrothermal characterisation of cork concrete composite: experimental and modelling study”, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 24, n° 4, p. 456–471, mar. 2020, doi: 10.1080/19648189.2017.1397551.
- [95] C. Parra, E. M. Sánchez, I. Miñano, F. Benito, e P. Hidalgo, “Recycled Plastic and Cork Waste for Structural Lightweight Concrete Production”, *Sustainability*, vol. 11, n° 7, p. 1876, mar. 2019, doi: 10.3390/su11071876.
- [96] N. V. Lakshmi e P. S. Sagar, “Study on partial replacement of groundnut shell ash with cement”, *Chall. J. Concr. Res. Lett.*, vol. 8, n° 3, p. 84, set. 2017, doi: 10.20528/cjcr.2017.03.002.
- [97] B. H. Sada, Y. D. Amartey, e S. P. Bako, “An investigation into the use of groundnut shell as fine aggregate replacement”, *Niger. J. Technol.*, vol. 32, n° 1, p. 54–60, mar. 2013.
- [98] H. T. Kimeng, O. O. Ekundayo, M. Sani, e K. Frederick, “Feasibility study of the use of Groundnut Shells as Fine Aggregates in Light weight Concrete Construction”, *Int. J. Adv. Res. Eng.*, vol. 1, n° 1, p. 13, jun. 2015, doi: 10.24178/ijare.2015.1.1.13.
- [99] DR. F. A. Olutoge, “Characteristics strength and durability of groundnut shell ash blended cement concrete in sulphate environments”, *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, n° 7, p. 2022–2034, jul. 2013.
- [100] *Decreto-Lei n.º 178/2006*. 2006.
- [101] *Decreto-Lei n.º 152-D/2017*. 2017.
- [102] “Municipal waste statistics - Statistics Explained”, *EUROSTAT*.
<https://ec.europa.eu/eurostat/statistics->

- explained/index.php/Municipal_waste_statistics#%20Municipal_waste_generation (acessado abr. 29, 2020).
- [103] “Relatório Anual de Resíduos Urbanos”, APA - Agência Portuguesa do Ambiente, Portugal, 2019. Acessado: abr. 29, 2020. [Online]. Disponível em: https://apambiente.pt/_zdata/PoliticaResiduos/Residuos_Urbanos/RARU_2018_v2.pdf.
- [104] “Instituto Nacional de Estatística - Estatísticas do Ambiente : 2018. Lisboa : INE, 2019. Disponível na www: <url:https://www.ine.pt/xurl/pub/358631361>”. Acessado: maio 25, 2020. [Online].
- [105] “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil”, ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, Brasil, 2019. Acessado: abr. 29, 2020. [Online]. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>.
- [106] E. da C. Nepomuceno, “Use of municipal waste to build ecological blocks”, 2019, Acessado: set. 23, 2020. [Online]. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/18933>.
- [107] O. Graupmann, M. A. Martins, M. Consul, e L. Cechin, “Análise da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de aterro sanitário”, *Matér. Rio Jan.*, vol. 24, nº 2, p. e12348, 2019, doi: 10.1590/s1517-707620190002.0663.
- [108] M. Czop e B. Łażniewska-Piekarczyk, “Use of Slag from the Combustion of Solid Municipal Waste as A Partial Replacement of Cement in Mortar and Concrete”, *Materials*, vol. 13, nº 7, p. 1593, mar. 2020, doi: 10.3390/ma13071593.
- [109] J. P. M. Gouveia, “Comportamento de estruturas de alvenaria por aplicação de acções de compressão : análise de materiais e definição de coeficientes de acordo com o Eurocode 6”, apresentado em Comportamento de estruturas de alvenaria por aplicação de acções de compressão : análise de materiais e definição de coeficientes de acordo com o Eurocode 6, 2000, Acessado: set. 24, 2020. [Online]. Disponível em: <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/15751>.
- [110] C. de S. Barbosa, “Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte”, Mestrado em Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- [111] J. S. Medeiros e F. H. Sabbatini, “Alvenaria estrutural nao armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto”, 1993, Acessado: set. 23, 2020. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000737187>.

- [112] R. P. Andolfato, J. S. Camacho, e R. M. Maurício, “Blocos de concreto: A busca de um traço otimizado”, *Rev. IBRACON–Instituto Bras. Concreto*, p. 32–39, 2002.
- [113] “NBR 6136 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos”. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, nov. 03, 2016.
- [114] “NP EN 771-3 +A1 - Especificações para unidades de alvenaria; Parte 3: Unidades de betão de agregados (blocos de betão de agregados correntes e leves)”. Norma Portuguesa, 2016.
- [115] “Eurocode 6 - Design of Masonry Structures”. European Standard, 2005.
- [116] “NP EN 772-13: Métodos de ensaio de blocos para alvenaria; Parte 13: Determinação da massa volúmica real seca e da massa volúmica aparente seca de blocos para alvenaria (excepto blocos de pedra natural)”. Norma Portuguesa, 2002.
- [117] L. A. P. Oliveira, “Apontamentos de apoio sobre Alvenarias. Apontamentos das aulas de Mestrado da disciplina de Estruturas de Alvenarias e Madeira.” Coimbra, D.E.C./F.C.T.U.C., 1995.
- [118] R. C. Smith e C. K. Andres, *Materials of construction*, 4th ed. New York: Gregg Division, McGraw-Hill, 1988.
- [119] “NP EN 206-1 - Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”. Norma Portuguesa, 2007.
- [120] “NP EN 1097-6 - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”. Norma Portuguesa, 2016.
- [121] “NBR 12118 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Métodos de ensaio”. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2013.
- [122] “Especificação E 394 - Betões: Determinação da Absorção de água por imersão”. LNEC, 1993.
- [123] “NP EN 772-1 - Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 1: Determinação da resistência à compressão”. Norma Portuguesa, 2011.
- [124] M. K. Abd e Z. D. Habeeb, “EFFECT OF SPECIMEN SIZE AND SHAPE ON COMPRESSIVE STRENGTH OF SELF-COMPACTING CONCRETE”, vol. 07, nº 02, p. 14, 2014.
- [125] Rajiv Banarjee, Md. Abid Alam, Zeeshan Ahmad, e INTEGRAL UNIVERSITY LUCKNOW, “Study of Compressive Strength of Various Grades of Concrete using Different Sizes of Cubes”, *Int. J. Eng. Res.*, vol. V4, nº 07, p. IJERTV4IS070455, jul. 2015, doi: 10.17577/IJERTV4IS070455.

- [126] N. G. Shrive, “The failure mechanism of face-shell bedded (ungrouted and unreinforced) masonry.”, *Int. J. Mason. Constr.*, vol. 2, nº 3, p. 115–128, 1982.
- [127] R. G. Drysdale, A. A. Hamid, e L. R. Baker, *Masonry structures: behavior and design*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1994.
- [128] “NP EN 12390-6 - Ensaios do betão endurecido; Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes”. Norma Portuguesa, 2011.
- [129] “NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento”. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2014.
- [130] PAVIMIR, “Especificação Técnica ET 025: Blocos de betão”. 2019.
- [131] V. G. Haach, G. Vasconcelos, e P. B. Lourenço, “Desenvolvimento de blocos estruturais de concreto.”, Guimarães, nov. 2008, p. 1–10.
- [132] “NP EN 197-1 - Cimento ; Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes”. Norma Portuguesa, 2012.
- [133] “NP EN 933-1 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados; Parte 1: Análise granulométrica; Método da peneiração”. Norma Portuguesa, 2014.
- [134] A. e B. Ltda. NORDAREIAS, “Declaração de desempenho: G4/8C Gravilha 4/8, AGC Areia grossa 0/4”. Pavimir, 2018.
- [135] C. A. P. dos S. e F. CAPSFIL SA, “Declaração de desempenho do produto: Pó de Areia 0/6”. Pavimir, 2018.
- [136] Fundação CIDAUT, “Relatório Técnico: Composto orgânico Resíduos do Nordeste”. 2019.
- [137] “NP EN 1097-3 - Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios”. Norma Portuguesa, 2002.
- [138] “NBR 12655 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento”. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2015.
- [139] A. de S. Coutinho, *Fabrico e propriedades do betão*, 2 ed. LNEC, 1988.
- [140] “NP EN 12620 - Agregados para betão”. Norma Portuguesa, 2010.
- [141] “NBR 6502 - Rochas e solos - Terminologia”. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1995.
- [142] R. B. da Silva, S. C. Angulo, R. G. Pileggi, e C. O. Silva, “Concretos secos produzidos com agregados reciclados de RCD separados por densidade”, *Ambiente*

- Construído*, vol. 15, nº 4, p. 335–349, dez. 2015, doi: 10.1590/s1678-86212015000400054.
- [143] “NP EN 12390-1 - Ensaio do betão endurecido; Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes”. Norma Portuguesa, 2012.
- [144] C. E. S. Tango, “Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais”, in *Proceedings [...]*, Florianópolis, Brasil, 1994, vol. 5, p. 21–30.
- [145] A. Frasson Junior, “Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural”, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- [146] A. L. de Oliveira, “Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação”, Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [147] I. Fernandes, “Blocos e pavers: produção e controle de qualidade”. Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais LTDA, São Paulo 2008.
- [148] “NP EN 12390-2 - Ensaio do betão; Parte2:Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica”. Norma Portuguesa, 2019.
- [149] “NP EN 12390-3 - Ensaio do betão endurecido; Parte 3: Resistência à compressão de provetes”. Norma Portuguesa, 2011.
- [150] J. de S. Coutinho, “Agregados para argamassas e betões”, 1999. <https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/agregpart1.pdf> (acessado jun. 22, 2020).
- [151] L. Ferreira, J. de Brito, e M. Barra, “Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties”, *Mag. Concr. Res.*, vol. 63, nº 8, p. 617–627, ago. 2011, doi: 10.1680/macr.2011.63.8.617.
- [152] “NP EN 12350-3 - Ensaio do betão fresco; Parte 3: Ensaio Vêbê”. Norma Portuguesa, 2009.
- [153] “NP EN 12350-2: Ensaio do betão fresco; Parte 2: Ensaio de abaixamento”. Norma Portuguesa, 9.
- [154] “ACI 211.3R-02 - Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete”. American Concrete Institute, 2009.
- [155] “NP EN 12390-7 - Ensaio do betão endurecido; Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido”. Norma Portuguesa, 2009.

[156] G. F. Spuldaro, “Caracterização mecânica de alvenarias de blocos de solo-cimento com incorporação de resíduos orgânicos”, 2020, Acessado: out. 20, 2020. [Online]. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/22507>.

[157] G. L. Gontijo, "Thermal Behaviour of Compressed Earth Blocks with Municipal Organic Waste Incorporation", 2020, Acessado: out. 20, 2020. [Online]. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/22533>.