

RESÍDUO INDUSTRIAL: ESTUDO DA APLICABILIDADE EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

LAURA DE OLIVEIRA SOARES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

Orientadora: Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de Sousa
Coutinho

NOVEMBRO DE 2021

MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



mestec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

A sorte segue a coragem.

Mario Sergio Cortella

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a meus pais, Anna Lúcia e Cláudio, e ao meu irmão Rodrigo, sem o incentivo e apoio deles esta dissertação não se concretizaria, mesmo que a distância. Também gostaria de agradecer a minha tia Ana por toda disposição, apoio e suporte.

A minha orientadora, Professora Doutora Joana Sousa Coutinho, pela colaboração, dedicação, transferência de conhecimento e experiência, características estas que viabilizaram a realização deste trabalho.

A todos os técnicos do laboratório de ensaio de materiais de construção (LEMC) pela disposição e empenho na realização dos ensaios experimentais, em especial as engenheiras Patrícia e Dora. Ao Miguel, do Departamento de Engenharia de Minas e Metalúrgica pela disponibilidade e ajuda no início da realização deste trabalho.

À empresa GrandVision por fornecer os resíduos de lentes oftálmicas utilizadas neste estudo.

Um agradecimento especial também a todas as minhas amigas do Brasil, Ana Clara, Natália, Fernanda, Helena e Marcela e aos amigos que fiz aqui em Portugal Thaina, Sara, Scarllet, Rafaela P, Chanalisa, Josema, Viviane e Rafaela B. E por fim, agradeço ao Iran pelo incentivo e companheirismo em parte dessa trajetória.

RESUMO

A produção de resíduos em larga escala, atualmente, é um problema mundial que enfrenta enorme dificuldade de ser solucionado, seja pela dificuldade de reciclar o material, pelo custo do seu tratamento ser elevado ou até mesmo pela falta de conhecimento e políticas de incentivo em descartes e reciclagem. A construção civil é um setor que pode mitigar os efeitos deste problema já que apresenta um enorme potencial para absorver e valorizar resíduos através da incorporação deles em betões e argamassas. Portanto, a presente tese de mestrado pretende viabilizar tecnicamente a utilização de um resíduo industrial, proveniente do sobranço de lentes oftálmicas produzidas com Columbia resin 39 (CR39), através da substituição parcial do agregado natural em argamassas de revestimento.

O plano de trabalho consistiu em incorporar o resíduo de lentes oftálmicas (LW) em argamassas para mosaicos hidráulicos, como substituto parcial da areia. Em uma primeira etapa, com o objetivo de identificar qual composição mais se adequaria para a produção dos mosaicos, realizou-se um estudo preliminar onde produziu-se 8 argamassas utilizando diferentes percentuais de substituição em volume (20% e 50%), tipos de cimento (CEM 32,5, CEM 42,5 e CEM 52,5) e a relação água/cimento (0,45 e 0,50). Para cada argamassa, moldaram-se 3 provetes com dimensão de 4×4×16 que, após 28 dias em cura, foram submetidos aos ensaios de resistência à flexão e compressão. Diante dos resultados de resistência à flexão obtidos definiu-se que a melhor composição seria a que apresentava 20% de LW, 80% de areia natural, cimento CEM 52,5 e relação água/cimento de 0,45.

A segunda etapa consistiu na produção de mosaicos de acordo com NP EN 13748-1 e NP EN 13748-2. Para isso, definiu-se moldar peças com dimensões de 20×20 cm² e espessura de 21 mm para submeter a ensaios de resistência à rotura, abrasão e absorção de água. Os resultados obtidos para a resistência à rotura aos 28 dias alcançaram uma média de 4,2 MPa. Quanto à resistência à abrasão os provetes, obtiveram uma perda de volume média de 1,69 cm³/50 cm². Já no ensaio de absorção os resultados foram satisfatórios, atingindo um coeficiente de absorção capilar de 0,3 g/cm² e uma absorção absoluta de água equivalente a 6,7 % da massa.

Em uma análise geral os resultados não são satisfatórios, principalmente devido ao facto dos mosaicos não terem atingido a resistência esperada. Isso pode ter ocorrido devido à ausência de prensas para a produção do mosaico, o que pode ter resultado em uma argamassa não suficientemente compactada. Logo, este trabalho contribui de forma significativa identificando possíveis falhas na produção que podem ter prejudicado os resultados finais, e consequentemente auxiliando na possível valorização do resíduo em futuros trabalhos.

PALAVRAS-CHAVE: economia circular, resíduo de lentes, mosaicos hidráulicos, ladrilhos hidráulicos, resíduo industrial.

ABSTRACT

The large-scale production of waste is currently a global problem that faces enormous difficulty to be solved, whether due to the difficulty of recycling the material, the high cost of its treatment or even the lack of knowledge and incentive policies for disposal and recycling. Civil construction is a sector that can mitigate the effects of this problem as it has huge potential to absorb and recover waste through its incorporation into concrete and mortar. Therefore, this thesis intends to technically enable the use of an industrial waste from scrap ophthalmic lenses produced with Columbia resin 39 (CR39) for partial replacement of the natural aggregate in coating mortars.

The main work consists in the incorporation of ophthalmic lens waste (LW) in mortars for terrazzo tiles as a partial substitute of the sand. To identify which composition would be most suitable to produce terrazzo tiles, a preliminary study was carried out, 8 mortars were produced using different percentages of substitution in volume (20 % and 50%), 3 types of cement (CEM 32.5, CEM 42.5 and CEM 52.5) and 2 water/cement ratio (0.45 and 0.50). For each mortar, 3 specimens with dimensions of 4×4×16 were moulded and, after 28 days, were submitted to flexural strength and compression strength tests. Considering the results of flexural strength obtained, it was possible to identify the best composition corresponding to 20% LW, 80% natural sand, cement CEM 52.5 and a water/cement ratio of 0.45.

A second phase of the present research work aimed at producing terrazzo tiles to NP EN 13748-1 and NP EN 13748-2. Test specimens with dimensions of 20×20 cm² and thickness of 21 mm that later were moulded and later submitted to flexural testing, Bohme abrasion and water absorption tests. The results obtained for the flexural strength at 28 days reached an average of 4.2 MPa. The Bohme abrasion resistance of the specimens obtained an average volume loss of 1.69 cm³/50 cm². In the absorption test the results were satisfactory, reaching a coefficient of capillary absorption of 0.3 g/cm² and an absolute water absorption equivalent to 6.7% of the mass.

In a global analysis the presented results are not yet satisfactory, mainly since the tiles did not reach the expected mechanical strength. This could be due to the absence of adequate presses to produce the tiles, which could have resulted in a mortar not sufficiently compacted. Therefore, this work contributed significantly by identifying possible failures in production that led to under-target results, thus leading the way for future work on the application of this waste.

KEYWORDS: circular economy, lens waste, terrazzo tiles, industrial waste.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. CONCEITOS IMPORTANTES	3
2.2. ECONOMIA CIRCULAR (A EVOLUÇÃO DA ECONOMIA)	4
2.2. MOSAICOS/LADRILHOS HIDRÁULICOS	5
2.2.1. PREMISSAS GEOMÉTRICAS	7
2.2.1.1. Espessura	7
2.2.1.2. Tolerâncias de dimensão	7
2.2.1.3. Tolerâncias da forma.....	8
2.2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ACORDO COM NP EN13748-1	8
2.2.2.1. Exigências para a resistência e carga à rotura.....	8
2.2.2.2. Resistência à abrasão	8
2.2.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA DE ACORDO COM NP EN13748-1	9
2.2.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ACORDO COM NP EN 13748-2.....	9
2.2.4.1. Exigências para a resistência e carga à rotura.....	9
2.2.4.2. Resistência à abrasão	10
2.2.5. RESISTÊNCIA ÀS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DE ACORDO COM NP EN 13748-2.....	10
2.3. HISTÓRIA DOS RESÍDUOS	10
2.4. RESÍDUOS PLÁSTICOS E A SUA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	11
2.5. USO DE MATERIAIS RECICLADOS EM ARGAMASSAS E BETÃO	12
2.6. LENTES OFTÁLMICAS.....	13

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	17
3.1. INTRODUÇÃO	17
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS	17
3.2.1 RESÍDUO DE LENTES OFTALMOLÓGICAS	17
3.2.1.1. Trituração do resíduo	18
3.2.1.2. Granulometria do LW	19
3.2.2. CIMENTO	21
3.2.3. ÁGUA	22
3.2.4. AREIA	22
3.3. ENSAIOS PRELIMINARES	22
3.3.1. PRODUÇÃO DAS AMASSADURAS	23
3.3.2. ENSAIO DE TRABALHABILIDADE	24
3.3.3. MOLDAGEM DOS PROVETES	25
3.3.4. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO	27
3.3.5. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	28
3.3.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PRELIMINARES	29
3.4. PRODUÇÃO DOS MOSAICOS	30
3.4.1. DEFINIÇÃO DA ESPESSURA	30
3.4.2. PREPARO DA ARGAMASSA	31
3.4.3. MOLDAGEM DOS MOSAICOS	32
3.5. ENSAIOS REALIZADOS NOS LADRILHOS E MOSAICOS	35
3.5.1. ENSAIOS NOS LADRILHOS DE ACORDO COM NP EN 13748-1	35
3.5.1.1. Geometria	35
3.5.1.2. Ensaio de resistência à rotura e carga de rotura	37
3.5.1.3. Ensaio de resistência à abrasão	37
3.5.1.4. Ensaio de absorção de água	38
3.5.2. ENSAIOS NOS MOSAICOS DE ACORDO COM NP EN 13748-2	40
3.5.2.1. Geometria	40
3.5.2.2. Ensaio de resistência à rotura e carga de rotura	40
3.5.2.3. Ensaio de resistência à abrasão	40
3.5.2.4. Ensaio de absorção de água	40

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1. INTRODUÇÃO	41
4.2. VERIFICAÇÃO DA GEOMETRIA	41
4.3. RESISTÊNCIA À ROTURA E CARGA DE ROTURA	44
4.4. RESISTÊNCIA À ABRASÃO	46
4.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA	48
5. CONCLUSÃO	51
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Modelo linear (A) versus modelo circular (B): 1) Matéria-prima virgem; 2) Produção e transformação; 3) Consumo e utilização; 4) Manutenção e reutilização; 5) Final da vida útil; 6) Reciclagem; 7) Incineração com valorização energética e 8) Descarte em aterro sanitário.....	4
Figura 2. 2. Economia Espiral. Adaptado de Ashby et al., 2019.....	5
Figura 2.3. Mosaicos Hidráulicos. a) Aplicação em residência particular. b) Aplicação em praça pública.	6
Figura 2.4. Polímero termoplástico (A) e termofixo (B).....	15
Figura 3.1. Resíduo de lentes oftálmicas. a) Resíduo prontos para transporte; b) Resíduo em ênfase.	18
Figura 3.2. Primeira moagem. a) Moinho de facas grandes; b) Facas; c) Resíduos de lentes após a primeira moagem.	18
Figura 3.3. Segunda moagem. a) Moinho de facas pequeno; b) Facas; c) Resíduo de lentes após segunda moagem.....	19
Figura 3.4. Preparativos para o ensaio. a) Amostra passante no peneiro de 4mm; b) Esquartelador..	19
Figura 3.5. Preparo do material. a) Volume do provete; b) Secagem em estufa; c) Lavagem no peneiro 0,0063mm.....	20
Figura 3.6. Peneiros da série base.	20
Figura 3.7. Curva granulométrica do LW com a série base.....	21
Figura 3.8 Curva granulométrica da areia com a série base e do LW.....	22
Figura 3.9. Linha do tempo para preparação da amassadura.	24
Figura 3. 10. Medição do diâmetro no ensaio de trabalhabilidade.	24
Figura 3.11. Processo de fabricação dos provetes testes. 1) Determinação das quantidades da mistura. 2) Misturador. 3) Mistura pronta. 4) Medição da temperatura da mistura. 5) Medição do diâmetro no ensaio de trabalhabilidade. 6) Compactador. 7) Colocação do material em 2 etapas. 8) Regularização da argamassa no molde. 9) Moldes preenchidos e prontos para descansar 24h. 10) Desmoldagem. 11) Provetes imersos em água para a realização da cura por 27 dias.....	26
Figura 3.12. Provetes dos ensaios preliminares.	26
Figura 3.13. Ensaio de Resistência à Flexão. a) Provete a ensaiar b) Provete rompido	27
Figura 3.14. Resultados do ensaio de resistência à flexão.	27
Figura 3.15. Ensaio de Resistência à Compressão.	28
Figura 3.16. Resultados de resistência média à compressão.	29
Figura 3.17. Maseira. a) Maseira com velocidade controlada; b) Argamassa sendo produzida.	31
Figura 3.18. Tratamento do agregado miúdo. a) Junção dos agregados; b) Homogeneização da mistura através de uma espátula.	32

Figura 3.19. Moldes dos mosaicos.	33
Figura 3.20. Moldagem do ladrilho referência. a) Pesagem da massa; b) Espalhando a argamassa com ferramenta rudimentar; c) Mesa de vibração.	33
Figura 3.21. Processo de produção dos mosaicos. A) Moldagem; b) Desmoldagem; c) Identificação; d) Submersão em água para cura.	34
Figura 3.22. Cubos para o ensaio de abrasão.	35
Figura 3.23. Moldagem dos mosaicos com LW polvilhado. a) Mosaico com 127g de LW polvilhado; b) Leve pressão para o LW aderir a argamassa fresca; c) Desmoldagem e retirada do excesso de LW; d) Mosaico identificado.	35
Figura 3.24. Medição com paquímetro.	36
Figura 3. 25. Verificação da retilinearidade.	36
Figura 3.26. Verificação da planeza da superfície.	36
Figura 3. 27. Ensaio de rotura. a) Máquina; b) Ajuste do mosaico no equipamento; c) Rotura do mosaico.	37
Figura 3.28. Marcação de pontos no provete.	38
Figura 3.29. Cubo na pista de ensaio.	38
Figura 3.30. Impermeabilização do mosaico. a) Impermeabilizante; b) Aplicação do impermeabilizante; c) Mosaico com as laterais impermeabilizadas.	39
Figura 3.31. Submersão dos mosaicos em água. a) Água a nível 10 mm; b) Água a nível 40 mm.	39
Figura 4.1. Resultado da carga de rotura.	44
Figura 4.2. Resultado da resistência à rotura dos mosaicos.	46
Figura 4.3. Provetes ensaiados. a) Antes do ensaio; b) Após o 8º ciclo; c) Após o 16º ciclo.	47

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. Requisitos de espessura.....	7
Quadro 2.2. Exigências quanto à carga de rotura.	8
Quadro 2.3. Classe de resistência à rotura.....	9
Quadro 2.4. Classe de carga de rotura.	9
Quadro 2.5. Requisitos da resistência à abrasão.	10
Quadro 2.6. Classes de resistência às resistências atmosféricas.	10
Quadro 3.1. Propriedades Mecânicas – NP EN 196-1 (ficha técnica SECIL)	21
Quadro 3.2. Propriedades Químicas – NP EN 196-2 (ficha técnica SECIL)	21
Quadro 3.3. Propriedades Físicas – NP EN 196-3 (ficha técnica SECIL)	22
Quadro 3.4. Composição dos provetes dos ensaios preliminares.....	23
Quadro 3.5. Quantidade dos componentes das argamassas.....	23
Quadro 3.6. Medida dos diâmetros do ensaio de trabalhabilidade das argamassas.	25
Quadro 3.7. Definição da espessura do mosaico.	30
Quadro 3.8. Composição da argamassa T7 corrigida para produzir 2 litros.	31
Quadro 3.9. Resultados do ensaio de trabalhabilidade nas argamassas dos mosaicos.	32
Quadro 3.10. Identificação dos ladrilhos por amassadura.....	34
Quadro 4.1 Dimensão das arestas dos ladrilhos.	42
Quadro 4. 2. Espessura dos ladrilhos.	42
Quadro 4.3. Retilinearidade.	43
Quadro 4.4. Planeza da superfície.....	44
Quadro 4.5. Resultados da resistência à rotura e carga de rotura.	45
Quadro 4.6. Dimensões iniciais dos provetes.	46
Quadro 4.7. Altura média dos provetes.	47
Quadro 4.8. Peso dos provetes.....	47
Quadro 4.9. Resultados ensaio de abrasão.....	48
Quadro 4.10. Dimensões dos ladrilhos no ensaio de absorção.	48
Quadro 4.11. Resultados do ensaio de absorção.....	49
Quadro 5.1. Síntese dos resultados dos estudos preliminares.	52
Quadro 5.2. Síntese do resultado dos ensaios.	53
Quadro 5.3. Síntese dos resultados com incorporação de 50% de LW.	54
Quadro 5.4. Comparação da massa volúmica do presente estudo.	55

Quadro 5.5. Comparação da massa volúmica do estudo anterior.....	55
--	----

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ABR – Abrasão

ABS – Absorção

AC – Antes de Cristo

CR 39 – Columbia Resin 39

DEC - Departamento de Engenharia Civil

EC – Economia Circular

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LEMC – Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção

LW – Lens Waste (resíduo de lentes)

PC – Policarbonato

PEBD – Poliuretano de baixa densidade

R – Resistência

RCD – Resíduo de construção e demolição

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao longo das últimas décadas a preocupação com o meio ambiente tem aumentado exponencialmente. A grande produção de resíduos e a sua destinação imprópria tem gerado enormes impactos ambientais, como a poluição dos lençóis freáticos e dos oceanos. Pesquisas apontam que aproximadamente 60% dos resíduos gerados no mundo são depositados em aterros ou em locais inadequados [1]. Os materiais que não podem ser reciclados normalmente são incinerados de forma a obter a valorização energética, ferindo os princípios do ciclo biológico onde o resíduo deveria ser considerado alimento de outros elementos ou então, estes resíduos são destinados a aterros, o que demanda uma grande área disponível devido ao seu elevado volume [2].

A indústria de lentes oftálmicas é extremamente importante no que diz respeito a qualidade de vida e saúde da população, porém apresenta ampla produção de resíduos resultantes da trajetória na fabricação das lentes tais como vidro, policarbonato, Columbia resin (CR 39). Dentre estes produtos, alguns possuem propriedades que permitem a sua reciclagem, como o vidro, e outros que por possuírem uma estrutura química complexa só estão aptos a valorização energética, como a CR 39. Embora a CR 39 não seja reciclada, ela se destaca na indústria oftálmica como um dos materiais mais utilizados na produção de lentes sendo depositada em sua maioria em aterro pela indústria GrandVision.

Os dados mencionados acima evidenciam a necessidade relacionada ao impacto econômico e ambiental, de considerar alternativas de destino mais nobres para os resíduos, portanto, destaca-se a importância de investigar possíveis aplicações para materiais do tipo CR 39. Ademais, sob o ponto de vista da indústria, a aplicabilidade do resíduo gera um valor econômico ao transformá-lo em insumo. Dentro deste contexto, a construção civil é um setor que apresenta enorme potencial para absorver resíduos, principalmente através da incorporação destes produtos na composição de betão e de argamassa. No entanto, as propriedades mecânicas, físicas e químicas das misturas cimentícias estão diretamente ligadas ao fator água/cimento, à qualidade das propriedades dos agregados e outros constituintes e à homogeneidade das misturas. Consequentemente, é essencial executar a substituição parcial ou integral dos agregados respeitando as normas técnicas vigentes.

As argamassas de revestimento, nomeadamente para ladrilhos e mosaicos hidráulicos, não apresentam grandes exigências no que diz respeito à resistência mecânica e a sua geometria é de fácil controle visto que seu processo de fabrico é através de moldes. Por isso, aplicar os resíduos nesse material pode ser

uma alternativa, além de contribuir para o meio ambiente, ainda pode diminuir o custo de produção da argamassa ao reduzir o uso de materiais virgens, por exemplo, a areia.

1.2. OBJETIVOS

O presente estudo pretende avaliar a viabilidade técnica da utilização de um resíduo industrial, a Columbia Resin (CR 39) proveniente de lentes oftálmicas, na substituição parcial do agregado na composição de argamassas de revestimento, mais especificamente, para ladrilhos e mosaicos hidráulicos.

Os objetivos específicos consistem em produzir um ladrilho hidráulico com substituição parcial do agregado natural, nomeadamente a areia, pelo resíduo industrial que atenda as especificidades das normas NP EN 13748-1 e NP EN 13748-2. Para esta análise, é avaliado o desempenho dos mosaicos através:

- Verificação das dimensões geométricas bem como do aspeto estético dos mosaicos;
- Estudo do comportamento mecânico de argamassas de revestimento para mosaicos compostas por LW;
- Avaliação da resistência a abrasão da argamassa de revestimento com incorporação de LW;
- Verificação da capacidade de absorção de água e do coeficiente de absorção capilar.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação desenvolve-se em 5 capítulos. O primeiro capítulo consiste na introdução, na qual se realiza o enquadramento do tema, a exposição dos objetivos e a estruturação de apresentação.

O segundo capítulo inclui uma revisão bibliográfica relacionada com o tema desta dissertação. Inicialmente são elencados conceitos importantes para então seguir para uma breve explanação sobre economia linear, circular e espiral de forma a evidenciar a importância de utilizar-se de cada vez menos recursos naturais. Em seguida apresenta-se uma breve introdução sobre a produção e a utilização de mosaicos hidráulicos e seus pré-requisitos normativos bem como a incorporação de resíduos na construção civil. Para fundamentar a pesquisa, são apresentados trabalhos existentes na literatura de incorporação de resíduos em argamassas e betões. Por fim, apresenta-se uma breve história sobre as lentes oftálmicas e o surgimento do CR-39 nessa indústria, bem como suas propriedades.

No terceiro capítulo é apresentado o programa experimental desenvolvido, onde primeiramente são especificados os materiais utilizados. Na sequência apresentam-se os ensaios preliminares que foram utilizados com o objetivo de definir a argamassa de revestimento a ser aplicada para os mosaicos e as etapas de produção dos mosaicos. Por fim, são descritos os ensaios aos quais os ladrilhos foram submetidos.

No quarto capítulo apresentam-se as características geométricas e os resultados obtidos nos ensaios dos ladrilhos hidráulicos referente aos ensaios de resistência à rotura, absorção de água e resistência à abrasão. Ademais, segue uma discussão dos resultados obtidos comparando-os com os valores requeridos na norma em vigor.

O quinto e último capítulo aborda as conclusões obtidas do estudo realizado nesta dissertação. Além disso, propõem-se ideias de estudos para desenvolvimentos futuros.

Para encerrar o presente trabalho, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. CONCEITOS IMPORTANTES

No âmbito do estudo da reciclagem de materiais, alguns conceitos precisam ser bem definidos. O Artigo 3º inserido no decreto 73/2011 apresenta a definição de resíduo e entre os tipos de resíduos existentes destaca-se o resíduo urbano e resíduo industrial.

São considerados resíduos “quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou obrigação de se desfazer”. O resíduo urbano é definido como “resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações”. Já o resíduo industrial é o “resíduo gerado em processos produtivos industriais, bem como o que resulte das atividades de produção e distribuição de eletricidade, gás e água” [3].

Ademais, os objetos descartados podem ser reutilizados, sofrer processos de reciclagem e/ou valorização ou até mesmo serem eliminados. Entende-se por reutilização “qualquer operação mediante a qual produtos ou componentes que não sejam resíduos são utilizados novamente para o mesmo fim para que foram concebidos” [3].

Apesar da reciclagem e da valorização proporcionarem um fim útil para o resíduo, é imprescindível saber diferenciá-los. A reciclagem é definida como “qualquer operação de valorização, incluindo o reprocessamento de materiais orgânicos, através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins, mas que não inclui a valorização energética nem o reprocessamento em materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento”. Enquanto a valorização consiste em “qualquer operação cujo resultado principal seja a transformação dos resíduos de modo a servirem um fim útil, substituindo outros materiais que, caso contrário, teriam sido utilizados para um fim específico ou a preparação dos resíduos para esse fim na instalação ou conjunto da economia” [3].

Por fim, na hipótese de não ocorrer a reutilização, reciclagem ou valorização, existe a opção de eliminar, neste setor, entende-se por eliminação “qualquer operação que não seja de valorização, ainda que se verifique como consequência secundária a recuperação de substâncias ou de energia” [3].

Após a análise dos conceitos, entende-se que o resíduo de lentes oftálmicas utilizado neste estudo se trata de um resíduo industrial visto que são derivados da indústria oftálmica e não das lentes descartadas pelos usuários. E para esse resíduo busca-se encontrar uma forma de reciclá-lo através da valorização do material em argamassas para ladrilho hidráulico, evitando assim, que ele seja eliminado.

2.2. ECONOMIA CIRCULAR (A EVOLUÇÃO DA ECONOMIA)

Ao longo dos anos verificou-se uma evolução da visão da forma de produção a partir do consumo de recursos naturais, ou não. Pode-se dizer que o pensamento de economia iniciou como linear, passou a circular e atualmente estuda-se uma integração em forma de espiral.

O pensamento linear surgiu após a segunda guerra mundial e ficou largamente conhecido pelo processo de produzir e utilizar recursos naturais, descartando-os na forma resíduo após o final da sua vida útil. Portanto, a economia linear pressupõe um modelo que se baseia na oferta ilimitada de recursos naturais de forma que o ambiente apresenta absoluta capacidade de absorver resíduos e poluição gerada [4].

No entanto, essa produção de resíduos desenfreada ao longo dos anos ocasionou problemas ambientais vindo então a demonstrar-se evidente a necessidade de repensar os modos de produção. Desenvolveu-se então, a economia circular (EC) que tem a finalidade de contrapor o conceito da economia linear. A EC consiste em promover a produtividade através do uso eficiente dos recursos naturais de forma que os processos e modelos de negócio se baseiem na reutilização, recuperação e reciclagem dos materiais. Em síntese, deve-se utilizar os materiais pelo maior tempo possível e após o seu uso, procurar extrair valor econômico, ou seja, formar um ciclo onde se minimizem as perdas [5].

Além disso, a EC objetiva limitar a produção de acordo com os níveis tolerados pela natureza, respeitando as taxas de reprodução natural [6]. Para a proteção ambiental acontecer, os materiais devem ser preservados, restaurados ou reintroduzidos de forma cíclica, fornecendo vantagens económicas tanto para fornecedores como para consumidores [5].



Figura 2.1. Modelo linear (A) versus modelo circular (B): 1) Matéria-prima virgem; 2) Produção e transformação; 3) Consumo e utilização; 4) Manutenção e reutilização; 5) Final da vida útil; 6) Reciclagem; 7) Incineração com valorização energética e 8) Descarte em aterro sanitário

A transição da economia linear para a circular não é fácil. Em termos dos consumidores é indispensável uma mudança na cultura e no ambiente industrial, muitas vezes fazendo-se necessário uma alteração dos modelos de negócios. Por isso, os governos estão buscando formas de minimizar o desperdício de recursos a fim de reduzir os impactos ambientais, por vezes através de incentivos fiscais. A economia

circular proporciona uma solução para a otimização de resíduos gerados por empresas, ou seja, incentiva a criação de oportunidades de negócios, por exemplo, o resíduo de uma empresa pode ser a matéria-prima de outra (ecologia industrial) [6].

Devido à crescente preocupação relacionada com o esgotamento de recursos naturais e aos danos causados no meio ambiente, a cada dia a EC se torna mais importante a nível global em diversos setores econômicos. A indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pelo consumo de matérias-primas e pela geração de resíduos no mundo. Portanto é considerado um setor portador de um enorme potencial de aplicação da cultura e do sistema da abordagem da economia circular [7].

Para verificar se existem vantagens ambientais em relação a emissões de dióxido de carbono quando se integra conceitos da economia circular ao invés de utilizar o sistema da economia linear é necessário investigar. Por exemplo, Nasir et al realizaram um estudo de caso na indústria da construção em que a pesquisa avalia os impactos que produtos de isolamento térmico para edifícios tradicionalmente produzidos com matérias-primas virgens e provenientes de materiais reciclados causam ao meio ambiente através da análise do ciclo de vida destes materiais. A partir deste método e dos dados fornecidos pelas empresas, os autores calcularam e analisaram as emissões totais de dióxido de carbono durante toda a vida do produto. Os resultados apontaram que o material de isolamento proveniente da cadeia de produção circular emite 39% menos dióxido de carbono para o meio ambiente do que o material de isolamento produzido na cadeia de produção linear [8].

É evidente que a EC tem um grande foco em aspetos ambientais e por ser cíclico não reconhece os impactos ao redor. A economia espiral (EE), que ainda se encontra em desenvolvimento, emerge com a finalidade de agregar o ambiente social aos conceitos já pré-estabelecidos através da avaliação da confiança, da cultura e dos valores sociais. Essa dinâmica agregadora proporciona conhecimento e aprendizagem de forma criativa em diferentes áreas (sociedade, economia e ecossistemas naturais) no conceito de espirais com feedback contínuo melhorando assim a qualidade de vida das pessoas [9].

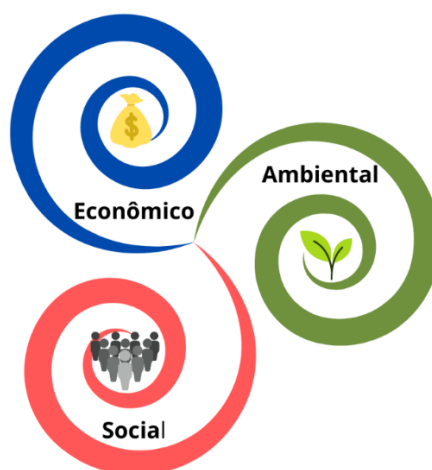


Figura 2. 2. Economia Espiral. Adaptado de Ashby et al., 2019

2.2. MOSAICOS/LADRILHOS HIDRÁULICOS

Mosaicos ou ladrilhos hidráulicos consistem em placas cimentícias utilizada como revestimento, de paredes e pisos, externos e internos, conforme apresentado na Figura 2.3. São produzidos de forma

artesanal ou industrial através de uma prensa e os principais componentes da mistura são cimento, agregado e água, e quando necessário, ainda podem-se acrescentar adjuvantes e adições (pigmentos, polímero, entre outros). O nome hidráulico remete ao ligante cimento que requer, como o betão, cura em água por submersão ou aspersão, ou seja, não se utiliza a técnica de queima em fornos como os revestimentos cerâmicos [10].

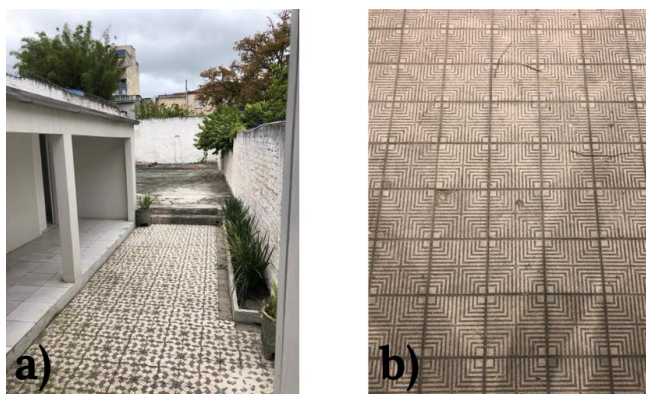


Figura 2.3. Mosaicos Hidráulicos. a) Aplicação em residência particular. b) Aplicação em praça pública.

Registos revelam que este material surgiu em meados do século XIX como uma alternativa de substituição do revestimento de pedra. Devido a sua boa resistência mecânica e a possibilidade de acrescentar pigmentos para fazer desenhos decorativos, o ladrilho hidráulico difundiu-se rapidamente pelos países europeus. No entanto, a partir de 1960 este revestimento começou a perder mercado para outros modelos como cerâmicos e porcelanatos, que possuem um processo de fabrico mais simples e mais industrializável, proporcionando produção em larga escala e diminuição do custo. Comparando tecnicamente estes materiais, todos possuem boa resistência e se assemelham no processo de instalação [11]. No entanto, no que diz respeito à média de produção em fábrica de área de material por trabalhador a cada dia, os valores chegam a 10 mil m² para pisos cerâmicos e 20 m² para ladrilhos hidráulicos [12]. Ou seja, pela produção 500 vezes menor, comprova-se desta maneira que o processo de fabricação do ladrilho hidráulico é mais artesanal e personalizado em comparação com as cerâmicas.

A literatura aponta avanços no desenvolvimento de ladrilhos de alto desempenho. Catoia, por exemplo, estudou a otimização da produção de ladrilhos hidráulicos para uma escala industrial através do desenvolvimento de um ladrilho hidráulico de alto desempenho. Para isso, utilizou como referência a tecnologia existente na produção de betão de alto desempenho. Duas composições com relação água/cimento de 0,32% foram estudadas, i) com cimento CPB 40 estrutural, metacaulino, ADVA Cast e agregado miúdo e ii) com CP V ARI RS, sílica ativa, ADVA Cast e agregado miúdo. O cimento CPB 40 Estrutural trata-se de um cimento branco da classe de resistência 40 MPa, sua composição é de 75 a 100% de clínquer branco e sulfatos e de 0 a 25% de calcário. Já o cimento CP V ARI RS consiste em um cimento de alta resistência inicial composto por 95 a 100% de clínquer incluindo sulfato de cálcio e 0 a 5% de calcário. O ADVA Cast é um adjuvante superplastificante de 3^a geração composto por policarboxilatos. As adições escolhidas, nomeadamente a sílica de fumo e o metacaulino, possuem o objetivo de proporcionar um composto mais resistente e levaram em consideração o efeito microfíler que busca preencher os vazios existentes e a reação pozolânica, ou seja, a reação química entre o hidróxido de cálcio com as partículas de adição [13] promovendo a durabilidade. Os resultados obtidos para a primeira composição foram satisfatórios de acordo com a norma brasileira NBR 9457:1986. A resistência à flexão atingiu valores 56% maiores que o mínimo exigido de 5MPa, a absorção de água ficou próxima de 2% o que é inferior ao limite de 8%, e a resistência a abrasão aos 28 dias foi de 4,64 mm, um valor próximo dos 3% permitidos em norma. Para a segunda composição os resultados foram

ainda melhores, a resistência a flexão apresentou valores 72% acima do mínimo exigido, a absorção de água ficou próxima de 1%, enquanto a resistência a abrasão aos 28 dias 3,26 mm [13].

Atualmente, a aplicação de ladrilho hidráulico está voltando a conquistar arquitetos e consumidores, não somente pela sua funcionalidade, mas principalmente por causa do seu grande potencial decorativo através do uso de peças exclusivas em determinados ambientes. Apesar de antigas, as peças criam um efeito moderno e estiloso e sobretudo são fáceis de limpar [14]. Esses aspectos positivos evidenciados são os responsáveis pela crescente utilização de ladrilhos, atraindo estudos de incorporação de resíduos.

Na literatura já existem trabalhos incorporando resíduos de madeira provenientes da indústria da marcenaria na fabricação de ladrilhos hidráulicos vibrados. A proposta elaborada por Savazzini-Reis e Fagundes consiste em substituir parcialmente, em massa, a areia por resíduo nas percentagens de 0%, 5% e 10%, na proporção cimento e agregado miúdo em 1:2, relação água cimento inicial de 0,5 e adjuvante plastificante na proporção de 0,2% da massa do cimento. Os resultados mostram que, na medida que se aumenta a percentagem de resíduo na argamassa, a absorção de água aumenta, 10%, 16% e 19%, e a resistência à flexão diminui, 5,91 MPa, 3,71 MPa e 3,01 MPa, respetivamente para 0%, 5% e 10% de resíduo [15].

Além da incorporação de madeira, outros resíduos podem ser introduzidos na composição de argamassas para ladrilhos e mosaicos hidráulicos, tais como os polímeros. Na União Europeia, e, portanto, em Portugal, as normas que especificam os requisitos dos ladrilhos e mosaicos hidráulicos acabados, os critérios de avaliação de conformidade, e os ensaios a serem realizados são NP EN 13748-1 [16] e NP EN 13748-2 [17], independente se há a incorporação de resíduos ou não. Apesar da norma apresentar uma nomenclatura diferente para as peças utilizadas no interior e exterior, ladrilhos ou mosaicos hidráulicos são elementos produzidos individualmente compactados de maneira adequada, de forma e espessura regular, satisfazendo os requisitos impostos pelas respetivas normas, podendo ser de camada única ou dupla [16][17]. As propriedades e as condicionantes normativas impostas pelas duas normas estão descritas abaixo.

2.2.1. PREMISSAS GEOMÉTRICAS

Apesar das dimensões de fabrico das peças de ladrilho hidráulico serem de responsabilidade do fabricante, para que a realização dos ensaios seja relevante é necessário que as peças atendam os requisitos exigidos pela norma NP EN 13748-1 e 13748-2.

2.2.1.1. Espessura

Para ladrilhos de camada única não há imposições ou restrições referentes à espessura, para outros modelos de ladrilho hidráulico a exigência quanto à espessura está apresentada no Quadro 2.1.

Quadro 2.1. Requisitos de espessura.

Classe	Espessura da camada de desgaste
I (Th I)	> 4mm
II (Th II)	> 8mm

2.2.1.2. Tolerâncias de dimensão

Sendo a dimensão da peça previamente determinada pelo produtor, no final da fabricação o produto final não pode diferir $\pm 0,3\%$ em relação ao comprimento das arestas. Ademais, a espessura do ladrilho

não pode exceder um desvio de ± 2 mm quando a peça tem uma espessura pré-definida < 40 mm ou ± 4 mm quando a peça tem uma espessura pré-definida ≥ 40 mm.

Além destas verificações, é necessário que um único ladrilho não possua dimensões que diferem entre si de mais de 3 mm e quando os ladrilhos forem classificados como calibrados este valor reduz para 1 mm.

2.2.1.3. Tolerâncias da forma

Para verificar a retilinearidade das arestas da face superior é necessário aferir a diferença máxima entre a régua e a aresta e este valor não deve ser superior a 0,3% da extensão da aresta analisada.

Já a planeza da face superior impõe que nenhum ponto deve desviar-se da superfície mais de 0,3% da dimensão da diagonal analisada.

Além destes requisitos, ainda é necessário verificar o aspeto e as características da superfície do ladrilho que não deve ter depressões, escamações ou fissuras quando distantes de 2 m no estado seco e sob luz natural.

2.2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ACORDO COM NP EN13748-1

2.2.2.1. Exigências para a resistência e carga à rotura

Para que o ladrilho hidráulico seja considerado aceitável a resistência à rotura média de 4 provetes precisa ser ≥ 5 MPa. Entretanto, nenhum valor individual de resistência pode ser < 4 MPa.

Referente à carga de rotura, os ladrilhos hidráulicos seguem as imposições descritas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2. Exigências quanto à carga de rotura.

Classe	Marcação	Requisito	
1a)	BL I	Sem requisitos	
2	BL II	área da superfície $\leq 1100 \text{ cm}^2$	valores individuais $\geq 2,5 \text{ kN}$
3	BL III	área da superfície $> 1100 \text{ cm}^2$	valores individuais $\geq 3,0 \text{ kN}$
a) Classe 1: os produtos devem ser apenas utilizados se os ladrilhos forem colocados numa camada de argamassa e sob uma base rígida.			

2.2.2.2. Resistência à abrasão

Existem 2 ensaios de resistência a abrasão permitidos pela norma, o ensaio de disco largo e o ensaio através do método de Böhme. Neste trabalho, o ensaio realizado é referente ao método de Böhme, portanto, para que o ladrilho hidráulico atenda aos requisitos impostos nenhum resultado individual deve exceder $30 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$.

2.2.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA DE ACORDO COM NP EN13748-1

A norma considera satisfatório o fator de absorção de água quando os valores individuais da absorção da água total for menor ou igual a 8% em massa e quando os valores individuais da capacidade de absorção de água através do ladrilho for menor ou igual a 0,4 g/cm².

2.2.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ACORDO COM NP EN 13748-2

2.2.4.1. Exigências para a resistência e carga à rotura

Para que o ladrilho hidráulico seja considerado aceitável, de acordo com a classe, a resistência à rotura média de 4 provetes precisa ser maior ou igual aos valores apresentados no Quadro 2.3. Entretanto, o valor individual de resistência à rotura deve ser maior ou igual aos valores apresentados no Quadro 2.3 de acordo com a respetiva classe.

Quadro 2.3. Classe de resistência à rotura.

Classe	Marcação	Resistência média à flexão MPa	Resistência individual mínima à flexão MPa
1	ST	3,5	2,8
2	TT	4,0	3,2
3	UT	5,0	4,0

A carga de rotura é satisfatória quando verifica os dois requisitos: 1) A carga de rotura média de quatro provetes ser maior ou igual aos valores apresentados no Quadro 2.4. na classe de carga de rotura apropriada. 2) Os resultados individuais serem maiores ou iguais aos valores apresentados no Quadro 2.4. na respetiva classe analisada.

Quadro 2.4. Classe de carga de rotura.

Classe	Marcação	Carga média de rotura kN	Carga individual mínima de rotura kN
30	3T	3,5	2,4
45	4T	4,0	3,6
70	7T	7,0	5,6
110	11T	11,0	8,8
140	14T	14,0	11,2
250	25T	25,0	20,0
300	30T	30,0	24,0

2.2.4.2. Resistência à abrasão

Existem 2 ensaios de resistência a abrasão permitidos pela norma, o ensaio de disco largo e o ensaio através do método de Böhme. Neste trabalho o ensaio realizado refere-se ao método Böhme, portanto, para que o ladrilho hidráulico atenda os requisitos impostos nenhum resultado individual deve exceder os valores descritos no Quadro 2.5, na classe de abrasão adequada.

Quadro 2.5. Requisitos da resistência à abrasão.

Classe	Marcação	Abrasão individual determinada pelo Método de Böhme
1	F	Desempenho não determinado.
2	G	$\leq 26 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$
3	H	$\leq 20 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$
4	I	$\leq 18 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$

2.2.5. RESISTÊNCIA ÀS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DE ACORDO COM NP EN 13748-2

De acordo com a norma, a verificação da resistência às condições atmosféricas pode ser feita através de dois ensaios, de absorção de água ou de gelo-degelo. Dado que neste trabalho é realizado o ensaio de absorção, apresenta-se no Quadro 2.6 os requisitos para atender esta especificação.

Quadro 2.6. Classes de resistência às resistências atmosféricas.

Classe	Marcação	Absorção de água por % de massa	Perda de massa após ensaio gelo-degelo kg/m^2
1	A	Desempenho não medido.	Desempenho não medido.
2	B	≤ 6 como média	Desempenho não medido.
3	D	Desempenho não medido.	$\leq 1,0$ como média com nenhum valor individual $> 1,5$.

2.3. HISTÓRIA DOS RESÍDUOS

De acordo com Williams a necessidade de pensar sobre soluções para o acúmulo de resíduos surgiu devido a migração da população de áreas rurais para os centros urbanos. Esta concentração de pessoas num pequeno espaço geográfico produzindo resíduos que além de possuírem mau odor, atraem animais como ratos e moscas que podem ser transmissores de doenças torna-se um incômodo e um perigo para a saúde. Os primeiros registros de problemas com resíduos ocorreram em meados de 500 AC, quando na Grécia foi criada uma lei proibindo o despejo de restos nas ruas e exigindo que estes fossem carregados para um local a céu aberto distante da cidade. Ao longo dos anos e séculos outras localidades também foram providenciando regras para o descarte de resíduos, coletores municipais foram instalados e cobrados impostos para a logística. Na Palestina, por exemplo, no início do primeiro milênio os resíduos já eram incinerados [18].

Os resíduos eram majoritariamente biodegradáveis, até à Revolução Industrial que alterou este cenário devido à substituição do método de produção manual para a produção em larga escala através de máquinas. Como se produzia mais em menos tempo, o consumo de produtos novos passou a ser incentivado e consequentemente o descarte aumentou. Ademais, com o passar do tempo e o aumento da tecnologia, tornou-se mais barato para as indústrias produzirem plásticos, alumínio e vidro do que reutilizarem os materiais descartados [18].

Até meio do século XX o descarte de lixo não era considerado um fator de risco. No entanto, este acúmulo de resíduos em zonas concentradas ocasionaram um desequilíbrio no planeta [2]. Cidadãos começaram a apresentar sintomas de intoxicação causados pela ingestão de água e pelo contato com solo contaminados por produtos químicos despejados pela indústria. Estas questões promoveram discussões da importância da gestão de resíduos e ocasionaram a implementação de normas mais rígidas no controle de descartes [18].

2.4. RESÍDUOS PLÁSTICOS E A SUA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A preocupação com a contaminação do meio ambiente por plásticos vem crescendo ao longo dos anos. Este material sintético ou semi-sintético e versátil é utilizado em grande escala devido as suas propriedades (boa resistência à degradação e durabilidade), características essas que tornam este material de difícil ou até impossível absorção pela natureza [19].

Atualmente destacam-se três principais destinos do plástico no final de sua vida útil: a reciclagem, a destruição do plástico através da incineração com ou sem recuperação de energia e, por último, o descarte em aterros sanitários ou apenas deixados ao ar livre. No entanto, estudos apontam que a reciclagem ainda representa um percentual muito pequeno considerando o volume de material produzido. Apesar da carência de dados globais precisos relacionados plásticos, Geyer e al sintetizaram os dados existentes de produção, uso e gestão de descarte entre os anos de 1950 e 2015 e aplicaram modelos estatísticos. Os resultados apontam que 30% do plástico produzido até 2015 está em uso, 55,5% está acumulado no meio ambiente terrestre e aquático, 8,5% incinerado e apenas 6% reciclado [20].

Este grande volume de polímeros descartados em aterro sanitário ocasiona uma interferência prejudicial na compostagem e na estabilização biológica dos aterros [21]. Ademais, estes materiais são depositados frequentemente em locais impróprios, o que ocasiona a migração destes para os oceanos e lagos. Uma vez que os plásticos chegam à costa, o vento e as correntes marinhas se encarregam de transportar as partículas, espalhando-as. Já existem registros de partículas de plástico encontradas em locais remotos, como no Ártico [22].

Portanto, para reduzir o impacto causado por polímeros no meio ambiente é necessário aplicar formas variadas de reciclagem. Esta prática além de aliviar os aterros sanitários prolongando a sua vida útil, estará preservando fontes esgotáveis de matéria prima, reduzindo custos relativos ao descarte dos resíduos e gerando emprego [21].

De acordo com Ignatyev e al a construção civil é o segundo maior setor de aplicação de plásticos, no entanto, o tempo de vida útil dos materiais utilizados (como tubagem, etc.) é de aproximadamente 10 anos. Dessa forma, o ciclo de reciclagem desta aplicação é considerado grande ao comparar com reciclagens ou reutilizações de outros produtos, por exemplo as garrafas de polietileno (PET). Ademais, a demanda elevada por materiais e a larga escala de utilização fazem com que o setor da construção civil apresente grande potencial na aplicação de plásticos reciclados. Atualmente os plásticos mais utilizados

neste setor são o policloreto de vinil (PVC), poliuretano (PU), e poliolefinas (PO), nomeadamente polietileno (PE) e polipropileno (PP) [23].

2.5. USO DE MATERIAIS RECICLADOS EM ARGAMASSAS E BETÃO

Diversos materiais já foram introduzidos na composição de argamassas e betões cimentícios, por exemplo, RCD, resíduos de construção e demolição, vidros [24], diversos tipos de polímeros [25] [26] [27], agregado siderúrgico inerte para a construção [28], materiais cerâmicos [29], entre outros. Nesta seção serão apresentados resultados desta aplicação conforme a literatura.

Considerando o uso de agregados provenientes da construção e demolição, Corinaldesi e Moriconi avaliaram mecanicamente e reologicamente argamassas preparadas com: i) resíduos de concreto pré-fabricado; ii) tijolos cerâmicos; iii) resíduos de demolição com 72% de concreto, 25% de alvenaria e 3% de betume. A proporção em peso de cimento e agregado fino utilizado nas misturas foi 1:3, o volume de água adicionado diferiu de acordo com a mistura a fim de todas as argamassas obterem a mesma consistência, 110 ± 5 mm conforme o ensaio da mesa de espalhamento. Em geral, os resultados mostraram que as argamassas preparadas com agregados reciclados desenvolveram valores menores de resistência à compressão e à flexão quando comparado com o valor da argamassa convencional. Isso ocorreu devido à maior absorção de água e à menor densidade relativa dos agregados reciclados em relação à areia. Pôde-se observar que argamassas que contêm agregados cimentícios têm uma redução de aproximadamente 30% na resistência à flexão e de 37% na resistência à compressão [29]. Note-se que na União europeia é preconizado o uso de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. Em particular, em Portugal o uso destes resíduos em betão encontra-se regulamentado pela especificação do LNEC E471 [30].

Vidro também já foi introduzido como material reciclado para compor argamassas. Matos e Sousa-Coutinho investigaram a possibilidade da substituição parcial de 10% e de 20% de cimento por resíduos de vidro moído em argamassas com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas e a durabilidade. Os resultados obtidos demonstraram que o aumento da resistência de 28 a 90 dias confirmou a existência de atividade pozolânica no vidro, embora ao dobrar a quantidade de pó de vidro moído na mistura ocorre um aumento de aproximadamente 60% na profundidade de carbonatação. Além disso, conforme aumenta a percentagem de substituição aumenta a resistência a penetração de cloretos. Enfim, os autores concluíram que este resíduo pode aumentar a durabilidade da argamassa e também com o seu uso aumentar a sustentabilidade nas construções [31].

Combinações com vidro com outros elementos reciclados também já foram testados. Kummoonin et al realizaram um estudo na Tailândia sobre a aplicação de resíduos em cerâmicos. Foram realizadas no total seis amostras, sendo uma com 100% de argila vermelha convencional e as outras cinco variando as composições em 60-70% de lama residual vermelha, 10-20% em escória de alto forno e 10-20% de vidro já triturado. Ademais, os autores também variaram a temperatura de queima entre 900°C e 1050°C. Os resultados apontaram que a amostra composta por 70% de lama residual, 15% de escória de alto forno e 15% de vidro triturado apresentou um desempenho mecânico e volumétrico satisfatório, de acordo com as normas vigentes no país, com queima a 1050°C. Quando comparado com a cerâmica convencional à mesma temperatura de queima, esta cerâmica apresentou um aumento de 30% na resistência a flexão e 19% na densidade aparente e uma redução de 7% na absorção de água [28].

Devido ao aumento do consumo de produtos plásticos, é cada vez mais recorrente o estudo da aplicação de polímeros na substituição de agregados naturais no mundo. Além de diminuir o consumo de material virgem, a aplicabilidade deste material proporciona a redução do descarte. Panyakapo e Panyakapo

estudaram a possibilidade de valorizar polímeros termofixos na produção de concreto leve em elementos da construção civil, especificamente em blocos para paredes de edifícios. Foram estudadas 6 misturas variando a proporção das massas dos constituintes: cimento, areia, água, cinzas volantes, pó de alumínio e melamina (plástico termofixo), sendo a mistura ótima resultante na proporção 1,0:0,8:0,75:0,3:0,0035:0,9 respetivamente. Os resultados obtidos mostram que a utilização do polímero termofixo na mistura reduz a densidade do concreto, no entanto diminui a resistência a compressão devido a fraca ligação que existe entre as partículas do polímero e a pasta de cimento [25].

Estudos envolvendo a substituição do agregado fino natural por polietileno de baixa densidade (PEBD) nas percentagens de 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50 e 60% em volume na fabricação de argamassas foram realizados por Ohemeng e Ekolu. A relação entre cimento e agregado utilizada foi de 1:3 e o fator água/cimento (a/c) variou entre 0,45 e 0,60. Independente do fator a/c pode se observar que a resistência a compressão diminui com o aumento da percentagem de plástico inserido na mistura, atingindo 82,3% de redução média quando 60% PEBD é inserido. Para 5% de PEBD, a resistência flexão atinge o valor máximo, com um aumento médio de 5,7% quando comparado com a mistura sem agregado plástico. A partir da substituição de pelo menos 20% do agregado fino por PEBD, a resistência à flexão reduz progressivamente até atingir valores aproximadamente 38% menores relativos à 60% de PEBD [26].

Wang e Meyer investigaram a viabilidade de substituir uma percentagem do agregado fino, usualmente areia, por poliestireno (PS) em argamassas. Foram produzidas 4 amostras onde a razão água cimento foi de 0,55 enquanto a proporção de cimento e agregado em todas as amostras foi de 1:3, tendo variado em volume somente a percentagem de poliestireno em 0%, 10%, 20% e 50%. Os resultados obtidos apontam que a resistência à compressão diminuiu proporcionalmente ao aumento da percentagem de substituição da areia [27].

Na aplicação de resíduos de lentes oftálmicas de CR 39 em argamassas os estudos ainda são primitivos. Ribeiro avaliou a possibilidade da utilização destes resíduos como substituto do agregado fino na fabricação de argamassas para ladrilhos e mosaicos hidráulicos. A proposta foi de substituir 50% do volume de areia por resíduos de lentes (LW) com o traço entre cimento e agregado definido em 1:3 em volume e a relação água/cimento de 0,5. Os resultados obtidos não foram satisfatórios. Em termos do ensaio de abrasão, os resultados obtidos foram aproximadamente 16% acima dos valores máximos permitidos pela norma. Os ladrilhos hidráulicos para utilização interior apresentaram uma resistência a rotura média 38% menor do que o requisito mínimo exigido por norma e uma carga de rotura individual aproximadamente 68% menor do que o requisito para a classe 2 [32].

De acordo com os autores citados, a aplicação de agregados deste tipo nas misturas reduz as propriedades mecânicas dos elementos. No entanto, não significa que não se possam encontrar combinações que satisfaçam as necessidades normativas exigidas.

2.6. LENTES OFTÁLMICAS

Na contemporaneidade os óculos além de instrumento de auxílio visual se tornaram também artigos de luxo. Pode-se dizer que as armações acompanham a onda da moda. No entanto a verdadeira essência do produto está na lente utilizada pois a lente adequada é imprescindível na qualidade de vida de qualquer utilizador de óculos visto que a visão é responsável por 90% da experiência sensorial dos humanos [33].

De acordo com Zeiss, formas de melhorar os problemas de visão são estudadas desde o início do século I, tempo em que um imperador utilizou uma pedra verde como dispositivo facilitador da entrada de luz. No final do século X um astrónomo árabe sugeriu a utilização de lentes polidas, mas só no século XIII

é que a sua ideia foi colocada em prática por monges italianos que chamaram de pedra de leitura e era feita a partir de cristal de rocha de quartzo. Foi na famosa fábrica de vidro de Murano que artesãos desenvolveram uma fórmula com características transparentes capaz de se tornar auxiliar de visão. Ademais, estes artesãos avançaram e criaram aros de madeira, preenchidos por vidro convexo, unidos no eixo, este foi o primeiro par de óculos do qual se tem conhecimento [34].

No início do século XXI a empresa Zeiss direcionou seus estudos para lentes oftálmicas com o objetivo de melhorar a experiência sensorial das pessoas. Na época, considerava-se uma boa lente aquela que era incolor e altamente transparente e que sem revestimento Punktal® possuísse uma taxa de transparência de 92%. Através do desenvolvimento promovido pela área militar, foi possível obter uma lente de vidro com tecnologia antirreflexo com taxa de transparência de 98% [33].

Até então as lentes eram produzidas em material inorgânico, essencialmente o vidro, material pesado e frágil. Depois surgiu no mercado um novo material com as características principais necessárias para fabricação de lentes, sendo estas: leveza, transparência e não quebrar com facilidade. Este material, Columbia resin 39 (CR 39) em 1970 começou a ser comercializado no formato de lentes corretivas [33].

De acordo com Bhootra, atualmente, o CR 39 é o material mais utilizado na fabricação de lentes oftálmicas, com um índice de refração de 1,498 e massa volúmica de 1,32 g/cm³. O material possui alta resistência a impactos, elevada transparência, pode ser revestido e sofrer tingimento sendo que a desvantagem aparece na baixa resistência a abrasão quando comparado com o vidro [35]. Estas características ficam evidentes para os usuários. Elmadina et al investigaram a satisfação dos clientes que utilizam óculos com lentes oftálmicas fabricadas com CR-39 nos parâmetros de conforto, durabilidade e segurança. De facto, foi realizado um questionário tanto a homens como mulheres com idades entre 5 e 65 anos e os dados foram analisados pelo software de estatística SPSS. Os resultados apontaram para uma elevada satisfação em conforto (96%) ao utilizar lentes de CR-39 em comparação com lentes de vidro. Referente a CR-39, 97% apontaram que as lentes são mais leves e 96% apontaram que as lentes são mais seguras. No entanto, 89,5% disseram que as lentes são mais frágeis sendo suscetíveis a arranhões quando comparado com as lentes de vidro [36].

A Columbia Resin 39 é um tipo de polímero. Os polímeros consistem em pequenas moléculas (monômeros) ligadas, através da polimerização, entre si. Os polímeros utilizados de forma recorrente na produção de lentes oftálmicas são; o termoplástico e o termofixo, que diferem entre si no alinhamento das moléculas, conforme apresentado na Figura 2.4. Os polímeros termofixos possuem na sua cadeia agentes de ligação entre as moléculas, o que torna a sua estrutura parecida com uma rede e por isso a sua rigidez não se altera quando submetido a altas temperaturas, mas depois destrói-se. Já os polímeros termoplásticos possuem uma cadeia molecular independente, ou seja, não possuem agentes de ligação entre as moléculas. Este material quando submetido a altas temperaturas amolece e funde-se novamente. O Policarbonato é um exemplo de polímero termoplástico [35].

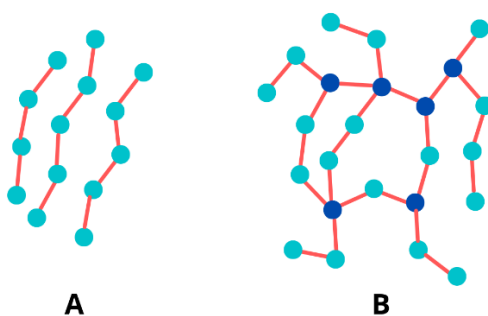


Figura 2.4. Polímero termoplástico (A) e termofixo (B).

Panyakapo e Panyakapo afirmam que atualmente os plásticos termofixos não são reciclados, portanto as opções de destino final são o aterro sanitário e a queima. Caso eles fossem reusados os custos com a gestão de resíduos em aterro e a emissão de poluentes através da queima decresceria [25].

Como não é possível reciclar, não existe um destino adequado para os resíduos de plástico termofixo, utilizados na fabricação de lentes oftálmicas. A construção civil, nomeadamente de edificações, requer uma enorme quantidade de material para compor argamassas e betões. A literatura já apresenta registos de sucesso considerando o uso de materiais reciclados para compor argamassas e betões. Experiências com o uso de CR39 em materiais cimentícios ainda é muito escasso na literatura.

Um dos estudos encontrados é o de Ruivinho onde é realizada a avaliação da composição dos resíduos de lentes oftálmicas orgânicas provenientes do corte e do descarte de lentes em Portugal com o objetivo de considerar possíveis soluções de valorização para os polímeros. Os materiais plásticos mais recorrentes foram o CR 39 (di-carbonato di-alila do etileno glicol), o Policarbonato (PC) e poliuretanos termoplásticos (TPU) que são classificados como termoplásticos ou termofixos. Os polímeros classificados como termoplásticos foram identificados como recicláveis e os termofixos como não recicláveis. Apesar de nem sempre ser possível reciclar pode-se afirmar que é possível valorizar todos os resíduos de lentes oftálmicas orgânicas (RLOO) mesmo que de formas distintas e com diferentes níveis de benefícios ambientais [37]

Assim, caso o uso deste material em argamassas seja viável sob o ponto de vista técnico, existirão alguns benefícios: i) proporciona um destino adequado ao resíduo, ii) vai evitar utilizar material virgem, iii) oportunidade de mercado para os produtores do material. Dessa forma, o principal objetivo desta dissertação de mestrado é avaliar o comportamento mecânico de argamassa para a produção de ladrilhos hidráulicos composta por CR39, tema este que não está abrangido na literatura.

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, primeiramente são apresentadas as características dos materiais utilizados e a descrição dos ensaios preliminares em argamassas produzidas, na parte aplicável, de acordo com a norma NP EN 196-1 Método de Ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas [38]. Consideraram-se argamassas que tem composições variadas com o objetivo de identificar qual a mistura que melhor se adequa ao objetivo proposto. Após a descrição destes ensaios é apresentada uma breve discussão dos resultados com o objetivo de definir a argamassa a ser utilizada nos mosaicos.

Em seguida é abordado neste capítulo ainda a produção detalhada dos mosaicos e a descrição dos ensaios em que eles são submetidos.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 RESÍDUO DE LENTES OFTALMOLÓGICAS

A multinacional Holandesa Grand Vision é uma indústria especializada no ramo oftalmológico. A base fabril situada em Vila Nova de Gaia produz anualmente 23 toneladas de resíduos derivados de lentes oftalmológicas que são recolhidos e armazenados em um depósito, e, posteriormente uma pequena porção é incinerada e o restante é direcionado para aterro [32]. Esta unidade é a responsável por disponibilizar o resíduo que é aplicado neste estudo, que é chamado de “resíduo de lentes” (LW) apresentado na Figura 3.1.

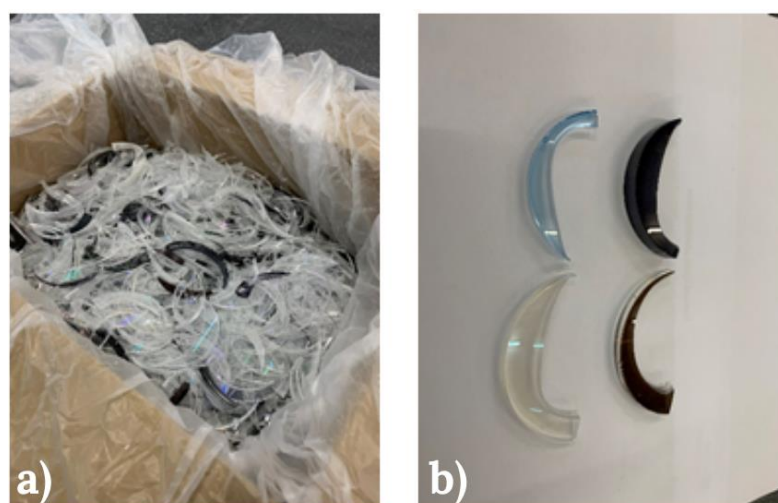


Figura 3.1. Resíduo de lentes oftálmicas. a) Resíduo prontos para transporte; b) Resíduo em ênfase.

3.2.1.1. Trituração do resíduo

Devido à irregularidade na forma deste resíduo, foi necessário triturá-lo em duas etapas. Primeiramente, utilizou-se um Moinho de facas grandes *Erdwich*, para reduzir o tamanho das partículas e homogeneizar o material, Figura 3.2.

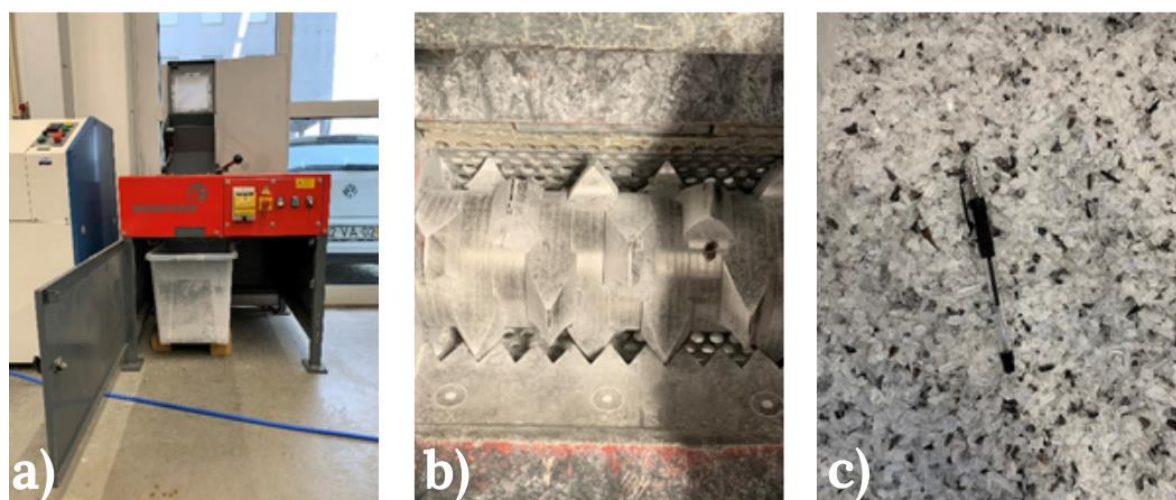


Figura 3.2. Primeira moagem. a) Moinho de facas grandes; b) Facas; c) Resíduos de lentes após a primeira moagem.

Na sequência, utilizou-se um moinho de facas pequeno para reduzir ainda mais o tamanho das partículas com o objetivo de tornar a dimensão das partículas adequada para efetuar a substituição parcial do agregado fino na argamassa, Figura 3.3. A granulometria do resíduo após o processo final é apresentada na próxima seção.

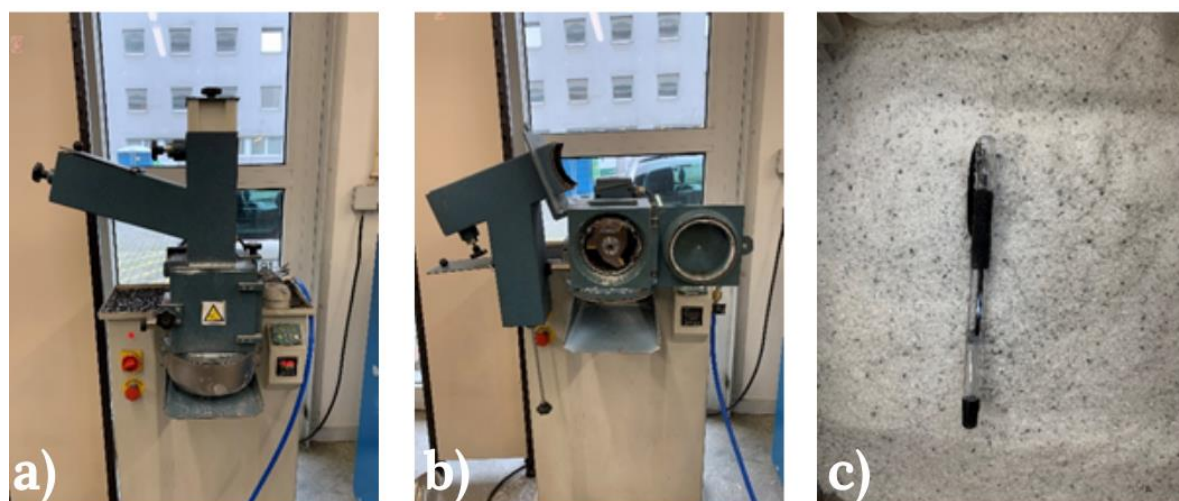


Figura 3.3. Segunda moagem. a) Moinho de facas pequeno; b) Facas; c) Resíduo de lentes após segunda moagem.

3.2.1.2. Granulometria do LW

A análise granulométrica do LW foi realizada segundo a norma NP EN 933-1 (2014). O ensaio fundamenta-se na análise da distribuição da dimensão dos grãos dos agregados através de um conjunto de peneiros selecionados de acordo com a natureza da amostra e o objetivo do trabalho.

Para determinação do volume mínimo da amostra a ser utilizado no ensaio, deve-se primeiramente determinar a dimensão máxima do agregado. Como pode ser visto na Figura 3.4, a totalidade do agregado passa pelo peneiro de 4mm, portanto, de acordo com a referida norma o volume mínimo do provete é de 0,3 litros. A fim de obter resultados fiáveis onde a amostra represente as características média do todo, deve-se recorrer à norma NP EN 932-1 [39] onde é especificado como realizar a redução das amostras. Visto que o volume necessário é pequeno, neste trabalho utilizou-se o esquartelador, apresentado na Figura 3.4, para reduzir, de forma aleatória, o tamanho da amostra.

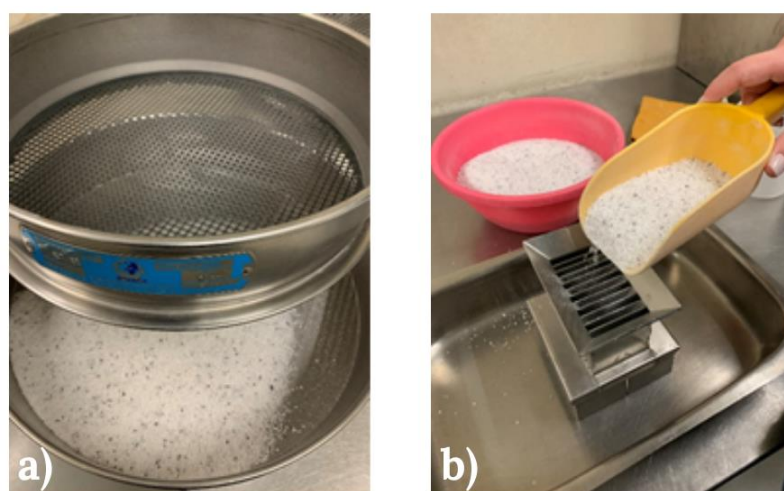


Figura 3.4. Preparativos para o ensaio. a) Amostra passante no peneiro de 4mm; b) Esquartelador.

O volume de agregado a utilizar para o ensaio é de 0,4 litros, apresentado na Figura 3.5. A preparação da amostra para o ensaio de análise granulométrica consiste em primeiramente colocar na estufa para secar a uma temperatura de $107,5^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$ até atingir massa constante. Retira-se então o provete da estufa para arrefecer e em seguida pesa-se o material ($M1 = 297,6 \text{ g}$). Após a pesagem, lava-se o material na peneira 0,063 mm com água corrente até que a água que atravessa fique límpida, significando que já não há mais material passante. Posteriormente coloca-se a secar novamente na estufa à temperatura $107,5^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$ até atingir massa constante e em seguida pesa-se novamente ($M2 = 293,1 \text{ g}$).



Figura 3.5. Preparo do material. a) Volume do provete; b) Secagem em estufa; c) Lavagem no peneiro 0,0063mm.

O processo da peneiração consiste em despejar o material lavado e seco no conjunto de peneiros já definidos (neste caso a série base) e apresentados na Figura 3.6. Os peneiros são empilhados por ordem de abertura de malha decrescente e a peneiração realizada através de agitação manual.

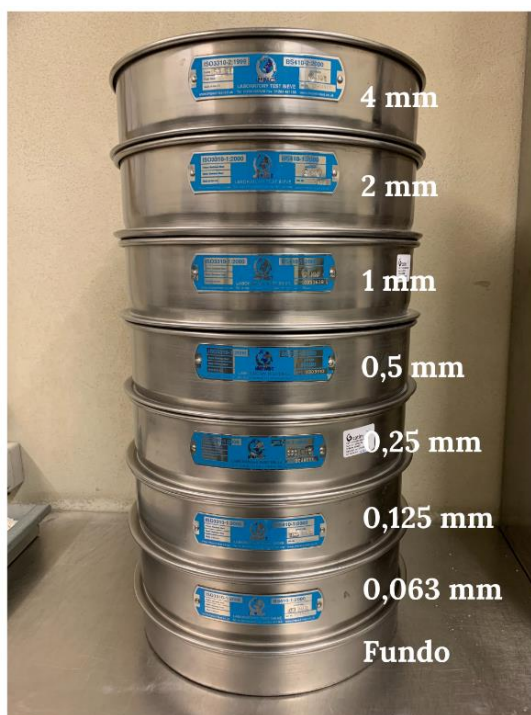


Figura 3.6. Peneiros da série base.

O material retido em cada peneira deve ser pesado e relacionado com a massa inicial do provete seco. Em seguida, deve-se calcular a percentagem de passados acumulados em cada peneiro. A curva granulométrica do LW é apresentada na Figura 3.7.

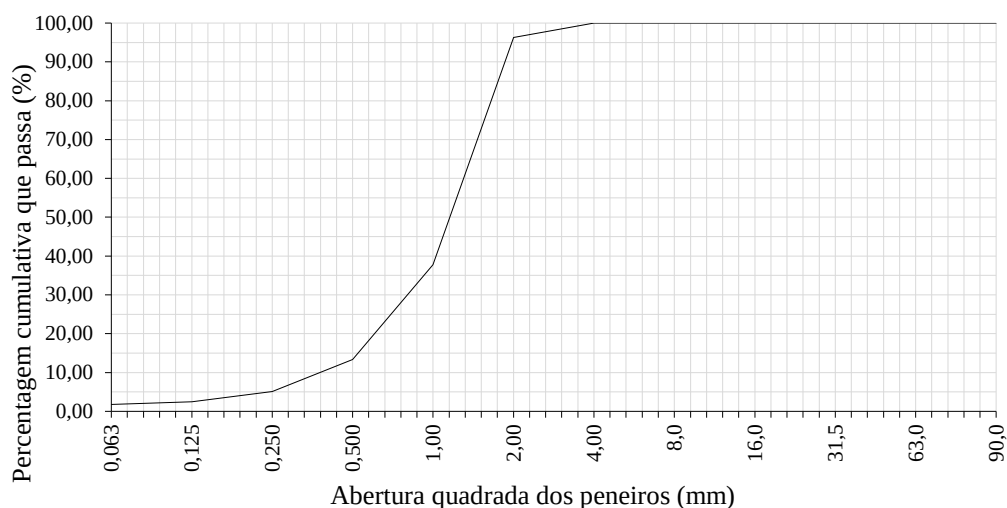


Figura 3.7. Curva granulométrica do LW com a série base.

3.2.2. CIMENTO

Para a realização dos estudos utilizaram-se três cimentos com propriedades distintas, o CEM II/B-L 32,5R (BR), o CEM I 42,5R e o CEM I 52,5 (BR). As propriedades mecânicas, químicas e físicas de cada um de acordo com as respectivas fichas técnicas estão especificadas em Quadro 3.1., Quadro 3.2. e Quadro 3.3.

Quadro 3.1. Propriedades Mecânicas – NP EN 196-1 (ficha técnica SECIL)

Dias	Resistências (MPa)		
	CEM II/B-L 32,5R (BR)	CEM I 42,5R	CEM I 52,5 (BR)
2	≥ 10	≥ 20	≥ 30
7	-	-	-
28	≥ 32,5 e ≤ 52,5	≥ 42,5 e ≤ 62,5	≥ 52,5

Quadro 3.2. Propriedades Químicas – NP EN 196-2 (ficha técnica SECIL)

Propriedades	Valor Especificado		
	CEM II/B-L 32,5R (BR)	CEM I 42,5R	CEM I 52,5 (BR)
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	≤ 3,5%	≤ 4,0%	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	≤ 0,10%	≤ 0,10%	≤ 0,10%

Quadro 3.3. Propriedades Físicas – NP EN 196-3 (ficha técnica SECIL)

Propriedades	Valor Especificado		
	CEM II/B-L 32,5R (BR)	CEM I 42,5R	CEM I 52,5 (BR)
Princípio de presa	≥ 75 min	≥ 60 min	≥ 45 min
Expansibilidade	≤ 10 mm	≤ 10 mm	≤ 10 mm

3.2.3. ÁGUA

A água utilizada nas amassaduras é potável procedente da rede pública, o que está de acordo com as normas NP EN 13748-1 e NP EN 13748-2.

3.2.4. AREIA

É importante que a areia e o LW apresentem uma granulometria semelhante a fim de minimizar o efeito da granulometria em termos de substituição de material. Portanto escolheu-se a areia 0/4 mm, de massa volúmica 2,64 Mg/m³ e 0,10% de absorção de água com granulometria apresentada na Figura 3.8.

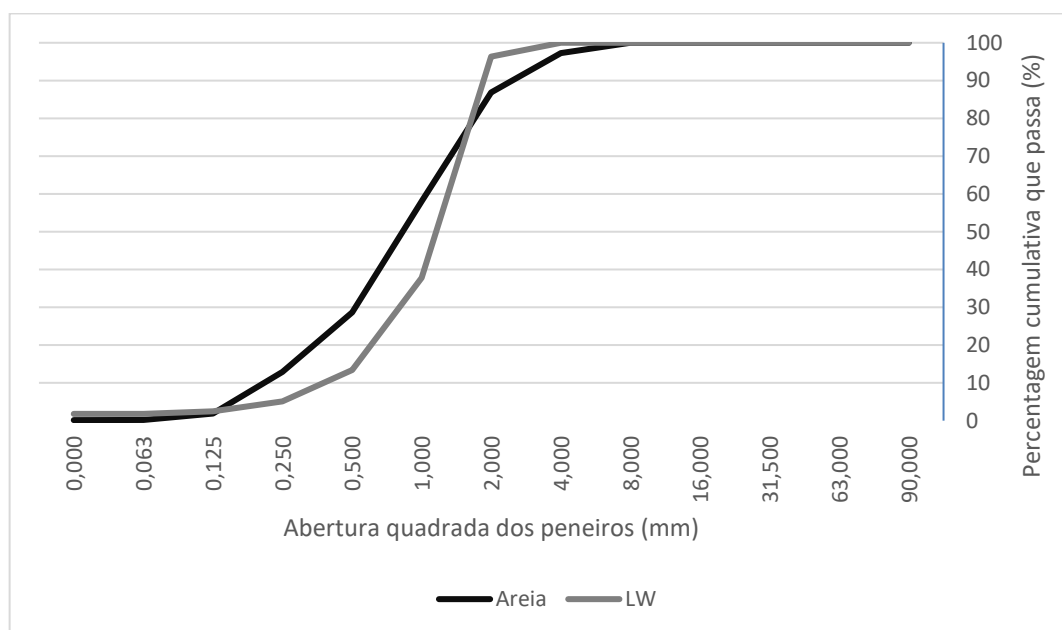


Figura 3.8 Curva granulométrica da areia com a série base e do LW.

3.3. ENSAIOS PRELIMINARES

Com o objetivo de investigar uma composição que aproxime os resultados aos requisitos exigidos por norma em relação as propriedades mecânicas, optou-se por realizar ensaios de provetes de acordo com a NP EN 196-1 Método de Ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas [38] quanto à resistência à flexão e à resistência à compressão. Foram testadas oito amassaduras variando

três componentes: o fator água/cimento, as percentagens de substituição em volume da areia por LW e de cimentos de resistência diferente.

3.3.1. PRODUÇÃO DAS AMASSADURAS

Na produção das amassaduras, o teste T0 foi considerado como o de referência por se tratar da mistura tradicional, ou seja, com 0% de LW. Os outros 7 testes (T1, T2, T3, T4, T5, T6 e T7) foram incrementadas variações no fator água/cimento, nas percentagens de substituição em volume da areia por LW e nas resistências de cimento. Entretanto, a proporção entre cimento e agregado fino manteve-se sempre de 1 para 3. As percentagens variáveis foram definidas pelo grupo de estudo e são apresentados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4. Composição dos provetes dos ensaios preliminares.

Teste	Relação a/c	Areia (%)	LW (%)	Cimento
T0	0,50	100	0	CEM II/B-L 32,5R (BR)
T1	0,50	50	50	CEM II/B-L 32,5R (BR)
T2	0,50	80	20	CEM II/B-L 32,5R (BR)
T3	0,45	50	50	CEM II/B-L 32,5R (BR)
T4	0,45	80	20	CEM II/B-L 32,5R (BR)
T5	0,50	50	50	CEM I/ 42,5R
T6	0,45	80	20	CEM I/ 42,5R
T7	0,45	80	20	CEM I/ 52,5R (BR)

Tendo como base a norma NP EN 196-1, para a realização do ensaio de determinação de resistência mecânica, são necessários 3 provetes com dimensão individual de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Considerando então cada tipo de argamassa produzida produziu-se o volume de 1 dm^3 para cada amostra. As quantidades utilizadas em cada mistura estão apresentadas no Quadro 3.5.

Quadro 3.5. Quantidade dos componentes das argamassas.

Teste	Cimento (g)	Areia (g)	LW (g)	Água Efetiva (g)	Água absorvida (g)
T0	484,6	1453,9	0,0	242,3	1,3
T1	484,6	727,0	358,2	242,3	0,7
T2	484,6	1163,1	143,3	242,3	1,0
T3	497,2	745,8	367,5	223,7	0,7
T4	497,2	1193,2	147,0	223,7	1,1
T5	490,6	735,9	362,7	245,3	0,7
T6	503,5	1208,4	148,9	226,6	1,1
T7	499,9	1199,7	147,8	224,9	1,1

As misturas foram realizadas de acordo com a linha do tempo referida na norma NP EN 196 -1 onde é especificada a ordem que se devem incluir os materiais bem como o tempo de mistura dentro da misturadora, tendo-se seguido a linha do tempo definida apresentada na Figura 3.9.

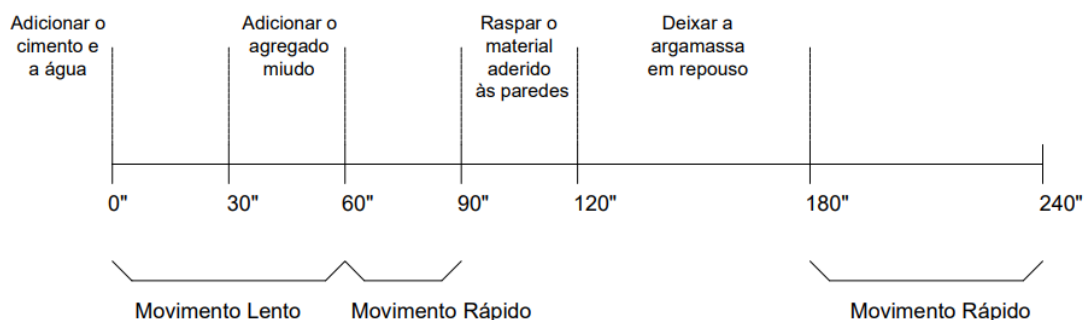


Figura 3.9. Linha do tempo para preparação da amassadura.

3.3.2. ENSAIO DE TRABALHABILIDADE

Após a fabricação de cada amassadura, mediram-se as temperaturas e realizou-se o ensaio de trabalhabilidade que tem o objetivo de medir a fluidez da argamassa ainda no estado fresco através da determinação da deformabilidade quando sujeita a uma tensão pré-definida de acordo com a norma *EN 1015-3 Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)* [40]. O ensaio, resumidamente, consiste em pousar o molde tronco-cônico na superfície da mesa e então despejar a argamassa para dentro em duas camadas com compactação de dez golpes por camada. Na sequência, retiram-se os excessos e o molde para então aplicar o esforço mecânico de quinze golpes em quinze segundos. No final mede-se o diâmetro da argamassa em duas direções perpendiculares. As fotografias do ensaio de espalhamento de todas as amostras estão na Figura 3. 10. e os resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.6.



Figura 3. 10. Medição do diâmetro no ensaio de trabalhabilidade.

Quadro 3.6. Medida dos diâmetros do ensaio de trabalhabilidade das argamassas.

Teste	Temperatura (°C)	Diâmetros (mm)			Média (mm)
T0	19,7	185	181	-	183,0
T1	19,6	169	170	-	169,5
T2	19,8	176	182	184	180,7
T3	20,2	130	133	-	131,5
T4	20,2	140	136	-	138,0
T5	20,8	174	179	-	176,5
T6	21,1	150	150	-	150,0
T7	24,0	140	140	-	140,0

3.3.3. MOLDAGEM DOS PROJETES

Imediatamente após medir a trabalhabilidade da argamassa, moldaram-se os projetes. O processo de moldagem consistiu em utilizar o molde apresentado na imagem 7 da Figura 3.11 onde primeiramente se preencheu com argamassa até metade da altura das 3 divisões, cada uma com dimensões de 4×4×16 cm³, e através do auxílio de uma espátula espalhou-se o material uniformemente. Em seguida compactou-se a primeira camada com o equipamento que produz 60 pancadas como pode ser visto na imagem 6 da Figura 3.11. Posteriormente, introduziu-se no molde a segunda camada de argamassa certificando-se que tivesse uma quantidade excedente, que, novamente foi espalhada uniformemente. Seguiu-se então para a compactação final com mais 60 pancadas. Após este processo, o molde foi retirado do compactador e colocado sobre uma superfície plana para que através de uma régua metálica se retirasse os excessos de argamassa ainda existentes conforme apresentado na imagem 8 na Figura 3.11. Em seguida, tapou-se o molde com uma placa de vidro deixando descansar a temperatura ambiente durante 24h. Após este período, as amostras foram desmoldadas e colocadas em cura imersas em água em câmara húmida com humidade relativa superior a 95% com temperatura controlada $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 27 dias. O processo completo de fabricação dos projetes é apresentado na Figura 3.11.



Figura 3.11. Processo de fabricação dos provetes testes. 1) Determinação das quantidades da mistura. 2) Misturador. 3) Mistura pronta. 4) Medição da temperatura da mistura. 5) Medição do diâmetro no ensaio de trabalhabilidade. 6) Compactador. 7) Colocação do material em 2 etapas. 8) Regularização da argamassa no molde. 9) Moldes preenchidos e prontos para descansar 24h. 10) Desmoldagem. 11) Provetes imersos em água para a realização da cura por 27 dias.

Este processo foi padrão e realizado para todas as amassaduras individualmente. Na Figura 3.12, são apresentados os provetes identificados e prontos para os ensaios que serão apresentados adiante.



Figura 3.12. Provetes dos ensaios preliminares.

3.3.4. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Após o término do tempo de cura, os provetes são ensaiados, primeiramente, à flexão através do método de carga em três pontos. Este ensaio consiste em posicionar o provete com o eixo longitudinal perpendicularmente aos apoios e na sequência aplicar uma carga verticalmente de forma constante até a ruptura. Esta carga aplicada que ocasiona a ruptura é medida no equipamento e, através da Equação 3.1 obtém-se a resistência à flexão.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (3.1)$$

Onde:

R_f é a resistência à flexão em MPa;

b é o lado da seção quadrada do prisma em mm;

F_f é a carga aplicada no meio do prisma na fratura em N;

l é a distância entre os apoios em mm

O ensaio de um provete é apresentado como exemplo na Figura 3.13.

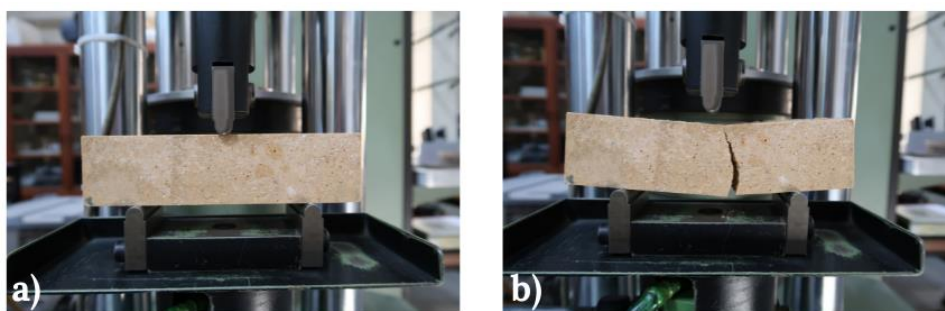


Figura 3.13. Ensaio de Resistência à Flexão. a) Provete a ensaiar b) Provete rompido

Neste ensaio obtém-se a resistência à flexão individual de cada provete, no entanto, para apresentar os resultados, faz-se a média dos três provetes de cada amassadura. Os resultados estão apresentados na Figura 3.14.

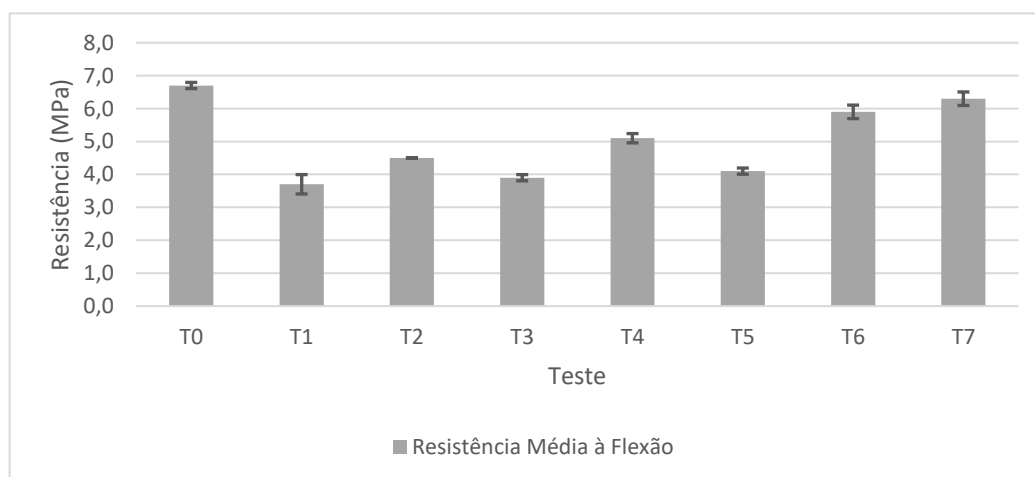


Figura 3.14. Resultados do ensaio de resistência à flexão.

3.3.5. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na verificação da resistência à compressão, é necessário ensaiar as duas metades de cada provete previamente obtidos do ensaio de resistência à flexão. Para realizar o ensaio, centraliza-se uma metade por vez na prancha do equipamento de ensaio e aplica-se a carga, uniforme em toda superfície de contato, aumentando a intensidade até a rotura. Ao final do ensaio, o valor da força aplicada que ocasiona a rotura é utilizada para calcular a resistência à compressão conforme a Equação 3.2.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.2)$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão em MPa;

F_c é a carga máxima de fratura em N;

1600 é a área das placas em mm².

O exemplo de ensaio em um provete é apresentado na Figura 3.15.

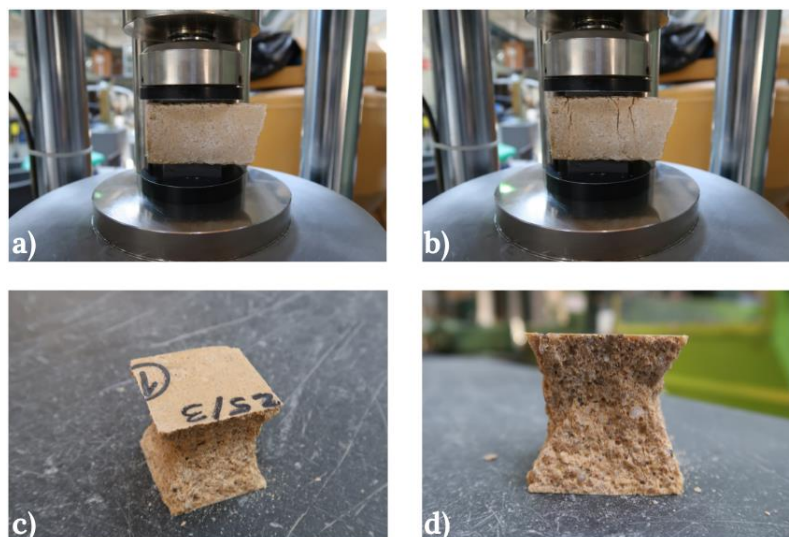


Figura 3.15. Ensaio de Resistência à Compressão.

Neste ensaio obtém-se a resistência à compressão individual de cada provete. No entanto, para apresentar os resultados, faz-se a média dos seis provetes de cada amassadura. Os resultados estão apresentados na Figura 3.16.

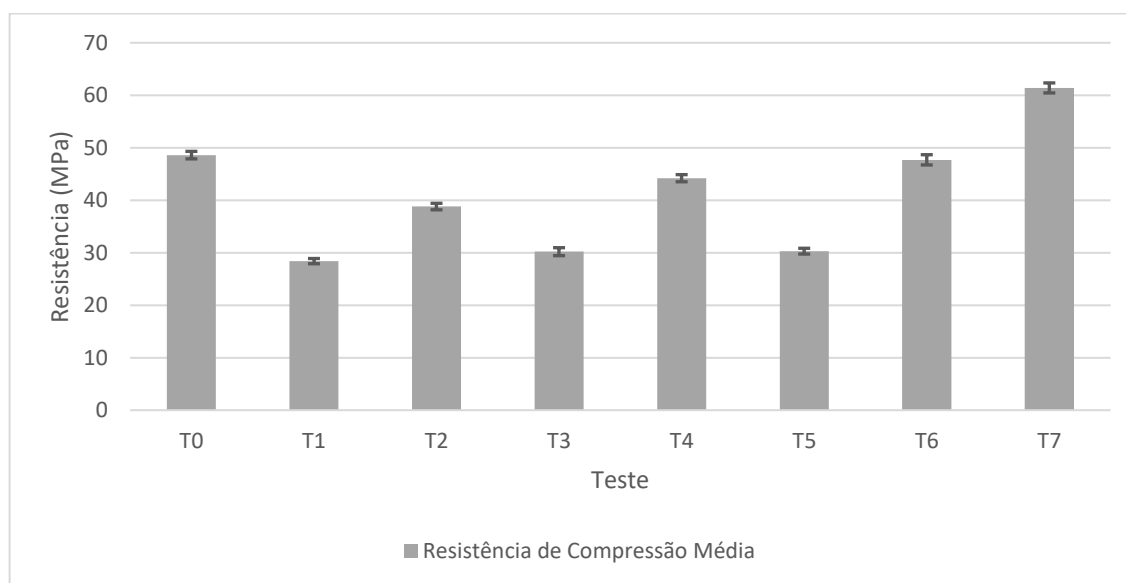


Figura 3.16. Resultados de resistência média à compressão.

3.3.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PRELIMINARES

Ao comparar o T0, T1 e T2, as três amassaduras com o cimento CEM II/B-L 32,5R (BR) e fator a/c igual a 0,5, pode-se observar que quanto maior a percentagem de LW menor a trabalhabilidade da argamassa. Quando se substituiu parcialmente a areia por 20% de LW, a trabalhabilidade reduziu aproximadamente 1,3% quando comparado com a amostra sem LW, e quando a substituição alcançou o volume de 50%, percebeu-se uma redução de 7,4% em relação a amostra sem LW.

Quanto a variação de cimento, ao comparar as amostras T4, T6 e T7 onde a substituição parcial da areia por LW é de 20% e a relação a/c é de 0,45 pode-se observar que as amostras que continham os cimentos brancos apresentaram menor trabalhabilidade. A amostra T4 apresenta uma trabalhabilidade 8,7% menor do que a amostra T6, enquanto a amostra T7 apresenta uma redução de 7,1%. Referente às resistências, essas mesmas amostras apontam que quanto maior a resistência do cimento maior a resistência à flexão e à compressão. T6 tem um valor de resistência à flexão aproximadamente 16% maior do que T4 e T7 um valor aproximadamente 24% maior do que T4.

No que diz respeito a resistência à flexão, ao substituir o agregado nobre, nomeadamente a areia, pelo LW ocorreu uma diminuição de resistência. A amostra T0 que não possui LW apresenta uma resistência de 6,7MPa, enquanto na amostra T2 com 20% de LW obteve apenas 67% do valor de T0. Já na amostra T1 onde aumenta-se a substituição da areia por LW para 50%, o valor da resistência é ainda menor, representando apenas 55% do valor obtido para T0.

Ao comparar as resistências entre as amostras T1 e T3 onde ambas possuem o mesmo cimento CEM II/B-L 32,5R (BR), o mesmo volume de 50% de LW na substituição da areia em suas composições, e varia apenas o fator a/c , percebe-se um pequeno incremento de 5,4% no valor da resistência à flexão ao diminuir o fator a/c de 0,5 para 0,45.

No caso em estudo pode-se verificar que a redução do fator a/c não ocasiona um forte impacto nos valores de resistência obtidos. Os fatores que alteram os resultados de resistência de forma significativa são o cimento e o volume de agregado nobre que é substituído.

Como o objetivo de produzir mosaicos que atendam os critérios referente à resistência mecânica especificada em norma, a amassadura definida para a produção de ladrilhos hidráulicos é a T7, com cimento CEM I 52,5R BR, fator a/c de 0,45 e 20% de LW. Entre todas as composições estudadas esta é a que possui maior resistência devido, sobretudo, ao tipo de cimento.

3.4. PRODUÇÃO DOS MOSAICOS

3.4.1. DEFINIÇÃO DA ESPESSURA

Para definir a espessura do mosaico a utilizar recorreu-se as normas NP EN 13748-1 e NP EN 13748-2, na secção de cálculo dos resultados de resistência a rotura e carga de rotura através da Equação 3.3.

$$T = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times t^2} \quad (3.3)$$

Onde:

T é a resistência em MPa;

P é a carga de rotura em N;

L é a distância entre os apoios em mm;

B é a largura do mosaico no plano de rotura em mm;

T é a espessura do mosaico no plano de rotura em mm.

Com o objetivo de atender à norma mais exigente quanto a resistência à flexão, NP EN 1378-2 para mosaicos hidráulicos para exteriores, é necessário que a resistência à flexão média seja de 5 MPa para a classe C. Sendo conhecida distância entre os apoios e a largura do mosaico no plano de rotura, fixou-se a resistência em 7 MPa e variadas espessuras a fim de obter-se a carga de rotura mínima de 3,0 MPa. O Quadro 3.7 apresenta os resultados.

Quadro 3.7. Definição da espessura do mosaico.

b (mm)	t (mm)	L (mm)	P (N)	T (MPa)
200	16	133,3	1792,45	7
200	17	133,3	2023,51	7
200	18	133,3	2268,57	7
200	19	133,3	2527,63	7
200	20	133,3	2800,70	7
200	21	133,3	3087,77	7
200	22	133,3	3388,85	7

Com a espessura de 21 mm, supostamente o mosaico deverá atender ambas as normas já citadas, onde na norma NP EN 13748-1 especifica classe 3 quando os valores individuais de carga de rotura não são abaixo de 3kN e a resistência à flexão média mínima é de 5MPa. Já para NP EN 13748-2 os mosaicos são considerados classe 30 quando a carga de rotura média é de 3kN e classe 3 quando a resistência à rotura média é de no mínimo 5MPa.

3.4.2. PREPARO DA ARGAMASSA

A composição da argamassa foi definida previamente como sendo a composição do teste preliminar T7, sendo essa apresentada no Quadro 3.4 e as quantidades de cada material para a produção de 1 litro de amassadura definidas no Quadro 3.5. Entretanto a misturadora a ser utilizada, apresentada na Figura 3.17 possui capacidade de produzir um volume de 2 litros de argamassa de cada vez, sendo então necessário dobrar as quantidades previamente apresentadas para a produção de cada mistura. Essas quantidades já corrigidas são apresentadas no Quadro 3.8.

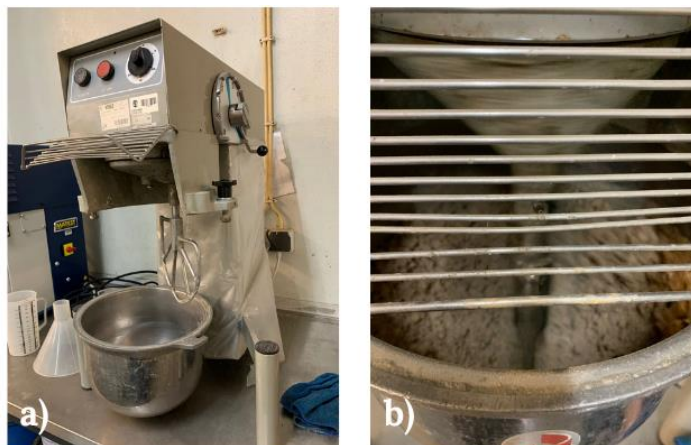


Figura 3.17. Maseira. a) Maseira com velocidade controlada; b) Argamassa sendo produzida.

Quadro 3.8. Composição da argamassa T7 corrigida para produzir 2 litros.

Teste	Cimento (g)	Areia (g)	LW (g)	Água Efetiva (g)	Água absorvida (g)
T7	999,8	2399,4	295,6	449,8	2,2

O volume de 2 litros de amassadura permite moldar 2 mosaicos. Portanto, considerando que para os ensaios são necessários, por norma, no mínimo 7 ladrilhos mais 3 cubos decidiu-se realizar 6 amassaduras de forma a produzirem-se peças extra.

De forma que todo o agregado se encontrasse em condições semelhantes de saturação, definiu-se que a água absorvida seria misturada com a areia previamente e esperou-se 15 minutos para iniciar a amassadura na misturadora. A mistura seguiu a linha do tempo previamente definida e apresentada na Figura 3.9. Para facilitar a mistura do agregado miúdo, ao invés de colocar a areia e o LW separadamente, juntou-se o LW com a areia num recipiente e após misturados com o auxílio de uma espátula (Figura 3.18) foram introduzidos na misturadora.

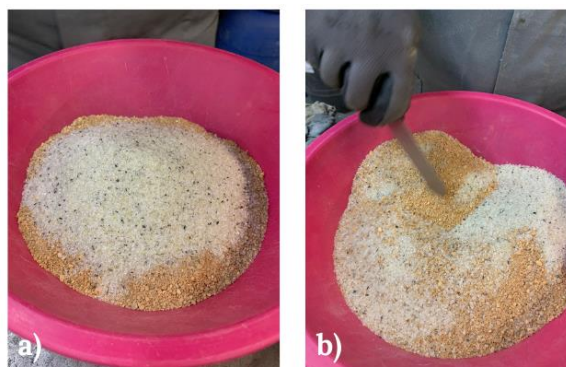


Figura 3.18. Tratamento do agregado miúdo. a) Junção dos agregados; b) Homogeneização da mistura através de uma espátula.

Como foram produzidas 6 argamassas do mesmo tipo, foi necessário identificar cada amassadura. Definiu-se que seriam chamadas de T7-A, T7-B, T7-C, T7-D, T7-E e T7-F. Ao fim da produção de cada uma, realizou-se o ensaio de trabalhabilidade sendo os resultados apresentados no Quadro 3.9.

Quadro 3.9. Resultados do ensaio de trabalhabilidade nas argamassas dos mosaicos.

Amassadura	Temperatura (°C)	Diâmetro (mm)			Média (mm)
T7 - A	25,4	144	141	-	142,5
T7 - B	25,1	144	137	141	140,7
T7 - C	24,9	143	139	138	140,0
T7 - D	24,0	140	140	-	140,0
T7 - E	24,0	143	140	-	141,5
T7 - F	24,3	142	142	-	142,0

A partir dos resultados obtidos pode-se observar que os valores de trabalhabilidade são muito próximos, indicando que a homogeneidade pretendida no fabrico das argamassas foi conseguida.

3.4.3. MOLDAGEM DOS MOSAICOS

Para a moldagem dos mosaicos, foram utilizados 5 moldes cúbicos com dimensão igual a 20×20×20 cm³, como mostra o modelo apresentado na Figura 3.19. Para preparar os moldes primeiramente foram limpos e lubrificados com óleo com auxílio de um pincel para facilitar a desmoldagem dos provetes.



Figura 3.19. Moldes dos mosaicos.

Com o objetivo de padronizar o processo de moldagem, optou-se por fazer do ladrilho T7-A-1 a referência e considerar o valor da massa utilizada como padrão para a produção dos seguintes. Para identificar a massa necessária para preencher 21 mm de altura do molde foi necessário primeiramente realizar a tara do mesmo na balança e depois começar a preencher com argamassa. Para espalhar a argamassa dentro do molde utilizou-se uma espátula e uma ferramenta rudimentar produzida no laboratório com 27,9 cm de altura. Quando se identificou que a altura de argamassa estava próxima dos 21 mm, colocou-se na mesa de vibração durante 40 s, após esta vibração verificou-se o assentamento da argamassa e, então, foi necessário acrescentar mais argamassa. Novamente espalhou-se a argamassa no molde e fez-se a vibração manual, que consistiu em levantar o molde aproximadamente 5cm da mesa e deixar cair, por 4 vezes. Na sequência foi realizada novamente a vibração mecânica na mesa por 40 s. No final do processo, verificou-se com uma régua que a distância entre o topo da argamassa e o topo do molde era de aproximadamente 27,9cm e, portanto, o mosaico estava com 21 mm. Para verificar a massa introduzida no molde, pesou-se, dessa vez o molde com a argamassa, e, então, obteve-se a massa de 1885 g. Fotos do processo são apresentadas na Figura 3.20.



Figura 3.20. Moldagem do ladrilho referência. a) Pesagem da massa; b) Espalhando a argamassa com ferramenta rudimentar; c) Mesa de vibração.

Por norma, são necessários 3 ladrilhos para o ensaio de absorção, 4 ladrilhos para o ensaio de resistência a flexão e 3 cubos com dimensões de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ para o ensaio de abrasão. Sabendo que cada ladrilho tem $20 \times 20 \times 2,1 \text{ cm}^3$ obteve-se o volume equivalente a 0,84 litros. Considerando que a misturadora

produz 2 litros, moldaram-se 2 ladrilhos por amassadura. A ordem das moldagens, bem como o ensaio a ser realizado com cada mosaico estão indicados no Quadro 3.10.

Quadro 3.10. Identificação dos ladrilhos por amassadura.

Amassadura	Identificação		Dimensão (cm ³)	Ensaio
T7 - A	T7 - A - 1	R 6 (LW)	20x20x2,1	Resistência
	T7 - A - 2	R 7 (LW)	20x20x2,1	Resistência
T7 - B	T7 - B - 1	ABS 1	20x20x2,1	Absorção
	T7 - B - 2	ABS 2	20x20x2,1	Absorção
T7 - C	T7 - C - 1	ABS 3	20x20x2,1	Absorção
	T7 - C - 2	Cubos	7x7x7	Abrasão
T7 - D	T7 - D - 1	R 5 (LW)	20x20x2,1	Resistência
	T7 - D - 2	R 1	20x20x2,1	Resistência
T7 - E	T7 - E - 1	R 2	20x20x2,1	Resistência
	T7 - E - 2	R 3	20x20x2,1	Resistência
T7 - F	T7 - F - 1	R 4	20x20x2,1	Resistência

A moldagem dos ladrilhos foi sempre seguida pelo ensaio de trabalhabilidade. O processo consistiu em despejar 1885 g de argamassa dentro do molde, acomodar com a espátula e com a ferramenta rudimentar. Para as vibrações, manteve-se a ordem de 40 s de vibração mecânica, levantar manualmente o molde a altura de 5cm e deixar cair livremente por 4 vezes e por fim, mais 40s de vibração mecânica na mesa.

Após o término do processo de moldagem, deixou-se o molde com o ladrilho fresco curar à temperatura ambiente do laboratório durante 24h e depois efetuar a desmoldagem. Em seguida, cada peça foi identificada e colocada dentro de um recipiente com água no interior da câmara de cura durante 27 dias. A Figura 3.21 apresenta algumas fotografias do processo.

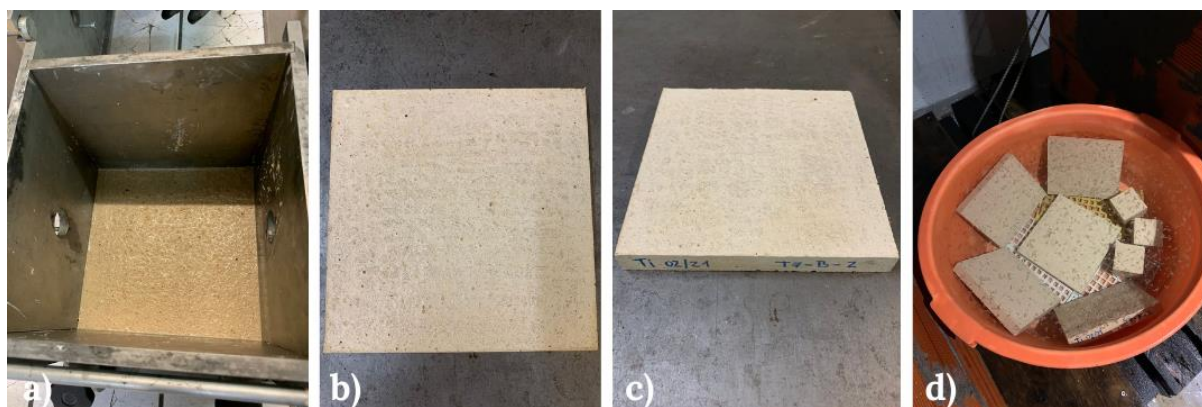


Figura 3.21. Processo de produção dos mosaicos. A) Moldagem; b) Desmoldagem; c) Identificação; d) Submersão em água para cura.

Para o ensaio de abrasão foram produzidos cubos com dimensões $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$, que são apresentados na Figura 3.22.

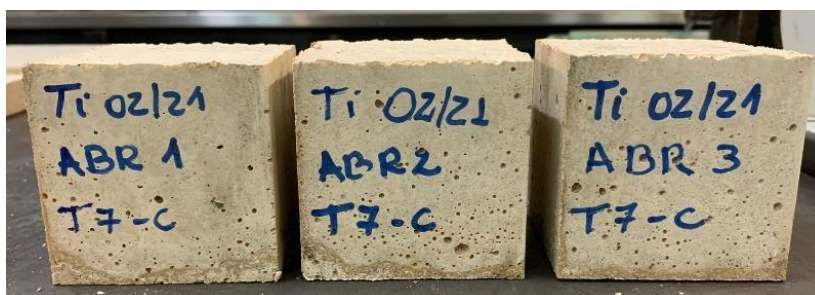


Figura 3.22. Cubos para o ensaio de abrasão.

Como por norma era exigido que fossem produzidos no mínimo 7 ladrilhos e o laboratório dispunha de apenas 5 moldes, foi necessário realizar as moldagens em 2 dias distintos. Ademais, resolveu-se moldar 3 mosaicos extras, mantendo o mesmo procedimento previamente definido, e aplicar 127 g de LW na superfície dos mesmos para serem ensaiados à flexão. As fotografias destes mosaicos são apresentadas da Figura 3.23.



Figura 3.23. Moldagem dos mosaicos com LW polvilhado. a) Mosaico com 127g de LW polvilhado; b) Leve pressão para o LW aderir a argamassa fresca; c) Desmoldagem e retirada do excesso de LW; d) Mosaico identificado.

3.5. ENSAIOS REALIZADOS NOS LADRILHOS E MOSAICOS

3.5.1. ENSAIOS NOS LADRILHOS DE ACORDO COM NP EN 13748-1

3.5.1.1. Geometria

Para a verificação dos desvios dimensionais do ladrilho, deve-se utilizar uma régua de aço com exatidão de 0,5 mm e um paquímetro com exatidão de 0,01 mm. As dimensões devem ser medidas em 3 pontos e os valores máximos e mínimos anotados. Para a medição dos mosaicos nesse estudo utilizou-se um paquímetro nos quatro lados de todos os mosaicos que foram medidos conforme a Figura 3.24.



Figura 3.24. Medição com paquímetro.

Já na verificação da retilinearidade das arestas deve-se colocar a régua ao longo da aresta e a distância máxima entre a régua e a peça deve ser anotada. Nessa etapa foram verificadas as 4 arestas de cada ladrilho conforme apresentado na Figura 3. 25.

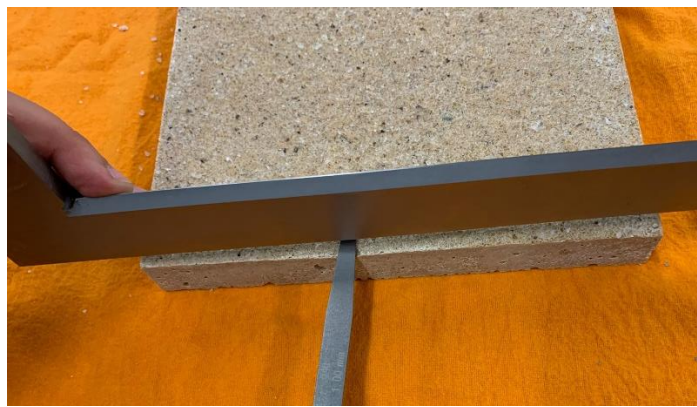


Figura 3. 25. Verificação da retilinearidade.

Na verificação da planeza da face superior, a norma indica medir o desvio máximo convexo e côncavo ao longo das duas diagonais da face superior com um instrumento com exatidão de 0,1 mm. Através do esquadro, Figura 3.26, pôde-se averiguar a planeza de todas as peças.



Figura 3.26. Verificação da planeza da superfície.

3.5.1.2. Ensaio de resistência à rotura e carga de rotura

Esse ensaio é realizado através de um equipamento que deve ter uma exatidão de $\pm 3\%$ sobre todo o intervalo das cargas. Além disso, o equipamento deve permitir um aumento da carga com taxas específicas.

O mosaico é posicionado de forma que o mesmo fique submetido à flexão por meio de três apoios cilíndricos com 20mm de diâmetro de forma a permitir a flexão da peça ensaiada. A distância entre os apoios inferiores deve ser igual a 2/3 do comprimento do ladrilho enquanto o terceiro apoio, superior, deverá estar centralizado, sendo a carga aplicada sobre si.

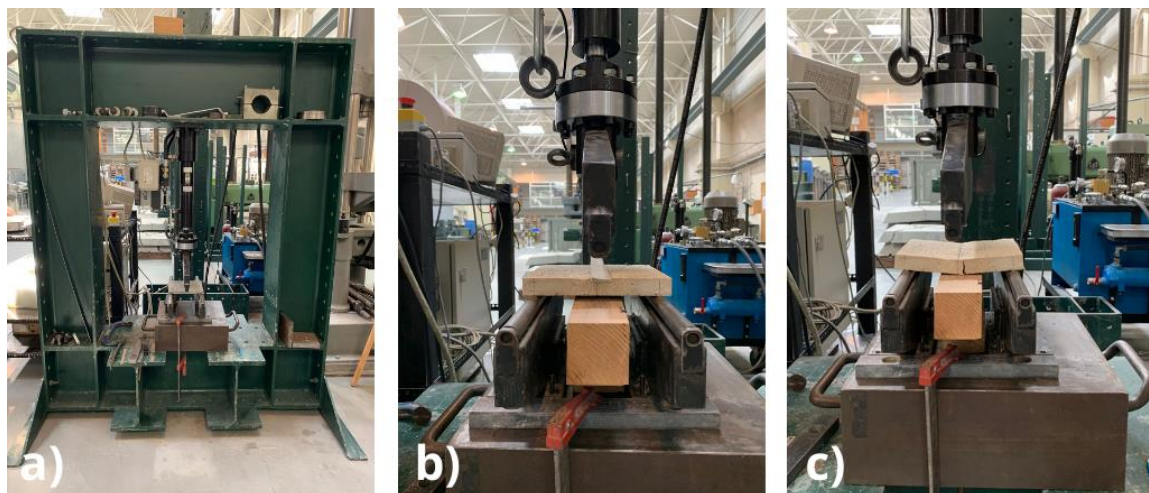


Figura 3. 27. Ensaio de rotura. a) Máquina; b) Ajuste do mosaico no equipamento; c) Rotura do mosaico.

No final do ensaio de cada mosaico, o equipamento regista a carga que provocou a rotura e a partir da equação (3.4) é possível calcular a resistência à rotura.

$$T = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times t^2} \quad (3.4)$$

Onde:

T é a resistência em MPa;

P é a carga de rotura em N;

L é a distância entre os apoios em mm;

B é a largura do mosaico no plano de rotura em mm;

T é a espessura do mosaico no plano de rotura em mm.

3.5.1.3. Ensaio de resistência à abrasão

Para a realização do ensaio, inicialmente pesou-se cada cubo. Em seguida identificaram-se 4 faces (I, II, III e IV) com uma caneta e através de um molde e marcou-se 9 pontos equidistantes, numa das faces perpendicular as faces I, II, III e IV conforme a Figura 3.28. Os pontos marcados foram utilizados para a verificação da altura do provete, tanto no início quanto ao longo do ensaio.



Figura 3.28. Marcação de pontos no provete.

Em seguida fixou-se um cubo de cada vez sobre a pista de ensaio, polvilhada com material abrasivo normalizado (alumina fundida), com a face a ser ensaiada (a que apresenta os 9 pontos marcados) em contato com a pista. A fim de forçar o desgaste, carregou-se axialmente o cubo com uma carga de 294 ± 3 N e ligou-se o equipamento, conforme Figura 3.1Figura 3.29.

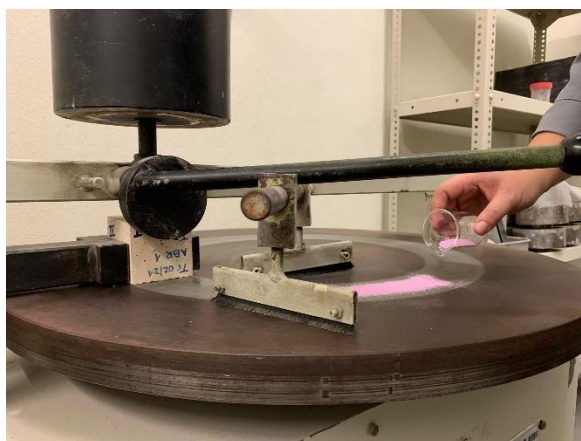


Figura 3.29. Cubo na pista de ensaio.

Cada cubo foi submetido a um total de 16 ciclos com 22 rotações cada. Após cada ciclo completo rodou-se 90° o provete e a cada 4 ciclos completos foi necessário pesar e marcar os 9 pontos na face de contato para poder executar as medições. Ao fim dos 16 ciclos, calculou-se a perda média do volume do provete através da equação:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_R} \quad (3.5)$$

Onde:

ΔV é a perda de volume após os 16 ciclos em mm^3 ;

Δm é a perda de massa após os 16 ciclos em g;

ρ_R é a massa volúmica do provete em g/mm^3

3.5.1.4. Ensaio de absorção de água

Para ensaiar o mosaico deve-se primeiramente remover as poeiras e aderências dos mosaicos para então deixá-lo secar em estufa com temperatura $105 \pm 5^\circ \text{C}$ até atingir massa constante. No entanto, o período dentro da estufa nunca deve ser menos do que 3 dias. Considera-se que o provete atingiu massa constante

quando a diferença de massa entre 2 pesagens efetuadas num intervalo de 24h for inferior a 0,1%. Antes de efetuar as pesagens deve-se deixar sempre os provetes arrefecerem até a temperatura ambiente. A massa obtida no final do ciclo de secagem é a massa no estado seco (m_d). Seguidamente deve-se selar as faces laterais, Figura 3.30, dos provetes e pesar novamente, obtendo-se então a massa no estado seco do provete selado ($m_{d,s}$).



Figura 3.30. Impermeabilização do mosaico. a) Impermeabilizante; b) Aplicação do impermeabilizante; c) Mosaico com as laterais impermeabilizadas.

Para a continuação do ensaio, devem-se imergir os provetes em água, com temperatura igual a 20 ± 5 °C com uma profundidade superior a 2mm e inferior a 10mm. Após $24 \pm 0,5$ h deve-se retirar o provete da imersão sem molhar a face posterior e efetuar a eliminação da água aderente à face de sucção através de uma esponja húmida. Após este processo concluído deve-se pesar o provete para obter-se a massa do provete após sucção de água por capilaridade após 24h através da superfície ($m_{h,24h}$) e imergir novamente o provete em água, só que dessa vez, a camada de água deve variar entre 25mm e 50mm. O provete fica submerso até atingir massa constante (alteração máxima de 0,1% de massa em 24 h) ou pelo menos 3 dias, Figura 3.31. Esta última pesagem proporcionará a massa do provete saturado de água à pressão atmosférica ($m_{h,c}$).

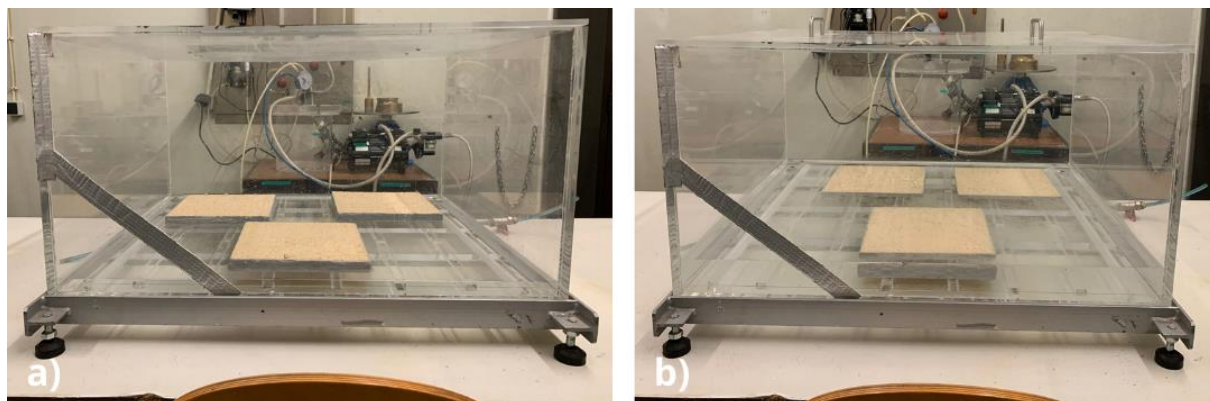


Figura 3.31. Submersão dos mosaicos em água. a) Água a nível 10 mm; b) Água a nível 40 mm.

Tendo todas estas informações anotadas, é possível calcular o coeficiente de absorção através da Fórmula 3.6 e calcular a capacidade de absorção através da Fórmula 3.7.

$$W_{24h} = \frac{m_{h,24h} - m_{d,s}}{s} \quad (3.6)$$

Onde:

W_{24h} é o coeficiente de absorção capilar por unidade de superfície à pressão atmosférica após 24h em g/cm²;

$m_{h,24h}$ é a massa do provete após sucção de água por capilaridade após 24h através da superfície de ensaio S em g;

$m_{d,s}$ é a massa no estado seco do provete selado em g;

S é a superfície (face de sucção) do provete em cm^2 .

$$W_{m,a} = \frac{m_{h,c} - m_{d,s}}{m_{d,s}} \times 100 \% \quad (3.7)$$

Onde:

$W_{m,a}$ é a capacidade de absorção de água baseada na massa em % de massa;

$m_{h,c}$ é a massa do provete saturado de água à pressão atmosférica em g;

$m_{d,s}$ é a massa do provete no estado seco em g.

3.5.2. ENSAIOS NOS MOSAICOS DE ACORDO COM NP EN 13748-2

3.5.2.1. Geometria

Segue o mesmo procedimento descrito no item 3.5.1.1.

3.5.2.2. Ensaio de resistência à rotura e carga de rotura

Segue o mesmo procedimento descrito no item 3.5.2.2.

3.5.2.3. Ensaio de resistência à abrasão

Segue o mesmo procedimento descrito no item 3.5.1.3.

3.5.2.4. Ensaio de absorção de água

Segue o mesmo procedimento descrito no item 3.5.1.4.

4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. INTRODUÇÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos e as discussões apropriadas para cada ensaio. No total foram produzidos 10 mosaicos de camada única. Dentre eles, 3 mosaicos foram destinados ao ensaio de absorção de água, sendo eles denominados como ABS1 a ABS3, 7 foram designados para o ensaio de resistência à rotura, nomeados aqui como R1 a R7. Entre estes 7, apenas R5 a R7 contem LW polvilhado na superfície. No entanto, o ensaio de abrasão não é realizado com mosaicos, e sim com cubos, pelo que foram produzidos 3 cubos nomeados neste trabalho como ABR1 a ABR3.

4.2. VERIFICAÇÃO DA GEOMETRIA

A verificação da geometria foi realizada para todos os mosaicos produzidos, nomeadamente ABS1 a ABS3 e R1 a R7. As dimensões das arestas são apresentadas no Quadro 4.1 Dimensão das arestas dos ladrilhos. Quadro 4.1. e as espessuras obtidas no Quadro 4. 2.

Quadro 4.1 Dimensão das arestas dos ladrilhos.

Provetes	Dimensões (mm)					Desvio Padrão (mm)
	Aresta 1	Aresta 2	Aresta 3	Aresta 4	Média	
ABS1	200,7	201,1	201,1	201,1	201,0	0,2
ABS2	200,6	201,0	200,9	200,9	200,9	0,2
ABS3	200,7	201,3	200,8	201,2	201,0	0,3
R1	200,33	200,67	200,21	200,42	200,4	0,2
R2	200,56	200,45	200,22	200,65	200,5	0,2
R3	200,55	200,45	200,38	200,48	200,5	0,1
R4	200,63	200,12	200,91	200,13	200,4	0,4
R5	200,23	200,65	200,24	200,53	200,4	0,2
R6	200,73	200,45	200,45	200,66	200,6	0,1
R7	200,55	200,58	200,52	200,75	200,6	0,1

No que diz respeito a geometria, pode-se verificar que referente as dimensões dos mosaicos, de acordo com o pré-requisito do desvio admitido ser de 0,3%, ou seja, todas as peças deveriam ter dimensões de $200 \text{ mm} \pm 0,6 \text{ mm}$. Ao analisar as dimensões individualmente apresentadas no Quadro 4.1, apenas o mosaico R3 atende esta especificação da norma. Caso a análise seja feita através da média, todos os mosaicos que foram submetidos ao ensaio de resistência à flexão atendem à exigência.

Quadro 4. 2. Espessura dos ladrilhos.

Provetes	Espessuras (mm)					Desvio Padrão (mm)
	Aresta 1	Aresta 2	Aresta 3	Aresta 4	Média	
ABS1	22,58	22,81	23,07	23,13	22,9	0,3
ABS2	22,89	22,94	23,34	22,8	23,0	0,2
ABS3	23,01	22,6	23,07	23,03	22,9	0,2
R1	23,07	23,21	22,79	22,93	23,0	0,2
R2	22,45	23,15	22,92	22,14	22,7	0,5
R3	22,45	22,63	23,08	22,37	22,6	0,3
R4	22,08	22,42	23,12	22,5	22,5	0,4
R5	23,55	23,77	24,43	22,9	23,7	0,6
R6	22,52	23,54	23,67	23,03	23,2	0,5
R7	23,6	24,35	24,36	23,89	24,1	0,4

Os mosaicos foram idealizados com 21 mm, no entanto como o molde tinha 200 mm de altura não foi possível executar um controle de qualidade rigoroso como quando se dispõe de moldes espessura correta, isto é, próprios para o fim em causa. Apesar de se ter tido o cuidado de produzir os mosaicos com uma massa pré-determinada, não foi possível um produto final com variação máxima de ± 2 mm pois os mosaicos apresentaram uma média geral de 23,1 mm quando o máximo permitido é 23,0 mm.

Referente à retilinearidade (Quadro 4.3.) e à planeza da superfície (Quadro 4.4) de forma geral os mosaicos também não atendem à especificação de ser inferior a 0,3% da dimensão da aresta como se poderia prever, pela ausência de equipamento adequado.

Quadro 4.3. Retilinearidade.

Provetes	Dimensões (mm)			
	Aresta 1	Aresta 2	Aresta 3	Aresta 4
ABS1	não OK	< 0,6	< 0,6	não OK
ABS2	< 0,6	não OK	< 0,6	< 0,6
ABS3	não OK	< 0,6	não OK	< 0,6
R1	< 0,6	< 0,6	< 0,6	< 0,6
R2	< 0,6	< 0,6	< 0,6	não OK
R3	não OK	não OK	não OK	não OK
R4	< 0,6	< 0,6	não OK	< 0,6
R5	não OK	não OK	não OK	não OK
R6	não OK	não OK	não OK	não OK
R7	não OK	não OK	não OK	não OK

Quadro 4.4. Planeza da superfície.

Provetes	Dimensões (mm)			
	Diagonal 1		Diagonal 2	
	Convexo	Côncavo	Convexo	Côncavo
ABS1	-	não OK	-	< 0,8
ABS2	-	< 0,8	-	não OK
ABS3	-	não OK	-	< 0,8
R1	-	não OK	-	< 0,8
R2	-	não OK	-	não OK
R3	-	não OK	-	não OK
R4	-	< 0,8	-	< 0,8
R5	-	não OK	-	não OK
R6	-	não OK	-	não OK
R7	-	não OK	-	não OK

4.3. RESISTÊNCIA À ROTURA E CARGA DE ROTURA

Quanto a avaliação de resistência à rotura e carga de rotura todos os 7 mosaicos foram ensaiados individualmente. Ainda vale salientar que os mosaicos R5 a R7 continham 127g de LW polvilhados na superfície. Os resultados obtidos no ensaio no que diz respeito aos valores de carga de rotura estão apresentados na Figura 4.1.

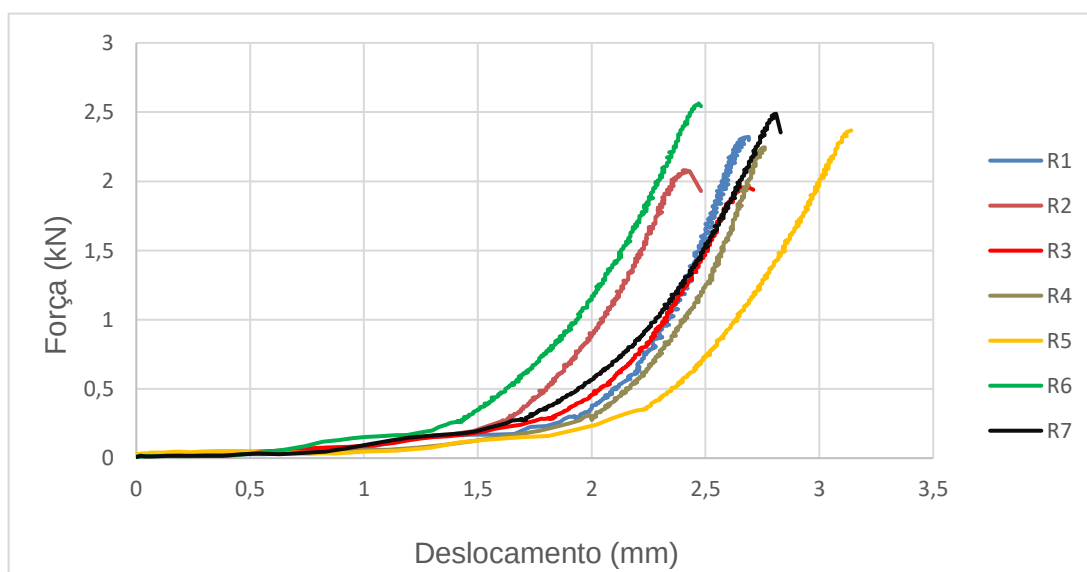


Figura 4.1. Resultado da carga de rotura.

De acordo com a NP EN 13748 no que diz respeito à carga de rotura, apenas os ladrilhos R6 e R7 atenderam a exigência da classe 2 onde nenhum valor individual pode ser menor que 2,5 kN, todos os outros (R1, R2, R3, R4 e R5) romperam com valores inferiores a 2,5 kN. Já para a norma EN 13748-2 existem 7 possibilidades de carga de rotura que variam da classe 30 a 300, os provetes R1, R2, R3 e R4 não se enquadram em nenhuma classe visto que para a menor classe (30) a carga média de rotura precisa ser de 3,0 kN, e a carga de rotura individual mínima de 2,4 kN.

A partir da força que provoca a rotura em cada mosaico, é necessário calcular a resistência à rotura através da Fórmula 3.3. Sendo a distância entre os apoios 133,33 mm para todos os casos, os valores obtidos para a resistência a rotura são apresentados no Quadro 4.5 e o gráfico para uma melhor identificação visual dos resultados está na Figura 4.2. Além dos valores individuais, também se verifica as médias, sendo a média 1 somente da média dos mosaicos R1, R2, R3 e R4, enquanto a média 2 além desses, também inclui os mosaicos R5, R6 e R7.

Quadro 4.5. Resultados da resistência à rotura e carga de rotura.

Proвете	Força (kN)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Resistência (MPa)
R1	2,3	200,4	23,0	4,4
R2	2,1	200,5	22,7	4,0
R3	2,0	200,5	22,6	3,8
R4	2,2	200,4	22,5	4,4
R5	2,4	200,4	23,7	4,2
R6	2,6	200,6	23,2	4,8
R7	2,5	200,6	24,1	4,3
Média 1	$2,2 \pm 0,2$	$200,4 \pm 0,0$	$22,7 \pm 0,2$	$4,2 \pm 0,3$
Média 2	$2,3 \pm 0,2$	$200,5 \pm 0,1$	$23,1 \pm 0,6$	$4,3 \pm 0,3$

Os resultados obtidos quanto a resistência à rotura para ladrilhos hidráulicos utilizados no interior são insuficientes para atender a norma NP EN 13748-1. A resistência média obtida de 4 ladrilhos (R1, R2, R3 e R4) foi de 4,2 MPa, quando o necessário era 5 MPa. Quanto ao requisito de nenhum ladrilho possuir valor individual inferior a 4 MPa, se verifica que apenas o R3 não atende. Já na norma NP EN 13748-2 para mosaicos hidráulicos para exteriores os requisitos são diferentes dos valores exigidos na NP EN 13748-1. Os valores de resistência média são divididos em classes, para mosaicos com valor de resistência média igual 4,2 MPa e resistência individual mínima de 3,8 MPa, o que se enquadra na classe 2.

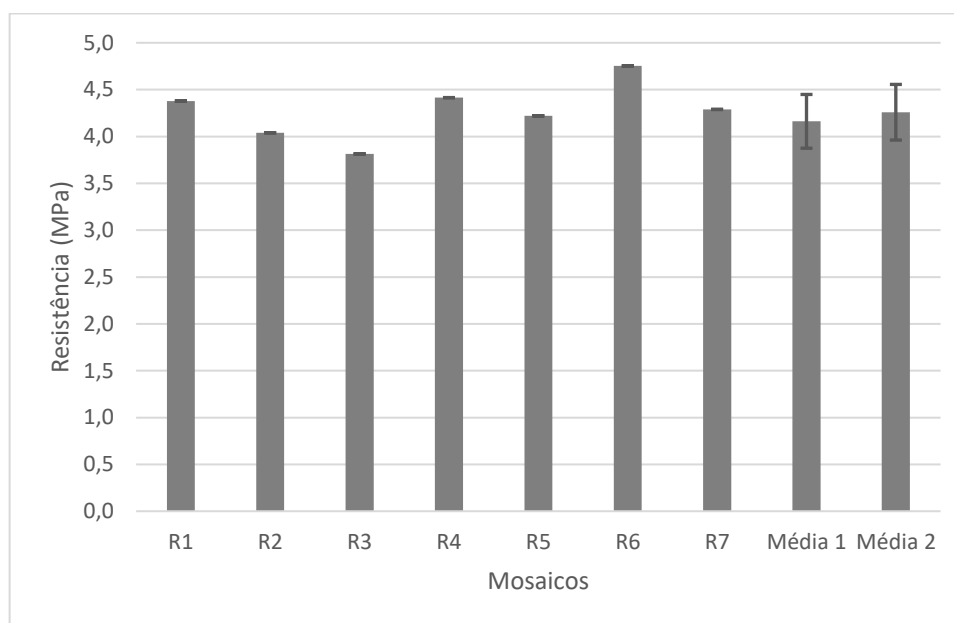


Figura 4.2. Resultado da resistência à rotura dos mosaicos.

4.4. RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Conforme descrito anteriormente, os primeiros valores apontados são as dimensões iniciais que foram realizadas com o auxílio de um micrómetro e são apresentadas no Quadro 4.6. Além disso, o peso inicial também foi verificado e, a partir destes valores, foi possível obter o volume inicial de cada provete bem como a massa volúmica.

Quadro 4.6. Dimensões iniciais dos provetes.

	ABR1	ABR2	ABR3
I/III (mm)	70,96	70,89	71,23
II/IV (mm)	70,93	71,03	71,15
Altura (mm)	68,68	68,89	69,05

Na sequência, os provetes foram submetidos ao ensaio e a cada 4 ciclos as alturas dos 9 pontos eram apontadas. É importante destacar que a partir do 8º ciclo colocou-se um papel cartão com espessura aproximada de 2 mm entre o provete e o peso na face superior por causa da forte vibração do provete na mesa. Este cartão teve a única finalidade de amortecer a pancada entre o provete com o peso e então evitar fissuras. A altura média dos provetes ao fim do 4º, 8º, 12º e 16º ciclos são apresentados no Quadro 4.7 e o estado dos provetes ao longo do ensaio pode ser verificado na Figura 4.3.

Quadro 4.7. Altura média dos provetes.

Fase	Altura média (mm)		
	ABR1	ABR2	ABR3
Inicial	68,7	68,9	69,0
Pré ensaio	68,4	68,4	68,5
4º Ciclo	67,6	67,4	67,5
8º Ciclo	66,9	66,5	67,0
12º Ciclo	66,3	65,9	66,5
16º Ciclo	65,7	65,3	65,7



Figura 4.3. Provetes ensaiados. a) Antes do ensaio; b) Após o 8º ciclo; c) Após o 16º ciclo.

Como pode ser observado na Figura 4.3 o provete ABR 3 perdeu um pedaço durante o desgaste na face II do conjunto do 8º ciclo, as massas podem ser conferidas no Quadro 4.8.

Quadro 4.8. Peso dos provetes.

Fase	Massa (g)		
	ABR1	ABR2	ABR3
Inicial	677,6	675,2	683,9
Pré ensaio	676,0	673,8	681,9
4º Ciclo	669,1	665,7	673,7
8º Ciclo	661,0	656,4	664,1
12º Ciclo	654,7	649,1	657,8
16º Ciclo	648,9	641,3	649,9

Após a obtenção de todos os dados definiu-se a perda de volume após 16 ciclos e os resultados obtidos para o ensaio de abrasão realizado através do método de Bohme são apresentados no Quadro 4.9.

Quadro 4.9. Resultados ensaio de abrasão.

Ciclo		ABR1	ABR2	ABR3
Pré-desgaste	Δm (g)	0,27	0,49	0,50
	ΔV (cm ³)	0,14	0,25	0,26
4º Ciclo	Δm (g)	1,04	1,45	1,51
	ΔV (cm ³)	0,53	0,74	0,77
8º Ciclo	Δm (g)	1,82	2,38	2,08
	ΔV (cm ³)	0,93	1,22	1,06
12º Ciclo	Δm (g)	2,34	2,97	2,58
	ΔV (cm ³)	1,19	1,53	1,32
16º Ciclo	Δm (g)	2,95	3,56	3,38
	ΔV (cm ³)	1,50	1,83	1,73

Apesar dos resultados obtidos no ensaio ($\Delta V_{ABR1}=1,50$ cm³/50 cm², $\Delta V_{ABR2}=1,83$ cm³/50 cm², $\Delta V_{ABR3}=1,73$ cm³/50 cm²) estarem abaixo do limite imposto pela norma de 30 cm³/50 cm², os provetes não atenderam as dimensões mínimas necessárias de $71 \pm 1,5$. Os três (ABR1, ABR2 e ABR3) apresentaram alturas iniciais inferiores a 69,5 mm, que seria a altura mínima permitida. Portanto, o ensaio deveria ser repetido com novos provetes que possuísem essas dimensões.

Ademais, é importante ressaltar que devido a intensa vibração, os provetes foram desgastados na lateral devido ao atrito com o equipamento, o que interfere de forma direta na massa final.

4.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA

Primeiramente verificou-se as dimensões de cada ladrilho, os valores são apresentados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10. Dimensões dos ladrilhos no ensaio de absorção.

Proвете	Comprimento médio (cm)	Largura média (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)
ABS1	20,1	20,1	2,3	403,9
ABS2	20,1	20,1	2,3	403,5
ABS3	20,1	20,1	2,3	404,1

As pesagens realizadas durante todo o ensaio de massa do provete seco, massa do provete seco selado, massa do provete após sucção de água por capilaridade após 24 h e massa do provete seco saturado são apresentadas no Quadro 4.11, bem como o cálculo do coeficiente de absorção capilar e a capacidade de absorção.

Quadro 4.11. Resultados do ensaio de absorção.

Provete	m_d (g)	$m_{d,s}$ (g)	$m_{h,24h}$ (g)	$m_{h,c}$ (g)	W_{24h} (g/cm ²)	$W_{m,a}$ (%massa)
ABS1	1767,5	1841,2	1960,3	1964,5	0,3	6,7
ABS2	1755,3	1817,5	1934,1	1938,5	0,3	6,7
ABS3	1757,0	1821,9	1941,1	1945,5	0,3	6,8

Como pode ser observado no Quadro 4.11 os 3 provetes possuem valor de absorção total de água inferior a 8% em massa e a absorção de água é inferior a 0,4 g/cm². Portanto satisfaz as condições impostas na norma NP EN 13748-1.

Quando a análise foi realizada pela norma NP EN 13748-2 verifica-se que existem 3 classes de resistência atmosférica. Para as classes 1 e 3 o desempenho referente à absorção de água por % de massa não é medido. Já para a classe 2, é necessário que o desempenho da absorção de água seja em média $\leq 6\%$, então, como todos os valores obtidos no ensaio são superiores a 6, pode-se afirmar que os mosaicos não atendem a classe 2 da referida norma.

5

CONCLUSÃO

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os recursos naturais disponíveis no mundo são finitos, inclusive já existem estimativas de até quando será possível realizar a extração de diversos deles. Portanto, a necessidade de encontrar materiais substitutos tem vindo a crescer de uma forma avassaladora nos últimos anos com o objetivo de amenizar o impacto ambiental. Uma das soluções é a substituição do material virgem por um material já usado, ou seja, praticar reciclagem. No entanto, a indústria no geral encontra dificuldade em substituir os materiais naturais por materiais reciclados, seja pelo custo, logística, mas sobretudo porque estes materiais em geral não possuem as propriedades mecânicas, físicas e/ou químicas ideais que proporcionem a troca.

O setor da construção civil é responsável por consumir uma enorme quantidade de recursos naturais, seja no fabrico de betão e argamassa, nos revestimentos, nos insumos elétricos e hidráulicos, entre outros. Por isso, também é considerado um setor com um considerável potencial para absorver materiais reciclados, mesmo que de forma parcial. Na construção são utilizados diversos tipos de argamassas, como as para assentamento de alvenarias, rebocos, para proteção mecânica de impermeabilizações e as de revestimento.

Como o resíduo industrial em estudo é oriundo do remanescente do corte e afinação de lentes oftálmicas durante o seu fabrico a partir de blocos de, sobretudo, CR-39, procurou-se uma aplicação do resíduo moído, LW, que pudesse proporcionar, além da reciclagem, uma valorização econômica. O resíduo LW possui propriedades únicas, como a transparência, o brilho e aspeto sem promover a reação álcali-sílica nem causar fermento de manuseio como o vidro. A fim de obter vantagem dessas propriedades optou-se por produzir um material cimentício de revestimento, em particular mosaicos hidráulicos. Este tipo de mosaico de baixo custo, longa duração e de fácil manutenção é, em geral, de produção simples e artesanal sendo possível o fabrico com diversas colorações e desenhos variados. Essa versatilidade faz com que além da utilização funcional do mosaico já conhecida, ele se torne um elemento decorativo. Portanto, os mosaicos hidráulicos consistirão numa ótima solução para a aplicação dos resíduos de lentes porque além de permitirem, de acordo com o tratamento final, o aproveitamento das propriedades óticas do LW, também proporcionarão um destino para o resíduo que atualmente é encaminhado, em maior parte, para aterro.

Uma das formas de reciclar LW será substituir parcialmente a areia natural em mosaicos hidráulicos, pelo que é fundamental satisfazer os requisitos das normas em vigor no que diz respeito propriedades

mecânicas, físicas e químicas para além de poder apresentar um aspeto final especial que poderá ser cobiçado em nichos de mercado exóticos.

Logo, esta tese de mestrado estudou a incorporação do LW numa argamassa cimentícia de revestimento, especificamente para mosaicos. No Quadro 5.1. apresentam-se os resultados da primeira iteração deste programa de investigação que consistiu em ensaiar provetes de diferentes composições, variando a relação água/cimento, a percentagem de LW em volume e o tipo de cimento.

Quadro 5.1. Síntese dos resultados dos estudos preliminares.

Teste	a/c	Areia (%)	LW (%)	Cimento	Flexão Média (MPa)
T0	0,5	100	0	CEM II/B-L 32,5R (BR)	6,7
T1	0,5	50	50	CEM II/B-L 32,5R (BR)	3,7
T2	0,5	80	20	CEM II/B-L 32,5R (BR)	4,5
T3	0,45	50	50	CEM II/B-L 32,5R (BR)	3,9
T4	0,45	80	20	CEM II/B-L 32,5R (BR)	5,1
T5	0,5	50	50	CEM I / 42,5R	4,1
T6	0,45	80	20	CEM I / 42,5R	5,9
T7	0,45	80	20	CEM I / 52,5R (BR)	6,3

A partir dos resultados obtidos nos testes preliminares, a argamassa a ser utilizada para produzir os ladrilhos hidráulicos foi definida, sendo esta a T7. Produziram-se mosaicos para os ensaios de resistência à rotura, abrasão e absorção de água. Ademais, foram verificados os aspetos relativos a aparência do produto acabado.

Apresenta-se assim no Quadro 5.2. a síntese dos resultados obtidos no decorrer do presente estudo relativo a mosaicos com a incorporação do LW na substituição parcial em volume da areia em 20% e ainda a conformidade ou não com as normas.

Quadro 5.2. Síntese do resultado dos ensaios.

Ensaio	Provete	Resultados			Verificação			
Resistência à rotura		Carga de Rotura (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	NP EN 13748-1		NP EN 13748-2	
					Carga Rot.	Resist.	Carga Rot.	Resist.
	R1	2,3	4,4	4,2	não OK	não OK	não OK	OK
	R2	2,1	4,0		não OK	não OK	não OK	OK
	R3	2,0	3,8		não OK	não OK	não OK	OK
	R4	2,2	4,4		não OK	não OK	não OK	OK
	R5	2,4	4,2	4,4	não OK	não OK	não OK	OK
	R6	2,6	4,8		não OK	não OK	não OK	OK
R7	2,5	4,3	não OK		não OK	não OK	OK	
Abrasão		ΔV (cm³)			NP EN 13748-1		NP EN 13748-2	
	ABR1	1,50			OK		OK	
	ABR2	1,83			OK		OK	
	ABR3	1,73			OK		OK	
Absorção		Coeficiente de absorção capilar (g/cm²)	Absorção absoluta de água (% massa)		NP EN 13748-1		NP EN 13748-2	
					Coef. de absorção capilar	Absorção absoluta de água	Coef. de absorção capilar	Absorção absoluta de água
	ABS1	0,3	6,7		OK	OK	OK	não OK
	ABS2	0,3	6,6		OK	OK	OK	não OK
	ABS3	0,3	6,8		OK	OK	OK	não OK

Ao analisar os resultados, pode-se perceber que os mosaicos atendem as especificidades das normas quanto à abrasão e parcialmente à absorção. Contudo, ainda não atende os requisitos quanto à resistência à rotura.

No entanto, por esta dissertação tratar-se da continuação da avaliação técnica da incorporação do LW em argamassas para ladrilhos hidráulicos apresentam-se no Quadro 5.3 os resultados do estudo anterior realizado pelo grupo de pesquisa com substituição de 50% da areia por LW em volume, ou seja, a composição do teste T1 especificado no Quadro 5.1.

Quadro 5.3. Síntese dos resultados com incorporação de 50% de LW.

Ensaio	Provete	Resultados			Verificação			
Resistência à rotura		Carga de Rotura (kN)	Resistência (MPa)	Resist. Média (MPa)	NP EN 13748-1		NP EN 13748-2	
					Carga Rot.	Resist.	Carga Rot.	Resist.
	MR1	0,8	3,0	3,1	não OK	não OK	não ok	OK
	MR2	0,8	3,2		não OK	não OK	não OK	OK
	MR3	0,8	3,1		não OK	não OK	não OK	OK
	MR4	0,9	3,1		não OK	não OK	não OK	OK
	ΔV (cm³)			NP EN 13748-1		NP EN 13748-2		
Abrasão	MABR1	35,48			não OK		não OK	
	MABR2	35,29			não OK		não OK	
	MABR3	33,52			não OK		não OK	
	MABR4	16,14			OK		OK	
	MABR5	-			-		-	
	MABR6	18,42			OK		OK	
Absorção		Coeficiente de absorção capilar (g/cm²)	Absorção absoluta de água (% massa)		NP EN 13748-1		NP EN 13748-2	
					Coef. de absorção capilar	Absorção absoluta de água	Coef. de absorção capilar	Absorção absoluta de água
	MABS1	0,3	10,3		OK	não OK	OK	não OK
	MABS2	0,3	10,2		OK	não OK	OK	não OK
	MABS3	0,3	10,2		OK	não OK	OK	não OK
	MABS4	0,3	9,5		OK	não OK	OK	não OK
	MABS5	0,2	9,5		OK	não OK	OK	não OK

Como se pode constatar, apesar dos resultados do presente estudo ainda não serem satisfatórios, apresentam um melhor desempenho que no primeiro trabalho realizado. Note-se que a principal causa de não se terem atingido os objetivos nesta segunda tentativa pode ter a ver com o facto de não existirem ainda disponíveis equipamentos dedicados para o fabrico de mosaicos.

Vale destacar que em relação às inconformidades no que diz respeito a resistência dos mosaicos embora se tenha previsto uma determinada resistência à flexão aquando dos estudos preliminares, calculada em provetes de argamassa compactada de acordo com a normalização em vigor para determinação da resistência do cimento (NP EN 196-1), na realidade o material resultante do processo de fabrico dos

mosaicos não terá sido suficientemente compactado levando a que a argamassa resultante fosse menos densa, mais porosa e portanto menos resistente. Esta hipótese pode ser confirmada ao comparar os valores de massa volúmica do provete $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ com a do mosaico apresentados no Quadro 5.4. Nota-se que o provete é 17% mais denso do que o mosaico.

Quadro 5.4. Comparação da massa volúmica do presente estudo.

Amostra	Massa (g)	Volume (cm^3)	Massa Volúmica (g/cm^3)
Provete T7 - $4 \times 4 \times 16$	574,03	256,00	2,24
Mosaico	1765,97	926,37	1,91

Com o objetivo de verificar se no estudo realizado anteriormente também ocorreu a diferença da massa volúmica entre o mosaico e o provete, buscou-se os dados e apresenta-se os resultados no Quadro 5.5.

Quadro 5.5. Comparação da massa volúmica do estudo anterior.

Amostra	Massa (g)	Volume (cm^3)	Massa Volúmica (g/cm^3)
Provete T1 - $4 \times 4 \times 16$	490,10	256,00	1,91
Mosaico M	1189,34	657,88	1,81

Neste caso, pode-se perceber que o provete é 6% mais denso que o mosaico. Apesar da diferença ser menor do que os 17% encontrados para a mistura com a combinação T7, também se comprova que a vibração não foi a mais adequada.

Ainda que se tenha constatado que a densidade do mosaico é demasiado baixa devido a compactação ineficiente, não parece viável aumentar muito o tempo de compactação uma vez que pode-se correr o risco de segregar o material, isto é, o material mais leve, LW, sobrenadar os outros constituintes da argamassa. Portanto parece fundamental tentar produzir os ladrilhos com o auxílio de uma prensa adaptada ou mesmo produzir mosaicos de dupla camada. Nestes, a camada principal seria uma argamassa convencional sem o material reciclado, e a camada de acabamento seria com a inserção do LW como substituo parcial da areia.

Por fim, ao se tratar de um estudo inovador, é preciso que a equipa de investigação permaneça investigando e aprofundando os conhecimentos sobre este resíduo em específico com o objetivo de encontrar melhores resultados em argamassas de revestimento e mesmo noutras aplicações. Torna-se, portanto, cada vez mais premente incentivar o desenvolvimento de novas pesquisas no segmento da incorporação de resíduos industriais em elementos da construção civil e, logo, servir como exemplo de sustentabilidade através da responsabilidade social e ambiental.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A presente investigação proporcionou uma oportunidade de aprofundar os conhecimentos sobre argamassas de revestimento, nomeadamente para ladrilhos hidráulicos, através da incorporação de resíduos de lentes oftálmicas. Entretanto, os resultados obtidos neste estudo não foram satisfatórios quando comparados com os requisitos das normas em vigor. Por tratar-se de uma combinação que ainda

não possui registros na literatura algumas sugestões de futuros estudos são apresentadas. Portanto, com base nas conclusões deste trabalho, listam-se os seguintes tópicos para trabalhos futuro.

- Estudar o modo de compactação, de preferência com uma prensa e moldes adequados, de modo a obter uma argamassa mais densa levando a valores da resistência e geometria conformes;
- Realizar um estudo específico e aprofundado sobre CR-39;
- Estudar a incorporação de adjuvantes que auxiliassem na trabalhabilidade das misturas;
- Reduzir a relação água cimento;
- Estudar a viabilidade de produzir mosaicos de dupla camada com LW somente na camada superficial;
- Avaliar o impacto económico da viabilidade da incorporação de LW em argamassas;
- Avaliar o impacto ambiental que a incorporação do LW em argamassas pode proporcionar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] International Environmental Technology Centre, "What is waste to energy?" <https://www.unep.org/ietc/>.
- [2] M. Braungart and W. McDonough, *Cradle to cradle*. Random House, 2009.
- [3] D. da República, "1.ª série — N.º 116 — 17 de Junho de 2011." 2011.
- [4] A. Murray, K. Skene, and K. Haynes, "The Circular Economy : An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context," *J. Bus. Ethics*, 2015, doi: 10.1007/s10551-015-2693-2.
- [5] Ministério do Ambiente da República Portuguesa, "Liderar a Transição - Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal: 2017-2020." p. 62, 2020.
- [6] J. Korhonen, A. Honkasalo, and J. Seppälä, "Circular Economy: The Concept and its Limitations," *Ecol. Econ.*, vol. 143, pp. 37–46, 2018, doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041.
- [7] A. Mangialardo and E. Micelli, *Rethinking the construction industry under the circular economy: Principles and case studies*, no. 9783319757735. Springer International Publishing, 2018.
- [8] M. H. A. Nasir, A. Genovese, A. A. Acquaye, S. C. L. Koh, and F. Yamoah, "Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry," *Intern. J. Prod. Econ.*, 2016, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.06.008.
- [9] A. Ashby, A. M. Callegaro, K. Adeyeye, and M. Granados, "The Spiral Economy : A Socially Progressive Circular Economy Model ?," in *Sustainable Development Goals and Sustainable Supply Chains in the Post-global Economy*, 1st ed., 2019, p. 240.
- [10] Mosaicos Amazonas, "Origem do nome ladrilho hidráulico," 2021. <https://www.mosaicosamazonas.com.br/dica/origem-do-nome-ladrilho-hidraulico> (accessed Sep. 10, 2021).
- [11] Tetracon, "Ladrilhos hidráulicos: da origem aos dias de hoje," 2017. <https://tetraconind.com.br/blog/ladrilhos-hidraulicos-da-origem-aos-dias-de-hoje/> (accessed Sep. 10, 2021).
- [12] F. Medeiros, T. Cappi, and M. Palhais, "Ladrilhos hidráulicos: nasce um clássico," Mar. 2003. <https://revistacasaedjardim.globo.com/Casaedjardim/0,25928,EJE502580-2186-1,00.html> (accessed Sep. 07, 2021).
- [13] T. Catoia, "Ladrilhos e revestimentos hidráulicos de alto desempenho," Universidade de São Paulo, 2007.
- [14] Mosaicos Amazonas, "3 razões para utilizar ladrilho hidráulico em seu negócio," 2021. <https://www.mosaicosamazonas.com.br/dica/3-razoes-para-usar-ladrilho-hidraulico-em-seu-negocio> (accessed Sep. 10, 2021).
- [15] A. Savazzini-Reis and A. F. Fagundes, "Incorporação de resíduo de madeira em ladrilho hidráulico vibrado," pp. 1–6, 2020.
- [16] "NP EN 13748-1 Ladrilho hidráulico - Parte 1: Ladrilho hidráulico para utilização em interiores," 2010.
- [17] "NP EN 13748-2 Mosaico hidráulico - Parte 2: Mosaico hidráulico para utilização em exteriores." 2013.
- [18] P. T. Williams, *Waste treatment and disposal*, 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [19] PlasticsEurope, "What are plastics?" <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics>.

- [20] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made," *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 7, pp. 19–24, 2017.
- [21] M. A. da S. Spinacé and M. A. De Paoli, "A tecnologia da reciclagem de polímeros," vol. 28, no. 1, pp. 65–72, 2005.
- [22] E. Van Sebille, A. Gilbert, and C. Spathi, "The ocean plastic pollution challenge: towards solutions in the UK," *Grantham Institute*, vol. 19, no. 19, pp. 3–4, 2016, [Online]. Available: www.imperial.ac.uk/grantham/publications.
- [23] I. A. Ignatyev, W. Thielemans, and B. Vander Beke, "Recycling of Polymers : A Review," *ChemSusChem*, no. May, 2014, doi: 10.1002/cssc.201300898.
- [24] A. M. Matos, "Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos," Universidade do Porto, 2010.
- [25] P. Panyakapo and M. Panyakapo, "Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete," *Waste Manag.*, vol. 28, pp. 1581–1588, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.08.006.
- [26] E. A. Ohemeng and S. O. Ekelu, "Strength prediction model for cement mortar made with waste LDPE plastic as fine aggregate," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 8, no. 4, pp. 228–243, 2019, doi: 10.1080/21650373.2019.1625826.
- [27] R. Wang and C. Meyer, "Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 9, pp. 975–981, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.06.014.
- [28] N. Kummoonin, M. Jaimasith, and W. Thiemsorn, "Fabrication of ceramic floor tiles from industrial wastes," *Suranaree J. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 65–77, 2014.
- [29] V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 289–294, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.12.006.
- [30] LNEC, "E 471 Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos," vol. 9, p. 8, 2009.
- [31] A. M. Matos and J. Sousa-Coutinho, "Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 205–215, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027.
- [32] A. M. F. Ribeiro, "Ecologia industrial em betão - resíduo industrial para mosaico hidráulico," Universidade do Porto, 2020.
- [33] Opticanet, "A história e evolução das lentes oftálmicas no mundo," 2011. <https://opticanet.com.br/secaodesktop/oculosecultura/5764/a-historia-e-evolucao-das-lentes-oftalmicas-no-mundo> (accessed Mar. 04, 2021).
- [34] Zeiss, "A história das lentes," 2017. <https://www.zeiss.pt/vision-care/melhor-visao/compreender-a-visao/a-historia-das-lentes.html> (accessed Mar. 04, 2021).
- [35] A. K. Bhootra, *Ophthalmic Lenses*, 1^a. New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers, 2009.
- [36] A. M. Elmadina, M. A. A. Elawad, and M. Dirar, "Patients' satisfaction of using plastic CR-39 lenses," *J. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 2012, pp. 25–37, 2013.
- [37] C. I. do C. Ruivinho, "Valorização dos resíduos de lentes oftálmicas orgânicas," Universidade do Algarve, 2010.
- [38] "NP EN 196-1 Método de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas." 2017.
- [39] "NP EN 932-1 - Ensaio das propriedades gerais dos agregados - Parte 1: Métodos de amostragem," 2002.

- [40] “EN 1015-3 Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).” pp. 2006–2008, 1999.