



Thianne Lopes Peixoto

Utilização de conchas de ostras e pó de forno de cal na composição de argamassas ecoeficientes

Universidade do Minho
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Civil





Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Civil

Thianne Lopes Peixoto

**Utilização de conchas de ostras e pó
de forno de cal na composição
de argamassas ecoeficientes**

Dissertação de Mestrado

Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação da:

Doutora Rute Maria Gonçalves Eires

Doutora Raphaele Lira Meireles Castro Malheiro

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicado.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositórioUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado saúde e disposição para viver essa experiência em outro país.

Agradeço humildemente a quem contribuiu de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho, o qual não seria possível sem o vosso apoio.

À minha família por me ter proporcionado minha formação académica, incentivo e apoio incondicional nas minhas decisões, necessários para levar até ao fim esta etapa da minha vida.

Ao meu namorado por todo o carinho, paciência, suporte e pelo tempo despendido na revisão deste trabalho.

Aos amigos e colegas do Brasil e de Portugal por todo apoio durante este período.

Ao lfbaiano, em especial meus chefes Isnaia Aragão e Leonardo Lapa, pelo apoio e ao Reitor Aécio Duarte, pela autorização para participar do programa de estudos no exterior.

As minhas orientadoras, Professora Doutora Rute Eires e Professora Doutora Raphaele Malheiro, pela disponibilidade e esclarecimento de todas as minhas dúvidas e principalmente pela partilha de todo entusiasmo pela temática.

Ao Eng. Carlos Jesus e ao colega André Lemos, que contribuíram consideravelmente na campanha experimental, pelos auxílios prestados em laboratório.

As empresas Aquagoma e Paper Mill pelas informações prestadas e fornecimento dos resíduos.

Obrigada à Universidade do Minho, ao Centro de Valorização de Resíduos (CVR), ao Laboratório da Escola de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC) e aos colaboradores, de modo geral, pelo contributo.

RESUMO

A utilização de resíduos para produção de argamassas tem sido cada vez maior, com ganhos também ao nível da promoção da economia circular. Com foco nas argamassas de cal e com objetivo da substituição parcial deste ligante, optou-se por estudar dois tipos de resíduos produzidos em abundância na região Norte de Portugal e, ainda, sem destinação final adequada: conchas de ostras e pó de forno de cal (poeiras). Estes resíduos, ainda pouco explorados, são compostos principalmente por carbonato de cálcio, o que fundamenta o seu potencial para substituição da cal na produção de argamassas ecoeficientes.

As conchas foram transformadas em pó sendo assim utilizada durante toda pesquisa. O trabalho foi desenvolvido em duas partes principais. Uma primeira, exploratória, com objetivo de conhecer melhor o comportamento das argamassas com a incorporação destes resíduos. Testou-se a adição do ácido acético (vinagre) como agente de dissolução de cálcio das conchas, o qual foi adicionado na fase líquida da mistura como promotor de melhorias na performance das argamassas. Na segunda parte, o trabalho esteve focado no estudo no desempenho mecânico e de durabilidade das argamassas com composições promissoras, definidas na parte anterior. Estas composições incluíram a utilização de vinagre na fase líquida e a substituição parcial da cal por 25, 50 e 90% de poeiras ou conchas.

Todas as amassaduras obtiveram resistência à compressão acima de $0,4 \text{ N/mm}^2$ aos 28 dias, o que afirma o potencial de substituição da cal em argamassas dessa natureza. A substituição de 50% do ligante por poeiras de cal mostrou-se a melhor opção em termos de resistência. As argamassas com substituição por conchas também demonstraram bom desempenho. A calcinação das conchas não resultou em melhoria das propriedades das argamassas e o emprego do vinagre na fase líquida da mistura melhorou significativamente o desempenho das argamassas, especialmente com as poeiras. No que se refere à durabilidade, as argamassas apresentaram valores elevados de absorção de água após os ensaios realizados aos 28 dias. Entretanto, tanto a utilização das poeiras quanto a utilização das conchas proporcionaram uma redução nos valores de absorção de água, quando comparados aos valores de referência. Os resultados demonstram um elevado potencial de viabilidade de utilização das poeiras e das conchas na produção de argamassas sustentáveis. Este trabalho representa um passo importante na valorização dos resíduos estudados. Desta forma, o trabalho contribui para a sustentabilidade da indústria da construção, através da valorização da economia azul e da promoção da economia circular.

Palavras-chave: Argamassa ecoeficiente, economia circular, economia azul, conchas de ostras, pó de forno de cal.

ABSTRACT

The use of waste for the production of mortars has been increasing, with gains also in terms of promoting the circular economy. Focusing on lime mortars and with the aim of partially replacing this binder, it was decided to study two types of waste produced in abundance in the North of Portugal and with an inadequate final disposal: oyster shells and lime kiln dust. These residues, still less explored, are calcium carbonate composed mainly, which underlies their potential to replace lime in the eco-efficient mortars production.

The shells were turned into powder and thus used throughout the research. This work was developed in two main parts. The first one is an investigatory study, with the aim of a better understanding the behavior of mortars incorporating these residues. In this part, the addition of vinegar was tested as an agent for dissolving calcium from the shells, which was added to the liquid phase of the mixture to promote improvements in the performance of the mortars. In the second part, the work was focused on studying the mechanical and durability mortars performance with promising compositions, defined in the previous part. These compositions included the use of vinegar in the liquid phase and the partial replacement of lime with 25, 50 and 90% of dust or shells.

All the mixes considered had compressive strength above 0.4 N/mm^2 after 28 days, which confirms the potential for replacing lime in mortars of this nature. Replacing 50% of the binder with dust, proved to be the best option in terms of resistance. Mortars replaced by shells also demonstrated a good performance. Calcination of the shells did not result in an improvement in the properties of the mortars and the use of vinegar in the liquid phase of the mixture significantly improved the performance of the mortars, especially with the dust. Regarding durability, all mortars showed high water absorption values after tests carried out after 28 days. However, both the use of dust and the use of shells provided a reduction in water absorption values, when compared to reference values. The results demonstrates a high potential viability of using dust and shells in the production of sustainable mortars. This work represents an important step in the valorization of the waste studied. In this way, this work contributes to the improvement of the construction industry sustainability, through the valorization of the blue economy and circular economy fomentation.

Keywords: Eco-efficient mortar, circular economy, blue economy, oyster shells, lime kiln dust.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Quadros.....	xi
Lista de Tabelas.....	xii
Lista de Símbolos.....	xiii
1. Introdução.....	15
1.1 Contextualização.....	17
1.2 Motivação.....	17
1.3 Objetivos.....	20
1.4 Metodologia Geral.....	20
1.5 Organização da Dissertação.....	21
2. Estado da Arte.....	22
2.1 Argamassas.....	22
2.1.1. Características Gerais.....	22
2.1.2. Argamassas de Cal e sua ecoeficiência.....	24
2.2. Conchas de Ostras	25
2.2.1. Características Gerais.....	25
2.2.2. Produção, Descarte e Reciclagem.....	28
2.2.3. Composição Físico-Química.....	29
2.2.4. Estudos e Aplicações.....	31
2.3. Pó de Forno de Cal.....	36
2.3.1. Características Gerais.....	36
2.3.2. Produção, Descarte e Reciclagem.....	37
2.3.3. Composição Físico-Química.....	39
2.3.4. Estudos e Aplicações.....	40
3. Metodologia.....	42
3.1 Materiais Utilizados.....	42
3.1.1. Conchas de Ostras.....	42
3.1.2. Pó de Forno de Cal.....	45
3.1.3. Cal.....	47
3.1.3.1. Cal Viva.....	47
3.1.3.2. Cal Hidratada.....	48
3.1.4. Vinagre.....	49
3.1.5. Água.....	50
3.1.6. Areia.....	51
3.2 Estudo das composições.....	52
3.2.1. Campanha exploratória.....	52
3.2.2. Composições estudadas.....	57
3.2.3. Preparação das misturas.....	58
3.3 Ensaio Realizados.....	61
3.3.1. Massa Volúmica.....	61

3.3.2. Análise Granulométrica.....	62
3.3.3. Termogravimetria (TGA).....	63
3.3.4. Fluorescência de Raios X (FRX).....	64
3.3.5. Espalhamento.....	65
3.3.6. Moldagem e Cura.....	66
3.3.7. Densidade aparente.....	66
3.3.8. Resistência à Flexão.....	67
3.3.9. Resistência à Compressão.....	68
3.3.10. Absorção de Água por Capilaridade.....	68
3.3.11. Absorção de Água por Imersão.....	69
3.3.12. Carbonatação Acelerada.....	70
4. Apresentação e Análise dos Resultados.....	72
4.1 Propriedades Químicas e Físicas dos Materiais.....	72
4.1.1. Massa Volúmica.....	72
4.1.2. Análise Granulométrica.....	72
4.1.3. Termogravimetria (TGA).....	73
4.1.4. Fluorescência de Raios X (FRX).....	74
4.2 Caracterização no Estado Fresco.....	74
4.3 Caracterização no Estado Endurecido.....	78
4.4 Comportamento Mecânico.....	78
4.4.1. Densidade aparente.....	78
4.4.2. Resistência à Flexão.....	79
4.4.3. Resistência à Compressão.....	83
4.5 Durabilidade.....	86
4.5.1. Absorção de Água por Capilaridade.....	86
4.5.2. Absorção de Água por Imersão.....	89
4.5.3. Carbonatação Acelerada.....	90
5. Conclusão.....	93
5.1 Principais Considerações.....	93
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	94
Referências.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia de trabalho.....	20
Figura 2 - Anatomia da Ostra, NAISSAIN (2023).....	25
Figura 3 - (a) ostra-japonesa e (b) ostra-portuguesa.....	26
Figura 4 – Características das ostras especiais, adaptado de (PUBLICO.PT, 2021).....	27
Figura 5 – Produção de ostra-japonesa em Portugal , adaptado de (AQUACULTORES, 2023).....	28
Figura 6 – Acumulação de conchas em Ínsua, CABRAL (2012).....	32
Figura 7 – Igreja de Nossa Senhora da Conceição das Barreiras, MOTA <i>et al.</i> (2023).....	33
Figura 8 - Esquema do processo Kraft, adaptado de (QUIMICA, 2020).....	36
Figura 9 - Ciclo do processo Kraft (VIEIRA, 2013).....	36
Figura 10 – Ciclo do processo de caustificação, ALVES (2015).....	37
Figura 11 – Forno de cal, adaptado de (OLIVEIRA, 2013).....	38
Figura 12 – Esquema de obtenção das poeiras de cal, adaptado de (OLIVEIRA, 2013).....	38
Figura 13 – Estuário do Lima (ELM), adaptado de (IPMA, 2024).....	43
Figura 14 – Processo de captura dos bivalves:(a) Viveiro do Estuário de Lima;(b) Grua do batelão;(c) Potes..	43
Figura 15 – (a) <i>Crassostrea Angulata</i> ; (b) <i>Crassostrea gigas</i> (SPEND IN, 2018).....	44
Figura 16 – Equipamento Los Angeles.....	45
Figura 17 – (a) Forno Mufla, (b) Conchas a serem calcinadas.....	45
Figura 18 – Resumo do processo na fábrica: (a) Forno de cal; (b) Recolha das poeiras; (c) Big Bags.....	46
Figura 19 – Características físico-químicas da Areia (PARAPEDRA, 2021).....	51
Figura 20 – Resumo da 1ª Etapa da campanha exploratória	52
Figura 21 – Provetes de referência desintegrados após desmoldagem.....	52
Figura 22 – Provetes com percentuais de poeiras após desmoldagem.....	53
Figura 23 – Resumo da 2ª Etapa da campanha exploratória	53
Figura 24 – Provetes desintegrados após 28 dias de cura.....	53
Figura 25 – Resumo da 3ª Etapa da campanha exploratória	54
Figura 26 – Resumo da 4ª Etapa da campanha exploratória	56
Figura 27 – Materiais separados e pesados.....	59
Figura 28 – Fases das amassaduras.....	59
Figura 29 – Resumo do ensaio de massa volúmica: (a) V ₁ ; (b) Materiais no Châtelier; (c) V ₂	62
Figura 30 – Equipamento Masterziser 3000 - Hydro LV.....	63
Figura 31 – Equipamento STA 449 F3 Júpiter.....	64

Figura 32 – Equipamento para ensaio de FRX (AFINKO, 2014).....	64
Figura 33 – (a) Mesa de Consistência, (b) Mistura após moldar no cone, (c) Medição após vibração.....	65
Figura 34 – Cálculo para diâmetro de espalhamento, adaptado de (MONTEIRO, 2022).....	65
Figura 35 – (a) Mesa de Vibração, (b) Misturas nos moldes.....	66
Figura 36 – Ensaio de Resistência à Flexão.....	67
Figura 37 – Ensaio de Resistência à Compressão.....	68
Figura 38 – Ensaio de Capilaridade.....	69
Figura 39 – Ensaio de Imersão.....	70
Figura 40 – Ensaio de Carbonatação Acelerada.....	71
Figura 41 – ATG da Conchas em pó.....	73
Figura 42 – ATG da Conchas em pedaços.....	73
Figura 43 – ATG das Poeiras de cal.....	73
Figura 44 – Espalhamento em relação a razão Lq/L na (1ª + 2ª fase).....	76
Figura 45 – Espalhamento de (a)P25% e (b)P90%.....	77
Figura 46 – Espalhamento de (a)C25% e (b)C90%.....	77
Figura 47 – Espalhamento de (a)C25%_Q e (b)C90%_Q.....	77
Figura 48 – Resultado do ensaio de Flexão	80
Figura 49 – Relação entre argamassas de Referência e Poeiras (ensaio de Flexão).....	81
Figura 50 – Relação entre argamassas de Referência e Conchas (ensaio de Flexão).....	82
Figura 51 – Relação entre argamassas de Referência e Conchas calcinadas (ensaio de Flexão).....	82
Figura 52 – Resultado do ensaio de Compressão.....	84
Figura 53 – Relação entre argamassas de Referência e Poeiras (ensaio de Compressão).....	85
Figura 54 – Relação entre argamassas de Referência e Conchas (ensaio de Compressão).....	85
Figura 55 – Relação entre argamassas de Referência e Conchas calcinadas (ensaio de Compressão).....	86
Figura 56 – Resultado da absorção de água ao longo do tempo.....	88
Figura 57 – Resultado do coeficiente de absorção de água por capilaridade ensaiados aos 28 dias.....	88
Figura 58 – Resultado do percentual de absorção de água ensaiados aos 28 dias.....	90
Figura 59 – Resultado da carbonatação dos provetes com apenas 1 ligante.....	91
Figura 60 – Resultado da carbonatação dos provetes de poeiras.....	92
Figura 61 – Resultado da carbonatação dos provetes de conchas.....	92
Figura 62 – Resultado da carbonatação dos provetes de conchas calcinadas.....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de Argamassas (EN 998-1:2003 e EN 998-2:2003).....	23
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das propriedades das argamassas de reboco em estado endurecido.....	23
Tabela 2 – Composição química das conchas de ostras identificadas em diferentes trabalhos	30
Tabela 3 – Características biométricas e peso médios individual das ostras.....	31
Tabela 4 – Compilação dos estudos sobre utilização de conchas na composição de argamassas.....	35
Tabela 5 – Composição química do pó de forno de cal identificada em diferentes trabalhos.....	39
Tabela 6 – Compilação dos estudos sobre utilização de lama e poeiras de cal nas argamassas.....	41
Tabela 7 – Características físico-químicas da Concha de Ostra em Pó.....	45
Tabela 8– Características físico-químicas do Pó de Forno de Cal.....	47
Tabela 9 – Características físico-químicas da cal viva. Fonte: Lacrilar (2023).....	48
Tabela 10 – Características físico-químicas da cal hidratada. Fonte: Calcidrata (2022).....	49
Tabela 11 – Características físico-químicas do Ácido Acético em Vinagre (ECHA, 2006).....	50
Tabela 12 – Composições estudadas.....	57
Tabela 13 – Composições estudadas com o quantitativo dos materiais em Kg/m ³	58
Tabela 14 – Composição das amassaduras e relação líquido/ligante.....	60
Tabela 15 – Determinação da massa volúmica.....	72
Tabela 16 – Determinação da granulometria.....	72
Tabela 17 – Resultado do ensaio de fluorescência por Raio X.....	74
Tabela 18 – Espalhamento das amassaduras em relação a razão Lq/L.....	75
Tabela 19 – Determinação da densidade aparente.....	78
Tabela 20 – Resultado do ensaio de Flexão aos 28 e 60 dias.....	79
Tabela 21 – Resultado do ensaio de Compressão aos 28 e 60 dias.....	83
Tabela 22 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade (28 dias) e relação a razão Lq/L.....	87
Tabela 23 – Percentagem de absorção em relação a razão Lq/L.....	89

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Água

AR - Areia

CalV – Cal Viva

CalH – Cal Hidratada

C – Conchas em Pó

CQ – Conchas em Pó Calcinadas

P – Poeiras de Cal

PQ – Poeiras de Cal Calcinadas

Vin – Ácido Acético em Vinagre

Vpc – Vinagre processado com conchas

V – 50% Vpc + 50% Água

CaCO₃– Carbonato de cálcio

CaO – Óxido de cálcio

CO₂ – Dióxido de carbono

SiO₂– Dióxido de silício

K₂O– Óxido de potássio

SrO– Óxido de estrôncio

Fe₂O₃– Óxido de ferro

SO₃– Óxido sulfúrico

MgO – Óxido de magnésio

Al₂O₃– Óxido de alumínio

Na₂O– Óxido de sódio

P₂O₅– Pentóxido de fósforo

Ca(OH)₂– Hidróxido de cálcio

CH₃COOH – Ácido acético

Ca(C₂H₃O₂)₂ – Acetato de Cálcio

CH₂– Metileno

CH₃– Metil

OH – Hidroxila

PVC – Policloreto de vinila

pH – Potencial de hidrogênio

PET – Politereftalato de etila

LA – Los Angeles

Lq/L - Líquido/Ligante

FRX – Fluorescência de Raios X

ECHA - Agência Europeia das Substâncias Químicas

REACH - Registro, Avaliação, Autorização e Restrição de Substâncias Químicas

INE – Instituto Nacional de Estatísticas

EU – European Union

UE – União Europeia

EN – Norma Europeia

NP – Norma Portuguesa

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera

GEE - Gases de Efeito Estufa

1. Introdução

Um dos materiais mais consumidos em uma construção, seja nova ou reabilitação, é a argamassa. A sua produção requer a extração de recursos naturais e a utilização do cimento nas argamassas de uso corrente está relacionada a um consumo significativo de energia elétrica e elevada emissão de dióxido de carbono (CO₂).

Considerando que o setor da construção civil é responsável por grande parte dos recursos naturais extraídos e é o maior consumidor de matéria-prima em comparação a qualquer outra actividade económica (MONTEIRO, 2022), considerando, também, o seu impacto do que se refere ao consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa (GEE), faz-se necessário produzir bens com menor impacto ambiental, promovendo a preservação do meio ambiente.

Buscando alternativas sustentáveis, um dos pilares para o desenvolvimento de argamassas ecoeficientes está relacionado com a economia circular. A utilização de resíduos, sendo um destino final sustentável para os mesmos, promove a diminuição da exploração e do transporte de recursos naturais, minimiza a emissão de GEE, buscando eficiência e, também, redução de custos.

Dentro do amplo conceito da sustentabilidade, que envolve aspetos económicos, sociais e ambientais, os materiais ecoeficientes demonstram ter a capacidade de responder a estes desafios. São, em sua maioria, caracterizados pelas baixas emissões de carbono, durabilidade, baixo consumo energético, não-tóxicos, recicláveis ou obtidos a partir de fontes renováveis. Além disso, podem substituir outros materiais ou produtos pouco ecológicos, sendo, também, passíveis de potencializar o desenvolvimento de economias locais. Neste sentido, optou-se por trabalhar com dois resíduos abundantes na região Norte de Portugal: conchas de ostras e pó de forno de cal.

No intuito de dar uma destinação ambientalmente favorável aos materiais residuais que são encaminhados para aterro sanitários ou depositados em locais inapropriados, as conchas de ostras têm sido estudadas e incorporadas como matéria-prima em diversos setores da indústria. São gerados cerca de 5 milhões de toneladas desse resíduo anualmente no mundo (PESSOA *et al.*, 2019) e em Portugal, as ostras representaram aproximadamente 25% da produção total de moluscos, cerca de 2.465 toneladas em 2022 de acordo com o relatório da Estatísticas da Pesca de 2023 (INE, 2024). Segundo Cho (2018), existe a necessidade de diminuir pela metade o impacto ambiental gerado pela concha de ostra.

O descarte inadequado das conchas provoca inúmeros problemas. As conchas que se acumulam no fundo do mar podem reduzir a profundidade das baías, causando obstrução na circulação da água e prejudicando a aquicultura em si. Este sistema de produção requer um ambiente não contaminado para garantir a qualidade

do produto. Além disso, no caso de conchas descartadas em terrenos baldios, a presença de matéria orgânica pode atrair vetores de doenças, como ratos, baratas e moscas, além de causar mau cheiro. Existe também uma elevada taxa de mortalidade na produção das ostras devido a diversos fatores, do resultado da atividade podem ocorrer mortalidades que variam de 40% a 60%, dependendo do local onde são produzidas (PESSOA, 2019). Portanto, os estudos sobre a reutilização das conchas de ostras são de grande importância para a sociedade, pois eles podem oferecer soluções ambientais para essas demandas, além de promoverem a Economia Azul. As conchas são compostas principalmente por carbonato de cálcio (CaCO_3), o que potencia seu uso como substituto da cal, principal componente das argamassas tradicionais..

Dentre os vários resíduos e/ou subprodutos industriais que precisam de uma destinação final adequada e ambientalmente sustentada, pode-se destacar também o pó de forno de cal (poeiras de cal), proveniente das indústrias de papel. A produção de papel é um dos sectores de actividade com maior exposição às questões relativas ao meio ambiente. Em primeiro lugar por estar dependente da gestão sustentável de um recurso natural renovável, a floresta, que detém um papel importante na fixação de carbono, mas também do papel, que no final do seu ciclo de vida, pode ser suscetível de ser valorizado através da reciclagem ou recuperação de energia. Em segundo lugar, pelos impactes negativos específicos do processo industrial de produção e papel (MODOLO, 2006).

O reaproveitamento de subprodutos é fundamental para preservação do meio ambiente, não apenas por reduzir o risco de contaminação, mas também por diminuir o custo e o consumo de energia na produção de materiais da construção civil.

Visando a circularidade da economia, a valorização dos resíduos e o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis, este trabalho tem como base o desenvolvimento de argamassa ecoeficiente através do reaproveitamento e reciclagem desses dois materiais, conchas de ostras e poeiras de cal. Para tal, foram utilizadas como base metodologias apresentadas em projetos anteriores e com o intuito de investigar sobre a viabilidade do desenvolvimento de uma argamassa ecoeficiente, buscando aproveitar o carbonato de cálcio presente nestes materiais.

1.1. Contextualização

As argamassas têm sido utilizadas na construção civil há milhares de anos como material de assentamento e revestimento. As primeiras referências foram encontradas em algumas zonas da actual Turquia que remontam a um período entre 12.000 e 5.000 A.C. (COELHO *et al.*, 2009). A utilização da cal na construção em Portugal começou aproximadamente no século VIII, durante o período de ocupação moura no sul do país. Nessa época, a cal era principalmente empregada para caiação das paredes, que eram pintadas de branco ou de outras cores com a adição de pigmentos, além de ser utilizada na elaboração de algumas argamassas (MENDES, 2017).

Ao longo dos séculos as técnicas evoluíram, desde a cozedura em fornos rudimentares até o fabrico industrial, assim como, a introdução de diversos materiais. Os componentes dessas argamassas antigas incluíam a cal viva, o gesso, as pozolanas, a cal hidráulica, posteriormente, os ligantes hidráulicos, e finalmente a introdução do cimento Portland.

Até o século XX, a cal misturada com pozolanas ou gesso era o ligante mais comum na construção civil. No entanto, com a descoberta do cimento Portland, a utilização da cal começou a diminuir. Isso aconteceu, porque o novo ligante endurece mais rapidamente e é mais resistente, o que permite a conclusão das obras em menos tempo, e com um desempenho mecânico muito superior ao das argamassas à base de cal. Apesar de amplamente utilizado, o cimento Portland tem se mostrado inadequado para muitas aplicações, gerando diversos problemas, especialmente na reabilitação de edifícios. Devido o surgimento de patologias por conta da incompatibilidade química com argamassas à base de cal, à introdução de sais solúveis, à baixa permeabilidade e ao elevado módulo de elasticidade, que não consegue lidar com as deformações das alvenarias (COELHO *et al.*, 2009). Assim, as argamassas à base de cal retomaram seu lugar de destaque nesse contexto, sendo importante compreender e promover o seu uso, mas agora de forma sustentável.

1.2. Motivação

A busca por inovação tecnológica na construção civil é fundamental para um mundo sustentável, e merece atenção especial à busca por novos materiais. Este trabalho visa promover a sustentabilidade e a economia circular, através da aplicação de matérias-primas alternativas em substituição parcial da cal, assim como, a redução de emissões CO₂ e do consumo de energia na sua produção.

A cal é um produto obtido através da calcinação de calcários e essencialmente composto por óxido de cálcio (CaO). Assim como o cimento, é empregue em larga escala na construção civil. A produção mundial de cal equivale a aproximadamente 283 milhões de toneladas por ano (ARULRAJAH *et al.*, 2017), porém no seu

processo de fabricação, o consumo de energia é intensivo na etapa de calcinação que é uma grande desvantagem ambiental. A calcinação visa descarbonatar (remover o CO₂ combinado com os óxidos de cálcio ou magnésio) o calcário para a produção de cal virgem. Este processo ocorre em fornos a temperaturas entre 900°C e 1200°C (SCHORCHT *et al.*, 2013), temperaturas muito elevadas, mas, ainda assim, inferiores aquela utilizada na produção do cimento, entre 1230°C e 1450°C (LIMA, 2011).

Diante destes indicativos, é urgente a necessidade de diminuir o consumo dos ligantes convencionais, por meio da adoção de novas tecnologias, reduzir as emissões de CO₂ e fabricar produtos energeticamente mais eficientes para atender às demandas do mercado. Uma das estratégias poderá consistir no emprego de resíduos industriais e de produtos naturais como substitutos dessas matérias-primas.

Um estudo realizado por Iribarren *et al.* (2010) sobre avaliação do ciclo de vida (ACV) das conchas de mexilhões, revelou que na calcinação a 550°C de 100 toneladas de conchas representam 77,5 toneladas de CO₂ equivalentes, o que é bastante superior do que um cenário de fim de vida em aterro, quantificado em 49,6 toneladas de CO₂ equivalentes, por 100 toneladas de conchas de mexilhão. Apesar da opção de deposição em aterro ter tido um impacto mais favorável, essa alternativa é completamente desencorajada, pois representa uma alternativa bastante desfavorável se considerarmos a sustentabilidade e valorização dos resíduos. Comparativamente com o processo de fabricação da cal, durante a calcinação com temperaturas acima de 1000 °C, para produzir 100 toneladas de óxido de cálcio (CaO) gera-se cerca de 120 toneladas de CO₂ equivalentes (LAVEGLIA *et al.*, 2022).

No que se refere à indústria do papel, com a forte tendência na redução da utilização de embalagens plásticas e outros materiais agressivos ao meio ambiente, a produção de embalagens ecológicas e biodegradáveis tem favorecido o crescimento deste setor, impulsionado pela adoção de papel kraft sack, como alternativa mais sustentável. Segundo o Bureau of International Recycling (BIR, 2022), foram produzidos em 2022, cerca de 240 milhões de toneladas de papel e papelão, sendo que 52% desse produto é proveniente de fontes recuperadas. De acordo com o relatório da Mordor Intelligence (2023), estima-se que o mercado papel kraft sack cresça de 11,63 bilhões de dólares em 2023 para 14,03 bilhões de dólares em 2028, à uma taxa de crescimento anual de 3,82% durante esse período de cinco anos em todo mundo, nas indústrias de embalagens e através de melhorias nas aplicações das embalagens.

Em busca da redução dos impactos ambientais provenientes da acumulação de grandes quantidades de conchas de ostras e do aumento na produção de pó de forno de cal gerado pela indústria de papel, é de suma importância promover a destinação correta destes materiais, a fim de fechar o ciclo de vida deles. Ao transformar estes resíduos em um produto que agrega valor e ao reintroduzi-lo na cadeia produtiva ou

ambiental, promove-se o uso sustentável dos recursos naturais e contribui para alcançar alguns dos principais Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (2016), tais como:

- Objetivo 11: Cidades e comunidades sustentáveis, que tem como uma das metas, reduzir o impacto ambiental adverso das cidades, prestando atenção especial à qualidade do ar e à gestão de resíduos.
- Objetivo 12: Produção e consumos sustentáveis, que tem como uma das metas, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização.
- Objetivo 14: Proteger a vida marinha, que tem como uma das metas, prevenir e diminuir a poluição marinha de todos os tipos, em particular de atividades terrestres.

Nos últimos anos, o termo Economia Azul surgiu como um conceito relacionado com a utilização sustentável dos recursos marinhos. A limitação das terras agrícolas está a forçar um olhar para além da economia verde e ampliar os horizontes para os mares e oceanos como potenciais repositórios de recursos. Portanto, a pesca e a aquicultura mundiais sofreram uma expansão notável e prevê-se que atinjam mais de 200 milhões de toneladas até 2030 (SUMMA *et al.*, 2022).

A valorização dos resíduos é um princípio fundamental e um motor crucial para um sistema virtuoso de gestão de resíduos, produções sem resíduos e um conceito cada vez mais circular, tanto para a economia verde como para a economia azul (SUMMA *et al.*, 2022). A reciclagem é uma prática muito eficiente no gerenciamento de resíduos, pois permite a transformação do lixo em matéria-prima para a indústria, trazendo consigo diversas vantagens para o meio ambiente. Além de reduzir consideravelmente o consumo de energia, contribui para a preservação dos recursos naturais e o bem-estar da comunidade. Diante da escassez de recursos naturais, a reciclagem estimula pesquisas científicas que favorecem para o reaproveitamento de resíduos (LOFFI, 2014).

As conchas têm sido objeto de estudo em várias pesquisas científicas nas últimas duas décadas, com algumas delas já reconhecidas e amplamente referenciadas, enquanto outras permanecem em escala laboratorial, com aplicações especializadas que ainda não foram completamente exploradas. De modo geral, a inclusão deste resíduo tem sido como agregado em argamassa ou betão e existem diversos exemplos históricos de uso de conchas na construção de residências, igrejas entre outros, através de práticas vernaculares que serão apresentados no item 2.2.4.

O resíduo de pó de forno de cal é um material ainda pouco explorado no ambiente acadêmico, mas com potencial para ser investigado. Aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de pó de forno de cal com alto teor de cálcio são produzidas anualmente nos EUA (ARULRAJAH *et al.*, 2017).

1.3. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi utilizar resíduos da indústria dos bivalves e do papel para desenvolver argamassas sustentáveis, através da substituição parcial do ligante em argamassas de cal. De maneira mais específica:

- Estudo da viabilidade técnica, através de ensaios físicos, mecânicos e de durabilidade, para produção de argamassas sem utilização de materiais calcinados;
- Estudo da viabilidade técnica para produção de argamassas com utilização de materiais calcinados;
- Avaliação da necessidade da utilização de aditivos nestas argamassas;
- Identificação das composições mais viáveis no que se refere às condições técnicas e de sustentabilidade.

1.4. Metodologia Geral

Os estudos iniciaram a partir da revisão bibliográfica disponíveis na literatura, incluindo, sites, artigos e trabalhos científicos, assim como na pesquisa exploratória em laboratório. As experiências foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Minho. A Figura 1 apresenta a metodologia geral para a realização deste trabalho.

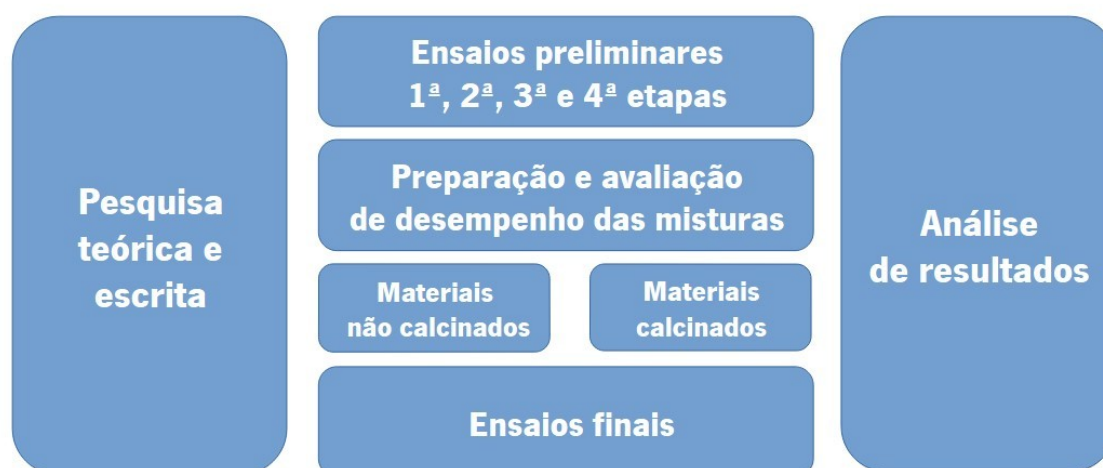


Figura 1 – Metodologia de trabalho

1.5. Organização da Dissertação

A presente dissertação foi dividida em seis capítulos, os quais foram estruturados para facilitar a compreensão do texto e detalhados da seguinte maneira:

O primeiro capítulo tem como objetivo introduzir o tema em estudo, justificando o interesse em desenvolvê-lo e ressaltando sua importância. Além disso, apresenta os objetivos a serem alcançados, a metodologia geral e a organização do texto.

No segundo capítulo são abordadas as características, produção, descarte, estudos e aplicações dos materiais residuais utilizados no estudo e a relevância da reciclagem desses resíduos. Também é feita uma abordagem sobre argamassas ecoeficientes e seu papel no desenvolvimento sustentável.

O capítulo três trata da metodologia do trabalho, descrevendo os materiais utilizados, as composições das argamassas e a caracterização dos materiais, os ensaios realizados e as peculiaridades desta campanha experimental, face a utilização de materiais não convencionais.

O capítulo quatro apresenta a análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios, abordando aspectos físicos, mecânicos e de durabilidade. Busca-se comparar as diferentes misturas e destacar influências como composição, ambiente de cura e quantidades adotadas, utilizando elementos gráficos para facilitar a compreensão.

O capítulo cinco consiste nas conclusões gerais do trabalho, incluindo uma análise crítica dos aspectos mais importantes e a avaliação do alcance dos objetivos propostos, assim como, também a sugestão de possíveis trabalhos futuros sobre o tema.

Por fim, são listadas todas as referências consultadas e anexos que foram relevantes para o desenvolvimento da dissertação.

2. Estado da arte

2.1 Argamassas

2.1.1. Características Gerais

As argamassas de modo geral são classificadas de acordo com a concepção, processo produtivo, propriedades e utilização. As propriedades das argamassas estão diretamente relacionadas com os objetivos para os quais são destinadas. Existem argamassas com a função de unir elementos de alvenaria e auxiliar na resistência aos esforços horizontais que surgem em paredes. Podem também colar materiais de revestimentos, absorver certas deformações naturais que a alvenaria ou juntas possam sofrer, selar juntas contra infiltração e ser utilizada para acabamentos em tetos e paredes, regularização de pavimentos com betonilhas, e reabilitação de obras. Neste contexto, as argamassas são classificadas pela sua aplicação e compreendem:

- Argamassa de alvenaria - Aplicada na construção de muros e paredes de tijolo ou bloco, por possuir resistência mecânica e aderência adequadas para lidar com deformações decorrentes de variações térmicas e humidade;
- Argamassa de revestimento/reboco - Utilizada para revestir paredes, podendo repelir água (hidrófugas), ser pintada ou ter diversos acabamentos. As monomassas são aplicadas em uma camada única por projeção, desempenhando funções de proteção e decoração semelhantes aos rebocos tradicionais;
- Cimentos-cola - Usado para colar elementos cerâmicos em paredes, rebocos ou pavimentos, misturando água imediatamente antes da aplicação;
- Massa para juntas - Formulada para reduzir o esforço nas juntas entre os elementos dos revestimentos aplicados, com suas propriedades determinadas pelo ligante e composição química;
- Argamassa de suporte - Aplicada no pavimento para nivelar e regularizar, garantindo uma superfície lisa e plana.

Esta campanha experimental focou no desenvolvimento uma argamassa de reboco de classe CS1. As normas EN 998-1:2003 e EN 998-2:2003 dizem respeito às argamassas para reboco e argamassas de alvenaria, e classificam de acordo com o Quadro 1 e a Tabela 1 a seguir.

Quadro 1 – Tipos de Argamassas (EN 998-1:2003 e EN 998-2:2003)

Critério	Argamassas de Reboco exteriores e interiores	Argamassas de assentamento de alvenaria
Segundo a conceção	➤ Argamassa de desempenho; ➤ Argamassa de formulação.	➤ Argamassa de desempenho; ➤ Argamassa de formulação.
Segundo o processo produtivo	➤ Argamassa industrial; ➤ Argamassa industrial semi-acabado; ➤ Argamassa feito em obra.	➤ Argamassa industrial; ➤ Argamassa industrial semi-acabada; ➤ Argamassa feita em obra.
Segundo as propriedades e utilização	➤ Reboco de uso geral; ➤ Reboco leve de uso geral; ➤ Reboco colorido para exteriores; ➤ Monomassa para rebocos exteriores; ➤ Reboco de drenagem de uso geral; ➤ Reboco de isolamento térmico de uso geral	➤ Argamassa de uso geral; ➤ Argamassa de alvenaria em camada fina; ➤ Argamassa leve.

Tabela 1 – Classificação das propriedades das argamassas de reboco em estado endurecido (EN 998-1:2003)

Propriedades	Categorias	Valores
Resistência à compressão aos 28 dias	CS I	0,4 a 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 a 5,0 N/mm ²
	CS III	3,5 a 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥ 6N/mm ²
Absorção de água por capilaridade	W0	Não especificado
	W1	$C \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \times (\text{min})^{1/2}$
	W2	$C \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \times (\text{min})^{1/2}$
Condutividade térmica	T1	≤ 0,1 W/m.K
	T2	≤ 0,2 W/m.K

2.1.1. Argamassas de Cal e sua ecoeficiência

Estudos comprovam que a cal é um dos materiais de construção mais importantes utilizados desde a antiguidade. A argamassa antiga remanescente em edifícios históricos é uma importante fonte de conhecimento que pode ser utilizada na reconstrução de argamassas semelhantes utilizando os materiais hoje disponíveis (NAIR *et al.*, 2022).

O cimento Portland é um dos materiais importantes na indústria da construção e o principal ligante utilizado em argamassas. Esta elevada utilização está muito relacionada com a sua vantagem económica e propriedade de presa rápida (LATIF *et al.*, 2015), quando comparada, por exemplo, com a cal na produção de argamassas. Segundo levantamento feito pela Internacional Energy Agency (2023), aproximadamente 0,58 toneladas de foram CO₂ libertadas na atmosfera em 2022 para a produção de cada tonelada de cimento. Como tal, a indústria do cimento a nível mundial, contribui com aproximadamente 7% do total de dióxido de carbono (CO₂) emitido no planeta, sendo este o principal gás de efeito estufa (SILVA *et al.*, 2022).

As argamassas de cal, como as de cal aérea e hidráulica, são mais flexíveis e se adaptam melhor às movimentações das estruturas, portanto, conseguem acompanhar as deformações que o suporte possa estar sujeito e são menos suscetíveis ao desenvolvimento de eflorescências (MENDES, 2017).

A cal aérea, embora tenha perdido espaço para novos ligantes, continua a ser empregada em diversas aplicações na construção civil. Seus principais usos incluem a produção de blocos silico-calcários, o fabrico de estuques (misturas com gesso), a formulação de ligantes hidráulicos (mistura com pozolanas), sob a forma de leitada na caiação de muros e misturada com cimento ou cal hidráulica em argamassas de reboco. Em argamassas de revestimento, a cal confere maior plasticidade, melhor trabalhabilidade e maior retenção de água, contribuindo para um melhor desempenho do sistema alvenaria-revestimento. No entanto, suas características, como tempo de presa lento, baixa resistência mecânica e elevada porosidade, limitam seu uso em aplicações que exigem alta resistência e durabilidade (ALMEIDA, 2010).

A cal hidráulica apresenta uma massa volúmica mais baixa e embora menos resistentes que o cimento, possui vantagens em aplicações que não exigem alta resistência, como revestimentos, rebocos e assentamentos de alvenaria. Sua maior trabalhabilidade, bom acabamento, boa aderência e menor retração as tornam mais adequadas para essas finalidades (ALMEIDA, 2010).

As argamassas ecoeficientes estão relacionadas com a utilização de materiais ligantes que minimizam impactos ambientais por meio de baixas emissões de carbono, durabilidade, baixo consumo energético, não toxicidade, reciclabilidade e origem renovável. Esses materiais podem substituir a produção de materiais ou produtos pouco ecológicos (MONTEIRO, 2022).

As argamassas de cal possuem características ecoeficientes e se destacam em diversos aspectos. Durante a carbonatação da cal há retenção de CO₂ da atmosfera, que contribui para a minimizar impactos ambientais. A produção de cal requer menos energia do que a produção de cimento, o que reduz a pegada de carbono associada à sua fabricação. As argamassas de cal são mais respiráveis, promovendo um ambiente interno mais saudável e confortável. Embora sejam consideradas ecoeficientes, as argamassas de cal apresentam algumas limitações como na extração do calcário, matéria-prima para a produção da cal, pode causar impactos ambientais significativos, como a geração de resíduos e a alteração do paisagismo, e este trabalho visa melhorar a eficiência das argamassas de cal com a incorporação de resíduos.

2.2 Conchas de ostras

2.2.1. Características Gerais

As ostras são organismos bivalves, que se refere a um animal com corpo mole protegido por um exoesqueleto em forma de concha com duas valvas (compostas por mais de 95% de carbonato de cálcio) que se articulam por uma charneira e são mantidas unidas pelos músculos adutores. Diferentemente de outros moluscos, a cabeça dos bivalves não é distinguível do resto do corpo, que consiste principalmente de um pé e uma série de lâminas branquiais (ctnedia), podendo ou não incluir um par de sifões. O manto do animal tem duas abas simétricas que cobrem o corpo e secretam as válvulas. As válvulas podem ser fechadas firmemente pela contração dos músculos adutores em cada extremidade do animal. Os bivalves não possuem um sistema muscular para abrir as valvas, sendo que estes se abrem automaticamente quando o músculo adutor relaxa devido a um ligamento elástico (LOFFI, 2014), a exemplo da Figura 2.

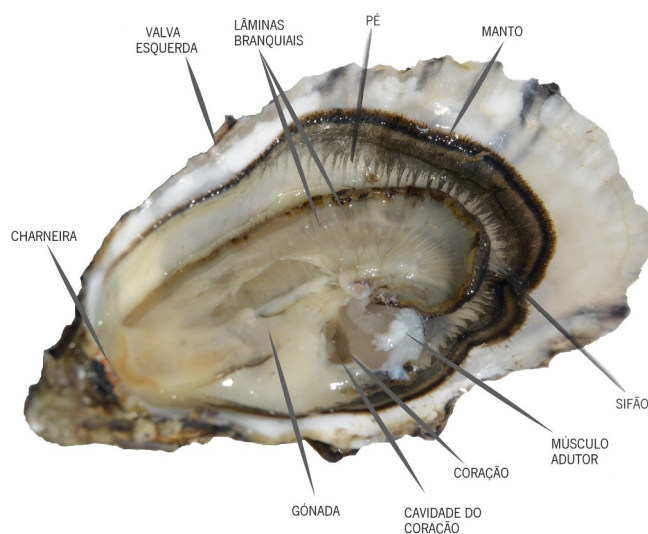


Figura 2 - Anatomia da ostra, adaptado de (NAISSAIN, 2023)

As ostras verdadeiras pertencem à ordem Ostreoida, família Ostreidae e se desenvolvem, em sua maioria, em águas rasas marinhas ou salobras. Neste trabalho, foram utilizadas ostras pertencentes ao gênero *Crassostrea* das espécies *Crassostrea angulata* (ostra-portuguesa) e *Crassostrea gigas* (ostra-japonesa).

O gênero *Crassostrea* é caracterizado pela presença de uma concha desigual, com as duas válvulas apresentando tamanhos e formas diferentes. A valva esquerda é maior e côncava, enquanto a direita é geralmente mais plana ou levemente convexa. Em geral, a concha é oval e alongada, porém a forma pode variar significativamente e é influenciada pelo tipo de substrato onde os indivíduos se desenvolvem, assim como por outros fatores como a densidade populacional por metro quadrado. As principais diferenças entre as espécies estudadas é que o interior da ostra-japonesa (Figura 3a) é branco com impressões musculares bem mais pigmentadas do que a portuguesa (Figura 3b), além disso, a portuguesa atinge uma média de 150 mm (MAGRO,2016) enquanto a japonesa possui uma concha alongada e espessa com comprimento máximo de 400 mm e comprimento médio 150-200 mm (DGRM, 2023).

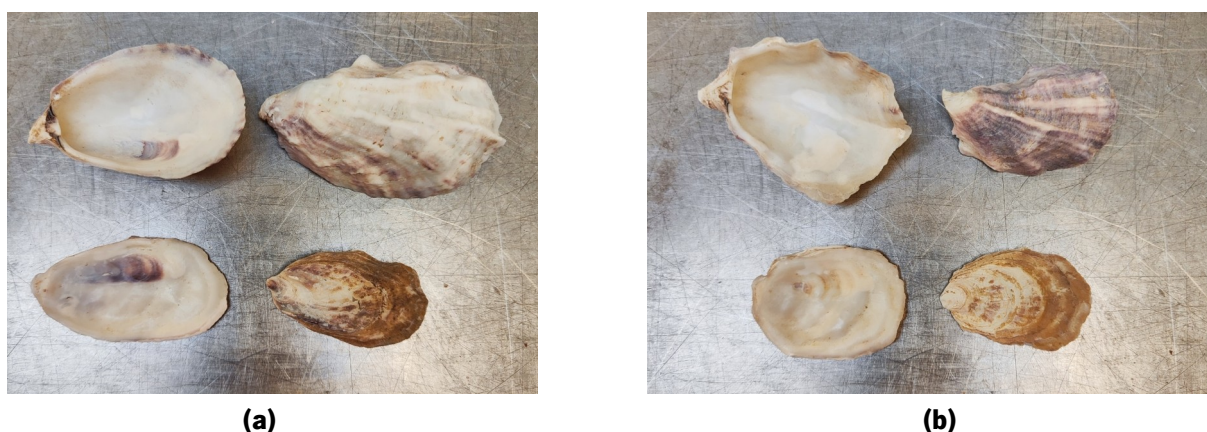


Figura 3 - (a) ostra-japonesa e (b) ostra-portuguesa

A ostra-portuguesa, também chamada de ostra-do-tejo ou carcanhola é a única espécie abundante em Portugal e é muito semelhante à ostra-japonesa. Estudos genéticos indicam que a ostra-portuguesa é originária da Ásia e foi trazida para a Europa durante as trocas comerciais de navios no século XVI. Segundo alguns historiadores, as ostras eram utilizadas como alimento, que rico em proteínas, alimentavam as tripulações das caravelas portuguesas que regressaram do Oriente. Ao chegarem aos estuários do Tejo e do Sado, as ostras se desenvolveram de forma extraordinária devido às ótimas condições naturais, tornando-se os maiores bancos naturais de ostras da Europa (SELO DO MAR, 2024).

A *Crassostrea gigas* ou *Magallana gigas*, mais conhecida por ostra-japonesa ou ostra-do-pacífico é uma espécie originária do nordeste da Ásia. Foi introduzida na Europa especificamente para a produção aquícola na década de 1970 e desde então, foi beneficiada graças à intervenção humana, à sua capacidade reprodutiva e alta adaptabilidade (AQUACULTORES,2023).

Ambas espécies são encontradas em estuários, lagoas e rias, tanto na zona intertidal baixa quanto na subtidal, podendo chegar até 40 metros de profundidade. Elas se fixam em substratos diversos, como lodo, silte duro, areia lodosa, fundos rochosos, cascalho com conchas e até em materiais provenientes da atividade humana. As ostras são mais comuns em águas salobras, mas são capazes de sobreviver em água doce por curtos períodos, bem como em águas marinhas, com sua faixa ideal de salinidade entre 20% e 25%. Elas suportam temperaturas entre -2°C e 35°C, mostrando também boa resistência às variações de temperatura (MAGRO,2016).

A ostra tem alta capacidade reprodutiva, sendo que a ostra-japonesa é capaz de produzir até cerca de 100 milhões de ovos, enquanto a portuguesa tem valores bem mais baixos, entre 1 e 2 milhões. Após a fecundação, os ovos se dividem sucessivamente até chegarem à fase larval em 24 horas. Após 15 a 20 dias, as larvas perdem sua capacidade de locomoção e desenvolvem a capacidade de se fixar, passando do estado pelágico para bentônico. Depois de se fixarem, sofrem metamorfose e assumem a forma juvenil. Em seguida, passam pela fase de crescimento e engorda, sendo que as ostras podem chegar ao tamanho comercial entre 18 e 30 meses (MAGRO,2016).

As ostras utilizadas neste trabalho (ostra-japonesa e ostra-portuguesa) são consideradas ostras especiais ou superespeciais, pois são cultivadas para ter uma aparência, qualidade e tamanho superiores, por questões de exigência do mercado (Figura 4).

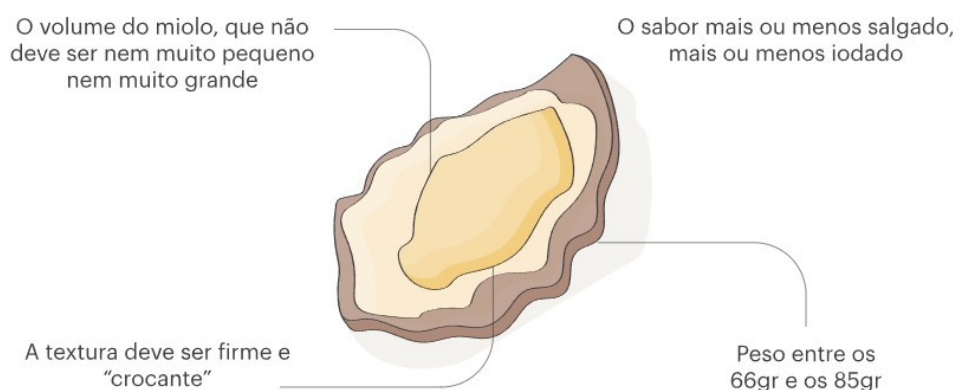


Figura 4 – Características das ostras especiais, adaptado de (PUBLICO.PT, 2021)

2.2.2. Produção, Descarte e Reciclagem

Atualmente, os moluscos bivalves mais consumidos, são cultivados e produzidos na União Europeia, América do Norte, China e Chile, e a produção mundial ocupa o segundo lugar na produção frutos do mar, com cerca de 16,1 milhões de toneladas anualmente (MAGALHÃES *et al.*, 2024). Em Portugal continental, são classificadas 17 zonas de produção de ostras (AQUACULTORES, 2023) e de acordo com os dados divulgados em 2023 pelo INE (Instituto Nacional de Estatísticas) referentes a 2021, a produção foi de 2.291,2 toneladas correspondendo a 12,8% da produção aquícola total no país (REA, 2024).

A produção da ostra-japonesa é significativa em Portugal, superando outras espécies de moluscos bivalves criados em aquicultura. A sua excelente adaptação em viveiros fez com que substituisse a produção da ostra-portuguesa e da ostra-europeia ao longo das últimas quatro décadas. Comparando com outras espécies de ostras produzidas em Portugal, a ostra-japonesa representa 65,36% da produção nacional, enquanto a ostra-portuguesa representa 34,61% e a ostra-europeia apenas 0,03%. No ano de 2021 houve a produção de 1.634 toneladas de ostra-japonesa no país, Figura 5 (AQUACULTORES, 2023).

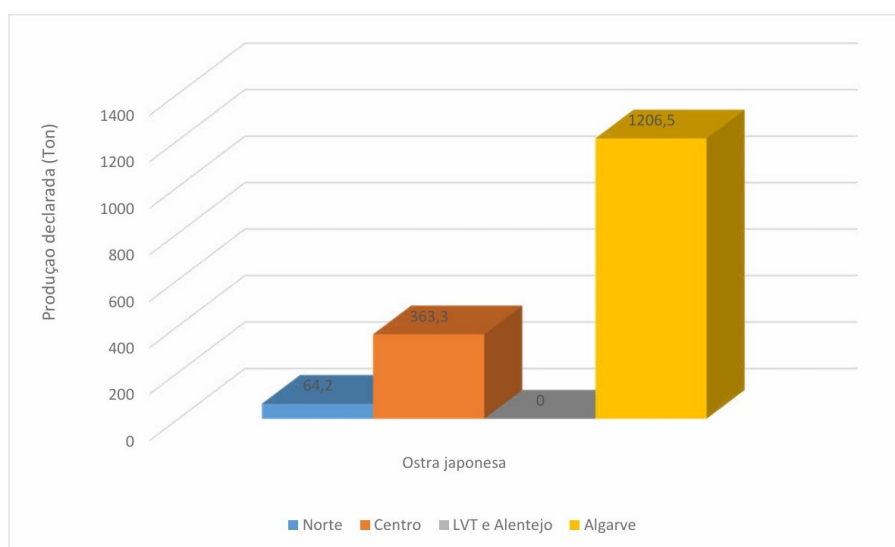


Figura 5 – Produção de ostra-japonesa em Portugal, adaptado de (AQUACULTORES, 2023).

Para as ostras, é gerado um grande volume de resíduos pré e pós-consumo, principalmente conchas, que geralmente representam cerca de 65-90% do peso vivo, dependendo da espécie (SUMMA *et al.*, 2022). A temperatura, as concentrações de clorofila, a biomassa de diatomáceas e as algas, potencialmente perigosas que libertam toxinas, podem levar a mortalidades elevadas. Algumas mortalidades podem também estar relacionadas com doenças causadas por ostreid herpesvirus OsHV-1, que pode atingir em alguns casos 80% a 95%. Dessa forma, são geradas grandes quantidades de conchas de ostra nos locais de produção. Para além disso, quando a população consome a ostra na alimentação, são geradas também as cascas. Esse subproduto da produção de ostra tende a causar impacto no ambiente se não for reutilizado (PESSOA *et al.*,

2019) e estima-se que cerca de 5 milhões de toneladas de resíduos relacionados são descartados ilegalmente todos os anos (BELLEI *et al.*, 2023).

É importante considerar a diferença de tamanho entre as ostras na gestão dos resíduos produzidos na aquicultura. Quanto maior o tamanho das ostras pode resultar em resíduos significativamente maiores do que outros bivalves mais pequenos. Em condições ambientais adequadas, as ostras podem acelerar o tempo de engorda, atingindo mais rapidamente o tamanho comercial mínimo.

Diante da elevada produção e consumo mundial de ostras, torna-se urgente analisar e mitigar os impactos ambientais causados pelo descarte (lixo comum, aterro ou incinerado) das conchas. É crucial desenvolver estratégias inovadoras na gestão das conchas de ostra, explorando seu potencial de reciclagem, na criação de materiais e produtos de alto valor agregado, estimulando a economia circular, reduzindo assim o volume de resíduos e promovendo a sustentabilidade.

Um dos desafios ao utilizar materiais residuais como um substituto daqueles tradicionalmente adotados e, por sua vez, menos ecológicos, está relacionado à incerteza na constância da qualidade. Além disso, a inexistência de normas adequadas pode colocar em dúvida o emprego de materiais secundários, o que retrata acima de tudo a importância do estudo investigativo destes materiais na construção. A produção de materiais com incorporação de resíduos com a qualidade similar ou superior a dos materiais primários é possível, porém muitas vezes requer altos custos de produção. Portanto, é decisivo o papel estratégico das autoridades ao exigir o cumprimento das leis e guiar economicamente as reciclagens e deposições, bem como orientar os processos de reciclagem (MONTEIRO, 2022).

2.2.3. Composição físico-química

A concha de ostra é majoritariamente composta por carbonato de cálcio (CaCO_3). Contudo, verifica-se uma discrepância na composição química das conchas de ostra relatadas na literatura que pode ser explicada pela consideração, ou não, do processo de calcinação. Enquanto Wang *et al.* (2013) analisaram as conchas em sua forma natural, o resultado foi de quase 96% composto por carbonato de cálcio (CaCO_3), outros estudos investigaram o material após calcinação, onde o CaCO_3 se decompõe em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2).

A Tabela 2 apresenta a composição química das conchas, conforme estudos de diversos autores. É importante ressaltar que os resultados atendem às expectativas, considerando as diferentes espécies analisadas e a forma de obtenção dos resultados, o elemento encontrado em maior quantidade sempre é o cálcio, seja ele apresentado como CaCO_3 ou CaO .

Tabela 2 – Composição química das conchas de ostras identificadas em diferentes trabalhos

Descrição		Compostos químicos (%)											
Autor/Ano	Ostra	CaCO ₃	CaO	K ₂ O	SiO ₂	SrO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Perda fogo
Loffi <i>et al.</i> (2014)	<i>C. gigas</i>	-	50,49	0,21	3,93	-	0,43	-	0,73	0,98	0,79	0,18	42,18
Silva <i>et al.</i> (2010)	<i>C. gigas</i>	-	56,1	0,07	0,91	0,16	0,05	-	0,68	0,42	0,98	0,15	43,18
Wang <i>et al.</i> (2013)	<i>C. gigas</i>	95,99			0,69			0,72	0,64	0,41	0,98	0,2	-
Siqueira (2021)	<i>C. brasiliensis</i>	-	91,74	0,21	2,67	2,08	0,82	0,50	0,69	1,30	-	-	-

Como sua composição química é predominantemente carbonato de cálcio, a concha de ostra é formada exclusivamente por estrutura cristalina de calcita. Destaca-se que o ensaio de suspensão de 10% do pó das conchas em água, aferiu um pH próximo a 9, cujo caráter é alcalino (Silva *et al.*, 2010).

Embora a estrutura cristalina, densidade e teor de matéria orgânica também influenciem nas características das conchas, a diferenciação física mais evidente está relacionada a parâmetros como tamanho e peso. A Tabela 3 expõe os aspectos físicos acerca das dimensões, peso parcial e total de conchas analisadas por outros autores.

Tabela 3 - Características biométricas e peso médios individual das ostras cultivadas em território português

Autor	Espécie	Local	Biometria (mm)			Peso (g)	
			Tamanho	Largura	Espessura	Total	Concha
Agripino (2009)	<i>Crassostrea angulata</i> *	Sado	74,31 ±14,76	47,62 ±7,90	43,23 ±9,91	90,853 ±39,628	74,858 ±34,304
		Mira	80,57 ±29,38	50,08 ±13,80	33,66 ±13,16	89,398 ±83,622	75,528 ±76,446
		Algarve	78,06 ±6,42	46,27 ±5,33	27,25 ±3,24	47,328 ±9,948	36,315 ±7,678
Magro (2016)	<i>Crassostrea angulata</i> *	Sado	67,35 ±20	43,30 ±11	28,31 ±10,7	48,81 ±43,4	41,53 ±37,3
	<i>Crassostrea gigas</i> **	Sado	124,30 ±8,3	65,62 ±8,7	40,42 ±5,5	136,68 ±20,2	102,78 ±10,4

* *Crassostrea angulata* (ostra-portuguesa), ** *Crassostrea gigas* (ostra-japonesa)

2.2.4. Estudos e Aplicações

O uso de conchas de ostra na construção civil é uma prática antiga, cuja origem exata é incerta. Damas *et al.* (2016) referem que em argamassas de cal aérea dolomítica no século XVI, o agregado deixa de ser essencialmente silicioso, passando a ser também calcário e a conter fragmentos de conchas (em áreas localizadas junto ao mar) e de rochas metamórficas calcíticas.

Em Portugal, na Igreja do Santíssimo Sacramento em Alcântara (Lisboa), do século XVII, foi possível identificar que na argamassa de cal aérea utilizada era composta também por agregados siliciosos, basálticos e fragmentos de conchas que revestiram o interior da abóbada, cúpula e paredes dos lados oeste, norte e sul, assim como, paredes de alvenaria de pedra no exterior (DAMAS *et al.*, 2016).

Na pequena ilha de Ínsua, situada na foz do rio Minho e que pertence atualmente ao concelho de Caminha, distrito de Viana do Castelo, observou-se que apresentava gigantescos depósitos de conchas mortas, sendo os maiores depósitos de conchas da costa continental portuguesa (CABRAL, 2007). A abundância e prosperidade dos moluscos na Ínsua estão provavelmente relacionadas com uma riqueza em nutrientes das correntes que passam pela ilha, arrastando águas do estuário do rio Minho. Cabral (2012) refere que estes

depósitos de conchas de moluscos da Ínsua foram utilizadas para o fabrico de cal no Portugal medieval, sendo o sustento dos frades neste local (Figura 6).

São escassas as informações que existem sobre a utilização de conchas de moluscos para o fabrico de cal, em Portugal. Muitos dos dicionários históricos existentes não referem a utilização de conchas para o fabrico de cal, com exceção, no Dicionário de Rafael Bluteau do fim do século XVIII, onde há indicação do fabrico de cal a partir de calcário ou de cascas de mariscos calcinadas, e sua utilização em argamassas de construção. À esta cal, adicionava-se, além da água, óleos de animais (baleia, peixe), de forma a melhorar as características da argamassa (CABRAL, 2012).



Figura 6 – Acumulação de conchas em Ínsua, adaptado de (CABRAL, 2012)

Rodrigues *et al.* (2018) refere que os resíduos da aquicultura vêm sendo utilizados empiricamente nas construções vernaculares. É possível encontrá-los incorporados nas argamassas, usados como revestimento, ou na execução de contrapisos.

O fabrico de cal a partir de conchas de moluscos encontra-se referido para outros países. O exemplo mais notável localiza-se na costa sudeste do Brasil, onde no passado viveu um grupo de povos nativos que consumia grandes quantidades de marisco, acumulando gigantescas lixeiras de conchas mortas, chamadas de sambaquis ("samba"= concha; "qui" = monte (CAMPOS *et al.*, 2007)). Estes depósitos de conchas foram posteriormente utilizados para o fabrico de cal. Os sambaquis constituíram o principal material-base utilizado no fabrico da cal, no sudeste brasileiro, durante o período colonial português – de facto, muitas igrejas, palácios e fortalezas construídas nesta época utilizaram argamassas com cal feita à base destas conchas. Esta actividade manteve-se até ao século XIX (CABRAL, 2007). Constatou-se a presença de cal conchífera na composição das argamassas utilizadas nas construções arqueológicas e a homogeneidade de sua

composição (concha queimada, areia, barro e óleo de mamífero) em todo o litoral brasileiro (CAMPOS *et al.*, 2007). Vale ressaltar que muitas destas obras resistem até os dias atuais, a exemplo da Igreja de Nossa Senhora da Conceição das Barreiras (Figura 7), no parque da Jaqueira em Recife, construída em 1766, que se encontra em perfeito estado de conservação e mostra partes de sua construção com compósitos cimentícios contendo resíduo da concha de ostras, que foi empregue como agregado (MOTA *et al.*, 2023).



Figura 7 – Igreja de Nossa Senhora da Conceição das Barreiras, adaptado de (MOTA *et al.*, 2023)

Na Índia, uma técnica vernacular, usava uma mistura de carvão e conchas. Segundo Nair *et al.* (2022), o processo consistia em espalhar inicialmente o carvão vegetal no chão e borrifar água, em seguida, as conchas eram colocadas por cima e novamente, o carvão era adicionado. Essa mistura de carvão e conchas era cozida por cerca de 5 horas em grandes tachos, concluindo assim o processo de calcinação. Mais água era adicionada à mistura (cal viva) para produzir cal em pó. No entanto, para obtermos uma argamassa de cal adequada para construção, era adicionado açúcar mascavo, gordura de cabeça de cobra e o fluido pegajoso de cacto à mistura de cal. Porém, ao longo dos anos, com a introdução do cimento e outros materiais de fácil acesso e de rápida fabricação, essa técnica foi sendo esquecida pois exige mão de obra especializada.

A incorporação de conchas de ostras em diversos estudos com materiais de construção, podem ser encontrados em betão, tijolo, asfalto misturado a quente, pedra artificial, mistura de solo e camadas de drenagem, cimento de fosfato de magnésio e acabamento residencial. (BELLEI *et al.*, 2023).

O não aproveitamento desse resíduo, que é rico em carbonato de cálcio, representa um desperdício de uma importante matéria-prima. Atualmente, o carbonato de cálcio é utilizado em diversas aplicações, como pavimentação de estradas, fabricação de papel, produção de fertilizantes e pesticidas, alimentos para animais, cerâmica, tintas, vidros, cimento e muito mais. Utilizar o carbonato de cálcio como carga em polímeros, especialmente PVC, é uma opção vantajosa devido à disponibilidade de tecnologias de

processamento acessíveis e de baixo custo, que poderiam beneficiar cooperativas de maricultores, e à proximidade de empresas que poderiam utilizar o carbonato produzido (AGRIPINO, 2009).

O emprego de conchas de ostra apresenta um grande potencial para aplicação em diversas tecnologias, contribuindo para a melhoria da eficiência de processos e a criação de novos materiais. Em particular, seu uso em sistemas de tratamento de água, gases e remoção de contaminantes, como metais pesados, tem sido amplamente explorado. Embora a viabilidade econômica de sua aplicação seja variável, a necessidade de encontrar soluções sustentáveis para o manejo desse resíduo volumoso justifica sua utilização. Nesse contexto, a aplicação direta das conchas, sem a necessidade de tratamento térmico ou químico e que, em termos de forma, é utilizada majoritariamente em pó, representa uma alternativa mais econômica e ambientalmente correta, uma vez que reduz os custos de processamento e preserva as propriedades naturais do material (PESSOA *et al.*, 2019).

Na Tabela 4, percebe-se que as argamassas ecoeficientes, dos trabalhos citados, foram desenvolvidas utilizando as conchas de ostras na consistência triturada ou em pó, e como agregado ou ligante parcial. Essas composições têm demonstrado potencial para serem utilizadas em grande escala na construção civil, porém ainda utilizam cimento como ligante na sua composição.

A pesquisa realizada por Loffi (2014) avaliou a substituição parcial da areia por resíduos de conchas em pó (*Crassostrea gigas*) em argamassas à base de cimento CP IV-32. Os resultados indicam que a substituição de 5% da areia por conchas em pó, proporciona características satisfatórias para a argamassa equivalentes aos valores da referência. Mesmo em baixas concentrações, a utilização da conchas em pó demonstra um impacto positivo para o meio ambiente.

A utilização das conchas em pó em argamassas investigada por Monteiro (2022) utilizou-se conchas em pó como ligante associado a cal viva. A autora associou também nos estudos iniciais a utilização do ácido acético como agente de reação, com objetivo de promover maior resistência mecânica. A água, embora essencial para reação da cal viva, que resulta na hidratação do óxido de cálcio, não é capaz de promover as ligações químicas necessárias para garantir a resistência do material. O ácido acético, presente no vinagre ao reagir com o carbonato de cálcio, promove a formação de novas ligações químicas, como o acetato de cálcio, conferindo maior resistência e durabilidade ao material. Porém os resultados demonstraram que não houve diferença significativa nos valores de resistência entre argamassa com água e com vinagre, e autora sugere que composição utilizando vinagre necessita de estudos aprofundados e investigativos para otimização da argamassa. Por fim, a argamassa estudada é composta por 97% de conchas em pó e 3% de cal viva como

ligantes, a uma razão Lq/L de 1:1 e obteve 0,5 MPa (EN 998-1:2003), sendo suficiente para a utilização como uma argamassa de revestimento ou de classe CS I (EN 998-1:2003).

Siqueira (2021) realizou uma investigação sobre conchas em pó (*Crassostrea brasiliana*), que demonstrou ser uma alternativa promissora para a substituição parcial ou total do agregado miúdo em argamassas para revestimento. Os resultados dos ensaios realizados com argamassas contendo conchas em pó mostraram um aumento na resistência à compressão em relação às argamassas convencionais, chegando a atingir 18,45 MPa com substituição total do agregado. Além disso, a absorção de água das argamassas com conchas em pó, embora tenha aumentado, permaneceu dentro do valor de referência.

Tabela 4 – Compilação dos estudos sobre utilização de conchas na composição de argamassas sustentáveis

Referência	Utilização da concha		Concha como ligante		
	Agregado	Ligante	Composição	% de substituição de ligante por conchas em pó	Resistência Compressão (28 dias) MPa
Loffi (2014)	X		cimento e conchas em pó		35,30 Superior a referência 32,95
Monteiro (2022)		X	cal viva e conchas em pó	97%	0,50 Superior a referência 0,40
Moraes <i>et al.</i> (2021)	X		cimento e conchas		5,16 Superior a referência 4,37
Rodrigues <i>et al.</i> (2018)	X		cimento e conchas		11,76 Superior a referência 6,91
Siqueira (2021)	X		cimento e conchas em pó		18,45 Superior a referência 14,88
Menezes (2019)	X		cimento e conchas de sururu		11,28 Inferior a referência 28,15

No estudo mais recente realizado por Seesanong *et al.* (2024), os resíduos de conchas de ostras foram utilizados para produzir cal viva, ou óxido de cálcio. O carbonato de cálcio das conchas foi calcinado a 900°C e foi realizada também a calcinação de acetato de cálcio mono-hidratado a 750°C (produzido com as conchas e ácido acético). Os autores obtiveram um índice de pureza maior com a calcinação do acetato de cálcio um teor de CaO de 91,5%, face a 87,8% através carbonato de cálcio. Este estudo foi que mais se aproximou deste trabalho, no entanto, esta é uma solução que ainda necessita de calcinação no seu processo, além disso este nível de pureza não parece ser relevante para a indústria da construção, trazendo mais um custo com mais um processo acrescido.

2.3. Pó de forno de cal

2.3.1. Características Gerais

O pó de forno de cal (poeiras de cal) é um dos materiais residuais resultante do processo kraft na indústria de papel (Figura 8). O processo Kraft (Figura 9) é um método de cozimento contínuo e amplamente utilizado na produção de papel devido às suas vantagens, especialmente em relação ao sistema de recuperação de produtos químicos associados a ele. O sistema de caustificação é responsável por recuperar o licor branco, utilizando produtos químicos inorgânicos provenientes da caldeira de recuperação e do forno de cal. O forno de cal, por sua vez, é um forno rotativo utilizado não apenas na indústria da celulose/papel, mas também em outros setores. Sua finalidade principal é reduzir os custos com produtos químicos convertendo a lama de cal (carbonato de cálcio) em cal viva (óxido de cálcio) + dióxido de carbono e resolver o problema do descarte da lama. Observa-se que a lama de cal é composta por aproximadamente 98% de óxido de cálcio (CaO), relativo ao processo de caustificação na fase de recuperação química do licor branco (GONÇALVES, 2021).

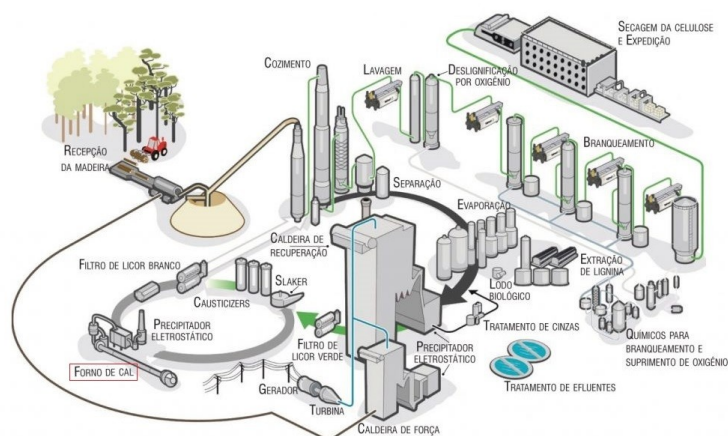


Figura 8 - Esquema do processo Kraft, adaptado de (QUIMICA, 2020)

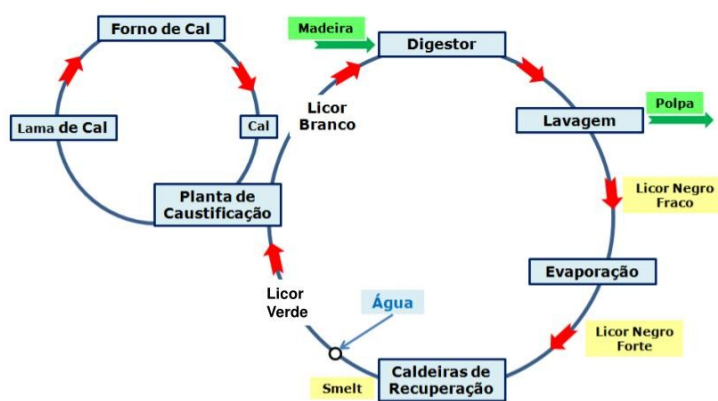


Figura 9 - Ciclo do processo Kraft (VIEIRA, 2013)

O pó de forno de cal (poeiras de cal) é o subproduto em pó coletado do processo de produção de cal viva (calcinação), Figura 10. Os gases gerados no processo de calcinação são conduzidos a um eletrofiltro, equipamento que utiliza forças eletrostáticas para remover, com altíssima eficiência, as partículas sólidas em suspensão, garantindo assim a qualidade do ar emitido. A fim de minimizar a emissão de partículas sólidas, os gases provenientes do forno de cal passam por um processo de filtragem eletrostática. Nesse processo, as partículas carregadas eletricamente são atraídas para eletrodos, sendo assim retidas e impedidas de serem lançadas na atmosfera.

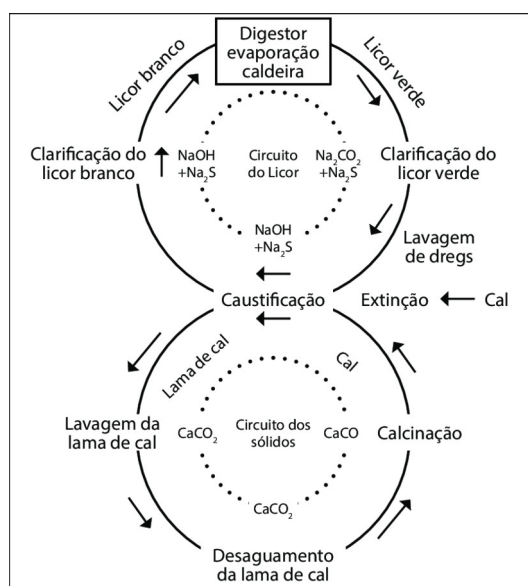


Figura 10 - Ciclo do processo de caustificação (ALVES, 2015)

2.3.2. Produção, Descarte e Reciclagem

A produção de poeiras é significativa em todo o mundo e o seu descarte nem sempre é feito de uma forma ambientalmente favorável. Estima-se que os Estados Unidos produzam anualmente cerca de 2,5 milhões de toneladas de poeiras. Na Malásia, por exemplo, uma única fábrica gera 1,5 tonelada de poeira por dia, que frequentemente é descartado em aterros sanitários (LATIF *et al.*, 2015).

O setor da pasta e papel é um dos pilares da economia portuguesa, contribuindo com cerca de 0,8% do PIB nacional e representando 4,6% das exportações nacionais (MODOLO, 2006), porém os valores de produção do pó de forno de cal não são encontrados facilmente.

O forno de cal possui um tubo de aço de grandes dimensões com leve inclinação (de 1,5°C- 3°C), que facilita o movimento do fluido no interior do tubo e revestido internamente com tijolos refratários. A temperatura interna varia de 250°C a 1600°C sendo na zona de queima acima de 760°C e a velocidades típicas de 0,5 a

2 RPM com controle de velocidade. Possui sistema de emergência para evitar parada do forno quando quente. O processo de retenção do fluido dentro do forno dura entre 2 e 4 horas (OLIVEIRA, 2013).

No processo kraft, o forno de cal é um grande consumidor de combustíveis fósseis (Figura 11). A busca por um processo mais sustentável passa pela substituição dos combustíveis utilizados, alternativas como gases de biomassa, coque de petróleo e metanol oferecem a possibilidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e diminuir a dependência de recursos não renováveis (TRAN, 2016).



Figura 11 – Forno de cal, adaptado de (OLIVEIRA, 2013)

O material particulado em suspensão (poeiras de cal) gerado fica no precipitador eletrostático (Figura 12), corresponde a cerca de 5 a 15% da produção do forno (OLIVEIRA, 2013) e possui um alto teor de cálcio que pode ser adequado para utilização em atividades de estabilização para substituir ligantes intensivos em carbono, como o cimento Portland (ARULRAJAH *et al.*, 2017).

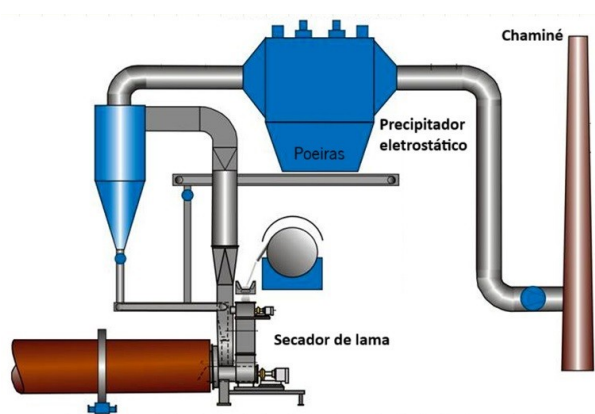


Figura 12 – Esquema de obtenção das poeiras de cal, adaptado de (OLIVEIRA, 2013)

Na formação das poeiras no forno de cal ocorre um fenômeno que possivelmente é influenciado por diversos fatores, pois a presença de elementos não processuais e a qualidade da cal queimada contribuem para o enriquecimento em pó, especialmente na extremidade quente do forno. Estudos indicam que a formação das

poeiras na extremidade quente do forno de cal tem um impacto negativo tanto na transferência de calor como no seu desempenho geral. A produção de poeiras pode chegar entre 5% a 20% da lama de cal introduzida no forno, sendo o tamanho das partículas o principal fator determinante para sua suspensão. A força de sustentação exercida pelos gases de combustão sobre as partículas sólidas também influencia a formação de pó (DERNEGARD *et al.*, 2016).

2.3.3. Composição físico-química

Segundo Arulrajah *et al.* (2017) as propriedades químicas do pó de cal variam de acordo com a composição da cal (calcítica ou dolomítica). A cal hidratada ou cal virgem, terá maior teor de cálcio em comparação com a cal dolomítica. A reatividade do pó está diretamente ligada ao conteúdo de cal e magnésio livres. A análise química revela grande variabilidade, enquanto a análise física indica um material fino e de alta pureza, com elevado pH (12) e baixa solubilidade em água (≥ 1). Os teores de óxido de cálcio (CaO) e de carbonato de cálcio não calcinado no material do pó são aproximadamente iguais e contêm normalmente uma baixa percentagem de impurezas, como o óxido de magnésio (MgO) de 0,82%, derivado do calcário. A análise granulométrica indicou que o pó de cal é predominantemente fino, com diâmetro médio de 0,39 μm .

De acordo com Latif *et al.* (2015) a análise química das poeiras revelou um alto teor de CaO (54,88%), com perda por ignição de 38,59%, o de MgO (0,95%) e encontra-se dentro dos padrões estabelecidos. A presença de 0,3% de SO_3 indica potencial pozolânico e o tamanho médio das partículas foi de 40,29 μm .

Kadhim *et al.* (2020) revelou em sua pesquisa, que as poeiras de cal estudadas, que é um material subproduto do processo de produção de cal viva, possui 80,1% de CaO e 0,6% de MgO, com densidade de 2700 kg/m^3 , tem alta alcalinidade com pH de 12,3, o que confirma sua adequação para ser ativador alcalino e o tamanho médio das partículas foi de 15,94 μm .

A Tabela 5, apresenta o resumo da composição química do pó de forno de cal desses estudos.

Tabela 5 – Composição química do pó de forno de cal identificada em diferentes trabalhos

Descrição		Compostos químicos (%)									
Autor/Ano	CaO	K ₂ O	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Perda Fogo
Arulrajah <i>et al.</i> (2017)	95,32	0,17	1,26	0,38	0,32	0,82	0,56	1,01	-	0,01	-
Latif <i>et al.</i> (2015)	54,88	0,85	0,67	0,38	0,3	0,95	0,68	0,01	0,01	0,1	38,59
Kadhim <i>et al.</i> (2020)	80,1	0,5	14,6	0,1	-	0,6	0,2	1,8	-	0,1	-

2.3.4. Estudos e Aplicações

As poeiras são utilizadas em algumas aplicações, como na agricultura para correção do solo e como agregado ou substituto de ligantes na construção civil.

Latif *et al.* (2015) realizou uma investigação promissora sobre as poeiras como material substituto do cimento na produção de argamassas para materiais de construção sustentáveis. Os resultados sugerem que o material pode ser utilizado como substituto parcial do cimento. A adição de poeiras à argamassa, embora permita substituir parte do cimento e acelerar o tempo de presa, reduz sua resistência final. Apesar disso, é possível alcançar resistências acima de 50 MPa aos 28 dias, substituindo até 50% do cimento por poeiras. No entanto, o aumento da quantidade de poeiras eleva a demanda por água e reduz a densidade da argamassa, sendo a relação a líquido/ligante de 0,375.

No estudo realizado por Arulrajah *et al.* (2017) demonstrou que a combinação de poeiras, com alto teor de cálcio, e cinzas volantes, ricas em sílica, pode atrair o interesse comercial devido ao seu potencial para substituir o cimento Portland em processos de estabilização de pavimentos, como na construção de rodovias e à sua capacidade de atuar como substituto direto da cal hidratada. Diferentes combinações de pó de forno de cal (poeiras de cal) e cinzas volantes foram utilizadas como ligantes alternativos misturados aos materiais de construção e demolição (como tijolo triturado, agregados de concreto reciclado e pavimentos de asfalto recuperado). Como resultado, a incorporação de 20% de poeiras de cal e 10% cinzas volantes com os agregados reciclados foi considerado o ideal em termos de resistência e comportamento resiliente. A relação a líquido/ligante foi de 0,46 e a resistência à compressão foi cerca de 1,5 MPa. Essa combinação de materiais residuais pode revolucionar a indústria da construção civil, abrindo novas possibilidades para o uso sustentável das poeiras e cinzas volantes em diversas aplicações de infraestrutura.

Kadhim *et al.* (2020) apresentou um estudo sobre uma nova abordagem para a produção de cimento alcalino ativado (AAC) de segunda geração, eliminando a necessidade de ativadores químicos comerciais. A inovação consiste na utilização de pó de forno de cal, um subproduto do processo de produção de cal viva, como fonte alcalina terrosa. Ao utilizar poeiras de cal (35%) calcinadas a 950°C em uma mistura com metacaulim (35%) e pozolana natural (silicato de alumina) com (30%), observou-se um aumento de mais de 51% na resistência após 28 dias de cura, em comparação com outras composições. A resistência do material continuou a aumentar até 180 dias de cura, atingindo 51 MPa para a formulação com maior proporção de poeiras de cal (40%) calcinadas a 950°C e metacaulim (40%). Esta composição apresentou desempenho semelhante ao cimento alcalino-ativado convencional em relação à resistência, tempos de pega e características

morfológicas, mas com a vantagem de ser produzida a partir de materiais mais sustentáveis e menos perigosos.

A Tabela 6 resume os estudos que utilizaram poeiras de cal e lama de cal, na composição de argamassas.

Tabela 6 – Compilação dos estudos sobre utilização de lama de cal e poeiras de cal na composição de argamassas sustentáveis

Referência	Ligante		Lama como ligante			
	Poeiras de Cal	Lama de Cal	Composição	% de substituição de ligante por lama de cal ou poeiras de cal	Resistência Compressão (28 dias) MPa	
Amaral (2016)		X	Solo-cimento e lama de cal	10%	2,5	Superior a referência
Gonçalves (2021)		X	Cal hidratada e lama de cal	25%	6,38	Superior a referência
Arulrajah <i>et al.</i> (2017)	X		Poeiras de cal e cinzas volantes	Até 20%	1,5	Superior a referência
Latif <i>et al.</i> (2015)	X		Cimento e poeiras de cal	Até 50%	50	Inferior a referência
Kadhim <i>et al.</i> (2020)	X		Poeiras de cal, metacaulim e pozolana	Até 40%	27	Superior a referência

É importante destacar que os trabalhos citados utilizaram poeiras provenientes dos fornos da produção de cal, o que demonstra a necessidade de investigação do tema desta campanha exploratória já que as poeiras utilizadas são provenientes da indústria de papel, apesar dos ambos resíduos possuírem propriedades semelhantes.

3. Metodologia

O estudo foi iniciado a partir de pesquisa exploratória em laboratório que decorreu paralelamente a revisão bibliográfica que fez uso de sites especializados, artigos e trabalhos científicos. Os ensaios laboratoriais apresentados foram realizados, maioritariamente, no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Minho, mas, também, no Centro de Valorização de Resíduos (CVR) e no Laboratório da Escola de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC), em Portugal.

3.1. Materiais Utilizados

Os materiais utilizados na elaboração de argamassas ecoeficientes à base de conchas de ostras e pó de forno de cal, foram definidos de acordo com suas propriedades e características adequadas ao estudo, bem como as diferentes misturas adotadas para otimizar a produção e alcançar resultados promissores. O desenvolvimento das argamassas e os ensaios foram conduzidos em laboratório para caracterizar as composições em estado fresco e endurecido e analisar suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade. Os equipamentos e procedimentos de ensaio seguiram as normas específicas referenciadas.

3.1.1. Conchas de ostras

As conchas de ostras utilizadas neste trabalho foram fornecidas pela empresa Aquagoma Produtos do rio e mar LTA, em Viana do Castelo, Portugal. A empresa possui um viveiro de ostras localizado no rio Lima, com uma área de aproximadamente 3,66 hectares (DGRM, 2024) sendo o primeiro em ambiente natural da região e o maior do país. Segundo um dos promotores, em 2018, a empresa já tinha um sistema de produção composto por 20.000 potes rotativos, sendo que a maior parte da safra é destinada exclusivamente ao mercado francês, que é líder no consumo e exportação desses moluscos na Europa. As ostras são cultivadas em um sistema de potes rotativos, que visa produzir ostras especiais e superespeciais, caracterizadas por um maior rendimento em carne e alta qualidade, como explicado de maneira pormenorizada no item 2.1.1. O estuário do Rio Lima (Figura 13) é classificado atualmente como “Zona B” pelo IPMA (2024), o que significa que os bivalves podem ser apanhados e destinados a depuração, transposição ou transformação em unidade industrial.

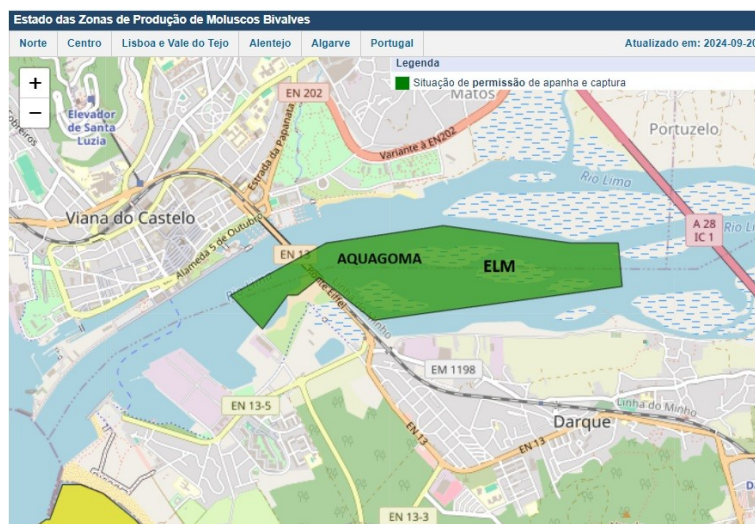


Figura 13 – Estuário do Lima (ELM), adaptado de (IPMA, 2024)

A captura de bivalves é realizada por batelão, uma embarcação adaptada para operar em águas rasas que chega próximo ao viveiro (Figura 14a). Equipado com uma grua (Figura 14b), o batelão recolhe os potes com ostras (Figura 14c), que são movidos rotativamente para otimizar o crescimento. As ostras são então transferidas para jaulas na embarcação e levadas para a empresa, onde passam por processos de seleção e calibragem.



(a)



(b)



(c)

Figura 14 – Processo de captura dos bivalves: (a) Viveiro do Estuário de Lima; (b) Grua do batelão; (c) Potes

As espécies que foram coletadas para o desenvolvimento deste trabalho são a *Crassostrea angulata* (ostra-portuguesa), Figura 15a, destinada principalmente ao mercado interno, e a *Crassostrea gigas* (ostra-japonesa ou ostra do pacífico), Figura 15b, que é exportada para a França.



Figura 15 – (a) *Crassostrea Angulata* (ostra-portuguesa); (b) *Crassostrea gigas* (ostra-japonesa) (SPEND IN, 2018)

Devido a uma mortalidade de cerca de 90% das ostras cultivadas no estuário, em um episódio isolado e sem causa definida, as conchas foram retiradas e armazenadas em big bags em um aterro da empresa e também destinadas a estudos diversos. Situações como essa são passíveis de acontecer em viveiros e isso reforça a necessidade de uma destinação ambientalmente favorável deste produto.

A respeito da caracterização das conchas de ostras em pó é composto pelas duas espécies (ostra-portuguesa e ostra-japonesa) e de acordo com os resultados dos ensaios de massa volúmica e ATG conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Características físico-químicas da concha de ostra em pó

Características da Concha de Ostra em Pó		
Composição química	Carbonato de Cálcio - CaO_3	= 95,5%
Características físicas	Estado Físico	Sólido
	Aspeto	Pó Fino
	Cor	Branco
	Odor	Inodoro
	Massa Volúmica	2710 kg/m^3 a 20°C
	Massa Volúmica (calcinada)	2336 kg/m^3 a 20°C

O material recebido de conchas foi higienizado com água corrente para retirar quaisquer resíduos de sujidade, em seguida seco em estufa à 105°C por pelo menos 24h e direcionado aos diversos processos. Com o objetivo de alcançar a consistência de pó, as conchas foram moídas em moinho de bolas, no equipamento chamado Los Angeles (Figura 16), numa sequência de 50 ciclos de 15 minutos em moagem para atingir a granulometria ideal de $<75\mu\text{m}$, granulometria satisfatória indicada no estudo de MONTEIRO (2022).



Figura 16 – Equipamento Los Angeles

Optou-se também pela utilização das conchas calcinadas em que, através do forno Mufla (Figura 17), conchas inteiras ou em pó foram submetidas a uma temperatura constante de 800°C por 4h e após o resfriamento do material, foi borrifado um pouco de água nas conchas inteiras para transformá-las em pó através da reação exotérmica, e por fim peneiradas na peneira de granulometria 75µm.



(a)



(b)

Figura 17 – (a) Forno Mufla, (b) Conchas a serem calcinadas

3.1.2. Pó de forno de Cal

O fornecimento do pó de forno de cal (poeiras de cal) foi realizado pela fábrica Paper Mill da DS Smith, também situada em Viana do Castelo, norte de Portugal. É uma das fábricas de papel kraftliner mais importantes da Europa e líder de mercado no sul da Europa. Em visita a empresa, um representante informou que a fábrica produz cerca de 400 mil toneladas anualmente de kraft paper, o que gera em torno de 100 toneladas residuais de poeiras de cal por ano que são descartados em aterro próprio. Até o fim de junho de 2024, 50 toneladas de poeiras tinham sido coletadas no forno de cal.

O forno da fábrica (Figura 18a) funciona ininterruptamente, produzindo cal para ser reinserida no processo kraft. Possui capacidade para produzir 180 toneladas de cal por dia, quantidade suficiente para repor a cal consumida na etapa de caustificação. A fim de compensar as perdas naturais do processo, é necessária a adição de uma pequena quantidade de calcário moído ao sistema. Essas perdas são as poeiras que são coletadas diariamente e acumulam em saco com cerca de 1 tonelada (Figura 18b e 18c). O funcionamento do forno de cal e a obtenção das poeiras de cal são processos interligados e que requerem cuidados específicos para garantir a eficiência da produção de cal e a preservação do meio ambiente.



Figura 18 – Resumo do processo de recolha de poeira na fábrica: (a) Forno de cal; (b) Recolha das poeiras; (c) Big Bags prontos para levantamento

A respeito da caracterização do pó de forno de cal está de acordo com os resultados dos ensaios de massa volúmica e ATG pode-se verificar na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Características físico-químicas do pó de forno de cal

Características do Pó de Forno de Cal		
Composição química	Carbonato de Cálcio - CaO_3	= 81,5%
Características físicas	Estado Físico	Sólido
	Aspeto	Pó Fino
	Cor	Branco
	Odor	Inodoro
	Massa Volúmica	2718 kg/m^3 a 20°C
	Massa Volúmica (calcinado)	2906 kg/m^3 a 20°C

O material das poeiras de cal, foi utilizado na forma em que foi recebido, pois apresenta-se na consistência de pó. Devido ao seu aspeto fino, a granulometria foi determinada à laser. Optou-se também pela utilização do material calcinado e seu processo de obtenção foi semelhante ao das conchas.

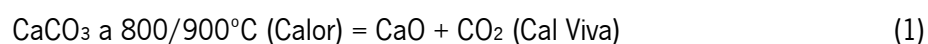
3.1.3. Cal

De acordo com a Norma NP EN 459-1:2015, a cal é definida como um material que pode aparecer em diferentes formas físicas e químicas, contendo óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e/ou hidróxidos de cálcio e magnésio (Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂) produzida através da calcinação de jazidas de carbonato de cálcio (como calcário, giz, conchas) ou jazidas de carbonato de cálcio e magnésio (como calcário dolomítico, dolomita), estes, predominantemente compostos por carbonato de cálcio (CaCO₃) e podem conter quantidades variáveis de argila. A presença de argila influencia nas propriedades da cal produzida, dando origem a diferentes tipos, como cal aérea (calcário puro), cales hidráulicas (calcários argilosos) e a marga calcária (cimento) (MAGALHÃES *et al.*, 2024).

A cal aérea é aquela que se solidifica com o CO₂ presente no ar. Ao ser misturado com água na medida certa, forma uma pasta que melhora a manipulação e a retenção de água das argamassas. A carbonatação dos hidratos em contato com o CO₂ atmosférico produz carbonato de cálcio, que aumenta a resistência e durabilidade das argamassas de cal (MAGALHÃES *et al.*, 2024). Existem diversos tipos de cal para construção, sendo a cal viva e a cal hidráulica as mais utilizadas.

3.1.3.1. Cal Viva

A cal viva é um aglomerante inorgânico que reage fortemente com a água, transformando-se em cal apagada. Essa reação exotérmica libera grande quantidade de calor e provoca um aumento significativo de volume de 3 a 5 vezes. A quantidade de água utilizada na hidratação influencia a consistência da cal apagada, se a quantidade de água for insuficiente, a cal apagada resulta em pó. Esse processo conhecido como extinção ou apagamento, exige cuidados devido à liberação de calor que pode atingir temperaturas de 90°C a 120°C e o hidróxido resultante designa-se por cal extinta ou hidratada.



A cal viva é comumente utilizada na pintura de paredes exteriores, pois ela funciona como um escudo de proteção para a alvenaria, já que previne o aparecimento de fungos e bolores e também como fertilizante na agricultura. Na construção civil, em geral, ela é extinta antes de sua utilização nas argamassas.

Foi utilizada cal viva em pó da marca portuguesa Lacrilar e está em conformidade com o regulamento EC 1907/2006 (REACH) e EU 2015/830 conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Características físico-químicas da cal viva (Lacrilar, 2023)

Características da Cal Viva		
Composição química	Óxido de Cálcio - CaO ₃	≥ 81%
	Estado Físico	Sólido
	Aspeto	Pó Fino
	Cor	Branco
	Odor	Inodoro
Características físicas	Peso molecular	56,08 g/mol
	Ponto de Fusão	≥ 450°C
	Densidade relativa	3,31
	Solubilidade na água	1,3 kg/m ³ a 20°C
	pH	12,3
	Temperatura da Reação Exotérmica com a Água	90°C - 120°C
	Massa Volúmica	3310 kg/m ³ a 20°C

3.1.3.2. Cal Hidratada

O hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), também conhecido como cal hidratada ou cal apagada, é produzido pela reação do óxido de cálcio com água (equação 2). A cal hidratada possui diversas aplicações, como na fabricação de rebocos, cimentos, tintas, produtos de borracha dura, produtos petroquímicos e no curtimento de couro.



Foi utilizada cal hidratada da marca portuguesa Calcidrata com sua respectiva ficha técnica conforme a Tabela 10.

Tabela 10 – Características físico-químicas da cal hidratada (Calcidrata, 2022)

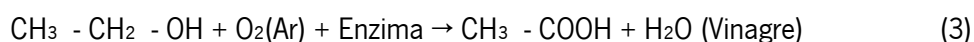
Características da Cal Hidratada		
Composição química	Hidróxido de Cálcio - Ca(OH)_2	$\geq 80\%$
	Sulfatos - SO_3	$\leq 2\%$
	Óxido de Magnésio - MgO	$\leq 5\%$
	Dióxido de Carbono - CO_2	$\leq 7\%$
Características físicas	Estado Físico	Sólido
	Aspeto	Pó Fino
	Cor	Branco a Bege
	Odor	Inodoro
	Peso molecular	74,09 g/mol
	Ponto de Fusão	$\geq 450^\circ\text{C}$ (resultado de estudo, método EU A.1)
	Densidade relativa	2,24 (resultado de estudo, método EU A.3)
	Solubilidade na água	1844,9 mg/l (resultado de estudo, método EU A.6)
	pH	12,4 (solução saturada a 20°C)
	Temperatura de decomposição	Quando aquecido acima de 580°C , o hidróxido de cálcio decompõe-se produzindo óxido de cálcio (CaO) e água (H_2O).
	Massa Volúmica	300 – 800kg/m ³ a 20°C

3.1.4. Ácido Acético em Vinagre

O ácido acético, também conhecido como ácido etanoico, é um ácido alifático monocarboxílico, com a fórmula CH_3COOH . É considerado um ácido fraco em solução, porém corrosivo, e mistura-se com a água facilmente. Ele pode ser obtido pela oxidação de líquidos que contêm álcool com o oxigênio do ar, por destilação seca da madeira, por adição catalítica de água ao acetilo e posterior oxidação do acetaldeído obtidos. É um reagente químico importante e amplamente utilizado na indústria química para a produção de politereftalato de etila (PET), produtos farmacêuticos, de limpeza, inseticidas e no fabrico de tintas e em aromatizantes, como solvente.

Neste trabalho o ácido acético (CH_3COOH) foi empregue por meio da sua concentração em vinagre a 6% de vinho branco de marca nacional e conforme descrito na embalagem do fabricante, a acidez total do líquido é expressa em 6g/100 ml de ácido acético. Ele é obtido exclusivamente do vinho pelo processo biológico de fermentação acética e essa reação ocorre a partir de um microrganismo denominado *Mycoderma aceti*,

responsável por produzir a enzima alcooloxidase que catalisa soluções alcoólicas, produzindo a solução aquosa de vinagre (Decreto-Lei n.º 174/2007, 2007), que é expressa na reação química abaixo, Equação 3.



O ácido acético em vinagre utilizado possui as características físico-químicas abaixo na Tabela 11.

Tabela 11 – Características físico-químicas do Ácido Acético em Vinagre (ECHA, 2006)

Características do Ácido Acético em Vinagre		
Composição química	CH ₃ COOH	=6%
	H ₂ O	=94%
Características físicas	Estado Físico	Líquido
	Cor	Incolor
	Odor	Pungente
	Peso molecular	60,05 g/mol
	Ponto de Fusão	16,6°C
	Ponto de Ebulição	117,9°C
	Massa Volúmica	1045 kg/m ³ a 25°C
	Solubilidade na água	602,9 g/l (solúvel em água, álcool, acetona, benzeno e outros solventes orgânicos)
	pH	1.0M = 2.4, 0.1M = 2.9, 0.01M = 3.4
	Viscosidade	1.056 MPa s a 25 °C
Classificação UE		Corrosivo (C) Inflamável (F)

3.1.5. Água

A água utilizada na produção das argamassas foi proveniente do abastecimento público da cidade de Guimarães. Segundo o fornecedor, Vimágua, no relatório do 1º trimestre de 2024 indicou que o pH da água utilizada variou de 6,9 a 8,6. De acordo com a norma NP EN 196-1, esta água está em conformidade com os padrões exigidos e adequada para o fabrico de argamassas.

3.1.6. Areia

Foi utilizada uma areia natural siliciosa com o nome comercial de S40/45, proveniente da região de Rio Maior, em Portugal e fornecida pela empresa do Grupo Parapedra, assim como a ficha técnica de acordo com a Figura 19.

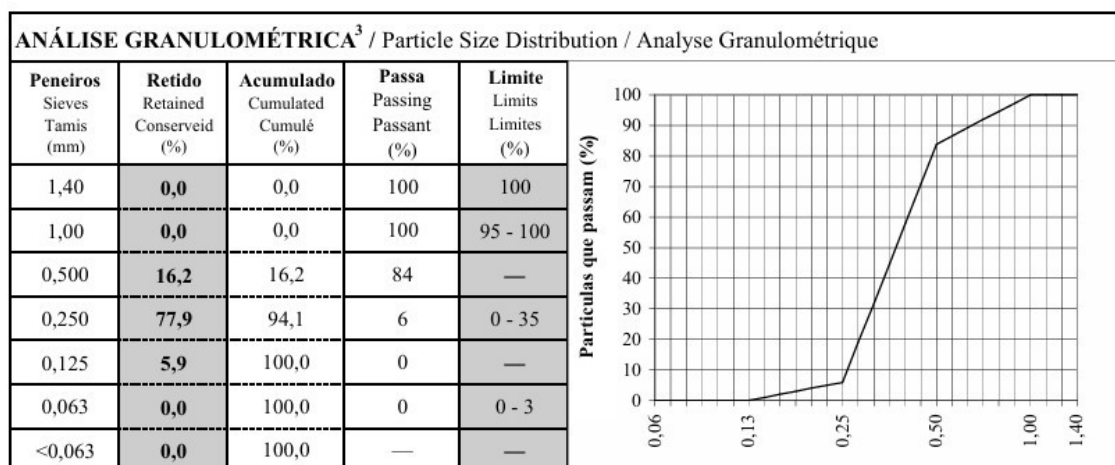
Figura 19 – Características físico-químicas da areia (PARAPEDRA, 2021)

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS / Physical Specifications / Caractéristiques Physiques		
PH	7	ISO 787/9
DUREZA MOHS / Mohs Hardness / Dureté Mohs	7	—
BRANCURA / Whiteness / Blanchéur	L* 82,5	Minolta CR300
DENSIDADE APARENTE / Non Compacted Bulk Density / D.A. Non Tassée	1,58 g/ml	EN 12902
MASSA VOLÚMICA / Particle Density / Masse Volumique	2,62 Mg/m³	EN 1097-6
ÍNDICE de REFRAÇÃO / Refractive index / Indice de Réfraction	1,55	—
HUMIDADE ¹ / Moisture / Humidité	3 - 5 %	DIN 53198
CORTE SUPERIOR / Top Cut / Coupure	1 mm	—

¹ Disponível em seco / Available without Moisture / Disponibles sans Humidité

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS ² / Chemical Specifications / Caractéristiques Chimiques									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
99,4	0,05	< 0,025	0,02	0,06	0,20	0,02	0,02	0,01	0,00

² F.R.X. / X-Ray Fluorescence / Fluorescence des Rayons-X



³ EN 933-1

3.2. Estudo das composições

3.2.1 Campanha exploratória

As primeiras misturas da campanha experimental tiveram como objetivo verificar a reatividade das poeiras de cal com a água e a sua combinação com cal e areia. Foram testadas argamassas com diferentes percentagens de cal, com dois traços diferentes e dois processos de cura.

Esta 1ª etapa da pesquisa foi baseada em experimentação, buscando otimizar o uso desses materiais e compreender melhor seu comportamento. O trabalho experimental exploratório foi iniciado utilizando apenas poeiras de cal e cal hidratada no traço 1:3:2 (ligante:areia:água) em volume. Inicialmente, foram definidas duas amassaduras como referências, uma com 100% de poeiras e outra com 100% de cal. Nessa etapa, foi usada uma areia com granulometria de 0 a 2mm e nenhum material foi calcinado, somente colocado em estufa por no mínimo 24 horas para retirar a humidade dos materiais e garantir resultados mais precisos. A Figura 20 resume esta etapa do trabalho.



Figura 20 – Resumo da 1ª Etapa da campanha exploratória

Após realizar a mistura e o ensaio de espalhamento, as misturas foram despejadas em moldes pequenos de 20x20x20mm³ e alocadas na câmara húmida ($\pm 20^{\circ}\text{C}/87\%\text{HR}$) por 28 dias. Durante o período de cura observou-se o comportamento dos provetes. Todos os provetes de referência desintegraram-se durante o processo de desmoldagem (Figura 21). Assim, não foi possível realizar os ensaios de caracterização mecânica. É provável que este comportamento esteja relacionado com as condições de cura adotadas nesta fase.



Figura 21 – Provetes de referência desintegrados após desmoldagem

Os ensaios seguintes foram dos provetes contendo diferentes percentuais de poeiras (10%, 20%, 40% 60% e 80%) nas amassaduras. Estes percentuais foram utilizados em substituição a cal hidratada. Após realizar a mistura e o ensaio de espalhamento, as massas foram despejadas em moldes pequenos de 20x20x20mm³ e alocadas na câmara húmida por 5 dias. Em seguida os provetes foram desmoldados e mantidos por mais 2 dias na câmara húmida ($\pm 20^{\circ}\text{C}/87\%\text{HR}$) e mais 21 dias à temperatura ambiente ($\pm 22^{\circ}\text{C}/60\text{-}70\%\text{HR}$) como visto na Figura 22.



Figura 22 – Provetes com percentuais de poeiras após desmoldagem

Nesta 2ª etapa, nenhum material foi calcinado, apenas colocados em estufa por no mínimo 24 horas para retirar a humidade dos materiais e garantir resultados mais precisos. A Figura 23 resume esta etapa do trabalho.

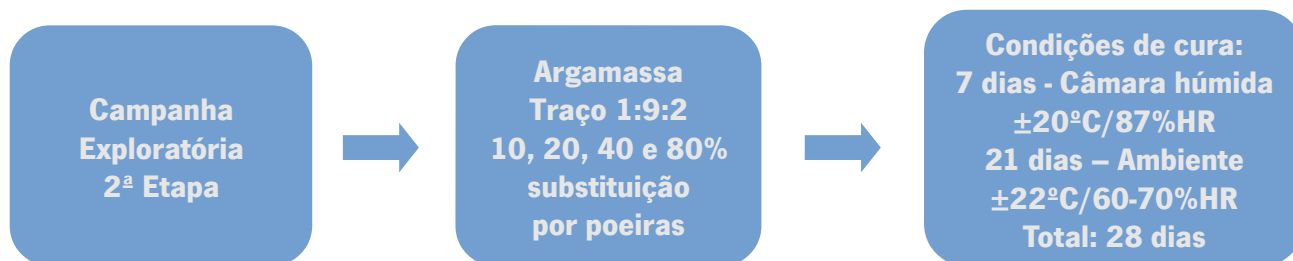


Figura 23 – Resumo da 2ª Etapa da campanha exploratória

Mesmo alterando as condições de cura em relação à 1ª etapa os provetes com estas percentagens de substituição não apresentaram condições para realização de ensaios mecânicos (Figura 24).



Figura 24 – Provetes desintegrados após 28 dias de cura

Estas pesquisas iniciais deixaram evidente a necessidade de alterar as percentagens de incorporação e de testar a calcinação do material estudado. Outras abordagens foram analisadas e implementadas no decorrer do trabalho experimental, como por exemplo o ajuste do traço (relação ligante/areia).

Na 3ª etapa, o traço foi ajustado para 1:2:0,5 (ligante:areia:água) e testado dois tipos de areia com granulometria diferente, uma com areia na granulometria de 0 a 2 mm e outra areia de granulometria fina, menor que 1 mm, nomeadamente, areia natural siliciosa com o nome comercial de S40/45.

Foram definidas duas amassaduras como referências de cal viva, uma com areia média e outra com areia fina. Após realizar as misturas e o ensaio de espalhamento, as massas foram despejadas em moldes pequenos de 50x50x50mm³ e alocadas à ambiente de laboratório ($\pm 22^{\circ}\text{C}/60\text{-}70\%\text{HR}$) até a realização dos ensaios de flexão e compressão aos 28 dias, que demonstraram que os provetes com areia fina obtiveram melhores resultados e a partir daí, foi definido a utilização da areia S40/45. A Figura 25 resume esta etapa do trabalho.



Figura 25 – Resumo da 3ª Etapa da campanha exploratória

Na 4ª etapa, a cal hidratada foi substituída pela cal viva e adicionado a solução de água com “vinagre processado com conchas” (Vpc) como agente de reação, ou seja, vinagre em que as conchas foram parcialmente dissolvidas formando acetato de cálcio. O intuito desta combinação era aumentar a reatividade com cal viva e acelerar o início de presa e o processo de carbonatação com o uso do acetato de cálcio presente no Vpc. O acetato de cálcio comercial é usado como aditivo com efeito acelerador de presa no betão e na medicina como fonte de cálcio para prevenir a osteoporose (PATEL, 2024).

O processo de dissolução de calcário com ácidos e posterior geopolimerização já foi referido por Davidovits *et al.* (1981) para composição de geopolímeros à base de compostos de soda, sílica e alumina. No entanto, parece ainda não ter sido testado para preparação de argamassas, sobretudo sem recorrer a geopolimerização ou a calcinação.

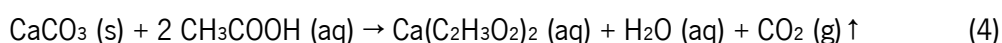
O traço mudou para 1:2:0,7 (ligante:areia:líquido) e foram definidas duas amassaduras, uma utilizando água e outra a solução V (50% Vpc + 50% Água). Nessa etapa, a cal viva foi empregue com a finalidade de aproveitar as suas propriedades plásticas, facilitando a trabalhabilidade da argamassa fresca e proporcionando maior rigidez ao produto final, devido à carbonatação. De modo geral, a cal viva possibilita a

redução de problemas relacionados a fissuras por retração e contribui para a resistência mecânica das argamassas.

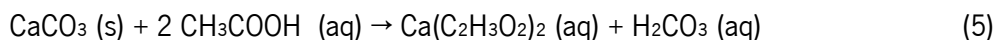
O emprego do vinagre neste estudo foi baseado no trabalho realizado por Monteiro (2022), que a partir da utilização de conchas trituradas, submeteu elas à ação do vinagre. O objetivo foi investigar a reação química, observando a dissolução do cálcio e a formação de cristais de acetato de cálcio, acompanhada pela liberação de dióxido de carbono (CO₂). Em seguida, realizou ensaios variando as proporções de vinagre em relação ao ligante (conchas em pó) e a água (relação água/ligante). Não ficou claro no estudo se as conchas submetidas ao vinagre foram transformadas em pó e utilizadas nas amassaduras e por quanto tempo durou esta ação.

Com o intuito de obter melhores resultados em relação ao estudo citado, optou-se por utilizar o vinagre de forma diferente. O vinagre utilizado nas amassaduras foi inicialmente adicionado num balde de conchas inteiras higienizadas e secas, e deixado por 48h na proporção de 1 litro para 500g de conchas. Retirado esse líquido procedeu-se de forma a diluir em 50% de água, formando a Solução V para ser utilizada nas amassaduras como a agente de reação. As conchas foram secas a ambiente e posteriormente calcinadas.

No processo conhecido como acidificação, o ácido acético (CH₃COOH) do vinagre reage com o carbonato de cálcio (CaCO₃), uma substância de característica básica, presente na superfície da concha. Ao entrar em contato, essas duas substâncias irão reagir, liberando assim dióxido de carbono (CO₂), que irá se desprendendo aos poucos da superfície da casca da concha. O restante do ácido e da base irão realizar neutralização, formando água (H₂O) e um sal, chamado Acetato de Cálcio (Ca(C₂H₃O₂)₂) criando uma suspensão parecida com espuma que ficará em meio ao vinagre, expressada na reação química a seguir:



Ou



Após realizar as misturas e o ensaio de espalhamento, as massas foram despejadas em moldes maiores de 40x40x160mm³. A mistura com a solução V foi dividida em 2 moldes, sendo que um molde foi alocado na câmara húmida (±20°C/87%HR) por 5 dias e o outro à ambiente (±22°C/60-70%HR) juntamente com o molde da mistura com água até a realização dos ensaios de flexão e compressão aos 28 dias. A Figura 26 resume esta etapa do trabalho.

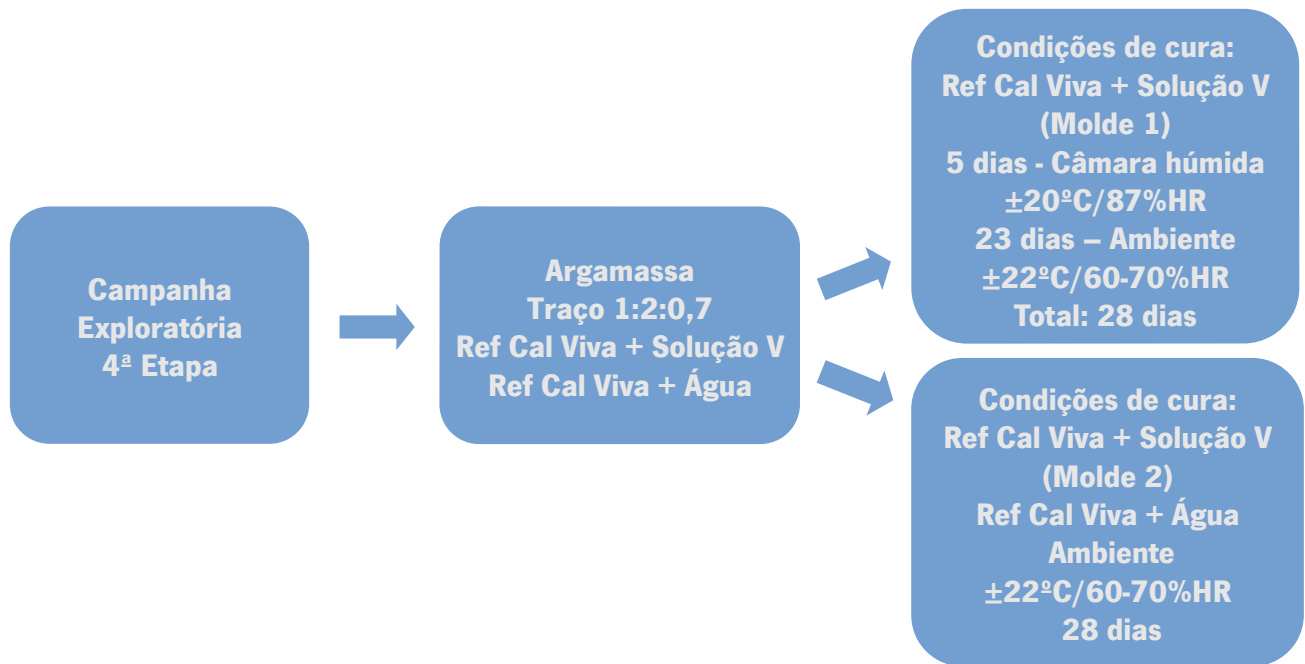


Figura 26 – Resumo da 4ª Etapa da campanha exploratória

Os moldes que ficaram na câmara húmida demoraram mais tempo a serem desmoldados do que os outros, e nos resultados dos ensaios mecânicos considerou-se as condições de cura não representou relevância na resistência. Os provetes com apenas água tiveram resultados muito abaixo dos provetes com solução V, e por isso, foi definido a utilização do ácido acético em vinagre com líquido das amassaduras. De maneira geral os valores obtidos de todos os provetes foram superiores com a troca do ligante e portanto definiu-se pela utilização da cal viva nas amassaduras.

Percebeu-se que apesar de obter resultados satisfatórios para dar continuidade ao trabalho, o traço utilizado ainda não demonstrava ser o ideal, havia líquido a mais nas amassaduras e portanto foi definido o traço de 1:2:0,5 (ligante:areia:líquido).

Uma vez que se está a trabalhar com materiais ainda pouco estudados, a campanha exploratória realizada foi essencial para definir os parâmetros iniciais de trabalho. Neste sentido, ao final desta etapa, optou por trabalhar com:

- Traço 1:2:0,5 (ligante:areia:líquido)
- Cal viva
- Areia fina
- Solução V (50% Vpc + 50% Água)
- Cura em ambiente de laboratório ($\pm 22^{\circ}\text{C}/60\text{-}70\%\text{HR}$)

3.2.2 Composições estudadas

Estabelecidos os principais parâmetros, partiu-se para a definição das composições a estudar, tendo em conta os diferentes ligantes: cal viva, poeiras de cal, poeiras de cal calcinadas, conchas em pó, conchas em pó calcinadas; e as diferentes fases líquidas: água, solução V (50% Vpc + 50% água). As composições estudadas, bem como suas nomenclaturas, estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Composições estudadas

Argamassa	Traço	Materiais
REF CAL	1:2:0,5	Cal Viva (Cal) + Areia (AR) + Solução (V)
REF CAL_A	1:2:0,5	Cal Viva (Cal) + Areia (AR) + Água (A)
P25%	1:2:0,5:0,25	75% Cal Viva (Cal) + Areia (AR) + Solução (V) + 25% Poeiras de Cal (P)
P50%	1:2:0,5:0,50	50% Cal Viva (Cal) + Areia (AR) + Solução (V) + 50% Poeiras de Cal (P)
P90%	1:2:0,5:0,90	10% Cal Viva (Cal) + Areia (AR) + Solução (V) + 90% Poeiras de Cal (P)
P100%	1:2:0,5	Poeiras de Cal (P) + Areia (AR) + Solução (V)
PQ100%	1:2:0,5	Poeiras de Cal (P) Calcinada (Q) + Areia (AR) + Solução (V)
PQ100%_A	1:2:0,5	Poeiras de Cal (P) Calcinada (Q) + Areia (AR) + Água (A)
C25%	1:2:0,5:0,25	75% Cal Viva (Cal) + Areia (AR) + Solução (V) + 25% conchas em pó (C)
C50%	1:2:0,5:0,50	50% Cal Viva (Cal) + Areia (AR) + Solução (V) + 50% conchas em pó (C)
C90%	1:2:0,5:0,90	10% Cal Viva (Cal) + Areia (AR) + Solução (V) + 90% conchas em pó (C)
C100%	1:2:0,5	conchas em pó (C) + Areia (AR) + Solução (V)
CQ25%	1:2:0,5:0,25	75% Cal Viva(Cal) + Areia(AR) + Solução(V) + 25% conchas em pó(C) Calcinada(Q)
CQ50%	1:2:0,5:0,50	50% Cal Viva(Cal) + Areia(AR) + Solução(V) + 50% conchas em pó(C) Calcinada(Q)
CQ90%	1:2:0,5:0,90	10% Cal Viva(Cal) + Areia(AR) + Solução(V) + 90% conchas em pó(C) Calcinada(Q)
CQ100%	1:2:0,5	conchas em pó (C) Calcinada (Q) + Areia (AR) + Solução (V)
CQ100%_A	1:2:0,5	conchas em pó (C) Calcinada (Q) + Areia (AR) + Água (A)

OBS: Solução (V): 50% Vpc + 50% Água

Na Tabela 13 os materiais são apresentados em kg/m³.

Tabela 13 – Composições estudadas com o quantitativo dos materiais em Kg/m³

Argamassa	Traço	Composição (kg/m ³)						
		Cal Viva (Cal)	Areia (AR)	Solução (V) 50%Vinagre + 50%Água (1ª Fase)	Água (A) (1ª Fase)	conchas em pó (C)	Conchas em pó Calcinada (CQ)	Poeiras de Cal (P) Poeiras de Cal Calcinada (CQ)
REF CAL	1:2:0,5	648	1295	324				
REF CAL_A	1:2:0,5	639	1278		319			
P25%	1:2:0,5:0,25	486	1295	324				133
P50%	1:2:0,5:0,50	324	1295	324				266
P90%	1:2:0,5:0,90	65	1295	324				479
P100%	1:2:0,5		1242	311				621
PQ100%	1:2:0,5		1261	315				631
PQ100%_A	1:2:0,5		1244		311			622
C25%	1:2:0,5:0,25	486	1295	324		133		
C50%	1:2:0,5:0,50	324	1295	324		265		
C90%	1:2:0,5:0,90	65	1295	324		477		
C100%	1:2:0,5		1242	310		621		
CQ25%	1:2:0,5:0,25	486	1295	324			114	
CQ50%	1:2:0,5:0,50	324	1295	324			229	
CQ90%	1:2:0,5:0,90	65	1295	324			411	
CQ100%	1:2:0,5		1198	299			599	
CQ100%_A	1:2:0,5		1182		296		591	

OBS: Solução (V): 50% Vpc + 50% Água

3.2.2. Preparação das misturas

O processo de amassadura das argamassas foi realizado numa misturadora conforme a norma NP EN 196-1, disponível no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho. As misturas tinham volumes definidos destinando-se a 2 moldes de 40x40x160mm³. Ressalta-se que as conchas em pó e as poeiras de cal possuem, em estado fresco, boa plasticidade e trabalhabilidade, tanto misturadas à água quanto a solução V, sendo possível tal feito.

De maneira geral, o processo foi dividido em duas fases e consistiu em algumas etapas como a preparação dos materiais, onde os componentes foram separados conforme à quantidade estabelecida e com o auxílio de

uma balança com precisão por décimos em grama (g) (Figura 27). Na primeira fase, misturou-se na misturadora os secos (ligantes e areia) por cerca de 1 minuto, adicionou o líquido gradualmente em 1 minuto e misturou por mais 30 segundos, depois aumentou-se a velocidade da misturadora e misturou por mais 30 segundos (Figura 28a).



Figura 27 – Materiais separados e pesados a serem misturados

Em alguns casos, houve a necessidade de um menor tempo de mistura, devido a reação exotérmica da cal com o líquido ou mais rotações quando houve a necessidade de adicionar mais líquido (Figura 28b). Todas as amassaduras que continham cal, descansaram por 24h e em seguida realizado a segunda fase, em que as misturas, que viraram pó novamente, foi adicionado mais líquido de acordo com a necessidade, e misturados até obter uma trabalhabilidade ótima, como pode ser visto na Figura 28 e na Tabela 14.

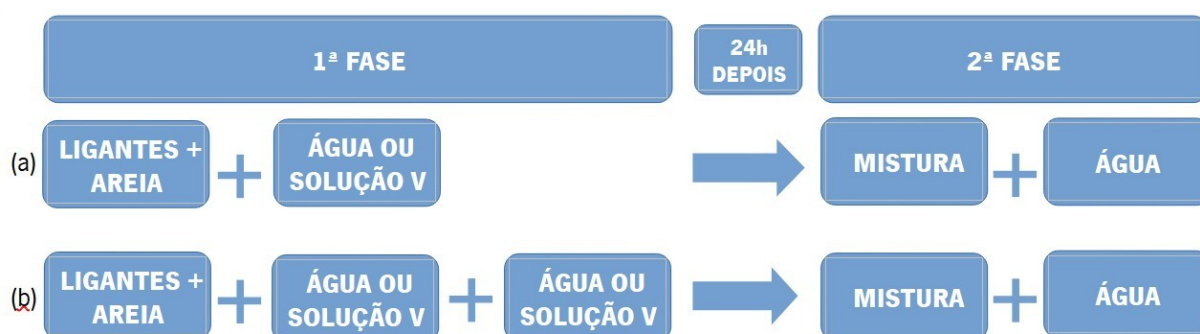


Figura 28 – Fases das amassaduras

Tabela 14 – Composição das amassaduras e relação líquido/ligante

Argamassa	Composição (kg)								Adições (kg)			Razão Lq/L		
	CAL	AR	V (1ª)	A (1ª)	C	CQ	P	PQ	+A (1ª)	+V (1ª)	+A após 24h (2ª)	(1ª)	(2ª)	(1ª+ 2ª)
REF CAL	1,09	2,19	0,55								1,20	0,50	1,10	1,60
REF CAL_A	1,08	1,08		0,54							1,39	0,50	1,29	1,79
P25%	0,82	2,19	0,55		-	-	0,23				1,09	0,52	1,05	1,57
P50%	0,55	2,19	0,55		-	-	0,45				0,38	0,55	0,38	0,93
P90%	0,11	2,19	0,55		-	-	0,81				0,19	0,60	0,21	0,80
P100%		2,13	0,53				1,07			0,12		0,62		0,62
PQ100%		2,13	0,53					1,07		0,11		0,60		0,60
PQ100%_A		1,87		0,65				0,94	0,13			0,84		0,84
C25%	0,82	2,19	0,55		0,22	-	-				0,87	0,52	0,84	1,36
C50%	0,55	2,19	0,55		0,45	-	-				0,10	0,55	0,10	0,65
C90%	0,11	2,19	0,55		0,81	-	-				0,15	0,60	0,16	0,76
C100%		2,02	0,51		1,01					0,08		0,58		0,58
CQ25%	0,82	2,19	0,55		-	0,19	-				1,07	0,54	1,06	1,60
CQ50%	0,55	2,19	0,55		-	0,39	-				0,92	0,59	0,99	1,57
CQ90%	0,11	2,19	0,55		-	0,70	-				0,36	0,68	0,44	1,13
CQ100%		2,02	0,51			1,01				0,18		0,68		0,68
CQ100%_A		2,00		0,50		1,00			0,40			0,90		0,90

3.3 Ensaios Realizados

Os materiais utilizados foram inicialmente caracterizados, de acordo com a necessidade e a inexistência de dados prévios. A partir dos ensaios citados abaixo, foi possível conhecê-los melhor, o que auxiliou na definição e preparação das misturas estudadas:

- Ensaios de Massa Volúmica (LNEC E64:1979)
- Análises de Granulometria a Laser
- Ensaios de Termogravimetria (ATG)
- Ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX)

Após a produção da amassadura, o material foi avaliado no seu estado fresco a partir do seguinte ensaio:

- Espalhamento (EN 1015-3:1999)

Os ensaios listados abaixo são referentes ao estado endurecido da argamassa, tendo sido avaliados o comportamento mecânico e alguns indicadores de durabilidade, considerando os diferentes tempos de cura entre 28 e 60 dias:

- Densidade Aparente (EN 1015-10:1999)
- Resistência à Flexão (EN 1015-11:1999)
- Resistência à Compressão (EN 1015-11:1999)
- Absorção de Água por Capilaridade (EN 1015-18:2002)
- Absorção de Água por Imersão (LNEC E394:1993)
- Carbonatação Acelerada (LNEC E 391:1993)

3.3.1. Massa Volúmica

A massa volúmica ou densidade do material é definida pelo quociente entre a massa e o volume desse material. Determina-se a massa de uma quantidade definida da amostra, previamente seca, e o volume correspondente num voluminímetro (densímetro de Le Châtelier) com características específicas e a utilização de um líquido auxiliar.

De acordo com a E LNEC 64-1979, o ensaio deve ser realizado a temperatura ambiente, $20 \pm 5^\circ\text{C}$, e a amostra colocada em estufa à 105°C por pelo menos 24h antes do ensaio. Foi definido entre 50g e 60g de cada material a ser testado e no voluminímetro coloca-se primeiramente o líquido, no caso gasolina, entre 0 e 1 na escala, aguarda por 15min mergulhado em água, para estabilização e mede-se o valor da escala (Figura 29a). Em seguida, derrama-se cuidadosamente através de um funil, a amostra no recipiente e aguarda por

mais 15min mergulhado em água, para estabilização (Figura 29b) e mede-se o valor da escala correspondente ao nível do líquido (Figura 29c). A densidade é determinada seguindo a Equação 6:

$$D = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (6)$$

- D = densidade em g/cm³;
- m = massa da amostra seca em gramas;
- V₁ = volume lido no voluminímetro contendo somente o líquido auxiliar, em centímetros cúbicos;
- V₂ = volume lido no voluminímetro contendo o líquido auxiliar e a amostra, em centímetros cúbicos;



(a)



(b)



(c)

Figura 29 – Resumo do ensaio de massa volúmica: (a) V₁; (b) Materiais no Châtelier; (c) V₂

3.3.2. Análise Granulométrica a Laser

A análise granulométrica consiste na determinação do tamanho das partículas que constituem o material e na sua distribuição em determinados intervalos. Representada por uma curva da relação da dimensão dos grãos e nas respetivas percentagens de ocorrência, de modo a possibilitar as características físicas do material.

O ensaio de granulometria foi realizado nas conchas em pó (resultante do processo de moagem apresentado no item 3.1.1) e no pó de forno de cal. O estudo da granulometria foi feito no laboratório da Escola de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC), através de uma unidade

automatizada (a laser) dispersora de partículas por via húmida, da marca Malvern modelo Masterziser 3000 - Hydro LV (Figura 30).

O equipamento dispersa cuidadosamente pequenas amostras de pó (foram utilizados cerca de 5 g) em água destilada, utilizando ondas sonoras para separar as partículas. Isso resulta em uma suspensão estável e dispersão uniforme, permitindo a medição precisa dos grãos. Para evitar a sedimentação, uma bomba centrífuga é utilizada. A análise granulométrica do material é realizada através de um software em computador e após cinco leituras consecutivas, é possível determinar a densidade e as classes de tamanho dos grãos, podendo-se calcular a média das leituras para obter a representação gráfica final (MONTEIRO, 2022).



Figura 30 – Equipamento Masterziser 3000 - Hydro LV

3.3.3. Análise Termogravimétrica (ATG)

A Análise Termogravimétrica (ATG), ou TGA (Thermogravimetric analysis), é um ensaio no qual é realizado o monitoramento da perda ou da agregação de massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo, em condições térmicas e atmosféricas controladas. O equipamento de análise termogravimétrica é composto basicamente por uma termobalança, instrumento que permite a pesagem contínua da amostra em função da temperatura, ou seja, à medida que ela é aquecida ou resfriada, sendo assim, o ensaio analisa os fenómenos de libertação ou absorção de calor, por medição da diferença de temperaturas (ΔT), entre a referência termicamente inerte e a amostra a ser testada. Os principais componentes da termobalança são: balança registradora, forno, suporte de amostra e sensor de temperatura, programador de temperatura do forno, sistema registrador e controle da atmosfera do forno.

A ATG das conchas em pó e em pedaços e do pó de forno de cal, foram realizadas no Laboratório da Escola de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC) utilizando da marca Netzsch, modelo STA 449 F3 Júpiter (Figura 31), com uma termobalança de alta precisão (precisão de 0,0001mg) e com um conjunto de dois porta-amostras de alumina: um para receber a amostra a ser testada e outro, de referência, com uma amostra de alumina (Al_2O_3) previamente calcinada a 1600 °C.



Figura 31 – Equipamento STA 449 F3 Júpiter

3.3.4. Fluorescência de Raios X (FRX)

O ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) é uma ferramenta para a análise química dos mais diversos materiais. Este ensaio permite a análise qualitativa e quantitativa da composição química de uma amostra, de forma rápida e precisa e de caráter não destrutivo. Sua ampla aplicação e capacidade de identificar vários elementos tornam essa ferramenta indispensável em pesquisas (Figura 32).



Figura 32 – Equipamento para ensaio de FRX (AFINKO, 2014)

3.3.5. Espalhamento

A trabalhabilidade de uma mistura no estado fresco refere-se à sua facilidade em ser misturada, colocada e compactada. Alguns autores também consideram a capacidade de escoamento como uma propriedade importante para a trabalhabilidade. O estudo da deformação e escoamento de um material define sua reologia, termo definido por Bingham em 1929, derivado da palavra grega *rhein* que significa escorregar. Infelizmente, não existe um ensaio direto para medir a trabalhabilidade de um material ligante, mas existe ensaios para medir diferentes partes relacionadas ao ligante (COELHO,2009).

O ensaio de espalhamento permite avaliar a influência da quantidade de líquido e da razão Líquido/Ligante (Lq/L), assim como da quantidade de ligantes e do diâmetro de espalhamento, no comportamento das argamassas.

As misturas foram submetidas primeiramente ao ensaio de espalhamento, segundo a norma EN 1015-3, em que uma porção da mistura é colocada dentro de um molde em formato de cone truncado, posicionado no centro da mesa vibratória. Utilizando um pilão, a argamassa é compactada por meio de 10 leves batidas. Em seguida, o molde é retirado. A mesa, por sua vez, é equipada com uma alavanca que a eleva e abaixa rapidamente. Em seguida, a massa é submetida a 15 golpes de vibração, para garantir uma melhor distribuição da argamassa sobre a mesa de consistência e então tira-se as medidas, em que o diâmetro de espalhamento é calculado a partir da média aritmética das duas leituras ortogonais (d_1 e d_2) no centro da mistura, por meio de uma régua de medição (Figura 33 e 34).

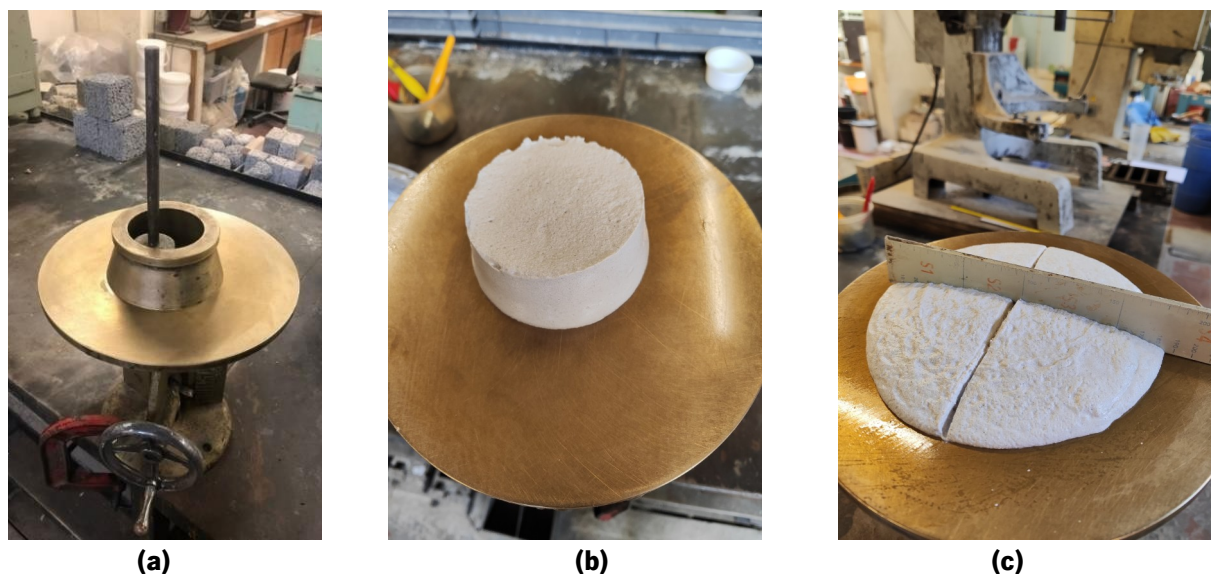


Figura 33 – (a) Mesa de Consistência, (b) Mistura após moldar no cone, (c) Medição após vibração

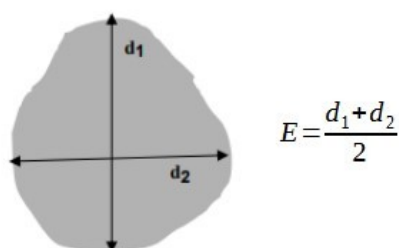


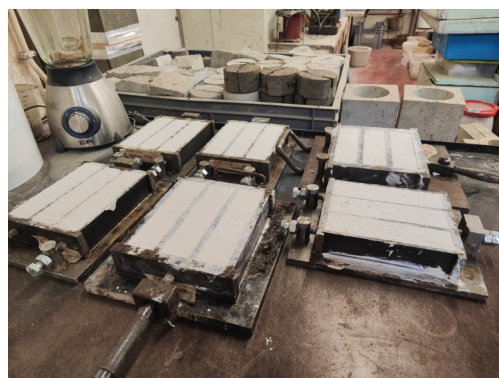
Figura 34 – Cálculo para diâmetro de espalhamento, adaptado de (MONTEIRO, 2022)

3.3.6. Moldagem e Cura

As misturas foram distribuídas em moldes 40x40x160mm³. Inicialmente os moldes são preenchidos até a metade, em seguida levados a mesa vibratória e recebe 60 golpes de vibração (Figura 35a) para evitar a formação de vazios dentro dos provetes, então mais mistura é despejada no molde e repete o processo na mesa vibratória. Os moldes são deixados descansar (Figura 35b) para curar em ambiente de laboratório, de acordo com o definido na campanha exploratória. Os provetes permaneceram nos moldes em média cerca de 5 dias e após o desmolde, permaneceram a ambiente de laboratório até o dia dos ensaios correspondentes.



(a)



(b)

Figura 35 – (a) Mesa de Vibração, (b) Misturas nos moldes

3.3.7. Densidade Aparente

A densidade aparente é determinada segundo a norma EN 1015-10, em que o volume do provete é obtido através das três dimensões de cada prisma (comprimento, largura e espessura). Cada lado foi medido três vezes. O peso da amostra é então dividido pelo seu volume. Na sequência o provete é aproveitado para os ensaios de resistência à flexão e compressão, respectivamente, devido ao teste de densidade aparente ser não destrutivo.

3.3.8. Resistência à Flexão

O ensaio de resistência à flexão realizado consistiu em avaliar a capacidade de um provete em resistir à flexão por três pontos. Os provetes utilizados no ensaio foram produzidos em moldes de 40x40x160mm³, com três provetes para cada composição de argamassa. O equipamento utilizado é o modelo LR50K Plus da marca LOYD. As peças do aparelho são diferentes para cada tipo de ensaio, incluindo uma prensa superior de carga e dois apoios horizontais distanciados de 100 ± 0,5mm, onde o provete é posicionado (Figura 36). O ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-11. A carga de partida é de aproximadamente 15N e o ensaio procede à uma velocidade mecânica estabelecida, de 0,005mm/s, até a falha.

O resultado da resistência à flexão é calculado de acordo com a seguinte equação, arredondado para 0,1 MPa e obtido pela média aritmética dos valores individuais de cada provete, conforme a norma:

$$f = \frac{1,5 \times F \times l}{b \times d^2} \quad (7)$$

- f – Resistência à flexão (MPa)
- F – Força máxima aplicada sobre o provete (N)
- l – Distância entre os apoios (mm)
- b e d – Dimensões laterais da secção dos provetes (mm)

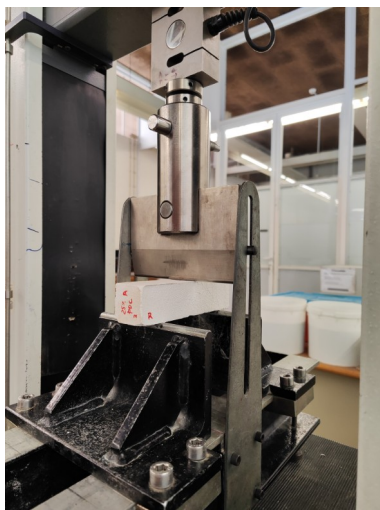


Figura 36 – Ensaio de Resistência à Flexão

3.3.9. Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão determina a carga máxima que o provete é capaz de suportar e é realizado após o ensaio de flexão, este onde o provete de dimensão $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ é partido ao meio, e uma das metades é submetida a uma força axial no ensaio seguinte. O ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-11 e o equipamento utilizado é o mesmo da flexão, modelo LR50K Plus da marca LOYD, onde os corpos de prova são posicionados em uma superfície plana e a carga é aplicada através de uma prensa, gradual e continua, até que a capacidade de resistência à força aplicada rompa a provete (Figura 37). A carga de partida é de aproximadamente 15N e o ensaio procede à uma velocidade mecânica estabelecida, de 0,005mm/s, até o rompimento. O resultado da resistência à compressão é dado pela seguinte equação:

$$C = F \times A \quad (8)$$

- C - Resistência à compressão (N/mm^2);
- F – Força máxima de compressão aplicada (N);
- A – Área da secção do provete (mm^2).

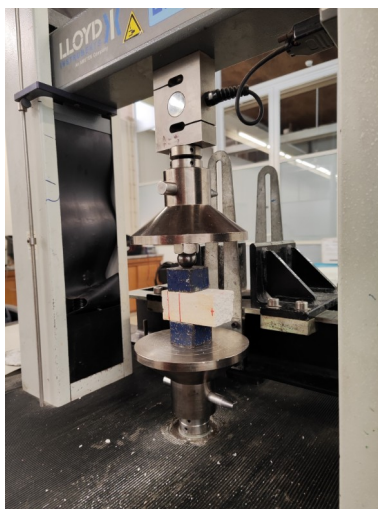


Figura 37 – Ensaio de Resistência à Compressão

3.3.10. Absorção de água por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade, segundo a norma EN 1015-18, é um procedimento que avalia o aumento de massa dos corpos de prova com a base imersa em 1 cm de água. Foram utilizadas duas metades de provetes intactos de cada mistura resultante do ensaio de resistência à flexão aos 28 dias. Os provetes foram secos em estufa à 60°C até obter massa constante, tida quando após duas pesagens consecutivas, no intervalo de 24 horas, não houver uma variação da massa acima de 0,2%. Em seguida

procedeu-se à impermeabilização das laterais com silicone, para que a água seja absorvida apenas pelas faces não impermeabilizada. Os provetes são pesados e o resultado é considerado como a massa seca (M3). São então, colocados verticalmente em um recipiente com água até altura 1cm e tampado para evitar a evaporação (Figura 38). Os provetes foram pesados aos 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 240, 1.440 e 10.080 minutos. A velocidade de absorção de água nos momentos iniciais é caracterizada pelo coeficiente de absorção de água por capilaridade, expresso em $\text{kg/m}^2 \times (\text{min})^{1/2}$. O coeficiente foi determinado, conforme a norma, entre 10 e 90 minutos e seu valor foi obtido pela média dos resultados. O restante do tempo foi utilizado para construir as curvas de absorção capilar. O resultado absorção de água por capilaridade é dado pela seguinte equação:

$$C = 0,1 \times (M_2 - M_1) \quad (9)$$

- C - Absorção de água por capilaridade $\text{kg/m}^2 \times (\text{min})^{1/2}$
- M1 – Massa do provete em 10min (g)
- M2 – Massa do provete em 90min (g)
- M3 – Massa do provete seco (g)

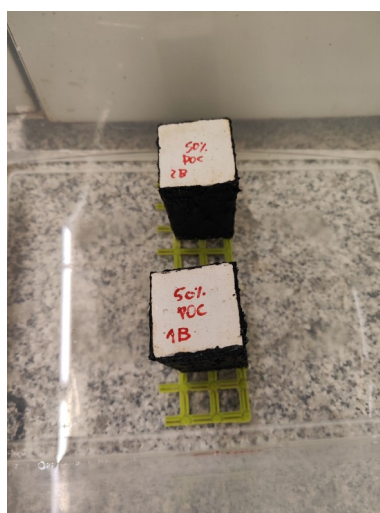


Figura 38 – Ensaio de Capilaridade

3.3.11. Absorção de água por Imersão

O ensaio de absorção de água por imersão mede a porosidade aberta de um material, comparando sua massa seca e saturada. Essa medida é crucial para avaliar sua durabilidade, pois materiais mais porosos são geralmente menos resistentes à umidade e a outros agentes degradantes.

Neste ensaio de absorção de água por imersão, os provetes utilizados foram os mesmos do ensaio de capilaridade. Com base na especificação LNEC E394 (1993) os provetes são saturados num recipiente com água a uma temperatura ambiente de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$, até atingirem a massa constante, ou seja, uma variação de massa inferior a 0,2% em medições sucessivas no intervalo de 24 horas. Em seguida, são realizadas duas pesagens, uma após ser retirado do recipiente de saturação e retirado (M1) e a segunda, quando o provete é mergulhado na balança hidrostática (M2) (Figura 39). O resultado absorção de água por imersão é dado pela seguinte equação:

$$A = \frac{M_1 - M_3}{M_1 - M_2} \times 100 \quad (10)$$

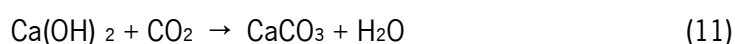
- A – Absorção de água por imersão (%)
- M1 - Massa do provete saturado no ar (g)
- M2 – Massa hidrostática do provete saturado (g)
- M3 – Massa do provete seco (g)



Figura 39 – Ensaio de Imersão

3.3.12. Carbonatação Acelerada

A carbonatação é um processo químico em que o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na mistura reage com o dióxido de carbono (CO_2) do ar, formando carbonato de cálcio (CaCO_3), através da Equação 11.



A carbonatação ocorre mesmo em ambientes rurais, com baixas concentrações de CO_2 na atmosfera, na ordem de 0,03% em volume e em grandes cidades, esta concentração pode variar entre 0,30% e, excepcionalmente, 1% (Neville, 1997). É um processo lento, que pode ser influenciado por inúmeras variáveis como, por exemplo, a humidade, a composição da mistura e a concentração de CO_2 .

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado na metade de 1 provete de cada argamassa, resultante do ensaio de flexão ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) aos 28 dias. Os provetes passaram por um período de 14 dias em ambiente de laboratório ($\pm 22^\circ\text{C}/60\text{-}70\%\text{HR}$) antes do início do ensaio. Em seguida, a fim de limitar as superfícies de exposição, 4 das 6 superfícies foram cobertas com parafina. Os provetes foram colocados na câmara de carbonatação ($60 \pm 5\% \text{ HR}$, $20 \pm 2^\circ\text{C}$, $5 \pm 0,5\% \text{ CO}_2$, LNEC E391, 1993) e mantidos até as datas de avaliação: 7, 14 e 21 dias. Para avaliar a evolução da carbonatação, foi cortado cerca de 2cm de amostra do provete ao final de cada período. A superfície fraturada na qual se pretendia determinar a profundidade de carbonatação foi pulverizada com uma solução com 1% de fenolftaleína (indicador) e 70% de álcool etílico (RILEM-CPC-18, 1988). A solução de fenolftaleína em meio com o pH inferior a 9, material carbonatado, permanece incolor. Ao contrário, quando a solução entra em contacto com um meio de pH superior a 9, apresenta uma tonalidade cor-de-rosa, Figura 40.

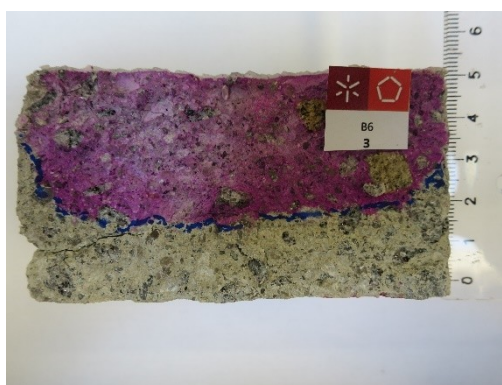


Figura 40 – Ensaio de Carbonatação Acelerada

4. Apresentação e Análise dos Resultados

4.1. Propriedades Químicas e Físicas dos Materiais

4.1.1. Massa Volúmica

O ensaio de massa volúmica foi realizado para caracterização dos resíduos estudados. Foram analisadas duas amostras de cada resíduo e como resultado, têm-se a média aritmética dos valores obtidos, Tabela 15.

Tabela 15 – Determinação da massa volúmica

Material	Densidade (Kg/m ³)
Conchas em pó (C)	2,710
Conchas em pó Calcinadas (CQ)	2,336
Poeiras de Cal (P)	2,718
Poeiras de Cal Calcinadas (PQ)	2,906

A cal viva apresenta uma densidade de 3,310 kg/m³. Os resíduos, por sua vez, mostraram-se menos densos. Ao analisar as conchas calcinadas, observou-se uma diminuição da densidade em comparação com o material inicial. Essa redução é um indicativo claro da ocorrência de perda de massa por ignição durante o processo de calcinação. Um comportamento distinto foi observado nas poeiras, que apresentaram aumento da densidade após a calcinação. Essa variação sugere que o processo de calcinação promoveu uma expansão do material, possivelmente devido à formação de novas estruturas, sendo assim, faz-se necessário mais análise sobre esse processo.

4.1.2. Análise Granulométrica

De acordo com o ensaio (Tabela 16), a média atribuída ao tamanho dos grãos das conchas em pó moído somente no Los Angeles foi de 40.4µm e das poeiras foi de 29.7µm, sendo assim, atenderam aos parâmetros estabelecidos no item 3.3.1, em utilizar os pós residuais com granulometria de até 75µm.

Tabela 16 – Determinação da granulometria

Dx	Tamanho das partículas (micron)	
	Poeiras de Cal	Conchas em pó
10	0.111 µm	0.149 µm
50	29.7 µm	40.4 µm
90	202 µm	229 µm

4.1.3. Termogravimetria (TGA)

As amostras utilizadas neste ensaio, corresponderam a conchas em pó advinda da moagem e em pedaços, e as poeiras de cal no seu aspecto natural. O objetivo da realização deste ensaio foi analisar quantidade de carbonato de cálcio (CaO_3) presente nas amostras e definir as temperaturas de calcinação de cada material. O resultado do ensaio de TGA (Figuras 41-43) demonstrou que os resíduos ensaiados possuem elevado percentual de CaO_3 , sendo que as poeiras de cal apresentam um percentual bastante semelhante à cal viva utilizada (81%, Tabela 9). As conchas apresentaram maior percentual de CaO_3 , sempre acima dos 90%, independentemente da forma (pedaços ou pó). No que se refere à perda de massa, a maior ocorre por volta dos 800°C para todas as amostras ensaiadas, sendo a concha partida em pedaços aquela onde esta perda ocorre a uma temperatura mais elevada, pouco acima dos 800°C.

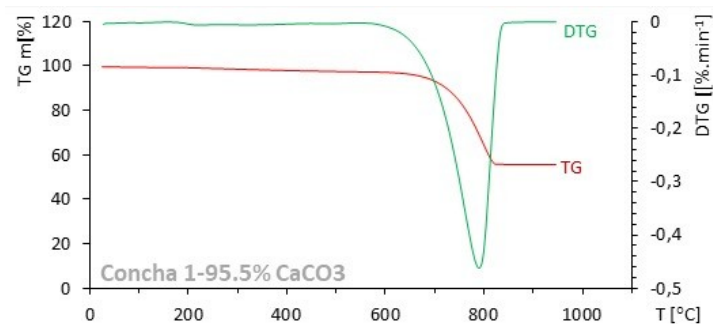


Figura 41 – ATG da Conchas em pó

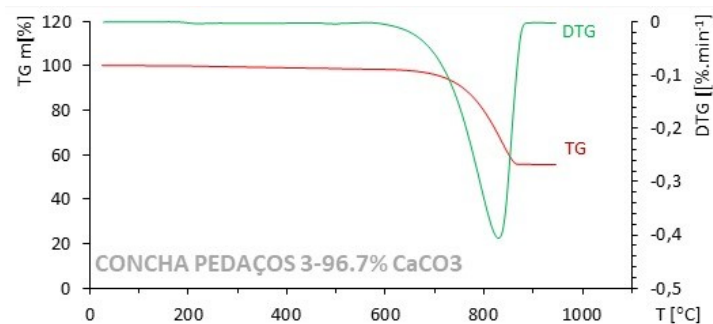


Figura 42 – ATG da Concha em pedaços

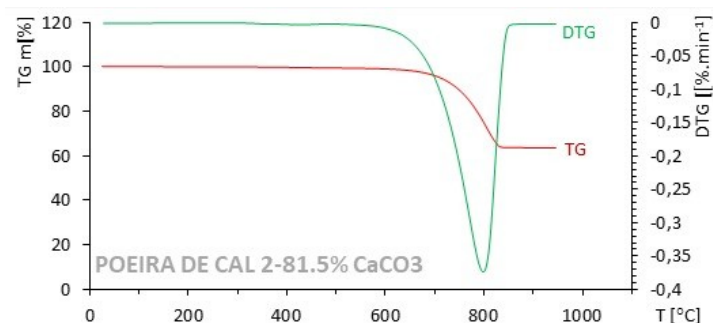


Figura 43 – ATG das Poeiras de cal

4.1.4. Fluorescência de Raios X (FRX)

De acordo com a Tabela 17, o resultado do ensaio de fluorescência por Raio X resume as composições das amostras de conchas em pó, pó de forno de cal (poeiras de cal) e da argamassa P50% (melhor resistência). Observa-se a presença do cálcio (Ca) como elemento maioritário nas composições, seguido do Fósforo (P) composto que influencia na resistência dos materiais e do Silício (Si), em que há um aumento considerável na amostra da argamassa P50% devido a areia siliciosa presente na composição. É importante salientar sobre a necessidade de fazer mais análises, uma vez que as realizadas não apresentaram valores, ainda que reduzidos de enxofre (S) nem sódio (Na), elementos que deveriam estar presentes nestes compósitos.

Tabela 17 – Resultado do ensaio de fluorescência por Raio X

Material	Compostos químicos (%)									
	Ca	P	Si	K	Ti	Cl	Mn	Sr	Fe	Outros
Poeiras de cal	77,2 0	15,8 5	5,60	0,50	0,2 5	0,22	0,16	0,10	0,05	0,07
Conchas em pó	84,8 2	7,72	6,01	0,4 6	0,28	0,2 5	0,0 1	0,3 2	0,0 9	0,04
Argamassa P50%	73,57	9,61	15,38	0,50	0,36	0,22	0,02	0,04	0,22	0,08

A análise química mostra a presença de fosforo (7,72%) na sua composição, sendo considerado um elemento comum nas conchas de bivalves e está presente na forma de pentóxido de fósforo (P_2O_5). Já nas rochas fosfáticas ou fosforitas (rochas sedimentares derivadas da deposição de animais marinhos) este valor geralmente passa os 18%, mas pode atingir 40% (CASTRO *et al.*, 2018).

Com a presença de fósforo na composição química dos dois resíduos, principalmente nas poeiras de cal (15,85% e 9,61%), como tal é provável ter ocorrido a formação de fosfato de cálcio ($Ca_3(PO_4)_2$) através da reação entre o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e ácido fosfórico (H_3PO_4) (MAESTROVIRTUALE, 2024), isso pode prejudicar a calcinação ou obtenção de CaO.

4.2. Caracterização no Estado Fresco

A utilização tanto das conchas em pó quanto das poeiras resultou em misturas homogêneas, sem grumos ou viscosidade excessiva. A finura dos materiais também favoreceu o desenvolvimento das amassaduras. Porém ao longo do trabalho, foi perceptível que as misturas produzidas com poeiras demonstraram maior coesão com a solução V, do que as misturas com conchas.

As argamassas de referência possuem apenas cal viva como ligante e misturada uma amassadura com apenas com água (A) e outra com a solução V. As amassaduras com 100% de substituição da cal por resíduos, também foram misturadas com água (A) e com solução (V).

Na Tabela 18 percebe-se que as misturas que continham solução V, necessitaram de menos líquido na composição do que aquelas que tinham apenas água, isso pode ser explicado pela capacidade do ácido acético dissolver o carbonato de cálcio, reagindo mais rapidamente. Existe a hipótese de que as grandes pedras em monumentais pré-colombianos eram artificiais, tendo sido aglomeradas com um ligante obtido pela dissolução ou desagregação de certas rochas contendo carbonato de cálcio através da ação de vários ácidos carboxílicos, como por exemplo o ácido acético (DAVIDOVITS, *et al.*, 1982).

No que se refere às argamassas com substituição de cal por conchas em pó, tendo sido todas feitas utilizando solução V, observa-se que aquelas com conchas em pó não calcinadas necessitou de menos água para obter um espalhamento semelhante. Nas argamassas com 90% de substituição da cal, houve também a necessidade de menos líquido. É provável que a relação entre o acetato de cálcio e o carbonato de cálcio, promova reações químicas mais rápidas e por isso necessitem de menos líquido para coesão.

Tabela 18 – Espalhamento das amassaduras em relação a razão Lq/L

Argamassa	Trabalhabilidade		Razão Lq/L		
	Espalhamento (cm) (1ª + 2ª Fases)	Observações visuais	(1ª Fase)	(2ª Fase)	(1ª + 2ª Fases)
REF CAL	21,5	Boa	0,50	1,10	1,60
REF CAL_A	19,5	Boa	0,50	1,29	1,79
P25%	19,5	Boa	0,52	1,05	1,57
P50%	19,5	Boa	0,55	0,38	0,93
P90%	23,0	Fluída	0,60	0,21	0,80
P100%	22,0	Fluída	0,62		0,62
PQ100%	18,0	Boa	0,60		0,60
PQ100%_A	20,0	Boa	0,84		0,84
C25%	17,5	Boa	0,52	0,84	1,36
C50%	17,0	Boa	0,55	0,10	0,65
C90%	18,8	Boa	0,60	0,16	0,76
C100%	18,5	Boa	0,58		0,58
CQ25%	17,0	Boa	0,54	1,06	1,60
CQ50%	17,0	Boa	0,59	0,99	1,57
CQ90%	18,0	Boa	0,68	0,44	1,13
CQ100%	18,5	Fluída	0,68		0,68
CQ100%_A	18,5	Boa	0,90		0,90

O espalhamento das misturas variou entre 17cm e 23cm, mas isso não quer dizer que quanto maior o espalhamento, mais líquido há na mistura. Essa discrepância dos resultados entre o espalhamento e a razão Lq/L, sugere que há diferentes ligações entre os componentes utilizados. A presença da cal e da concha calcinada nas misturas, demonstra uma maior necessidade de líquidos para atingir o mesmo espalhamento de outras misturas com menor concentração de cal ou que não possui conchas calcinadas na sua composição como podemos observar na Figura 44.

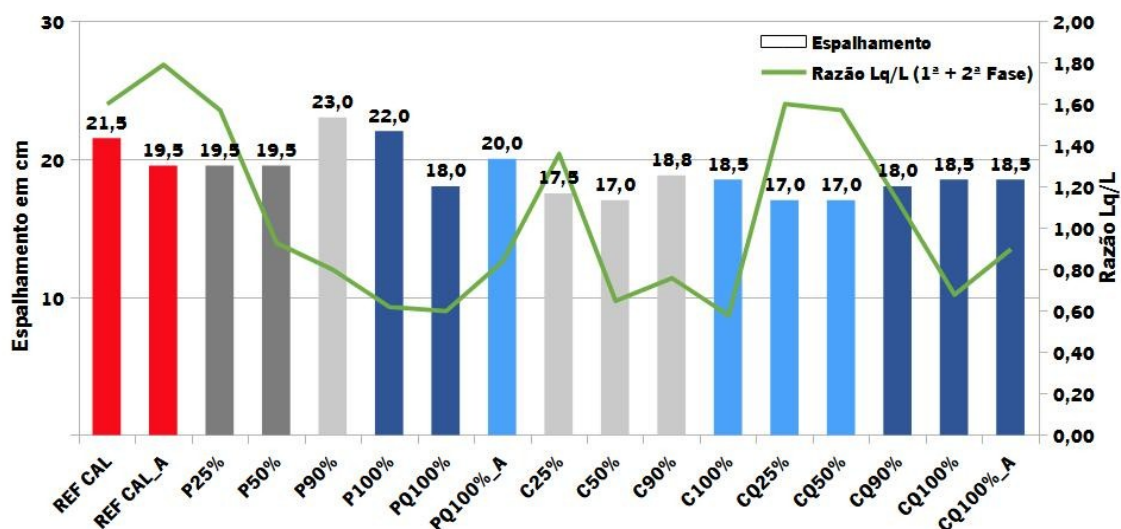


Figura 44 – Espalhamento em relação a razão Lq/L na (1ª + 2ª fase)

Conforme demonstrado nas Figuras 45, 46 e 47, as amassaduras apresentam características visuais semelhantes, independentemente da quantidade de líquido utilizada. Observa-se que as amostras à esquerda, com maior teor de líquido, e as à direita, com menor teor de líquido, exibem aspectos similares.

De modo geral, as argamassas tiveram boa consistência, e apenas três composições, P90%, P100% e CQ100% obtiveram consistência fluida (Figura 45b), devido ao processo empírico de adição de líquido.



(a)



(b)

Figura 45 – Espalhamento de (a)P25% e (b)P90%



(a)



(b)

Figura 46 – Espalhamento de (a)C25% e (b)C90%



(a)



(b)

Figura 47 – Espalhamento de (a)CQ25% e (b)CQ90%

4.3. Caracterização no Estado Endurecido

Com o objetivo de avaliar o desempenho das amassaduras, foram realizados ensaios mecânicos e de durabilidade. Foram caracterizadas quanto às suas propriedades mecânicas, avaliar a capacidade das argamassas de suportar cargas. Já os ensaios de durabilidade, incluindo absorção de água por capilaridade e imersão, visaram avaliar a resistência dos provetes em contato com a água e sua durabilidade em ambientes húmidos. Para tanto, as dimensões e a massa dos provetes foram medidas antes dos ensaios, para fins de comparação e cálculo da densidade.

4.4. Comportamento Mecânico

4.4.1. Densidade Aparente

Resultado da densidade aparente apresenta-se na Tabela 19. Os dados mostram que a maior parte das argamassas apresentam densidades superiores às argamassas de referência, sendo as argamassas com poeiras aquelas que apresentam os valores mais elevados (ligeiramente superiores às argamassas com conchas em pó). Em geral, as argamassas mais densas tiveram menos retração e/ou ficaram mais pesadas.

Tabela 19 – Determinação da densidade aparente

ARGAMASSAS	AOS 28 DIAS
	MÉDIA DENSIDADE APARENTE (Kg/m ³)
REF CAL	1531
REF CAL_A	1446
P25%	1556
P50%	1741
P90%	1799
P100%	1790
PQ100%	1790
PQ100%_A	1755
C25%	1572
C50%	1558
C90%	1687
C100%	1734
CQ25%	1486
CQ50%	1529
CQ90%	1639
CQ100%	1646
CQ100%_A	1581

4.4.2. Resistência a Flexão

Foram preparados 3 provetes de 40x40x160mm³ de cada argamassa, para cada idade, 28 e 60 dias. Para cada argamassa e cada idade, foram ensaiados 3 provetes, e o valor obtido foi a média dos três provetes, na sua respetiva idade.

A Tabela 20 resume os resultados médios da resistência à flexão. Os resultados indicam uma baixa resistência à flexão e apresentam valores bastante dispersos entre as diferentes misturas. A consistência dos resultados é confirmada pelos baixos valores do desvio padrão.

As argamassas feitas apenas com resíduos não calcinados, apresentaram resultados irrisórios nos ensaios de compressão e flexão, e foram desconsiderados nas comparações, assim como, não foram testadas em outros ensaios.

Tabela 20 – Resultado do ensaio de Flexão aos 28 e 60 dias

ARGAMASSAS	AOS 28 DIAS		AOS 60 DIAS	
	MÉDIA RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)	DESVIO PADRÃO (K)	MÉDIA RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)	DESVIO PADRÃO (K)
REF CAL	0,76	0,07	0,94	0,06
REF CAL_A	0,55	0,03	0,52	0,02
P25%	0,49	0,08	0,73	0,09
P50%	1,17	0,11	1,65	0,08
P90%	0,91	0,11	0,83	0,06
P100%	0	0	-	-
PQ100%	1,33	0,07	1,31	0,07
PQ100%_A	0,37	0,02	0,33	0,04
C25%	0,84	0,13	1,60	0,01
C50%	0,86	0,15	1,10	0,03
C90%	1,01	0,05	0,89	0,07
C100%	0,15	0,01	-	-
CQ25%	0,57	0,02	1,23	0,16
CQ50%	0,75	0,15	1,12	0,16
CQ90%	0,69	0,07	0,84	0,14
CQ100%	0,56	0,03	-	-
CQ100%_A	0,51	0,1	0,50	0,08

A Figura 48 apresenta, em formato gráfico, os resultados dos ensaios de flexão realizados aos 28 e 60 dias. A evolução da resistência ao longo do tempo é comparada com a resistência das misturas de referência constituídas exclusivamente de cal como ligante, permitindo avaliar o efeito da adição dos demais componentes na resistência das argamassas.

A maioria das composições ecoeficientes estudadas apresenta desempenho similar, ou superior, ao desempenho das argamassas de referência com cal viva (REF CAL_A), conforme a posição relativamente às linhas de referência a tracejado aos 28 e 60 dias de cura. Este resultado geral é um bom indicador do potencial de valorização destes resíduos na produção de argamassas.

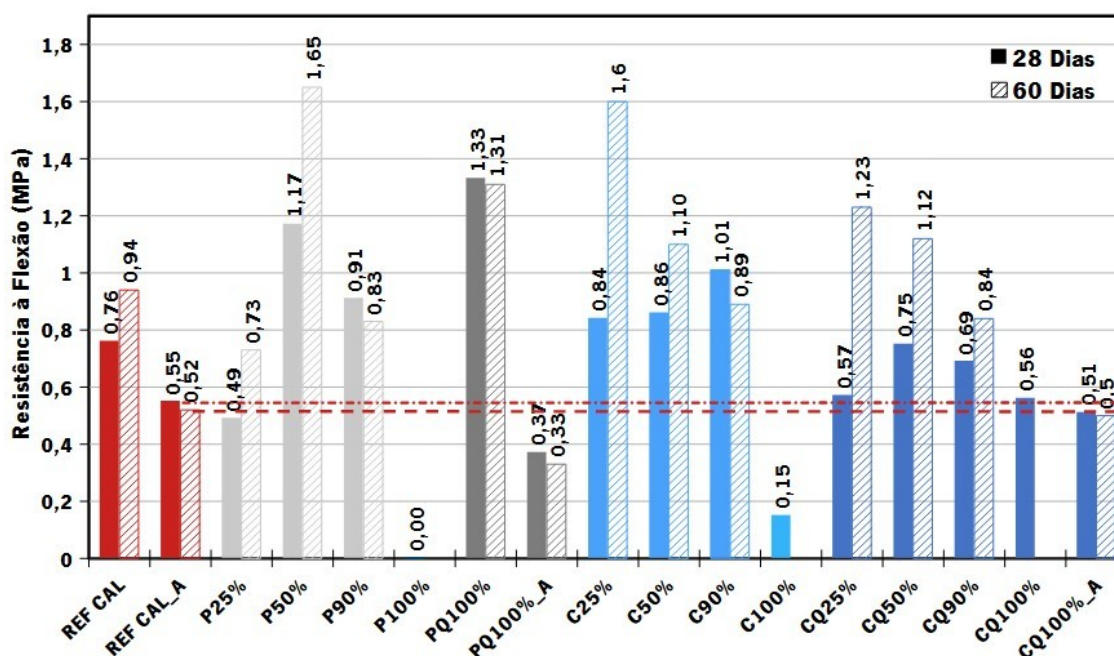


Figura 48 – Resultado do ensaio de Flexão

Há uma diferença de comportamento consoante o líquido utilizado, solução V e água. Na maioria das situações, as argamassas produzidas com recurso à solução V e com apenas 1 ligante (REF CAL, PQ100%, CQ100%) apresentaram um comportamento superior quando comparadas as mesmas argamassas produzidas utilizando água (REF CAL_A, PQ100%_A, CQ100%_A). No caso das argamassas com poeiras de cal calcinada (PQ100% x PQ100%_A) os valores de resistência à flexão são 72,18% superior aos 28 dias e 76,33% superior aos 60 dias. Este comportamento pode estar relacionado com a menor necessidade de líquido verificada para produção das argamassas que utilizaram solução V (ver Tabela 14).

Observa-se que as argamassas feitas apenas com poeiras de cal calcinada apresentam o melhor e o pior comportamento quando comparadas as argamassas feitas apenas com cal viva, a referência base deste trabalho. A argamassa feita com poeiras de cal calcinadas e água (PQ100%_A) apresenta um comportamento à flexão que é 32,73% inferior ao comportamento da REF CAL_A aos 28 dias e 36,54% inferior aos 60 dias. Já a argamassa feita apenas com poeiras de cal calcinadas e solução V (PQ100%) apresenta um comportamento que é 42,86% superior ao comportamento da REF CAL aos 28 dias e 28,24% superior aos 60 dias.

No que se refere à utilização dos resíduos como substituto parcial da cal viva e solução V como agente reação, a argamassa P50% foi a que apresentou comportamento à flexão superior a argamassa produzida exclusivamente com cal (REF CAL), sendo 35,04% superior aos 28 dias e 43,03% superior aos 60 dias. Observa-se que não há uma tendência linear entre o aumento na percentagem de substituição e a redução na resistência à flexão (Figura 49). Os resultados dos ensaios das argamassas P25% e P90% apresentaram valores inferiores e próximos da referência, respectivamente. Este comportamento pode estar associado com a quantidade de líquido utilizado na fase de produção das argamassas. A relação L_q/L indica que a argamassa P25% possui um valor elevado (1,57), enquanto a P90% apresenta um valor baixo (0,80), porém obteve uma consistência fluida. Embora a quantidade de líquido tenha sido reduzida, a argamassa não atingiu a trabalhabilidade desejada, o que pode ter comprometido a sua qualidade e desempenho.

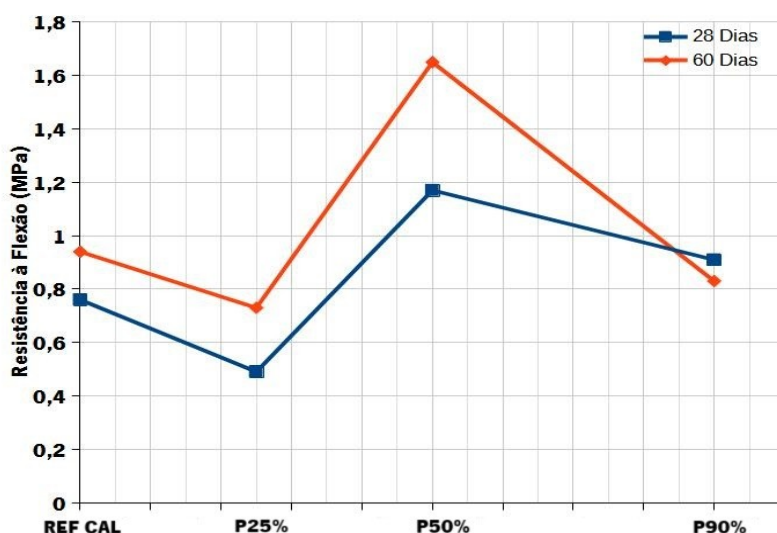


Figura 49 – Relação entre argamassas de Referência e Poeiras (ensaio de Flexão)

As argamassas com substituição parcial da cal viva por conchas em pó também apresentaram resultados superiores quando comparadas a argamassa REF CAL (Figura 50). A argamassa C25% apresentou melhor resultado com um comportamento à flexão que é 9,52% superior ao comportamento da REF CAL aos 28 dias e 41,25% superior aos 60 dias.

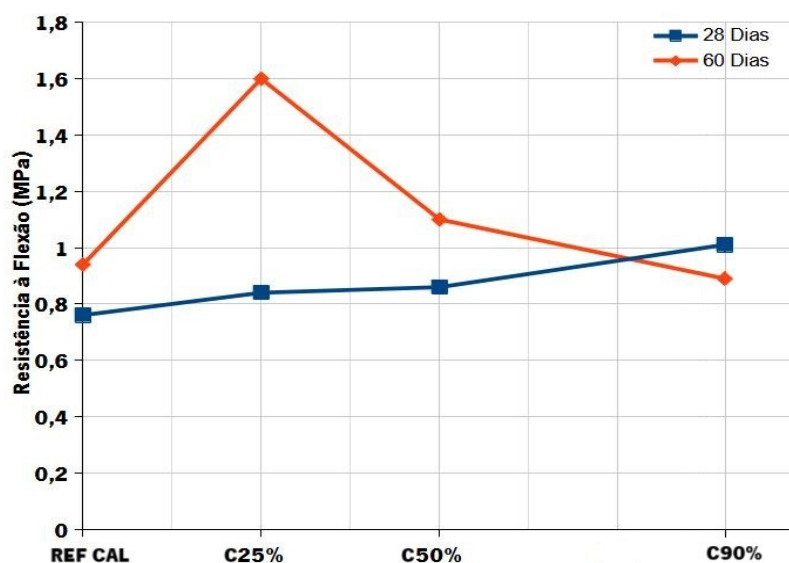


Figura 50 – Relação entre argamassas de Referência e Conchas (ensaio de Flexão)

Todas argamassas com substituição parcial da cal viva por conchas em pó calcinadas obtiveram comportamento à flexão inferior a REF CAL aos 28 dias, somente as argamassas CQ25% e CQ50% vieram a superar os valores aos 60 dias (Figura 51). Observa-se que as argamassas produzidas com conchas em pó não calcinadas apresentaram melhor desempenho à flexão do que aquelas calcinadas. Este resultado é muito relevante uma vez que a calcinação exige a exposição à elevadas temperaturas, no caso a 800°C, o que é ambientalmente desfavorável. Deve-se destacar que esse comportamento foi influenciado pela maior quantidade de água que necessitou nas argamassas CQ, o que também demonstra que a calcinação das conchas causou uma modificação nesse pó o que fez essas argamassas demandarem mais água.

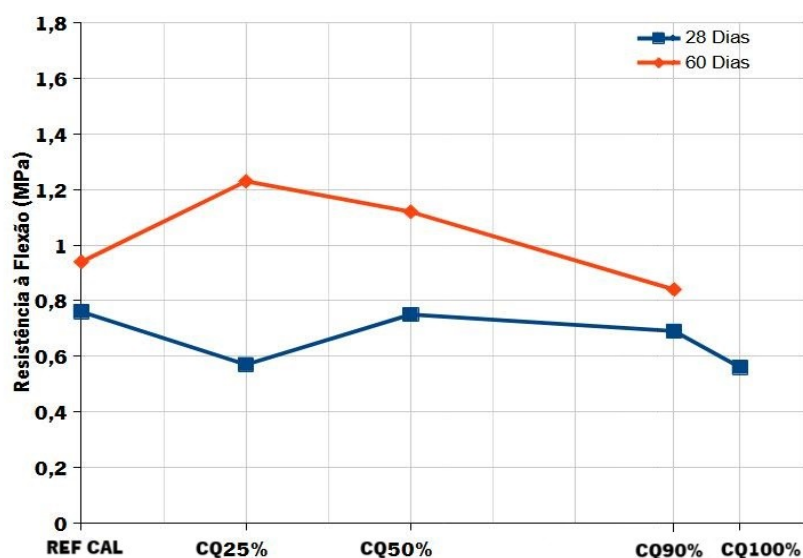


Figura 51 – Relação entre argamassas de Referência e Conchas calcinadas (ensaio de Flexão)

4.4.3. Resistência à Compressão

Os resultados de resistência à compressão são apresentados na Tabela 21. Embora a resistência à compressão seja inferior às argamassas convencionais, os resultados demonstram uma boa consistência, confirmada pelos baixos desvios padrão, no entanto, observa-se uma grande dispersão dos resultados entre as diversas argamassas.

Tabela 21 – Resultado do ensaio de compressão aos 28 e 60 dias

ARGAMASSAS	AOS 28 DIAS		AOS 60 DIAS	
	MÉDIA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	DESVIO PADRÃO (K)	MÉDIA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	DESVIO PADRÃO (K)
REF CAL	1,86	0,15	2,18	0,10
REF CAL_A	0,83	0,10	1,16	0,05
P25%	1,34	0,09	2,01	0,06
P50%	2,04	0,04	3,11	0,24
P90%	1,14	0,29	1,35	0,11
P100%	0,14	0,07	-	-
PQ100%	2,02	0,40	2,27	0,13
PQ100%_A	0,86	0,03	2,00	0,39
C25%	1,20	0,29	1,90	0,15
C50%	1,37	0,03	2,07	0,05
C90%	1,30	0,11	1,62	0,05
C100%	0,36	0	-	-
CQ25%	0,87	0,05	2,00	0,05
CQ50%	1,18	0,13	1,94	0,22
CQ90%	1,01	0,03	1,29	0,24
CQ100%	0,76	0,22	-	-
CQ100%_A	0,88	0,03	1,27	0,13

A Figura 52 apresenta graficamente os resultados dos ensaios de compressão realizados aos 28 e 60 dias. Como no ensaio de flexão, de igual modo são apresentadas linhas de referência a tracejado aos 28 e 60 dias de cura, em que compara com a resistência das argamassas de referência constituídas exclusivamente de cal viva como ligante. Mostra também a evolução da resistência ao longo do tempo, permitindo uma análise detalhada do efeito da adição dos demais componentes na resistência das argamassas

Tendo em vista, a argamassa de referência de cal (REF CAL_A) como base para as outras argamassas, percebe-se que a maioria das argamassas obtiveram resultados similares (PQ100%_A, CQ25%, CQ100%, CQ100%_A) ou mais elevados aos 28 dias, mas aos 60 dias obtiveram mais resistência e todos tiveram valores maiores que as argamassas de cal com água.

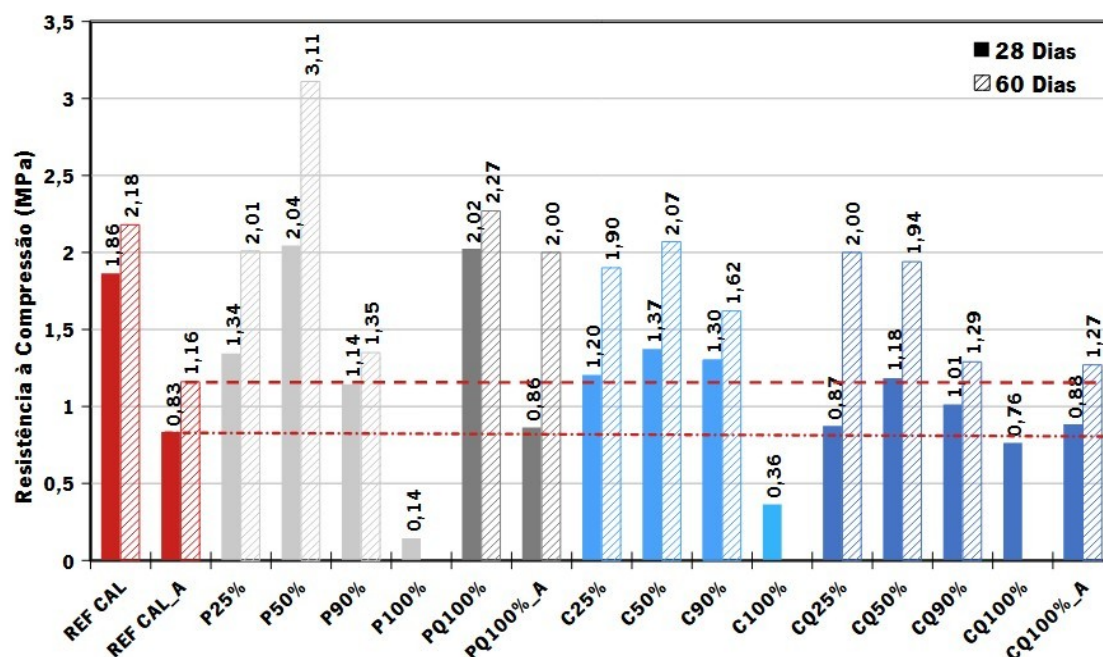


Figura 52 – Resultado do ensaio de Compressão

Percebe-se que há uma diferença de comportamento consoante o líquido utilizado, solução V e água. Nas argamassas produzidas com recurso à solução V e com apenas 1 ligante (REF CAL e PQ100%) apresentaram um comportamento superior quando comparadas as mesmas argamassas produzidas utilizando água (REF CAL_A e PQ100%_A), porém na comparação entra as argamassas com conchas em pó calcinadas (CQ100% x CQ100%_A) não houve discrepância de valores. Assim como no ensaio de flexão, é possível perceber a relevância do emprego do vinagre nas composições, com destaque para as argamassas de referência de cal (REF CAL) e de poeiras (PQ100%), e as argamassas com percentagens de substituição.

Todas as argamassas ganharam mais resistência com passar do tempo, destacam-se as argamassas PQ100%_A e CQ25% que duplicaram os valores. As argamassas com substituição parcial da cal viva por conchas em pó apresentaram resultados semelhantes as de conchas calcinadas, e isso acontece também com as poeiras, reafirma-se então, que não há necessidade de calcinar os materiais para que tenham aplicabilidade em argamassas ecoeficientes.

No que se refere à utilização dos resíduos como substituto parcial da cal viva e solução V como agente reação, mais uma vez, a argamassa P50% obteve o melhor resultado nas duas idades quanto a resistência à compressão, reafirmando a boa relação das poeiras com o vinagre. Apresentou comportamento à compressão superior a argamassa produzida exclusivamente com cal (REF CAL), sendo 8,82% superior aos 28 dias e 29,90% superior aos 60 dias. Observa-se que também não há uma tendência linear entre o aumento na percentagem de substituição e a redução na resistência à compressão (Figura 53). Já as argamassas P25% e P90% apresentaram valores inferiores e abaixo da referência, respetivamente.

Uma explicação para a baixa resistência poderá ser o facto da presença de fósforo nas poeiras de cal (confirmada na análise química FRX, com 15,85% de fósforo) que prejudica a calcinação ou obtenção de CaO. Logo, justifica-se que as resistências tenham sido menores, tal como aconteceu com a argamassa P100% e PQ100%_A que obtiveram resultados ínfimos e na 1ª Etapa exploratória deste trabalho, em que se misturaram poeiras com água e os provetes não tiveram coesão suficiente para serem ensaiados.

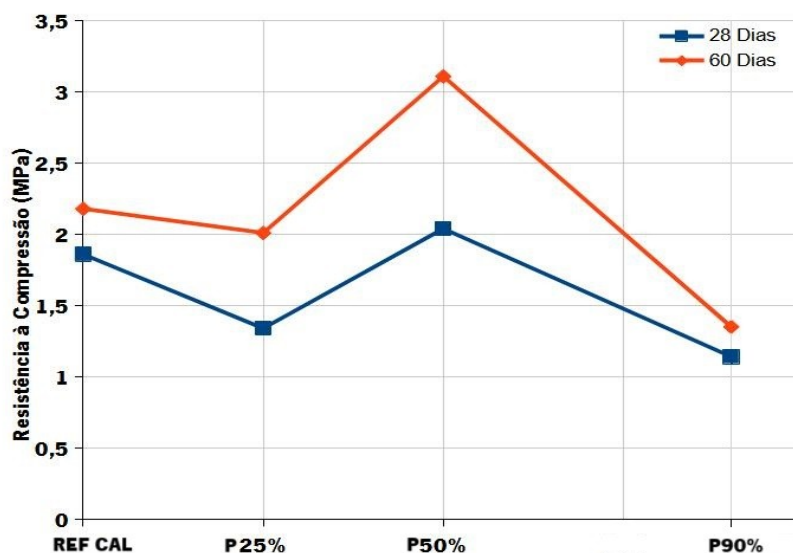


Figura 53 – Relação entre argamassas de Referência e Poeiras (ensaio de Compressão)

As argamassas com substituição parcial da cal viva por conchas em pó apresentaram resultados inferiores quando comparadas a argamassa REF CAL (Figura 54). Observa-se que há uma relação direta entre o aumento na percentagem de substituição e a redução na resistência à compressão tanto aos 28 dias quanto aos 60 dias. Também pode-se justificar menos resistência nas conchas pelo teor de fósforo presente na composição de 7,72%. (confirmada na análise química FRX).

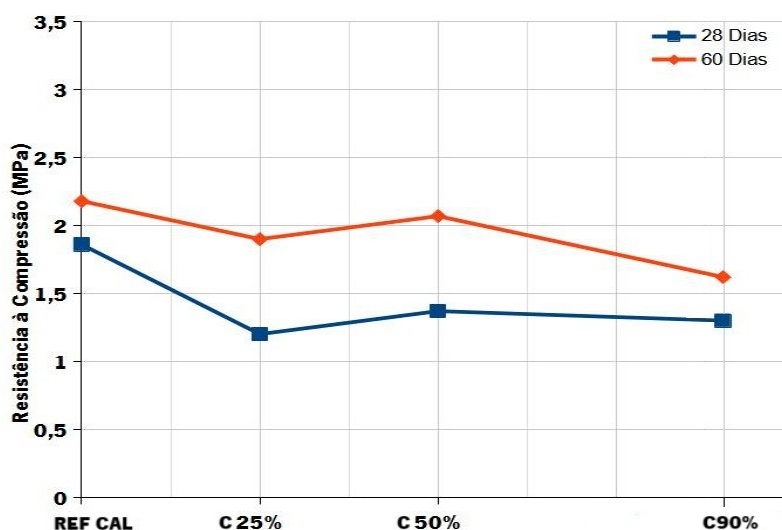


Figura 54 – Relação entre argamassas de Referência e Conchas (ensaio de Compressão)

Todas argamassas com substituição parcial da cal viva por conchas em pó calcinadas obtiveram comportamento à compressão inferior a REF CAL nas idades correspondentes (Figura 55). Mais uma vez, observa-se que as argamassas produzidas com conchas em pó não calcinadas apresentaram melhor desempenho à compressão do que aquelas calcinadas, o que reforça a utilização deste resíduo sem a necessidade de calcinar.

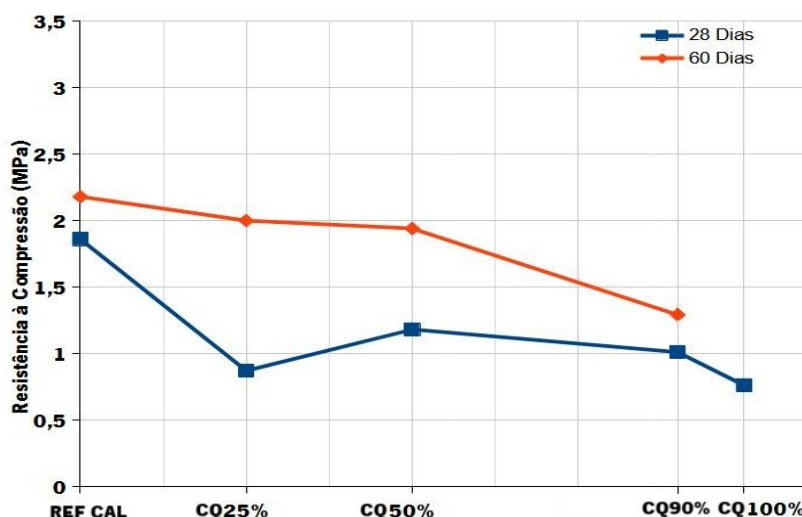


Figura 55 – Relação entre argamassas de Referência e Conchas calcinadas (ensaio de Compressão)

4.5. Durabilidade

4.5.1. Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade avalia a capacidade de um material absorver água através de seus poros e está diretamente relacionada à durabilidade do material, pois influencia a penetração de agentes agressivos. O objetivo principal do ensaio é determinar o coeficiente de absorção de água por capilaridade, que representa a quantidade de água absorvida por unidade de área e tempo. Diversos fatores influenciam a absorção por capilaridade, como a finura do ligante, a razão Lq/L , a idade do provete e o grau de compactação. A finura do ligante, por exemplo, estabelece uma relação inversa com a absorção por capilaridade, ou seja, quanto maior a granulometria, menor a absorção. Já a relação Lq/L exerce influência oposta, uma vez que um aumento nessa relação resulta em um maior volume de poros e, consequentemente, em maior absorção de água. De modo geral, valores baixos de absorção por capilaridade são desejáveis, pois indicam menor conectividade entre os poros e maior resistência à penetração de água e agentes agressivos, contribuindo para aumentar a durabilidade do material.

Os valores alcançados são indicados na Tabela 22. Observa-se valores elevados para todas as argamassas, quando comparados aos valores limite apresentados na EN 998-1 (2003), Tabela 1. Contudo, a utilização das poeiras e das conchas em pó nas argamassas proporcionaram uma redução no coeficiente de absorção de água por capilaridade em comparação as argamassas de referência, independentemente de percentagem de substituição utilizada.

Considerando os fatores apresentados anteriormente, pode-se indicar que o emprego dos materiais com granulometria fina (poeiras e conchas em pó) colaboraram para menor absorção de água, já na razão Lq/L, indicado na Tabela 22, que não é possível perceber de que forma essa relação teve influência, visto que, o menor coeficiente não foi o utilizou menos líquido. Além disso, provetes com o mesmo valor $2 \text{ kg/m}^2 \times (\text{min})^{1/2}$ de coeficiente, nomeadamente, P25% e C50%, tiveram proporções bem distintas na quantidade de líquido empregue na mistura em relação aos ligantes, que pode ser visualizado na Tabela 22 a seguir:

Tabela 22 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade (28 dias) e relação a razão Lq/L

Argamassa	Capilaridade		Trabalhabilidade	
	Coeficiente de absorção $\text{kg/m}^2 \times (\text{min})^{1/2}$	Razão Lq/L (1 ^a)	Razão Lq/L (2 ^a)	Razão Lq/L (1 ^a + 2 ^a)
REF CAL	2,3	0,50	1,10	1,60
REF CAL_A	2,5	0,50	1,29	1,79
P25%	2	0,52	1,05	1,57
P50%	2,1	0,55	0,38	0,93
P90%	1	0,60	0,21	0,80
P100%	-	0,62		0,62
PQ100%	1,4	0,60		0,60
PQ100%_A	0,9	0,84		0,84
C25%	1,8	0,52	0,84	1,36
C50%	2	0,55	0,10	0,65
C90%	0,5	0,60	0,16	0,76
C100%	-	0,58		0,58
CQ25%	1,1	0,54	1,06	1,60
CQ50%	2,1	0,59	0,99	1,57
CQ90%	1,8	0,68	0,44	1,13
CQ100%	0,1	0,68		0,68
CQ100%_A	1,6	0,90		0,90

Outro fator que pode ter influenciado com resultado em sua maioria com valores altos, é a idade dos provetes. Os provetes ensaiados tinham pouco mais de 28 dias e percebe-se que nos ensaios de flexão e

compressão a resistência aumentou aos 60 dias. É expectável que a absorção de água também diminua com o passar do tempo e a continuidade das reações de hidratação.

A Figura 56 apresenta o perfil de absorção de água por capilaridade de cada provete no decorrer do ensaio. Percebe-se que inicialmente os provetes absorvem mais água e que com o passar do tempo, pessoas massas dos provetes se mantêm quase que constante, indicando que absorve cada vez menos.

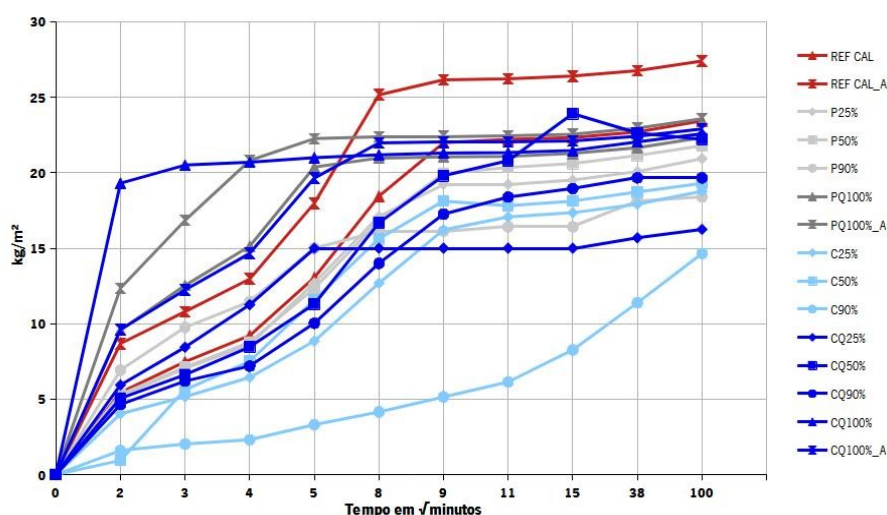


Figura 56 – Resultado da absorção de água ao longo do tempo

Na classificação das argamassas, o coeficiente de absorção ideal é de no máximo $0,4 \text{ kg/m}^2 \times (\text{min})^{1/2}$ e na Figura 57, percebe-se que apenas um provete, nomeadamente CQ100% atendeu a este critério, sendo que o provete C90% ficou bem próximo do valor com $0,5 \text{ kg/m}^2 \times (\text{min})^{1/2}$. Com base nestes resultados, pode-se dizer que é preciso cautela no que se refere a utilização destas argamassas em áreas sujeitas a humidade elevada. É necessário um estudo mais aprofundado sobre as questões que envolvem durabilidade, para que seja possível a definição das potenciais aplicações para este tipo de argamassa.

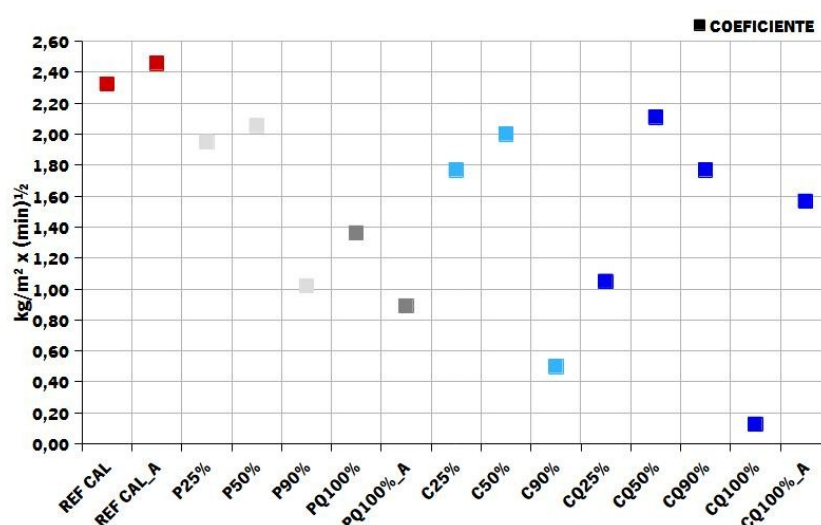


Figura 57 – Resultado do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes ensaiados aos 28 dias

4.5.2. Absorção de Água por Imersão

O ensaio de absorção de água por imersão é realizado para quantificar a quantidade de água que um material poroso é capaz de absorver quando completamente imerso em água. Essa propriedade é fundamental para determinar a durabilidade do material, pois a presença de poros interconectados facilita a penetração de água e outros agentes agressivos, podendo comprometer a sua performance ao longo do tempo. É importante ressaltar que a absorção de água por imersão ocorre predominantemente através dos poros de maior dimensão presentes na estrutura porosa do material.

De acordo com a Tabela 23, não é possível certificar que a razão Lq/L teve influência direta na absorção de água por imersão, visto que, provetes com percentuais iguais ou próximos, nomeadamente, REF CAL (35%), CQ100% (34%) e P25% (34%), obtiveram quantidade distintas de líquido empregue na mistura em relação aos ligantes (1,60, 0,68 e 1,57, respectivamente).

Tabela 23 – Percentagem de absorção em relação a razão Lq/L

Argamassa	Imersão	Trabalhabilidade		
Proвете	A (%)	Razão Lq/L (1 ^a)	Razão Lq/L (2 ^a)	Razão Lq/L (1 ^a + 2 ^a)
REF CAL	35%	0,50	1,10	1,60
REF CAL_A	38%	0,50	1,29	1,79
P25%	34%	0,52	1,05	1,57
P50%	26%	0,55	0,38	0,93
P90%	25%	0,60	0,21	0,80
P100%	-	0,62		0,62
PQ100%	27%	0,60		0,60
PQ100%_A	29%	0,84		0,84
C25%	28%	0,52	0,84	1,36
C50%	27%	0,55	0,10	0,65
C90%	19%	0,60	0,16	0,76
C100%	-	0,58		0,58
CQ25%	25%	0,54	1,06	1,60
CQ50%	31%	0,59	0,99	1,57
CQ90%	27%	0,68	0,44	1,13
CQ100%	34%	0,68		0,68
CQ100%_A	32%	0,90		0,90

A Figura 58 apresenta graficamente a percentagem de cada argamassa, sendo a argamassa REF CAL_A com a maior percentagem de 38% e a argamassa C90% com apenas 19% de absorção de água. Saliente-se que,

neste caso, o provete REF CAL_A também possui a maior razão Lq/L, porém a argamassa C90% não possui a menor razão Lq/L. Observa-se também que a finura dos materiais incorporados (poeiras e conchas em pó) e coesão das misturas resultaram em uma redução da absorção de água quando comparada as argamassas de referência, assim como aconteceu para absorção de água por capilaridade.

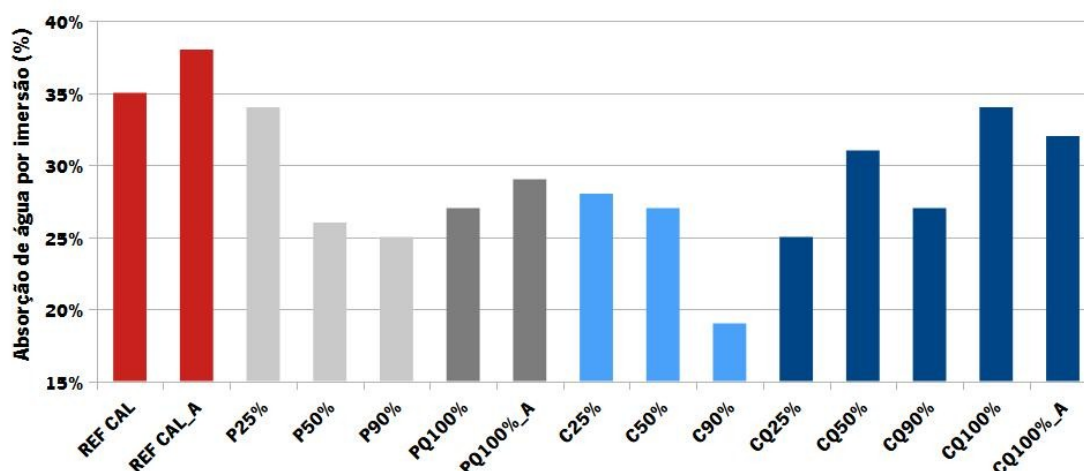


Figura 58 – Resultado do percentual de absorção de água dos provetes ensaiados aos 28 dias

4.5.3. Carbonatação Acelerada

A carbonatação afeta a porosidade das argamassas de cal, resultando em um aumento do volume dos poros com diâmetro de 0,1 μm durante a transição da portlandita para a calcita. Estes poros, que não participam do processo de carbonatação devido ao bloqueio do acesso ao CO_2 , explicam a longa duração do processo ao longo de vários anos. Por outro lado, outro estudo aponta limitações na utilização do indicador fenolftaleína para avaliar a carbonatação das argamassas de cal aérea, destacando casos em que a superfície parece totalmente carbonatada, mas a resistência continua a aumentar, demonstrando que o processo de carbonatação ainda está ocorrendo (COELHO,2009).

O resultado dos ensaios de carbonatação acelerada realizados aos 7, 14 e 21 dias de idade nas composições estudadas apresentaram resultados distintos dos resultados convencionalmente apresentados na literatura. A carbonatação é um processo que acontece de fora para dentro, a medida que ocorre a penetração do CO_2 . Assim, o resultado da utilização da fenolftaleína para determinação da profundidade de carbonatação apresenta, em provetes carbonatados, uma cor transparente no exterior (carbonatado) e uma cor avermelhada no interior (não carbonatado). Os resultados alcançados neste estudo apresentam padrões de cores muito distintos do convencional,

Como pode ser visto na Figuras 59-62. Apenas a utilização de 90% de poeiras (Figura 60) e 90% de conchas em pó (Figura 61) apresentam um padrão de cor que vai ao encontro dos resultados esperados para uma

penetração de CO_2 no sentido exterior – interior. Neste caso, as áreas carbonatadas são muito similares, sendo que aos 7 dias há uma maior carbonatação nos provetes com poeiras, enquanto aos 14 e aos 21 dias há uma carbonatação ligeiramente superior nos provetes com conchas em pó.

No que se refere aos demais casos, onde o padrão de cores da fenolftaleína não corresponde ao padrão convencional, é preciso uma investigação mais aprofundada tanto ao nível da microestrutura das argamassas, quanto ao nível das reações químicas envolvidas no processo. Apesar destes ensaios não terem sido realizados no âmbito deste trabalho devido à constrangimentos relacionados com o tempo disponível para finalização do estudo, algumas hipóteses são aqui levantadas:

- As ligações químicas entre os diversos materiais (cal, poeiras, conchas e vinagre), podem ter originado compostos químicos diferentes que inviabilizaram a determinação da profundidade de carbonatação através do uso exclusivo da fenolftaleína;
- A utilização do vinagre e a consequente alteração no pH da solução pode, também, ter inviabilizado a determinação da profundidade de carbonatação através do uso exclusivo da fenolftaleína;
- O facto de se terem usado provetes resultados do ensaio de flexão pode ter afetado os resultados, uma vez que poderão ter ocorrido algumas microfissuras que influenciariam a porosidade e a absorção do CO_2 .



Figura 59 – Resultado da carbonatação dos provetes com apenas 1 ligante: 100% cal; 100% poeiras; 100% conchas em pó (da esquerda para direita): 7; 14 e 21 dias (de cima para baixo)



Figura 60 – Resultado da carbonatação dos provetes de poeiras (25, 50 e 90%, da esquerda para direita): 7; 14 e 21 dias (de cima para baixo)



Figura 61 – Resultado da carbonatação dos provetes de conchas (25, 50 e 90%, da esquerda para direita): 7; 14 e 21 dias (de cima para baixo)



Figura 62 – Resultado da carbonatação dos provetes de conchas calcinadas (25, 50 e 90%, da esquerda para direita): 7; 14 e 21 dias (de cima para baixo)

5. Conclusão

5.1. Principais Considerações

O presente trabalho teve por objetivo principal desenvolver uma argamassa ecoeficiente, utilizando resíduos de conchas de ostras e pó de forno de cal que, em geral, são alocados em aterros. No entanto, o aterro, por sua vez, devia ser a última opção, devido à perda de recursos e à ocupação de grandes áreas.

Neste trabalho, os resíduos foram empregues como ligantes nas composições, com intuito de viabilizar uma argamassa que não utilize cimento e substitua parcial ou totalmente a cal. O ligante é um constituinte com grande influência nas propriedades e no desempenho da argamassa, uma vez que liga todos os materiais envolvidos. Devido às limitações das características físico-química dos materiais residuais utilizados, optou-se por considerar os requisitos de desempenho para uma argamassa de reboco de classe CS1. Os resultados registados revelaram que a maioria das composições testadas obtiveram resistência à compressão acima do valor de referência considerado, 0,4 N/mm² aos 28 dias, o que afirma o potencial de substituição da cal em argamassas dessa natureza. Todavia, verifica-se que é necessária a utilização de 10% de cal viva relativamente à quantidade de ligante. Mas ainda assim, é um resultado favorável, uma vez que podemos utilizar 90% de pó de forno de cal ou conchas em pó, promovendo a valorização destes resíduos.

O emprego de materiais não convencionais na elaboração de uma argamassa foi uma das premissas deste estudo, e a opção de introduzir o ácido acético em vinagre como agente de dissolução de cálcio das conchas de ostras e posterior reação nas misturas foi um ponto positivo no processo. De maneira geral, o uso do vinagre melhorou as resistências à flexão e à compressão das argamassas, principalmente as de cal e poeiras de cal, mas não foi tão expressivo nas argamassas de conchas. Verificou-se também que os provetes adquirem mais resistência com o passar do tempo, uma vez que há um aumento de resistência significativos na maioria das composições.

A argamassa com substituição de 50% por poeiras de cal obteve o melhor resultado de resistência, contudo a substituição de 100% por poeiras de cal calcinadas também teve resultado surpreendente. As argamassas com substituição por conchas em pó também apresentaram bom desempenho. No entanto, a calcinação das conchas não resultou em melhoria das propriedades das argamassas.

No que se refere à durabilidade, todas as argamassas apresentaram valores elevados de absorção de água após os ensaios realizados aos 28 dias. Contudo, tanto a utilização das poeiras, quanto a utilização das conchas em pó proporcionaram uma redução nos valores de absorção de água, quando comparados aos valores de referência. Apesar disso, é importante aprofundar os estudos de durabilidade para que seja possível determinar o campo de aplicação das argamassas desenvolvidas.

O tempo de cura desempenha um papel fundamental na evolução das propriedades das argamassas. Portanto, investigações com tempos de cura mais longos são essenciais para um melhor entendimento do comportamento dessas argamassas ao longo do tempo. Paralelamente, a otimização das dosagens e o estudo de possíveis aditivos para melhorar ainda mais o desempenho destas argamassas é fundamental, pois a proporção dos componentes influencia diretamente as reações químicas e nas características finais do material.

Do ponto de vista da sustentabilidade, a utilização de conchas de ostra e pó de forno de cal na produção de argamassas demonstra um compromisso com a economia circular, promovendo a reutilização de resíduos e reduzindo a demanda por recursos naturais. Além disso, a pesquisa comparou a eficiência de diferentes processos, incluindo a calcinação do material, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O trabalho com materiais residuais exige estudos aprofundados e a vários níveis. Com base nos resultados deste trabalho e considerando o potencial para futuras investigações, destacam-se:

- Estudo sobre as conchas de ostra e poeiras de cal empregues numa mesma argamassa;
- Estudo detalhado sobre as reações químicas existentes, principalmente a relação entre o ácido acético e os outros materiais;
- Estudo sobre a carbonatação acelerada mais aprofundado;
- Estudo sobre o emprego de aditivos que melhorem os aspetos de durabilidade, nomeadamente absorção por capilaridade e imersão;
- Estudos de aderência a diversos tipos de suporte das argamassas desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

- Afinko Polimeros, 2014. <https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-o-ensaio-de-frx/> (acedido em setembro de 2024).
- Almeida, J. L. M. S. L., 2010. Argamassas tradicionais e industriais de alvenaria em edifícios. Dissertação de mestrado em engenharia civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Fevereiro, 2010. Porto, Portugal.
- Alves, E. D. & Pinheiro, O. S. & Costa, A. O. S. & Junior, E. F. C., 2015. Estudo do processo de obtenção celulose Kraft com ênfase no forno de cal. Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) e pelo Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora (DTI – CNPq). Junho, 2015. Brasil.
- Amaral, M. C., 2016. Avaliação dos efeitos da incorporação de resíduo de pó de forno de cal nas propriedades e microestrutura de uma mistura solo-cimento. Tese de doutorado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense. Janeiro, 2016. Campos dos Goytacazes, Brasil.
- Aquacultores, 2023. https://aquacultores.pt/wp-content/uploads/2023/12/Plano-Controlo-Ostra_Japonesa.pdf (acedido em agosto de 2024).
- Arulrajah, A. & Mohammadinia, A. & D'Amico, A. & Horpibulsuk, S., 2017. Effect of lime kiln dust as an alternative binder in the stabilization of construction and demolition materials. *Construction and Building Materials*, Volume 152, Pages 999-1007. October 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.070>
- Bellei, P. & Magalhães, F. & Pereira, M. & Torres, I. & Solstad, R. & Flores-Colén I., 2023. Renderizações térmicas inovadoras que incorporam conchas de ostras para isolamento sustentável. *Sustentabilidade* 2023, 15, 15952.
- Bellei, P. & Torres, I. & Solestad, R. & Flores-Colen, I., 2023. Potential Use of Oyster Shell Waste in the Composition of Construction Composites: A Review. *Buildings* 2023, 13, 1546. <https://doi.org/10.3390/buildings13061546>
- Bureau of International Recycling (BIR), 2022. <https://www.bir.org/news-press/bir-in-the-press/item/el-52-del-papel-y-carton-producido-a-nivel-mundial-procede-de-fibras-recicladas> (acedido em novembro de 2023).
- Cabral, J. P., 2007. A exploração dos recursos naturais da ínsua de caminha, nos séculos XV-XIX. Conflitos entre a comunidade franciscana, a câmara municipal, os moradores vizinhos e o comando da fortaleza *Revista da Faculdade de Letras – Geografia – Universidade do Porto II Série*, Volume I, – pp. 9-31, Porto, Portugal.
- Cabral, J. P., 2012. Acumulações de conchas mortas de moluscos na ilha da Ínsua (Caminha, Portugal). Universidade do Porto, Faculdade de Ciências & Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental . Maio, 2012. Porto, Portugal.
- Campos, M. A. N. & Reis, A. S. & Tristão, F. A. & Rocha-Gomes, L. V., 2007. A Utilização da Cal Conchífera em Monumentos Históricos no Espírito Santo. Tese de mestrado em Engenharia Civil na Universidade Federal Do Espírito Santo. Espírito Santo, Brasil.
- Carvalho, D. L., 2019. Estudo da viabilidade do uso de lama de cal proveniente da indústria de papel em massa cerâmica. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Janeiro, 2019. Ponta Grossa, Brasil.

- Castro, L. & Melgar, R. , 2018. Rochas de fósforo. Capítulo introdutório. Faculdade de Ciências Exatas e Natural. Janeiro, 2018. Buenos Aires, Argentina. https://www.researchgate.net/publication/322643539_Rocas_fosforicas_Capitulo_Introductorio
- Cho, G. A., 2018. Porous carrier for nonpoint pollution source treatment and manufacturing method thereof. Inventor Chodang University, Dongyang Plant. Titulares. Patente coreana KR20180111045, 2018.
- Coelho, A. Z. G. & Pacheco, F. & Jalali, T. S., 2009. A cal na construção. Edição TecMinho. Universidade do Minho. 2009. Guimarães, Portugal.
- Damas, A. L., & Veiga, M. R. & Faria, P., 2016. Caracterização de argamassas antigas de Portugal – contributo para a sua correta conservação. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa. Novembro, 2016. Lisboa, Portugal.
- Davidovits, J. & Aliaga, F., 1981. Fabrication of stone objects, by geopolymeric synthesis, in the pre-incan Huanka civilization (Peru). Page 21. Abstract of a paper presented at the 21st International Symposium for Archaeometry, Brookhaven National Laboratory. 1981. New York, USA,.
- Davidovits, J. & Bonett, A. & Mariotte, A. M., 1982. The disaggregation of stone materials with organic acids from plant extracts, an ancient and universal technique. Making cements with plant extracts. Proceedings of the 22nd symposium on archaeometry, university of Bradford. Pages 205 – 212. April, 1982. Saint-Quentin, France
- Dernegard, H. & Brelid, H. & Theliander, H., 2017. Characterization of a dusting lime kiln – A mill study. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 32(1):25-34. <https://doi.org/10.3183/npprj-2017-32-01-p025-034>
- DGRM, 2024. <https://webgis.dgrm.mm.gov.pt/portal/apps/webappviewer/index.html?id=8998c9b4e9dd436f94a4785c2da89478> (acedido em setembro de 2024)
- DS Smith, 2023. <https://www.dssmith.com/pt/produtos-e-servicos/produtos-de-papel/fabricas-de-papel-da-ds-smith/fabrica-de-papel-de-viana> (acedido em outubro de 2023).
- ECHA, Pub. L. No. 200-580-7, European Chemicals Agency – ECHA, 2006. <https://echa.europa.eu/pt/registration-dossier/-/registered-dossier/15549/4/1> (acedido em setembro de 2024).
- EN 459-1. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria. 2015
- EN 998-1. Specification for mortar for masonry – Part 1: Rendering and plastering mortar. 2013
- EN 998-2. Specification for mortar for masonry – Part 2: Masonry mortar. 2013
- EN 1015-3. Methods of test for mortar for masonry Part 3: Determination of consistence of fresh mortar. Setembro, 1999.
- EN 1015-10. European Standard, “Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar”, European Committee for Standardization (CEN), Agosto, 1999.
- EN 1015-11. European Standard, “Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”, European Committee for Standardization (CEN), Agosto, 1999.
- EN 1015-18. European Standard, “Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar”, European Committee for Standardization (CEN), Dezembro, 2002.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2009. https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/en/en_pacificcuppedoyster.htm (acedido em novembro de 2023).
- Gonçalves, H. S., 2021. Substituição da cal hidratada por pó de forno de cal, residuo da indústria de celulose, na produção de argamassas de múltiplo uso. Dissertação apresentada ao PPGEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense. Setembro, 2021. Campos dos Goytacazes, Brasil.
- Gosto bem comer, 2011. <https://gostobemcomer.blogspot.com/2011/05/hoje-houve-ostras.html> (acedido em agosto de 2024).
- Grupo Parapedra, 2021. <https://grupoparapedra.pt/produto/areia-siliciosa-s40-45/> (acedido em julho de 2024).
- Instituto de Ciências Marinhas da Andaluzia - Conselho Superior de Investigação Científica e do Departamento de Filologia e Tradução - Universidade Pablo de Olavide de Sevilha (ICTIOTERM), 2005 http://www.ictioterm.es/nombre_cientifico.php?nc=202 (acedido em novembro de 2023).
- INE. Instituto Nacional de Estatística, 2024. Estatísticas da Pesca, 2023. https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=439542305&PUBLICACOEStema=55505&PUBLICACOESmodo=2 (acedido em julho de 2024).
- Internacional Energy Agency (IEA), 2023. <https://www.iea.org/energy-system/industry/cement> (acedido em novembro de 2023).
- IPMA. Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Lista de Espécies — Zonas Litorais, 2023. https://www.ipma.pt/pt/bivalves/docs/files/Lista_de_espxcies_em_26_06_2023.pdf (acedido em agosto de 2024).
- IPMA. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2024. <https://www.ipma.pt/pt/bivalves/index.jsp> (acedido em setembro de 2024).
- Iribarren, D. & Moreira, M. T. & Feijoo, G., 2010. Implementação da gestão de subprodutos na Avaliação do Ciclo de Vida do setor do mexilhão. Recursos, Conservação e Reciclagem. Volume 54, Edição 12, páginas 1219-1230. Outubro, 2010. Santiago de Compostela, Espanha. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.03.017>
- Kadhim, A. & Sadique, M. & Al-Mufti, R. & Hashim, K. 2020. Long-term performance of novel high-calcium one-part alkali-activated cement developed from thermally activated lime kiln dust. Journal of Building Engineering, Volume 32, November 2020, 101766. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101766>
- Latif, M. A. & Naganathan, S. & Razak, H. A. & Mustapha, K.N., 2015. Performance of lime kiln dust as cementitious material. Procedia Engineering, Volume 125, Pages 780-787. November, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.135>
- Laveglia, A. & Sambataro, L. & Ukrainczyk, N. & Belie, N. & Koenders. E., 2022. Avaliação do ciclo de vida da cal hidratada: cenários atuais e futuros em quatro países da UE. Jornal de Produção Mais Limpa Volume 369. Outubro, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133224>
- Lima, A. B., 2011. O processo produtivo do Cimento Portland. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil.
- LNEC E 391. Betões. Determinação da resistência à carbonatação. 1993.
- LNEC E 394. Betões - Determinação da absorção de água por imersão. 1993.

- LNEC E 64. Cimentos - Determinação da massa volúmica. 1979.
- Loffi, S. B., 2014. Estudo sobre o comportamento de uma argamassa incorporada com cascas de ostras. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Sul de Santa Catarina. Novembro, 2014. Palhoça, Brasil.
- Maestrovirtuale, 2024. Fosfato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$): estrutura, propriedades e usos. <https://maestrovirtuale.com/fosfato-de-calcio-ca3-po4-2-estrutura-propriedades-e-usos/> (acedido em outubro de 2024)
- Menezes, R. C., 2019. Desenvolvimento de argamassa de assentamento e revestimento com conchas de sururu descartadas do complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba. Trabalho de Conclusão de Curso de Mestrado Profissional em Tecnologias Ambientais do Instituto Federal de Alagoas. Novembro, 2019. Marechal Deodoro, Brasil.
- Merckmillipore, 2024. https://www.merckmillipore.com/PT/en/product/Calcium-carbonate,MDA_CHEM-102059?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (acedido em agosto de 2024).
- Modolo, R. C. E., 2006. Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil. Dissertação de Mestrado em Gestão Ambiental Materiais e Valorização de Resíduos Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro. Aveiro, Portugal.
- Monteiro, R. B. V., 2022. Desenvolvimento de argamassa ecoeficiente à base de conchas de ostras. Dissertação de mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis da Universidade do Minho. Maio, 2022. Guimarães, Portugal.
- Moraes, Y. B. L. & Faustino, R. & Mota, J. M. F. & Santos, A. M. & Santos, E., 2021. Projeto de habitação de interesse social sustentável para comunidades pesqueiras e o aproveitamento dos resíduos da maricultura. Brazilian Journal of Development (ed.), v.7, n.8, p. 84688-84702. Agosto, 2021. Curitiba, Brasil.
- Mordor Intelligence, 2023. Tamanho do mercado Papel KRAFT Sack Análise de Participação - Tendências de Crescimento e Previsões (2023-2028) Source: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/sack-kraft-paper-market> (acedido em novembro de 2023).
- Mota, J. M. F. & Silva, R. F. & Moraes, Y. B. L. & Silva, A. J. C. & Santos, A. M., 2017. Reaproveitamento da concha de marisco como agregados em argamassas e concretos não estruturais. III Encontro latino-americano e europeu sobre edificações e comunidades sustentáveis (elecs). 2017. Rio Grande do Sul, Brasil.
- Mota, J. M. F. & Fernandes, C. M. & Silva, R. F., 2023. Uso de marisco como agregado na construção civil: Relato de experiência no Litoral Norte de Pernambuco. Concilium(ed.), Vol.23, N°3, Março, 2023. Recife, Brasil. Doi: 10.53660/CLM-877-23B29
- Mundo Português, 2018. <https://www.mundoportugues.pt/2018/12/18/viana-vai-exportar-200-toneladas-de-ostras-por-ano/#:~:text=Um%20dos%20promotores%20do%20projeto%20Aquagoma%2C%20Marco%20Silva%2C,o%20maior%20viveiro%20de%20ostras%20a%20n%C3%ADvel%20nacional> (acedido em outubro de 2023).
- Nair, H. B. & Tom, B., 2022. Seashells to lime: swotting of a vernacular method and needs for revival. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. April, 2022. Doi:10.1088/1757-899X/1258/1/012066
- Naissain, F., 2023. <https://www.francenaissain.com/es/la-ostra/la-ostra-y-sus-origenes/anatomia-de-las-ostras/> (acedido em novembro de 2023).

- Neville, A. M., 1997. Propriedades do Concreto. São Paulo: PINI.
- NP EN 196-1;2017. Métodos de ensaio de cimentos : parte 1 : determinação das resistências mecânicas. 2017.
- NP EN 459-1:2015. Cal de construção : parte 1 : definições, especificações e critérios de conformidade. 2015.
- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 2016. <https://ods.pt/> (acedido em novembro de 2023).
- Ochoa, P. A. & Gutiérrez, A. S. & Martínez, J. B. C. & Vandecasteele, C., 2010. Cleaner production in a small lime factory by means of process control. Journal of Cleaner Production, Volume 18, Issue 12, Pages 1171-1176, August 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.019>
- Patel, A., 2024. Acetato de cálcio: um guia abrangente sobre suas propriedades, usos e perspectivas futuras. Maio de 2024. <https://annexechem.com/guide-to-calcium-acetate/> (acedido em outubro de 2024).
- Pessoa, K. A. R. & Salgado, R. & Mata, A. M. A. T. & Quintella, C. M., 2019. Casca de Ostra: tendências recentes dos usos ambientais visando à economia circular. Cadernos de Prospecção – Salvador, 12(4), p. 849-864. Setembro, 2019. Salvador, Brasil.
- Publico, 2021. <https://www.publico.pt/2021/09/14/infografia/radiografia-producao-nacional-ostras-625> (acedido em setembro de 2024).
- Quimica, 2020. <https://www.quimica.com.br/producao-de-acido-sulfurico-a-partir-de-gases-odoriferos/> (acedido em setembro de 2024).
- REA, Portal do estado do ambiente, 2024. <https://rea.apambiente.pt/content/produ%C3%A7%C3%A3o-em-aquicultura> (acedido em setembro de 2024).
- RILEM-CPC-18, 1988. Measurement of hardened concrete carbonation depth. Material and Structures , Volume 18, pp. 453-455.
- Rodrigues, A. N. & Mota, J. M. F. & Silva, R. F. & Santos, A. M., 2018. Uso da concha de marisco como agregado miúdo na produção de tijolo maciço prensado manualmente. Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2018 – 60CBC2018. Setembro, 2018. Cidade Universitária, Recife, Brasil.
- Schorcht, F. & Kourti, I. & Scalet, B.M. & Roudier, S. & Sancho, L. D., 2013. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. European Commission, Joint Research Centre, Institute for prospective technological studies, 2013. Seville, Spain.
- Seesanong, S.& Seangarun, C. & Boonchom, B.& Laohavisuti, N. & Boonmee, W. & Thompho, S. & Rungrojchaipon, P., 2024. Low-Cost and Eco-Friendly Calcium Oxide Prepared via Thermal Decompositions of Calcium Carbonate and Calcium Acetate Precursors Derived from Waste Oyster Shells. Materials 2024,17, 3875. <https://doi.org/10.3390/ma17153875>
- Selo do Mar, 2024. <https://selodemar.com/pt/ostra-portuguesa/> (acedido em agosto de 2024).
- Silva, A. N. R. & Gomes, F. L. M., 2022. Avaliação das emissões de dióxido de carbono e dos impactos do reaproveitamento de pneus inservíveis na produção de cimento. Trabalho de Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal Fluminense. Fevereiro, 2022. Niterói, Brasil.
- Siqueira, N. L. C., 2021. Incorporação do pó de conchas de ostra provenientes do processo de ostreicultura na produção de argamassa para revestimento. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Aquicultura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Abril, 2021. Natal, Brasil.

Spend in, 2018 <https://www.spend-in.com/food/ostra3> (acedido em agosto de 2024).

Summa, D. & Lanzoni, M. & Castaldelli, G. & Fano, E. A. & Tamburini, E., 2022. Tendências e Oportunidades de Valorização de Resíduos de Conchas de Bivalves numa Perspectiva de Bioeconomia Azul Circular. Recursos 2022, 11, 48. Editora Acadêmica: Eva Pongrácz. <https://doi.org/10.3390/recursos11050048>

Vieira, O., 2013. A eletroquímica e o processo de celulose e papel. <https://slideplayer.com.br/slide/1260652/> (acedido em novembro de 2023).