



*Universidade Federal da Paraíba*  
*Centro de Tecnologia*  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**  
**AMBIENTAL**  
**– MESTRADO –**

**ESTUDO DO POTENCIAL DO PÓ DE CONCHA DE MARISCO**  
**COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR EM CIMENTO**  
**LC<sup>3</sup>**

*Por*

***Vinicius da Silva Vieira***

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba*  
*para obtenção do grau de Mestre*

**João Pessoa – Paraíba**  
**Fevereiro de 2026**



*Universidade Federal da Paraíba*  
*Centro de Tecnologia*  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**  
**AMBIENTAL**  
**– MESTRADO–**

**ESTUDO DO POTENCIAL DO PÓ DE CONCHA DE MARISCO**  
**COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR EM CIMENTO**  
**LC<sup>3</sup>**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Vinicius da Silva Vieira**

**Orientador: Prof. Dra. Aline Figueirêdo da Nóbrega**

**João Pessoa – Paraíba**  
**Fevereiro de 2026**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

V658e Vieira, Vinicius da Silva.

Estudo do potencial do pó de concha de marisco como material cimentício suplementar em cimento LC<sup>3</sup> / Vinicius da Silva Vieira. - João Pessoa, 2026. 110 f. : il.

Orientação: Aline Figueirêdo da Nóbrega.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Polimorfismo. 2. Cimento LC<sup>3</sup>. 3. Pó de concha de marisco. 4. Aragonita. 5. Calcita. 6. Economia circular. I. Nóbrega, Aline Figueirêdo da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 548.33(043)




**ESTUDO DO POTENCIAL DO PÓ DE CONCHA DE MARISCO COMO  
MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR EM CIMENTO LC<sup>3</sup>**


**VINICIUS DA SILVA VIEIRA**

**Dissertação aprovada em 05 de fevereiro de 2026**


**Período Letivo: 2025.2**

Documento assinado digitalmente  
 **ALINE FIGUEIREDO DA NOBREGA**  
Data: 25/02/2026 08:46:33-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


**Prof(a). Dr(a). Aline Figueiredo da Nóbrega – IFPB  
Orientador(a)**

Documento assinado digitalmente  
 **MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS**  
Data: 24/02/2026 21:19:16-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof(a). Dr(a). Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – IFPB  
Examinador(a) Interno(a)**

Documento assinado digitalmente  
 **LAURA SILVESTRO**  
Data: 24/02/2026 09:24:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof(a). Dr(a). Laura Silvestro – UTFPR  
Examinador(a) Externo(a)**

Documento assinado digitalmente  
 **CARINA SILVANI**  
Data: 24/02/2026 09:35:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof(a). Dr(a). Carina Silvani – UFCG  
Examinador(a) Externo(a)**

**João Pessoa/PB  
2026**

Dedico este trabalho a Tropical Drinks® em nome dos meus pais, Ana Lúcia e Neto, que sob muitas lutas e renúncias me fizeram chegar até aqui.

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço a Deus e a intercessão de Nossa Senhora por utilizar diversas pessoas para abençoar minha jornada acadêmica, por conceder-me esta oportunidade extraordinária e por guiar-me ao longo deste desafiador percurso, sempre oferecendo-me proteção diária e por mostrar-me que os planos divinos são superiores aos meus próprios objetivos.*

*A minha família, em especial aos meus pais Ana Lúcia e Joaquim Neto, às minhas irmãs, Ana Livia, Samyra e Nathália, por acreditarem no meu potencial e sempre me incentivarem a lutar por meus objetivos, assim como não mediram esforços para que eu chegasse a esta etapa da minha vida.*

*À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aline Nóbrega, pela paciência e ensinamentos como orientadora. Aos companheiros de laboratório: Diego, Djalma, Fabíola, Hélykan, Iranilza, Karina, Leane, Letícia, Lucas, Tayná, Ueslei e Wesley por dividirem comigo os momentos de alegrias e dificuldades encontrados durante a jornada.*

*Às empresas Kaoling, Cimentos Nacional e Mibra Minérios, pelo fornecimento de materiais utilizados nesta pesquisa.*

*Aos funcionários do Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas - UFPB, em especial a Sebastião e Delby, pelo apoio e auxílio na realização dos ensaios laboratoriais. Ao Laboratório de Materiais e Biosistemas - UFPB, ao Núcleo de Pesquisa de Materiais - UFPB e ao Laboratório de Caracterização de Minerais e Materiais - IFRN, pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho.*

*A CAPES pela bolsa de mestrado concedida a mim através do programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba.*

*A todos que não mencionei, mas que me ajudaram direta ou indiretamente, meu muito obrigado!*

## RESUMO

Diante da crescente pressão global pela racionalização do uso de recursos naturais finitos e adoção de práticas alinhadas à Agenda 2030 e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a indústria cimenteira tem buscado por alternativas que causem menor impacto ambiental, considerando sua contribuição de aproximadamente 8–10% das emissões globais de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) associadas à produção de cimento. Nesse contexto, o *Limestone Calcined Clay Cement* ( $\text{LC}^3$ ) destaca-se como uma solução promissora, ao possibilitar reduções de até 35% nas emissões de  $\text{CO}_2$  por meio da substituição parcial do clínquer por argila calcinada e filer calcário (FC). Contudo, a extração do calcário ainda acarreta impactos ambientais relevantes, visto que é um recurso natural não renovável. Dessa forma é importante estudar fontes carbonáticas alternativas, dentre as opções, destaca-se as conchas de marisco (*Anomalocardia brasiliana*), resíduo abundante no litoral brasileiro e rico em  $\text{CaCO}_3$ . Sendo assim, este trabalho avaliou a viabilidade técnica do pó de concha de marisco (PCM) como substituto do filer calcário em sistemas  $\text{LC}^3$ , compostos por 50% de clínquer, 30% de argila caulínica calcinada, 5% de gipsita e 15% de filer calcário. Foram analisadas formulações com substituições de 25%, 50%, 75% e 100% do FC por PCM. Os materiais foram caracterizados por meio da determinação da massa específica, granulometria a laser, FRX, FTIR, DRX e MEV. Também se avaliou as propriedades das misturas conforme requisitos normativos. Os resultados de FRX e FTIR indicaram que o PCM e FC apresentaram composição química semelhante. No que se refere a microestrutura observou-se a formação de etringita, portlandita e hemicarboaluminato, bem como a estabilidade da aragonita no meio alcalino da pasta cimentícia aos 28 dias. Observou-se que o PCM atuou como agente de nucleação heterogênea, favorecendo o consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , o refinamento microestrutural e um ganho de resistência mecânica de 30% para o cimento com 100% de PCM em comparação com a referência aos 91 dias. As misturas com substituições iguais ou superiores a 50% atenderam aos requisitos normativos, indicando que a utilização do PCM é tecnicamente viável quando empregada em teores moderados a elevados. Conclui-se que o PCM pode ser um material alternativo frente ao FC para uso em cimentos  $\text{LC}^3$ , contribuindo para a economia circular e para minimização do impacto causado ao meio ambiente.

**PALAVRAS-CHAVE:**  $\text{LC}^3$ , Pó de concha de marisco, Aragonita, Calcita, Polimorfismo, Economia circular.

## ABSTRACT

Faced with increasing global pressure to rationalize the use of finite natural resources and adopt practices aligned with the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals (SDGs), the cement industry has been seeking alternatives that cause less environmental impact, considering its contribution of approximately 8–10% of global carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions associated with cement production. In this context, Limestone Calcined Clay Cement (LC<sup>3</sup>) stands out as a promising solution, enabling reductions of up to 35% in CO<sub>2</sub> emissions through the partial replacement of clinker with calcined clay and limestone filler (LF). However, limestone extraction still entails significant environmental impacts, since it is a non-renewable natural resource. Therefore, it is important to study alternative carbonate sources; among the options, mussel shells (*Anomalocardia brasiliensis*), an abundant residue on the Brazilian coast and rich in CaCO<sub>3</sub>, stand out. Therefore, this work evaluated the technical feasibility of shellfish powder (CMP) as a substitute for LF in LC<sup>3</sup> systems, composed of 50% clinker, 30% calcined kaolinitic clay, 5% gypsum, and 15% limestone filler. Formulations with filler substitutions of 25%, 50%, 75%, and 100% by CMP were analyzed. The materials were characterized physically, chemically, and mineralogically, as well as microstructurally. The properties of the mixtures were also evaluated in accordance with the normative requirements. The results indicated that LF and CMP presented similar chemical composition. Regarding microstructure, the formation of ettringite, portlandite, and hemicarboaluminate was observed, as well as the stability of aragonite in the alkaline medium of the paste. It was observed that CMP acted as a heterogeneous nucleation agent, favoring Ca(OH)<sub>2</sub> consumption, microstructural refinement, and a 30% increase in mechanical strength for the CMP-treated cement compared to the reference at 91 days. Mixtures with substitutions equal to or greater than 50% met the normative requirements, indicating that the use of CMP is technically feasible when employed in moderate to high levels. It is concluded that CMP can be an alternative material to LF for use in LC<sup>3</sup> cements, contributing to the circular economy and minimizing the environmental impact. Furthermore, it aligns with the SDGs.

**KEYWORDS:** LC<sup>3</sup>, Shellfish powder, Aragonite, Calcite, Polymorphism, Circular economy.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
2.1 Objetivo Geral.....	4
2.2 Objetivos Específicos.....	4
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
3.1 Impactos ambientais causado pela indústria cimenteira.....	5
3.2 Cimento LC <sup>3</sup> .....	7
3.2.1 Produtos de hidratação da matriz LC <sup>3</sup> .....	9
3.2.2 Influência do filer calcário nas propriedades do LC <sup>3</sup> .....	12
3.3. Conchas de Marisco.....	14
3.3.1 Características Gerais.....	14
3.3.2 Composição química e mineralógica.....	17
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
4.1 Beneficiamento dos materiais.....	26
4.2 Ensaio/análises de caracterização dos materiais.....	30
4.2.2 Ensaio de caracterização química dos materiais.....	31
4.2.3 Ensaio de caracterização mineralógica dos materiais.....	32
4.3 Preparação das misturas de cimento.....	32
4.3.1 Validação dos cimentos.....	33
4.3.1 Análise química.....	34
4.3.2 Análise de finura dos cimentos.....	34
4.3.3 Tempo de início de pega.....	35
4.3.4 Análise de resistência à compressão.....	35
4.4 Análise dos produtos de hidratação.....	37
4.5 Análise estatística.....	38
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>39</b>
5.1 Características dos materiais.....	39
5.2 Caracterização dos materiais.....	44
5.2.1 Análise física dos materiais.....	44
5.2.3 Análise química dos materiais.....	49
5.2.4 Análise mineralógica dos materiais.....	52
5.3 Requisitos normativos dos cimentos modificados segundo a NBR 16697 (2018)..	56
5.3.1 Requisitos químicos.....	56
5.3.2 Finura dos cimentos.....	57
5.3.3 Tempo de início e fim de pega.....	58
5.3.4 Resistência à compressão axial das argamassas.....	60
5.4 Análise de regressão linear.....	66
5.4.1 Correlações estatísticas.....	66
5.4.2 Modelos de regressão linear.....	68

5.5 Produtos de hidratação.....	71
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>75</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conjunto de fases de cimento Portland e LC3-50 (50,3%) em 3 e 28 dias de hidratação.....	11
Figura 2 - Conchas de Marisco.....	15
Figura 3 - Resíduos de conchas de moluscos descartados próximos às margens do Rio Paraíba-PB.....	16
Figura 4 - Difratoogramas do pó de concha de marisco.....	20
Figura 5 - Síntese de estudos com uso de conchas marinhas em sistemas LC <sup>3</sup> .....	23
Figura 6 - Procedimento Experimental.....	26
Figura 7 - Local de coleta das conchas de marisco.....	27
Figura 8 - Materiais em estudo (a) Fíler calcário calcítico; (b) Conchas de marisco; (c) Argila caulinitica natural; (d) Clínquer Portland; (e) Gipsita.....	28
Figura 9 - Fluxograma de processos do beneficiamento das conchas.....	28
Figura 10 - Fluxograma de processos do beneficiamento do clínquer.....	29
Figura 11 - Fluxograma de processos para obtenção da argila calcinada.....	30
Figura 13 – Requisitos normativos para validação dos cimentos segundo a NBR 16697 (2018).....	33
Figura 14 - Comparação dos diâmetros característicos do pó de concha e filer calcário.....	40
Figura 15 - Diâmetros característicos do clínquer ao longo do ciclo de moagem.....	41
Figura 16 - Difratoograma de raios x das amostras de argilas cauliniticas natural e calcinada.	42
Figura 17 - Espectros de absorção no infravermelho sobrepostos da argila caulinitica in natura e calcinada à 800°C.....	43
Figura 18 - Curva granulométrica dos materiais em estudo.....	45
Figura 19 - Micrografias de elétrons secundários: (a) Fíler calcário em 800x e 6kx e (b) Pó de concha de marisco em 800x e 6kx.....	48
Figura 20 - Espectros de absorção no infravermelho sobrepostos: Clínquer (a) e Gipsita (b).	50
Figura 21 - Espectros de absorção no infravermelho sobrepostos do filer calcário e do pó de concha de marisco.....	52
Figura 22 – Difratoogramas de raios X (DRX) do filer calcário e do pó de concha de marisco.....	53
Figura 23 – Difratoogramas de raios X (DRX) dos materiais analisados: (a) argila calcinada; (b) clínquer Portland e (c) gipsita.....	55
Figura 24 - Resultados das análises de tempos de pega e índice de consistência das pastas cimenticias.....	58
Figura 25 - Resultados de resistência à compressão diametral das argamassas ao longo do período de cura.....	60
Figura 26 – Correlações estatísticas entre o teor de PCM, a finura dos cimentos, a resistência à compressão das argamassas ao longo do período de cura e os tempos de pega..	67
Figura 27 - Resultados da análise dos produtos de hidratação das pastas cimenticias via DRX: Ett - Etringita; Ms: Monocarboaluminato; CH - Portlandita; Al - Alita; Ar -	



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos normativos para validação dos cimentos segundo a NBR 16697 (2018).....	34
Tabela 2 – Identificação e composição das pastas cimentícias.....	35
Tabela 3 – Identificação e composição das argamassas.....	36
Tabela 4 - Requisitos de resistência à compressão diametral NBR 16697.....	37
Tabela 5 - Diâmetros característicos dos materiais em estudo.....	46
Tabela 6 - Massa específica dos materiais em estudo.....	47
Tabela 7 - Composição química dos materiais.....	49
Tabela 8 – Resultados da Análise Mineralógica por DRX com refinamento de Rietveld...	54
Tabela 9 – Análise dos requisitos químicos segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018).....	56
Tabela 10 – Resíduo na peneira #200.....	57
Tabela 11 - Resultados da ANOVA para a resistência à compressão ao longo do período de cura.....	61
Tabela 12 - Diferenças médias obtidas por análise múltipla de médias pelo método de Tukey para os resultados de resistência à compressão às 24h.....	62
Tabela 13 - Diferenças médias obtidas por análise múltipla de médias pelo método de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 3 dias.....	63
Tabela 14 - Diferenças médias obtidas por análise múltipla de médias pelo método de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 7 dias.....	64
Tabela 15 - Diferenças médias obtidas por análise múltipla de médias pelo método de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias.....	64
Tabela 16 - Diferenças médias obtidas por análise múltipla de médias pelo método de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 91 dias.....	65
Tabela 17 - Medidas de ajustamento do modelo de resistência à compressão aos 28 dias..	68
Tabela 18 – Medidas de ajustamento do modelo de regressão linear para o tempo de início de pega.....	69
Tabela 19 – Medidas de ajustamento do modelo de regressão linear para o tempo de fim de pega.....	70

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais reações de hidratação no sistema LC <sup>3</sup> e seus hidratos.....	9
Quadro 2 - Principais características das fases de CaCO <sub>3</sub> .....	18
Quadro 3 - Teor de CaO em conchas de Marisco encontrados por diferentes autores.....	19
Quadro 4 - Influência da aragonita em matriz cimentícia convencional por diferentes autores.....	21
Quadro 5 - Ensaio e análises de caracterização dos materiais.....	30
Quadro 6 – Testes estatísticos realizados.....	38

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil enfrenta desafios ambientais significativos, principalmente devido ao alto impacto da produção e do consumo de cimento Portland (Moreira, 2020). A extração de matérias-primas não renováveis para sua fabricação contribui para a degradação ambiental, enquanto o processo de produção é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), intensificando a pegada de carbono do setor (Fernandes, 2023). Segundo Reis *et al.* (2021) a produção de cimento Portland é responsável por até 10% das emissões globais de  $\text{CO}_2$ .

Uma das estratégias mais promissoras para mitigar esses impactos é a utilização de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), que permitem a substituição parcial do clínquer, principal constituinte do cimento Portland convencional (Caldas, 2018; Fernandes, 2023). Essa abordagem inclui o uso de resíduos industriais e naturais na formulação de ligantes de baixa emissão de  $\text{CO}_2$ , reduzindo a dependência do clínquer e consequentemente os impactos ambientais negativos associados a sua produção (Santana; Aragão Júnior, 2023; Fernandes, 2023).

Dentre essas alternativas, destaca-se o cimento  $\text{LC}^3$  (*Limestone Calcined Clay Cement*), que substitui parte do clínquer por uma combinação de argila calcinada e filer calcário (Scrivener *et al.*, 2018). A sinergia entre a argila e o filer tem um papel crucial no desempenho do  $\text{LC}^3$ , uma vez que o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) da argila reage com o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) do filer e o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) liberado durante a hidratação do clínquer, formando carboaluminatos hidratados (Antoni *et al.*, 2012; Scrivener *et al.*, 2018; Moreira, 2020), o que contribui para uma microestrutura mais densa e estável, quando comparado a cimentos convencionais, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade do material (Câmara, 2020; Moreira, 2020).

O uso do cimento  $\text{LC}^3$  pode reduzir entre 25% e 35% das emissões de  $\text{CO}_2$  associadas à produção de cimento (Vizcaíno-Andrés *et al.*, 2015). No entanto, a extração do  $\text{CaCO}_3$  de fontes naturais para produção do filer calcário ainda impõe impactos ambientais relevantes, como a degradação de ecossistemas e o aumento da pressão sobre recursos não renováveis (Oliveira *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2023). Nesse contexto, torna-se pertinente o uso de fontes renováveis de carbonato de cálcio, entre as quais se destaca o aproveitamento de resíduos de conchas de moluscos marinhos (Caldas, 2018), por se tratar de um resíduo biogênico composto majoritariamente por  $\text{CaCO}_3$  (Fernandes, 2023).

Na aquicultura e pesca artesanal, os resíduos de conchas podem representar até 80% do peso total dos organismos (Fernandes, 2023), com produção global superior a 14,7 milhões de toneladas em 2022 (FAO, 2024), gerando cerca de 11,7 milhões de toneladas de resíduos de concha por ano. Seu descarte inadequado, prática recorrente em regiões costeiras, tem gerado uma série de impactos ambientais e de saúde pública, como assoreamento de cursos d'águas, poluição visual e proliferação de patógenos (Oliveira; Castilho; El-deir, 2016; Leite *et al.*, 2024). Isso ocorre porque as conchas acumulam resíduos orgânicos, criando um ambiente propício à proliferação de microrganismos e liberando odores que atraem insetos vetores de doenças (Mo *et al.*, 2018; Sawai, 2011).

No cenário brasileiro, essa problemática é recorrente e particularmente observada em municípios costeiros do Nordeste, como é o caso de Cabedelo, no estado da Paraíba, onde conchas da espécie *Anomalocardia brasiliiana*, conhecidas popularmente como marisco-pedra, são frequentemente descartadas às margens do Rio Paraíba e em áreas de manguezal, intensificando a degradação ambiental e evidenciando a carência de estratégias para sua valorização (Caldas, 2018; Fernandes, 2023; Fagundes; Silva, 2022).

As conchas de *Anomalocardia brasiliiana* apresentam particular interesse devido à sua composição majoritariamente constituída por carbonato de cálcio na forma de aragonita (Viana, 2021; Fernandes, 2023). Esse polimorfo difere da calcita, forma mais comum e termodinamicamente estável do  $\text{CaCO}_3$ , amplamente utilizada como filler calcário em sistemas cimentícios (Han *et al.*, 2025). A aragonita, por sua vez, é um polimorfo metaestável que tende, ao longo do tempo, a transformar-se em calcita por meio de processos de dissolução e recristalização (Zhang *et al.*, 2012; Saulat *et al.*, 2020; Cao; Xu; Zhang, 2016; Li; Cao; Yin, 2019).

O polimorfismo do carbonato de cálcio, em particular a coexistência de aragonita e calcita, pode alterar a reatividade e a cinética das reações de hidratação, afetando a formação das fases hidratadas e a evolução microestrutural do sistema. Nesse sentido, considerando o elevado potencial das conchas de marisco como fonte alternativa de  $\text{CaCO}_3$  e seu acúmulo recorrente em áreas costeiras, sua incorporação em cimentos LC<sup>3</sup> apresenta-se como uma estratégia capaz de reduzir a extração de calcário natural e, simultaneamente, mitigar os impactos ambientais associados à disposição inadequada desse resíduo.

Dessa forma, devido a sua composição, rica em calcário, o resíduo de conchas de mariscos tem potencial para ser usado como substituto do filler calcário no LC<sup>3</sup> e pode

representar uma alternativa técnica e ambientalmente vantajosa, promovendo o reaproveitamento de resíduos locais e contribuindo para a economia circular.

Neste contexto, esta pesquisa propõe a investigação de um cimento LC<sup>3</sup> modificado, composto por clínquer, gipsita, argila calcinada e pó de concha de marisco. O estudo concentra-se na formulação e caracterização de misturas cimentícias, avaliando suas propriedades no estado fresco, endurecido e na análise da microestrutura, com ênfase na conformidade com os requisitos estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018) para cimentos Portland no Brasil. Dessa forma, busca-se promover a valorização de um resíduo costeiro abundante e ainda subutilizado, contribuindo para práticas alinhadas à economia circular e para o atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados ao consumo responsável, à ação climática e à inovação na indústria da construção.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar a influência do uso de pó de concha de marisco nas propriedades de um cimento Limestone Calcined Clay Cement.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a validação dos cimentos LC<sup>3</sup> modificados frente a NBR 16697 (ABNT, 2018);
- Investigar a formação dos produtos de hidratação formados nesses ligantes.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo encontra-se estruturado em quatro seções, organizadas com o objetivo de fornecer a fundamentação teórica necessária à análise dos resultados. Inicialmente, é abordado sobre os impactos ambientais do cimento Portland convencional e o *Limestone Calcined Clay Cement* (LC<sup>3</sup>) como uma alternativa sustentável, com ênfase em seus constituintes básicos utilizados neste estudo. Em seguida, discute-se a influência do filer calcário no desempenho dos cimentos LC<sup>3</sup>. Na terceira seção, são abordadas as propriedades das conchas de marisco, com destaque para sua composição química e mineralógica, bem como seu potencial de aplicação como fonte alternativa de carbonato de cálcio. Por fim, é apresentada uma análise do estado da arte referente aos cimentos LC<sup>3</sup> modificados com carbonatos biogênicos oriundos de conchas marinhas, discutindo-se suas implicações no desempenho e na sustentabilidade desses sistemas.

#### 3.1 Impactos ambientais causado pela indústria cimenteira

A indústria da construção civil desempenha um papel fundamental na economia global, tendo o cimento como um de seus principais insumos (Mikulis *et al.*, 2023). A civilização moderna tornou-se dependente desse aglutinante mineral acessível e versátil, devido a sua facilidade de uso, mesmo por profissionais com pouca qualificação (Scrivener; John; Gartner, 2018). No entanto, sua produção acarreta impactos ambientais significativos, tanto pela extração de matérias-primas não renováveis, como rochas carbonáticas e argila, quanto pela emissão de dióxido de carbono durante a queima de combustíveis, para formação do clínquer (Usón *et al.*, 2013; Moreira, 2020). Estima-se que as emissões de CO<sub>2</sub> oriundas do setor cimenteiro aproximem-se de 8–10% das emissões globais (Rocha; Toledo Filho; Cayo-Chileno, 2022), tornando-se um dos principais setores emissores de gases do efeito estufa.

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), os cimentos Portland comercializados no Brasil apresentam diferentes teores de clínquer, que variam conforme o tipo de cimento e as adições minerais incorporadas à sua composição, podendo chegar a uma composição de 100% de sulfatos de cálcio e clínquer, obtido pela calcinação de calcário e argila em até 1450°C, seguido de moagem e adição de 3 a 5% de sulfato de cálcio (Mehta; Monteiro, 2014). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), no Brasil, a produção de cimento totalizou 66.526 mil toneladas em 2023, com uma taxa de emissão de 580 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento. Assim, a indústria cimenteira brasileira emitiu

aproximadamente 38.585 mil toneladas de CO<sub>2</sub> no período. Em escala global, a produção emitiu 4.102 milhões de toneladas no mesmo ano (SNIC, 2023).

Aproximadamente 50% das emissões de CO<sub>2</sub> na fabricação do cimento provêm do processo de calcinação do calcário e argila para obtenção do clínquer, enquanto 40% decorrem da queima de combustíveis e os 10% restantes advêm do uso de eletricidade e do transporte (Usón, 2013). Para cada 1.000 kg de calcário calcinado, são gerados 560 kg de óxido de cálcio (CaO) e 440 kg de CO<sub>2</sub>, tornando essa etapa a principal responsável pelas emissões de carbono do setor, correspondendo a cerca de 52% do total, enquanto o consumo energético responde pelo restante (Costa *et al.*, 2013). Além disso, destaca-se que os maiores consumidores de energia no processo produtivo são os equipamentos responsáveis pela alimentação do forno, o resfriador e os sistemas de moagem e transporte do cimento, que representam mais de 50% do consumo total de energia elétrica (Usón, 2013).

A indústria cimenteira é uma das maiores consumidoras de energia do mundo, com intensidade térmica média no Brasil de 3.624 MJ por tonelada de clínquer (Usón, 2013). Desta forma, entende-se que a relação clínquer/cimento é um fator determinante na pegada de carbono do setor. No Brasil, esse índice foi de 71% em 2023. Assim, reduzir a proporção de clínquer no cimento representa uma estratégia eficaz para mitigar as emissões do setor cimenteiro (Usón, 2013).

O uso de MCS para substituir parte do clínquer no cimento é a abordagem mais eficaz para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> na indústria global de cimento (Scrivener *et al.*, 2018). De acordo com Ilic, Mitrovic e Milicic (2010), os MCS podem ser definidos como materiais sólidos finamente moídos que são usados para substituir parte do clínquer em um cimento ou cimento em uma mistura de concreto. No entanto, a disponibilidade de MCS tradicionais, como cinza volante e escória, é limitada em relação à demanda por cimento (Scrivener, 2014). Essa restrição no fornecimento dificulta a ampliação dessa estratégia, a menos que novas alternativas de MCS sejam desenvolvidas. Entre os materiais disponíveis em quantidade suficiente para atender a essa necessidade, destaca-se a argila rica em caulinita, que pode ser calcinada para produzir um MCS eficiente (Scrivener *et al.*, 2018).

Nesse sentido, a busca por soluções mais sustentáveis na indústria cimenteira tem impulsionado o desenvolvimento de cimentos com menor teor de clínquer, utilizando MCS, como fileres calcários, pozolanas e resíduos industriais (Câmara, 2020). Essa abordagem está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente:

ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura: Incentiva a adoção de processos industriais sustentáveis e o desenvolvimento de materiais inovadores que reduzam o impacto ambiental;

ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis: Promove a construção de edificações mais eficientes e sustentáveis, reduzindo a pegada de carbono do setor;

ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis: Estimula o uso eficiente de recursos naturais e a redução de resíduos na cadeia produtiva do cimento;

ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima: Propõe a adoção de práticas que reduzam as emissões de gases de efeito estufa e mitiguem os impactos climáticos.

Nesse contexto, o cimento LC<sup>3</sup> se apresenta como uma alternativa promissora e de baixo carbono ao cimento Portland (Marangu, 2020), demonstrando potencial para reduzir os impactos ambientais negativos da produção de cimento sem comprometer suas propriedades mecânicas e de durabilidade (Scrivener, 2014). Assim, o LC<sup>3</sup> torna-se uma solução viável para a construção sustentável.

### **3.2 Cimento LC<sup>3</sup>**

O conceito do *Limestone Calcined Clay Cement* surgiu a partir da necessidade de desenvolver um material cimentício mais sustentável, mantendo propriedades mecânicas e de durabilidade comparáveis às do cimento comum (Scrivener, 2014). O LC<sup>3</sup> é um cimento ternário que utiliza a ação sinérgica entre o calcário e argilas caulínicas calcinadas para substituir parte do clínquer, reduzindo significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo de recursos naturais na produção de cimento Portland (Blouch; Rashid; Ju, 2023).

As argilas caulínicas calcinadas destacam-se por apresentar o maior potencial pozolânico entre as diversas classes de argilas, o que as torna uma alternativa eficiente para a substituição parcial do clínquer (Avet; Scrivener, 2018; Fernandez; Martirena; Scrivener, 2011). No entanto, conforme Scrivener *et al.* (2018), mesmo com a utilização de argilas de baixa pureza, teor de caulinita de aproximadamente 40% em misturas de cimento LC<sup>3</sup>-50 (50% de clínquer) já é suficiente para obter propriedades mecânicas semelhantes às do cimento Portland comum a partir dos 7 dias de hidratação. A reatividade desse tipo de argila resulta da formação de metacaulim durante a ativação térmica das argilas brutas (Avet; Scrivener, 2018), por meio do processo de calcinação. De acordo com Ilic, Mitrovic e Milicic (2010), a temperatura de calcinação ideal para obtenção do metacaulim situa-se entre 600 e 800 °C, sendo que temperaturas mais elevadas promovem a recristalização e a formação de mulita (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>), o que reduz a reatividade do material.

Estudos indicam que uma proporção de 2:1 entre argila calcinada e carbonato de cálcio permite substituir cerca de 50% do clínquer, mantendo a resistência mecânica e reduzindo a porosidade (Vizcaíno-Andrés *et al.*, 2015). Pesquisas experimentais, como as realizadas por Antoni *et al.* (2012), demonstram que misturas com até 45% de substituição combinada de argila calcinada e calcário apresentam resistências mecânicas superiores às do cimento CP I após 7 e 28 dias de cura. Mesmo em substituições de 60%, a resistência mecânica atinge 93% daquela obtida com o cimento Portland de referência aos 28 dias, evidenciando a eficácia do sistema ternário. Outros estudos, como o de Lins (2017), reforçam os benefícios do cimento LC<sup>3</sup>, destacando ganhos significativos de resistência em idades avançadas, mesmo em substituições de até 60%.

A viabilidade e a eficiência do cimento LC<sup>3</sup> têm sido amplamente demonstradas na literatura. Segundo Soares (2015), esse sistema é capaz de reduzir a exsudação, o calor de hidratação e a porosidade da matriz, em função do efeito filler, resultando na melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade. Adicionalmente, a Organização das Nações Unidas reconhece o LC<sup>3</sup> como uma das soluções mais promissoras para a redução de emissões na indústria cimenteira, especialmente em países em desenvolvimento (Scrivener; John; Gartner, 2018). Estudos recentes indicam que cimentos LC<sup>3</sup> com teores de clínquer inferiores a 50% mantêm resistências mecânicas adequadas, aliadas à redução da pegada de carbono, Sun, Zunino e Scrivener (2024) reportaram resistências à compressão da ordem de 45 MPa e 34 MPa aos 28 dias para sistemas contendo aproximadamente 39% e 29% de clínquer, respectivamente, na proporção 2:1 entre argila calcinada e calcário, atendendo às classes 42,5 N e 32,5 N da EN 197-1 (2011). Esses resultados reforçam o potencial do LC<sup>3</sup> na transição para uma construção mais sustentável e resiliente.

Do ponto de vista econômico, uma pesquisa realizada em Cuba por Berriel *et al.* (2016) avaliou o potencial econômico e ambiental do cimento LC<sup>3</sup> no contexto cubano, comparando-o com o cimento Portland tradicional e um cimento comercial com zeólita. A análise focou na produção de 1 tonelada de cimento, considerando a extração de matérias-primas, transporte, clínquerização, calcinação de argila e moagem. O LC<sup>3</sup> mostrou uma redução de 30% nas emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com o cimento Portland, com uma substituição de 50% do clínquer por uma mistura de argila calcinada e calcário (proporção 2:1). Além disso, o LC<sup>3</sup> apresentou uma redução nos custos operacionais em cerca de 27%, especialmente quando implementado em fábricas de cimento existentes com tecnologia retrofitted.

Além das vantagens econômicas e ambientais, o LC<sup>3</sup> também apresenta excelente desempenho em durabilidade. Avet e Scrivener (2020) analisaram sua resistência à penetração de cloretos e concluíram que ele supera o cimento Portland nesse aspecto, contribuindo para a longevidade das estruturas. Esses achados reforçam a relevância do LC<sup>3</sup> não apenas para a redução de emissões, mas também para a segurança e eficiência das construções modernas. Dessa forma, sua adoção pode representar um avanço significativo para a indústria da construção civil, garantindo materiais mais duráveis e sustentáveis.

### 3.2.1 Produtos de hidratação da matriz LC<sup>3</sup>

Durante a hidratação do sistema LC<sup>3</sup>, a argila calcinada destaca-se como um material pozolânico, por possuir capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água, formando compostos cimentícios (Ilic; Mitrovic; Milicic, 2010), as principais reações químicas envolvidas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais reações de hidratação no sistema LC<sup>3</sup> e seus hidratos

Descrição da Reação	Equação Química
Hidratação do clínquer (principalmente alita), produzindo o gel C-S-H ou C-A-S-H e hidróxido de cálcio.	$C_3S + Al^{3+} + H \rightarrow C-A-S-H \text{ (gel)} + CH$
Reação pozolânica entre o metacaulim e o hidróxido de cálcio na presença de água.	$Al_2Si_2O_7 + 2CH + 3H \rightarrow C-A-S-H + Al(OH)_3$
Formação de etringita (na presença de sulfatos).	$Al^{3+} + SO_4^{-2} + Ca^{2+} + H \rightarrow C_6AS_3H_{32}$
Formação de Monocarboaluminato, fase AFm (Alumina-Ferrita-Monosal) com carbonato.	$Al^{3+} + Ca^{2+} + CO_3^{-2} + H \rightarrow C_4ACH_{11}$
Formação de Hemicarboaluminato, fase AFm, formada pela reação de aluminato com calcário, mas com menor conteúdo de $CO_3^{2-}$ .	$Al^{3+} + Ca^{2+} + 0,5CO_3^{-2} + H \rightarrow C_4A_{0,5}CH_{13}$
C <sub>3</sub> S: Alita; H: Água; C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub> : (silicato de cálcio hidratado); CH: Hidróxido de cálcio; MK: Metacaulim (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ); C <sub>6</sub> AS <sub>3</sub> H <sub>32</sub> : Etringita; C <sub>4</sub> ACH <sub>11</sub> : Monocarboaluminato; C <sub>4</sub> A <sub>0,5</sub> CH <sub>13</sub> : Hemicarboaluminato; Al(OH) <sub>3</sub> : hidróxido de alumínio; C-S-H: Silicato de cálcio hidratado; C-A-S-H: aluminossilicato de cálcio hidratado.	

Fonte: Autoria própria, (2026).

O metacaulim formado após a calcinação da caulinita reage, em meio aquoso e à temperatura ambiente, com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação das fases silicato do clínquer Portland (C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S), formando principalmente silicatos de cálcio hidratados

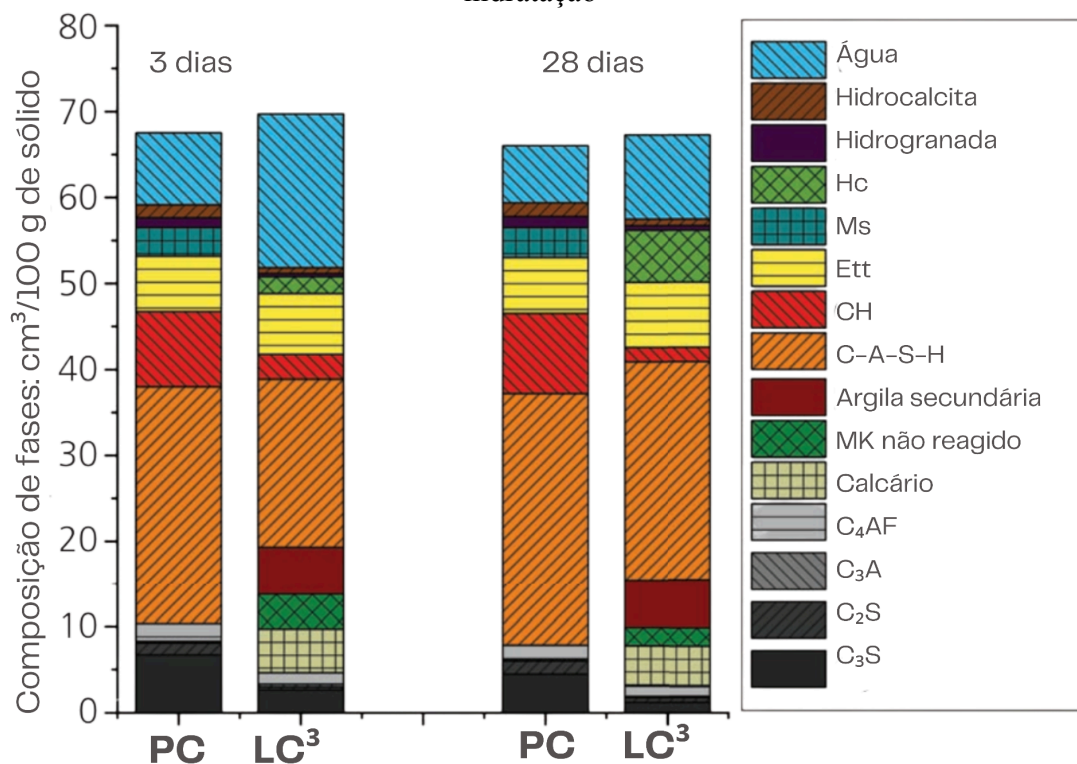
com alumínio incorporado (C–A–S–H) e fases do tipo AFm (alumina, ferro e monossulfato) (Ilic; Mitrovic; Milicic, 2010; Vizcaíno-Andrés *et al.*, 2015; Scrivener *et al.*, 2018).

Além disso, na presença do filer calcário, o alumínio liberado pela argila caulinítica calcinada interage com o carbonato de cálcio, formando carboaluminatos hidratados, como hemicarboaluminato (Hc) e monocarboaluminato (Mc). Esta reação sinérgica é uma ponto chave do sistema LC<sup>3</sup>, pois confere maior densidade e durabilidade à matriz, como também promove a substituição do monossulfoaluminato (Ms) por fases de carboaluminato (Scrivener *et al.*, 2018). Sendo essa troca decisiva para a durabilidade do matriz, uma vez que a microestrutura é estabilizada e as expansões associadas à etringita controlada, aumentando a resistência frente a ataques químicos, como os de sulfatos (Antoni *et al.*, 2012; Scrivener, 2014; Vizcaíno-Andrés *et al.*, 2015).

Além disso, os hidratos de carboaluminato contribuem para o preenchimento dos poros da matriz cimentícia, elevando sua densidade e resistência. Estudos indicam que essas reações ocorrem de forma significativa já a partir de 1 dia de hidratação, evidenciando o potencial do sistema para aplicações em cimentos sustentáveis (Antoni *et al.*, 2012; Vizcaíno-Andrés *et al.*, 2015; Avet; Scrivener, 2018).

O conjunto de fases do LC<sup>3</sup> com 50% de substituição do clínquer por argila calcinada e filer pode ser caracterizado, como mostrado na Figura 1, onde são comparados aos 3 e 28d de hidratação o cimento Portland comum e o cimento LC<sup>3</sup>.

Figura 1 - Conjunto de fases de cimento Portland e LC3-50 (50,3%) em 3 e 28 dias de hidratação



Hc - Hemicarboaluminato; Ms - Monossulfato; Ett - Etringita; CH - Hidróxido de cálcio; C-A-S-H - Silicato de cálcio-alumínio hidratado; C<sub>4</sub>AF - Tetra-aluminoferrita de cálcio; C<sub>3</sub>A - Tri-aluminato de cálcio; C<sub>2</sub>S - Silicato dicálcico; C<sub>3</sub>S - Silicato tricálcico.

Fonte: Scrivener *et al.*, (2018).

Analisando os resultados obtidos por Scrivener *et al.*, (2018) percebe-se que o conteúdo de hidróxido de cálcio (CH) é reduzido, indicando o consumo pela reação pozolânica com a argila caulínica calcinada. Observa-se a formação de Hc como principal fase AFm, em vez de Ms, que é característico do cimento Portland. A presença de etringita ainda é notável, mesmo em 28 dias. Há presença de argila secundária não reagida, o que mostra que nem todo o metacaulim hidratou até o 28º dia – o que pode ser considerado positivo, pois confere potencial reativo a longo prazo.

Além da formação de Hc e Mc, o calcário adicionado ao cimento LC<sup>3</sup> também possui relevância física. A otimização da distribuição granulométrica das partículas de calcário melhora as propriedades reológicas do LC<sup>3</sup> (Scrivener *et al.*, 2019), promovendo uma maior fluidez e trabalhabilidade da pasta cimentícia. Esse efeito não apenas contribui para a compactação do material, mas também facilita a dispersão das partículas de clínquer e metacaulim, otimizando a hidratação e a formação de fases cimentícias. Além disso, a presença de partículas finas de calcário pode acelerar as reações iniciais de hidratação, atuando como núcleos de precipitação para os compostos hidratados, o que resulta em um ganho precoce de resistência mecânica (Antoni *et al.*, 2012; Scrivener *et al.*, 2019).

Dessa forma, entende-se que o filer calcário não apenas reduz o consumo de clínquer, mas também exerce papel relevante na melhoria da coesão e da resistência mecânica do cimento LC<sup>3</sup>. A compreensão dessa influência torna-se especialmente importante quando se considera a possibilidade de substituição do calcário natural por fontes alternativas de CaCO<sub>3</sub>. Nesse contexto, o tópico a seguir discute especificamente a influência do filer calcário nas propriedades do LC<sup>3</sup>, estabelecendo a base conceitual para a avaliação de materiais carbonáticos alternativos.

### 3.2.2 Influência do filer calcário nas propriedades do LC<sup>3</sup>

O filer calcário nos cimentos LC<sup>3</sup> manifesta-se por meio de mecanismos físicos e químicos interdependentes, que afetam a hidratação, a microestrutura e o desenvolvimento da resistência mecânica. Diferentemente de um material inerte, o calcário atua como agente de preenchimento, sítio de nucleação e reagente químico, desempenhando papel central na sinergia característica do sistema LC<sup>3</sup> (Liu *et al.*, 2024; Shao; Cao, 2024).

Do ponto de vista físico, o chamado efeito filer está associado ao preenchimento dos vazios entre os grãos de clínquer e da argila calcinada, promovendo melhor empacotamento das partículas e redução da porosidade capilar (Oliveira, 2018). Além disso, a finura do filer também se reflete na cinética de hidratação. Shao, Cao e Zheng (2024) observaram que o aumento da finura do calcário intensifica os sítios de nucleação e reduz a contribuição do crescimento cristalino como etapa controladora da reação, resultando em maior taxa de precipitação das fases hidratadas nas idades iniciais.

Além dos efeitos físicos, o filer calcário participa ativamente de reações químicas no LC<sup>3</sup>. A principal sinergia química ocorre entre o carbonato de cálcio do filer e a alumina reativa proveniente da argila calcinada, resultando na formação de fases carboaluminato do tipo AFm, como o hemicarboaluminato e o monocarboaluminato. Segundo Fu, Liu e Niu (2026), essa reação favorece a estabilização da etringita em detrimento da formação de monossulfoaluminato, aumentando o volume total de fases sólidas e contribuindo para o refinamento da microestrutura e a densificação da matriz, conforme demonstrado anteriormente no Quadro 1 do tópico 3.2 deste capítulo.

Os efeitos combinados da finura e da composição química do filer refletem-se diretamente no desempenho mecânico do LC<sup>3</sup>. Lins (2017) avaliou argamassas LC<sup>3</sup> com diferentes tipos de filer calcário, utilizando 45% de substituição do clínquer e proporção 2:1 entre argila calcinada e filer, e observou resistências à compressão semelhantes aos 28 dias, quando comparado a mistura de referência, indicando predominância dos efeitos

físicos nas idades iniciais. Entretanto, aos 90 dias, o filer com maior teor de carbonato de cálcio apresentou melhor desempenho mecânico, evidenciando a importância da sinergia química em idades mais avançadas.

Resultados semelhantes foram reportados por Oliveira (2018), ao investigar cimentos LC<sup>3</sup> produzidos com diferentes tipos de filer. Nas primeiras idades, o melhor desempenho mecânico foi associado aos fileres com menor diâmetro médio de partículas, em razão da intensificação dos efeitos físicos de nucleação. A partir de 7 dias, observou-se incremento significativo da resistência à compressão decorrente da formação de fases carboaluminato, resultantes da reação entre o carbonato de cálcio do filer e as fases aluminosas da argila calcinada. Aos 28 e 91 dias, o filer caracterizado pelo maior teor de óxido de cálcio (49,1%), apresentou os maiores valores de resistência mecânica entre os materiais avaliados, enquanto o filer com baixo teor de CaO (2,75%) e elevada fração silicosa, apresentou desempenho inferior, mesmo apresentando maior finura. Esses resultados indicam que, embora a finura exerça papel relevante nas idades iniciais, o teor de carbonato de cálcio torna-se determinante em idades mais avançadas, evidenciando a existência de um limite inferior de calcário abaixo do qual os efeitos físicos não são suficientes para compensar a menor reatividade química do sistema LC<sup>3</sup>.

Em síntese, a literatura indica que o desempenho do LC<sup>3</sup> depende do equilíbrio entre as propriedades físicas do filer, como finura e área superficial, e sua composição química, especialmente o teor de carbonato de cálcio. A compreensão dessa interação é fundamental para a otimização de sistemas LC<sup>3</sup> com elevados teores de substituição do clínquer e fornece base conceitual para a investigação de fontes alternativas de CaCO<sub>3</sub>, como resíduos carbonáticos de origem biogênica.

Contudo, a viabilidade técnica e a implementação em larga escala do cimento LC<sup>3</sup> enfrentam desafios relacionados à dependência de calcário natural não renovável. Diante desse cenário, torna-se essencial a busca por alternativas mais sustentáveis para substituir o filer calcário em cimentos LC<sup>3</sup>, visando reduzir ainda mais os impactos ambientais do setor. Nesse contexto, biomateriais como conchas de moluscos e ossos de animais, surgem como opções promissoras, uma vez que apresentam diferentes estruturas morfológicas e teores de CaCO<sub>3</sub>, características que influenciam diretamente suas propriedades e aplicações (Caldas, 2018; Fernandes, 2023).

Entre essas alternativas, as conchas de marisco se destacam por sua ampla disponibilidade e por serem frequentemente descartadas como resíduos da mariscagem, atividade que envolve a coleta de moluscos para consumo e comercialização. Esse

processo, quando realizado de maneira desordenada, pode levar à impactos ambientais significativos, como poluição visual, proliferação de vetores de doenças (baratas, ratos, *Aedes aegypti*), colonização de microrganismos patogênicos, assoreamento e alterações na qualidade da água em comunidades ribeirinhas (Fernandes, 2023; Oliveira; Castilho; El-deir, 2016; Leite *et al.*, 2024). Nesse sentido, a reutilização das conchas como matéria-prima para a produção de cimento poderia mitigar parte desses problemas, promovendo um modelo mais sustentável de gestão desses resíduos (Oliveira; Castilho; El-deir, 2016).

Dessa forma, a substituição do filer calcário por pó de conchas de marisco em cimentos LC<sup>3</sup>, pode não apenas favorecer a economia circular ao converter resíduos em insumos para a construção civil, como também manter o potencial de sinergia química essencial para a formação de fases carboaluminato, por serem compostas por CaCO<sub>3</sub>, reforçando a viabilidade técnica e ambiental do sistema.

### **3.3. Conchas de Marisco**

#### **3.3.1 Características Gerais**

A *Anomalocardia brasiliana* (Figura 2), conhecida como marisco-pedra, é um molusco bivalve amplamente distribuído ao longo da costa brasileira (Fernandes, 2023). Trata-se de um dos mariscos mais consumidos e comercializados no Brasil (Boehs *et al.*, 2010).

Figura 2 - Conchas de Marisco



Fonte: Viana, (2021).

O descarte inadequado das conchas de marisco tem gerado preocupação entre autoridades e órgãos de vigilância sanitária, pois a grande quantidade de resíduos sólidos (conchas) pode provocar assoreamento em rios e oceanos, alterando comunidades de fitoplâncton (Leite *et al.*, 2024). Muitos produtores descartam esse material em áreas de mangue, terrenos baldios ou diretamente no mar (Caldas, 2018). Além do impacto ambiental, esse descarte irregular contribui para a geração de problemas de saúde pública, representando risco sanitário para comunidades ribeirinhas e áreas urbanas próximas (Fernandes, 2023; Oliveira; Castilho; El-deir, 2016; Leite *et al.*, 2024).

Estima-se que, na mariscagem, apenas 20% do marisco seja aproveitado para consumo, enquanto os 80% restantes, compostos pelas conchas, são descartados sem um destino adequado (Petcov, 2007). Essa grande quantidade de resíduo representa um passivo ambiental significativo, reforçando a necessidade de estratégias para seu reaproveitamento.

No município de Cabedelo-PB, localizado na Região Metropolitana de João Pessoa, é recorrente o descarte inadequado de conchas de marisco, especialmente nas áreas próximas ao Rio Paraíba. A pesca artesanal de mariscos é uma atividade essencial para as famílias que dependem dessa prática para sua subsistência e geração de renda, no entanto,

a falta de gestão dos resíduos gerados tem causado sérios impactos ambientais (Fagundes; Silva, 2022). No bairro do Renascer, estima-se uma geração diária entre 10 e 12 toneladas de resíduos de conchas de marisco. Esses resíduos, frequentemente depositados em áreas de manguezal ou terrenos baldios, contribuem para o assoreamento de áreas costeiras e para a degradação dos ecossistemas locais (Figura 3). Apesar da crescente conscientização quanto ao potencial de reaproveitamento das conchas, a carência de políticas públicas efetivas e de infraestrutura adequada para o manejo desses resíduos permanece como um desafio para os municípios litorâneos, dificultando a implementação de soluções ambientalmente sustentáveis.

Figura 3 - Resíduos de conchas de moluscos descartados próximos às margens do Rio Paraíba-PB



Fonte: Fagundes e Silva (2022).

A ausência de iniciativas para o reaproveitamento das conchas tem sido um desafio para os municípios litorâneos que buscam minimizar os impactos ambientais e sociais (Wolf, 2018). Esses resíduos são classificados como resíduos sólidos urbanos, pois são frequentemente descartados em espaços públicos, tornando-se responsabilidade da administração municipal (Jacobi; Besen, 2011). A Instrução Normativa nº 13 do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) (2012) inclui esses materiais na Lista Brasileira de Resíduos Sólidos, categorizando-os como resíduos não perigosos.

De acordo com Fernandes (2023), as marisqueiras reconhecem o potencial de aproveitamento das conchas, mas fatores como grande volume de produção diária, falta de espaço para armazenamento e inexistência de políticas públicas para o manejo adequado fazem com que esses resíduos se acumulem em vias públicas e manguezais. A Instrução Normativa nº 105 do IBAMA (2006) proíbe o descarte de resíduos da malacocultura no mar e responsabiliza os empreendedores pela destinação correta dos materiais, mas a fiscalização e implementação das normas ainda são deficientes (Fernandes, 2023; Leite *et al.*, 2024).

Segundo Fernandes (2023), as conchas de marisco são constituídas predominantemente por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), característica que as torna uma alternativa tecnicamente viável ao calcário natural, com potencial para reduzir a demanda por esse recurso não renovável. Diante dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado e do volume expressivo ocupado por esses resíduos, torna-se necessário o desenvolvimento de estratégias que promovam sua mitigação por meio do reaproveitamento como fonte alternativa de materiais (Águila-Almanza *et al.*, 2022). Nesse contexto, a avaliação da composição química e mineralógica das conchas de marisco assume papel fundamental, uma vez que essas características determinam sua reatividade, estabilidade e adequação para aplicação em sistemas cimentícios, como o cimento LC<sup>3</sup>.

### 3.3.2 Composição química e mineralógica

O carbonato de cálcio existe em três fases cristalinas anidras encontradas na natureza: calcita, aragonita e vaterita. A calcita é a fase termodinamicamente mais estável, seguida pela aragonita e depois pela vaterita (Kontoyannis; Vagenas, 2000; Nebel; Epple, 2008; Islam *et al.*, 2011). O Quadro 2 apresenta as características principais das fases do  $\text{CaCO}_3$  conforme o estudo de Kontoyannis e Vagenas 2000).

Quadro 2 - Principais características das fases de  $\text{CaCO}_3$ 

Características	Fase		
	Calcita	Aragonita	Vaterita
	Cristais cúbicos, romboédrico. Mais estável.	Cristais de aragonita em forma de agulha, frequentemente dispostos em feixes. A aragonita pode se transformar em calcita em temperaturas elevadas.	Não possui uma morfologia distinta, ocorrendo como partículas esféricas de tamanho submicrométrico. A vaterita é a fase menos estável do carbonato de cálcio.

Fonte: Autoria própria, (2026).

O  $\text{CaCO}_3$  é encontrado predominantemente na natureza sob a forma de calcita. Essa fase mineralógica ocorre em rochas calcárias, sendo amplamente utilizada como filler calcário quando moída e como matéria-prima para a produção do clínquer de cimento Portland (Leite, 2024). A aragonita, por sua vez, constitui a principal fase mineralógica das conchas de organismos marinhos, embora sua aplicação na construção civil seja menos comum (Viana, 2021).

A composição química das conchas de marisco é predominantemente formada por  $\text{CaCO}_3$ , podendo variar conforme a espécie, local de coleta e beneficiamento (Oliveira; Castilho; El-deir, 2016; Caldas, 2018; Fulgêncio *et al.*, 2018; Viana, 2021; Fernandes, 2023). Nesse contexto, o Quadro 3 apresenta uma síntese da caracterização de conchas de marisco por diferentes autores.

Quadro 3 - Teor de CaO em conchas de Marisco encontrados por diferentes autores

<b>Autor</b>	<b>Localidade</b>	<b>Beneficiamento</b>	<b>CaO (%)</b>
Hamester e Becker (2010)	Região de Joinville-SC	As conchas foram limpas com água e expostas ao ar livre por um período de 7 dias, em seguida, para a fragilização das conchas, as mesmas foram queimadas em forno à 200°C por 1 hora em seguida passaram por 4 condições de moagem: 15 e 30 minutos via úmido e via seco em moinho de bolas, queimadas novamente à 500°C por 2 horas e para desfazer os aglomerados, uma nova moagem foi realizada, porém à seco, por 1 minuto.	95,74
Fulgêncio <i>et al.</i> (2018)	Litoral paraibano	As conchas de marisco foram moídas via seca, em moinho de discos, para obtenção de um pó fino, posteriormente peneirado para a obtenção de partículas com diâmetro menor ou igual a 74 µm (#200).	53,80
Viana (2021)	Município de Cabedelo-PB	As conchas foram lavadas e secas ao ar livre por 48 horas. Em seguida, foram trituradas em um moinho de bolas. Preencheu-se o cilindro do moinho pela metade e cada amostra passou cerca de 02h no processo de moagem. Fez-se então o peneiramento das amostras em uma peneira ABNT nº 200 (74 µm).	94,89
Fernandes (2023)	Barra de Mamanguape no município de Rio Tinto-PB	As conchas foram higienizadas e processadas em três etapas, sendo a primeira no triturador, a segunda no moinho de bolas e na terceira o qual o material foi submetido à calcinação a uma temperatura final de 500° C e realizada a desaglomeração através do pilão metálico.	97,51

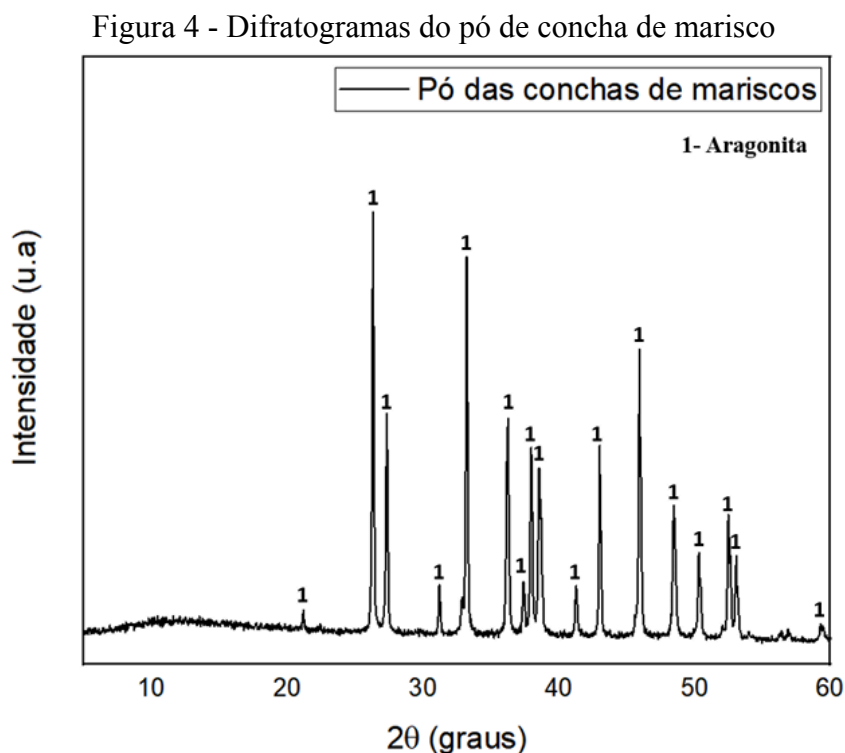
(Fonte: Autoria própria, 2026).

Em estudos como os de Fulgêncio *et al.* (2018), Viana (2021) e Fernandes (2023), a quantidade de CaO nas conchas pode variar dependendo do tratamento aplicado, mas o teor de CaCO<sub>3</sub>, principal componente que confere propriedades cimentícias ao material, se mantém. O Quadro 3 evidencia essa variação, destacando que a presença de CaCO<sub>3</sub> nas conchas, mesmo sem um tratamento térmico, pode proporcionar teores adequados de carbonato de cálcio para aplicação como filer no cimento. Viana (2021) obteve um teor de 94,89% de CaO sem a necessidade de calcinação, o que demonstra que a moagem e o

peneiramento podem ser suficientes para garantir a qualidade do material para aplicação na produção de cimentos LC<sup>3</sup>.

A utilização das conchas *in natura* favorece a redução dos custos de produção e minimiza os impactos ambientais, alinhando-se aos princípios da construção civil sustentável. Dessa forma, a escolha de um processamento exclusivamente mecânico para as conchas de marisco mantém a viabilidade técnica de sua aplicação em cimentos LC<sup>3</sup> e contribui para a redução do impacto ambiental do setor da construção civil. (Caldas, 2018; Fulgêncio *et al.*, 2018; Viana, 2021; Fernandes, 2023).

A análise de difração de raios-X (DRX) realizada por Viana (2021), em sua pesquisa sobre o uso da concha de marisco na formulação de fluidos de perfuração de poços de petróleo, confirmou que as conchas coletadas em Cabedelo - PB, são compostas exclusivamente por CaCO<sub>3</sub> na forma de aragonita, conforme mostrado na Figura 4.



Fonte: Viana, (2021).

Resultados semelhantes foram obtidos por Fulgêncio (2019), Caldas (2018) e Leite (2024), os quais demonstraram que, mesmo quando a espécie *Anomalocardia brasiliana* é coletada em diferentes regiões, sua composição mineralógica permanece predominantemente constituída por CaCO<sub>3</sub> na forma de aragonita.

A forma cristalina do carbonato de CaCO<sub>3</sub> exerce influência direta no comportamento de sistemas cimentícios, afetando de maneira significativa a cinética de

hidratação e o desenvolvimento das propriedades mecânicas (Shao; Cao; Zheng, 2024). Essa influência tem sido ainda que incipiente, investigada na literatura, conforme sintetizado no Quadro 4, que reúne estudos recentes comparando o desempenho da aragonita com a calcita substituindo o cimento Portland convencional em pastas cimentícias.

Quadro 4 - Influência da aragonita em matriz cimentícia convencional por diferentes autores

<b>Autor</b>	<b>Tipo de material</b>	<b>Resistência mecânica</b>	<b>Hidratação</b>
Zhao <i>et al.</i> (2023)	Pastas cimentícias com aragonita sintética com teor de substituição entre 10% e 20% em massa.	Melhoria da resistência à compressão em todas as idades, com ganho de 10,4% para a pasta com aragonita em relação à referência e de 3,9% em relação à pasta com calcita.	A pasta com aragonita atingiu o pico principal de hidratação 1,3 vezes mais rápido que a pasta com calcita ( $\approx 7,5$ h vs. 9,5 h).
Li, Cao e Yin (2019)	Pastas cimentícias com aragonita sintética ultra finas com teor de substituição de 1% em massa.	A aragonita apresentou resistência à compressão 45% superior à da calcita no 1º dia.	Pico de hidratação: aragonita $\approx 4,5$ h; calcita $\approx 6,5$ h. Calor de hidratação da aragonita 39,1% maior que o da calcita nas primeiras 6 h.
Shen <i>et al.</i> (2022)	Aragonita sintética ultra finas com teor de substituição entre 0,5% a 2,0% em massa.	Incremento de até 25,2% na resistência à compressão e 30,5% na resistência à flexão aos 28 dias, em comparação com o controle.	Não informado.

Fonte: Autoria própria, (2026).

Zhao *et al.* (2023), ao avaliarem a substituição parcial do cimento Portland por pós sintéticos de calcita e aragonita, observaram que a aragonita proporcionou ganhos de resistência à compressão de aproximadamente 10,4% em relação à pasta de referência e 3,9% em relação à pasta com calcita, além de antecipar o pico principal de hidratação em cerca de 2 horas. De maneira complementar, Shen *et al.* (2022) demonstraram que a aragonita, quando empregada na forma de *whiskers*, pode atuar simultaneamente como sítio de nucleação e microelemento de reforço, resultando em incrementos de até 25,2% na resistência à compressão e 30,5% na resistência à flexão aos 28 dias.

Li, Cao e Yin (2019) compararam o desempenho da calcita e da aragonita tanto no estado fresco quanto no processo de hidratação de pastas de cimento Portland. Os autores

observaram que, embora a calcita apresenta ligeira vantagem na melhoria da fluidez e na aceleração da hidratação da pasta, ambas as fases do  $\text{CaCO}_3$  podem ser utilizadas como filler em formulações cimentícias. Embora esses estudos se restrinjam a sistemas de cimento Portland e utilizem materiais sintéticos, eles fornecem evidências mecanísticas relevantes acerca do papel da aragonita em matrizes cimentícias.

A maior reatividade da aragonita também foi observada em ensaio de reatividade de concha de mexilhões, de modo que o calor total liberado foi de 21.9 J/g contra 14.9 J/g para filler calcário, mesmo a concha apresentando maior diâmetro médio que o filler calcário estudado (Rux, Tuen; Suraneni, *et al.* 2025). De acordo com Fernández-Díaz *et al.* (1996), essas propriedades morfológicas promovem reações superficiais seletivas e conferem estabilidade parcial das fases Mc em meio alcalino, ao mesmo tempo em que sua estrutura fibrosa influencia significativamente o refinamento microestrutural ao longo do processo de hidratação da matriz cimentícia.

Nesse contexto, a predominância da fase aragonita nas conchas de marisco sugere que o uso desse resíduo como substituto do filler calcário convencional pode implicar não apenas efeitos físicos de preenchimento, mas também alterações na cinética de hidratação e na microestrutura do sistema, aspectos particularmente relevantes em cimentos  $\text{LC}^3$ , nos quais a interação entre aluminatos, carbonatos e argilas calcinadas desempenha papel fundamental. Assim, a compreensão da composição química e mineralógica das conchas de marisco estabelece uma base teórica essencial para a interpretação dos resultados experimentais apresentados nos capítulos subsequentes, especialmente aqueles relacionados à hidratação, microestrutura e desempenho mecânico dos cimentos  $\text{LC}^3$  modificados.

#### 3.3.4 Conchas marinhas em $\text{LC}^3$

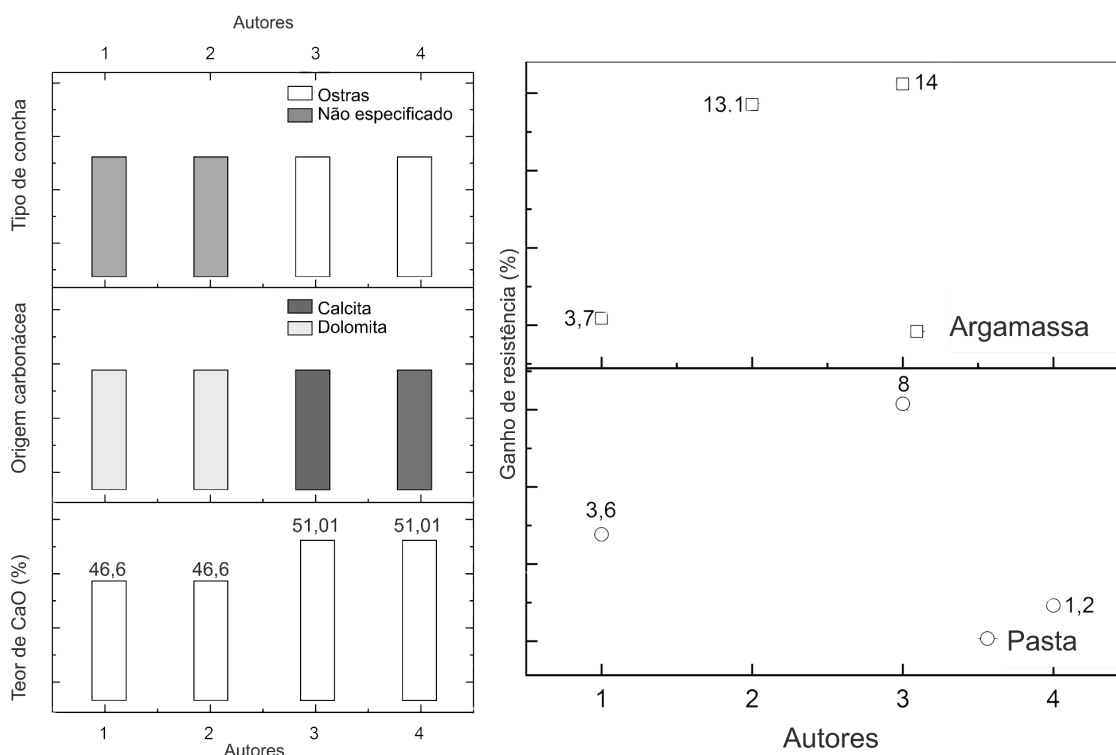
Nas literaturas recentes não há registros consolidados sobre o uso de conchas de marisco como fonte de carbonato de cálcio em sistemas  $\text{LC}^3$ . No entanto, pesquisas recentes vêm explorando a sinergia entre a argila calcinada e o clínquer Portland com o pó de conchas de animais marinhos, com destaque para ostras e mexilhões.

Os estudos de Gu *et al.* (2024), Her *et al.* (2020), Her *et al.* (2024) e Liu *et al.* (2024) demonstram que os resíduos de conchas podem atuar como substituto parcial ou total do calcário, promovendo efeitos benéficos no desempenho mecânico e na estrutura interna do cimento  $\text{LC}^3$ . Além disso, avalia-se que o beneficiamento das conchas (*in natura*

ou calcinadas) influencia diretamente suas propriedades físico-químicas, alterando a reatividade, a formação de hidratos e a compactação da matriz cimentícia.

A Figura 5 apresenta uma síntese comparativa dos quatro estudos disponíveis até o momento que investigaram a influência do carbonato de cálcio de origem biogênica nas propriedades de cimentos LC<sup>3</sup>. Nela são reunidos os teores de CaO dos materiais avaliados e os ganhos de resistência mecânica dos cimentos modificados com pós de conchas, em relação aos cimentos LC<sup>3</sup> de referência, nos quais o filer calcário constitui a única fonte de CaCO<sub>3</sub>.

Figura 5 - Síntese de estudos com uso de conchas marinhas em sistemas LC<sup>3</sup>



(1) Liu *et al.*, (2024); (2) Gu *et al.*, (2024); (3) Her *et al.*, (2024a); (4) Her *et al.*, (2024b)

Fonte: Autoria própria, (2026).

De forma geral, a análise integrada dos resultados apresentados na Figura 5 permite afirmar que, independentemente do tipo de concha marinha empregada, todos os sistemas LC<sup>3</sup> modificados com carbonato de cálcio de origem biogênica apresentaram desempenho mecânico superior ao dos respectivos cimentos LC<sup>3</sup> de referência (apenas com o filer calcário como fonte de CaCO<sub>3</sub>). Esse comportamento consistente, observado em diferentes investigações e condições experimentais, indica que o ganho de resistência não está associado a uma espécie específica de concha, mas à natureza carbonática do material e à sua interação físico-química com a matriz LC<sup>3</sup> (Her *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2024; Gu *et al.*, 2024).

Adicionalmente, a similaridade nos teores de CaO observados entre os diferentes resíduos biogênicos, tipicamente entre 46,6% e 51,0%, indica elevada pureza carbonática, o que favorece a estabilidade química do sistema e a ocorrência de reações complementares com as fases aluminatos da argila calcinada. Essas reações contribuem para a formação de hemicarboaluminato e monocarboaluminato, fases reconhecidas por aumentar o volume de sólidos hidratados, refinar a distribuição de poros e melhorar a coesão da matriz cimentícia (Scrivener *et al.*, 2018).

A magnitude dos ganhos de resistência, contudo, varia de acordo com o tipo de sistema avaliado. Em ensaios conduzidos em argamassas, os incrementos quando comparado a ação da aragonita com a calcita são significativamente mais elevados do que aqueles observados em pastas, alcançando aumentos da ordem de 8% a 14%, enquanto nas pastas os ganhos permanecem mais modestos, entre aproximadamente 0,2% e 3,6%. Essa diferença está diretamente relacionada às distintas metodologias de ensaio adotadas nos estudos, bem como à influência do agregado miúdo na redistribuição de tensões e no aproveitamento dos efeitos físicos de preenchimento e nucleação promovidos pelas partículas de carbonato.

No que tange ao calor de hidratação e à cinética inicial, Her *et al.* (2024) afirmam que o pó de  $\text{CaCO}_3$  biogêncio, oriundo da concha de ostra, atua como um acelerador de pega. Os autores demonstram por meio de calorimetria isotérmica que a hidratação em sistemas com concha ocorre de forma mais rápida do que no  $\text{LC}^3$  convencional e no Cimento Portland Comum (CP). Este fenômeno é atribuído à morfologia irregular das partículas de concha (em formas de ponta de lança ou subarredondadas), que oferecem uma maior área superficial específica para a nucleação heterogênea dos produtos de hidratação, acelerando a dissolução do silicato tricálcico (C3S) e o fim do período de indução.

Resultados convergentes foram observados por Her *et al.* (2020), que avaliaram a substituição total do filler calcário por pó de concha de ostra com granulometria inferior a 100  $\mu\text{m}$  em sistemas  $\text{LC}^3$ . Os autores verificaram que a maior finura das partículas de concha acelerou a hidratação inicial em relação ao calcário, promovendo resistências à compressão similares às do  $\text{LC}^3$  convencional e superiores às do Cimento Portland Comum nas idades de 3 e 7 dias. A análise microestrutural confirmou a formação de mono-carboaluminato e hemi-carboaluminato, fases típicas da interação entre carbonatos e aluminatos, além do consumo de hidróxido de cálcio evidenciado por termogravimetria, indicando eficiência reativa comparável à do sistema  $\text{LC}^3$  tradicional.

De forma complementar, Liu *et al.* (2024) avaliaram o efeito do pó de concha na hidratação e microestrutura de cimentos LC<sup>3</sup> com diferentes materiais cimentícios suplementares. Os autores observaram que o pó de concha, composto por dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) acelera a hidratação das fases C<sub>3</sub>S e C<sub>3</sub>A de maneira mais eficiente do que o pó de calcário, especialmente em sistemas ricos em aluminatos. Entretanto, também foi identificado que o preenchimento excessivo dos poros pode limitar o espaço disponível para o crescimento posterior dos produtos de hidratação, retardando parcialmente o ganho de resistência em idades mais avançadas. Ainda assim, o material contribuiu para a redução de poros maiores e para a uniformização da microestrutura.

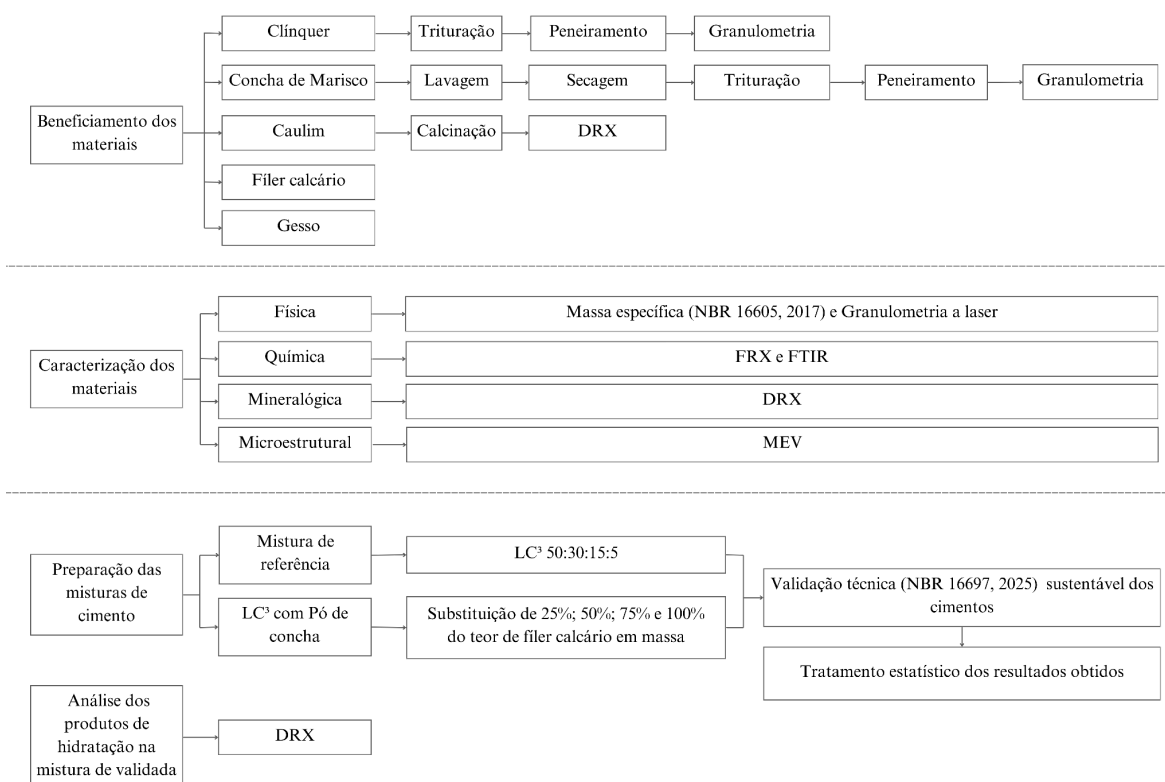
Gu *et al.* (2024), embora não tenham especificado o tipo de concha utilizada, investigaram o uso de pó de concha, como material carbonatado rico em CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, visando a otimização da estrutura de poros e da permeabilidade do LC<sup>3</sup>. Os autores observaram aumento da resistência à compressão de aproximadamente 7 MPa nas idades iniciais e de 3 MPa em idades mais avançadas. A maior resistência aos 28 dias (41,2 MPa) foi obtida quando o pó de concha foi combinado com calcário, resultando também na menor porosidade medida (18,4%). Esses resultados reforçam o papel do carbonato biogênico tanto no refinamento da microestrutura quanto na melhoria do desempenho mecânico.

A análise conjunta desses estudos indica que, independentemente do tipo específico de concha marinha empregado, os sistemas LC<sup>3</sup> modificados com carbonato de cálcio de origem biogênica apresentaram desempenho mecânico igual ou superior ao dos sistemas de referência, contendo apenas filer calcário. Esse comportamento sugere que o ganho de desempenho está associado principalmente à função carbonática do material, aliada à sua finura e mineralogia. Assim, os resíduos de conchas de marisco demonstram elevado potencial para substituir o calcário convencional em sistemas LC<sup>3</sup>, contribuindo para o desempenho técnico do material e para a valorização de resíduos na perspectiva da sustentabilidade e da economia circular.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida por meio de uma abordagem experimental, conforme detalhado na Figura 6. A sequência metodológica contempla as seguintes etapas: (1) beneficiamento dos materiais em estudo; (2) caracterização dos materiais utilizados; (3) análise dos cimentos com e sem substituição do filer calcário por pó de concha de marisco; e (4) tratamento estatístico dos resultados obtidos, conforme sintetiza o fluxograma da Figura 6.

Figura 6 - Procedimento Experimental



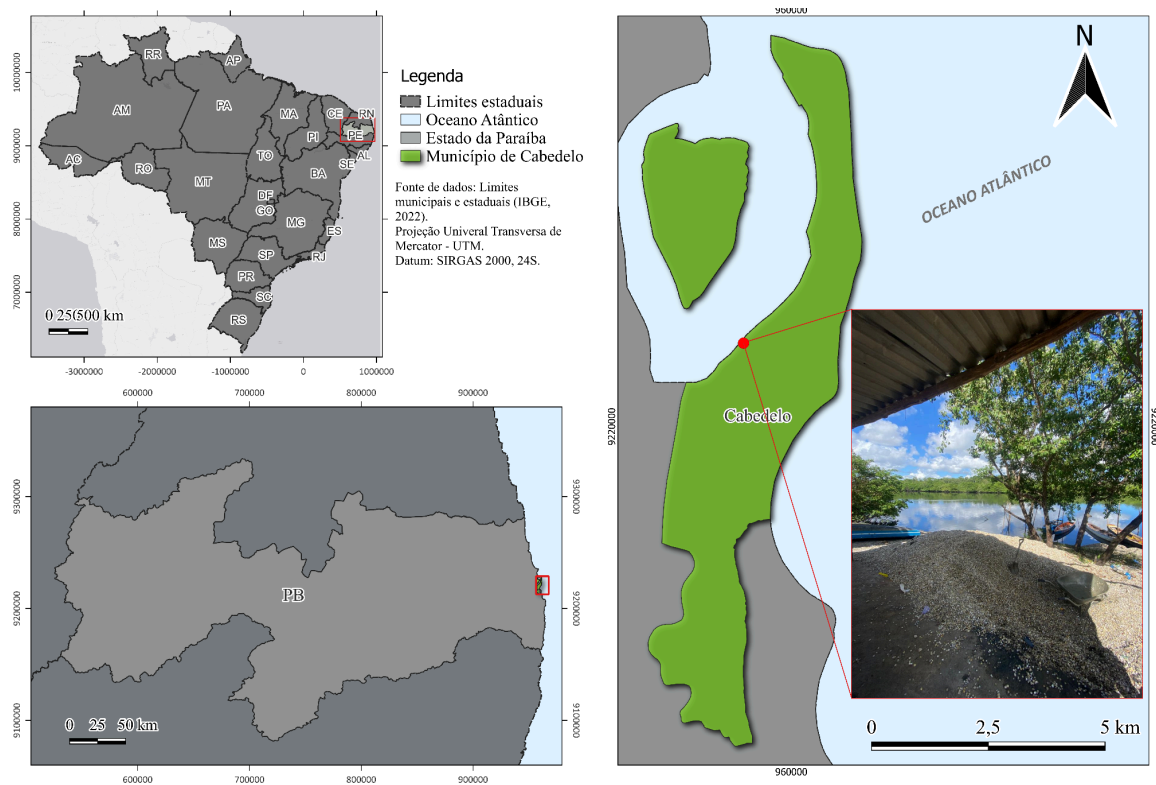
Fonte: Autoria própria, (2026).

A seguir serão detalhadas cada uma das etapas do planejamento experimental.

### 4.1 Beneficiamento dos materiais

A Figura 7 apresenta o mapa de localização da área de coleta das conchas de marisco utilizadas nesta pesquisa. O material foi obtido como resíduo proveniente da atividade de mariscagem no município de Cabedelo, situado na região metropolitana de João Pessoa, estado da Paraíba.

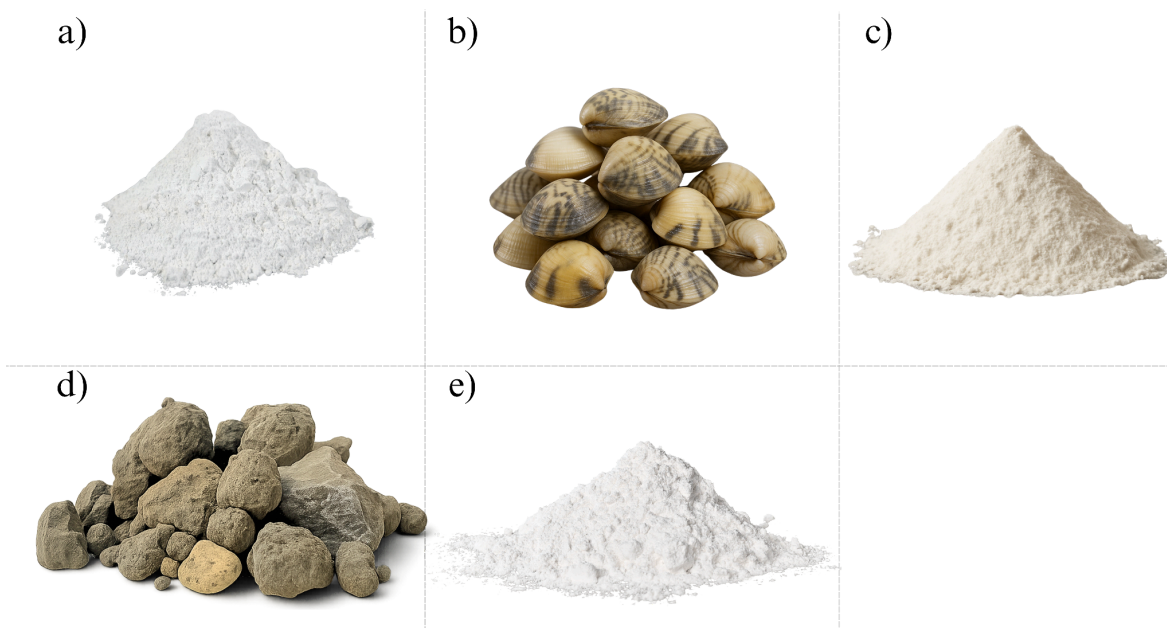
Figura 7 - Local de coleta das conchas de marisco



Fonte: Autoria própria, (2026).

Os demais materiais utilizados, a saber: o filer calcário de origem calcítica, clínquer Portland, gipsita e argila caulínica, foram adquiridos por meio de doação obtidos diretamente com suas respectivas empresas. A Figura 8 ilustra os materiais em estudo, e a seguir são descritos os procedimentos específicos de beneficiamento empregados para cada um deles.

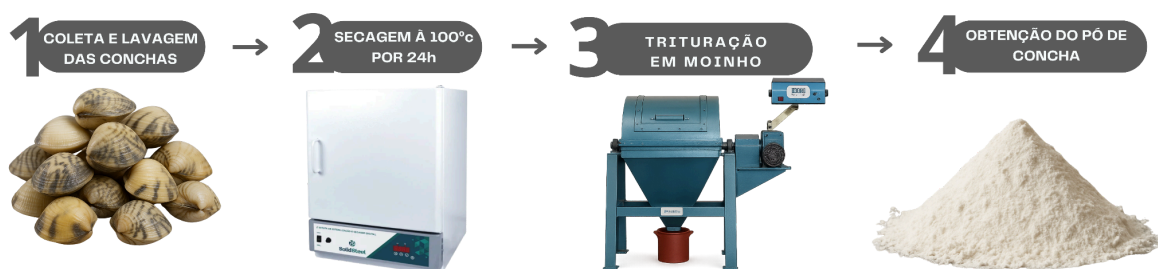
Figura 8 - Materiais em estudo (a) Filer calcário calcítico; (b) Conchas de marisco; (c) Argila caulínica natural; (d) Clínquer Portland; (e) Gipsita



Fonte: Autoria própria, (2026).

O filer calcário foi utilizado como material de referência para efeito comparativo nas substituições pelo pó de concha de marisco. As conchas de marisco, por se tratar de um resíduo de origem biogênica, coletado *in natura*, foi necessário submetê-lo a etapas de beneficiamento, com o intuito de torná-lo adequado para aplicação como substituinte parcial do filer calcário em sistemas cimentícios. Os procedimentos realizados estão ilustrados na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma de processos do beneficiamento das conchas



Fonte: Autoria própria, (2026).

As conchas foram inicialmente lavadas em água corrente, a fim de remover impurezas orgânicas e sais solúveis que poderiam comprometer a reatividade do material ou interferir nos processos físico-químicos de hidratação do cimento. Em seguida, foram secas em estufa a 100 °C por 24 horas, garantindo a eliminação da umidade residual.

A etapa de moagem foi realizada em moinho de bolas/barras do tipo SONNEX, utilizando-se 30 kg de esferas metálicas de diferentes diâmetros (40, 30, 25 e 20 mm) para 5 kg de conchas. O equipamento operou a 73,67 rpm. A cada intervalo de 30 minutos, amostras foram coletadas e submetidas à análise granulométrica a laser, permitindo comparar a distribuição de partículas obtidas com a do filer calcário convencional. O processo foi repetido em ciclos sucessivos até um tempo total de 3h30.

O clínquer Portland, foi obtido diretamente de uma fábrica de cimento na forma de pelotas, por este motivo foi necessário um processo de beneficiamento com moinho de bolas para obter-se um pó com uma distribuição granulométrica adequada para a produção das pastas de cimento. O procedimento adotado para obtenção do pó de clínquer Portland é apresentado na Figura 10.



Fonte: Autoria própria, (2026).

A moagem seguiu a mesma metodologia adotada para as conchas de marisco, tendo como objetivo alcançar um diâmetro médio de partículas entre 10 e 15  $\mu\text{m}$ , conforme a recomendação de Mehta e Monteiro (2008).

Por fim, a argila caulínica natural foi obtida previamente seca, moída e peneirada, utilizando apenas o material passante na peneira de malha nº 200 (75 $\mu\text{m}$ ), ainda na fábrica. Os processos de beneficiamento estão apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma de processos para obtenção da argila calcinada



Fonte: Autoria própria, (2026).

A calcinação da argila caulínítica foi conduzida em forno tipo mufla a 800 °C por 2 horas, com o objetivo de promover a desestruturação da caulinita e a consequente formação da metacaulinita, procedimento amplamente consolidado na literatura (He; Makovicky; Osback, 1994; Scrivener, 2014; Avet e Scrivener, 2018). Para validar a eficiência da calcinação, foram realizadas análises de difração de raios X e Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier, antes e após o tratamento térmico.

#### 4.2 Ensaios/análises de caracterização dos materiais

A segunda etapa do programa experimental envolve a caracterização física, química, mineralógica e microestrutural dos materiais. O detalhamento dessa etapa é apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Ensaios e análises de caracterização dos materiais

Tipo de Caracterização	Ensaio/Análise	Referência
Física	Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)
	Granulometria a laser (GL)	-
Química	Fluorescência de Raios X (FRX)	-
	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	-
Mineralógica	Difração de Raios X (DRX)	-
Microestrutural	Microscopia eletrônica de varredura	

Fonte: Autoria própria, (2026).

#### 4.2.1 Ensaio de caracterização física dos materiais

A caracterização física dos materiais foi realizada por meio dos ensaios de distribuição granulométrica, massa específica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de compreender o comportamento físico dos constituintes empregados nas misturas cimentícias.

A distribuição granulométrica dos materiais foi obtida pelo método de difração a laser em via seca, utilizando o equipamento CILAS 1090, que permite a análise em uma faixa de tamanhos entre 0,04  $\mu\text{m}$  e 500  $\mu\text{m}$ . O sistema de alimentação do material opera por vibração, com frequência de 55 Hz e amplitude de 55%. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais (LAPAMA) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

A massa específica foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma NBR 16605 (ABNT, 2017), utilizando picnômetro de líquidos.

Por fim, a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada no Laboratório de Materiais e Biosistemas da UFPB, em um equipamento VEGA, 4ª geração, da TESCAN, com fonte de elétrons de filamento de tungstênio. As análises foram conduzidas em amostras em pó passantes na peneira nº 200 (75  $\mu\text{m}$ ), referentes ao filer calcário e ao pó de concha de marisco, com o objetivo de comparar a morfologia do pó de concha após o processo de moagem com a do filer calcário, utilizado como material de referência. A preparação foi feita com fita de carbono e metalização, assegurando adequada condução elétrica e qualidade das imagens.

#### 4.2.2 Ensaio de caracterização química dos materiais

A análise da composição química dos materiais foi realizada por Fluorescência de Raios X (FRX) em um espectrômetro Shimadzu EDX-720, no Laboratório de Caracterização de Minerais e Materiais do IFRN Natal-Central. As amostras em pó foram analisadas sob vácuo. Duas leituras foram realizadas: uma no intervalo de Sódio (Na) a Scândio (Sc) e outra no intervalo de Titânio (Ti) a Urânio (U), intervalos característicos desta técnica analítica, a fim de realizar a detecção dos elementos presentes em cada faixa de energia.

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier foi realizada no Laboratório de Materiais e Biosistemas da UFPB, em um espectrofotômetro de infravermelho modelo IRAffinity-1, a análise foi realizada na faixa espectral de 4000 a 400

cm<sup>-1</sup>, com 32 digitalizações e resolução de 4 cm<sup>-1</sup>, usando pastilhas de KBr com 0,6% em peso de amostra.

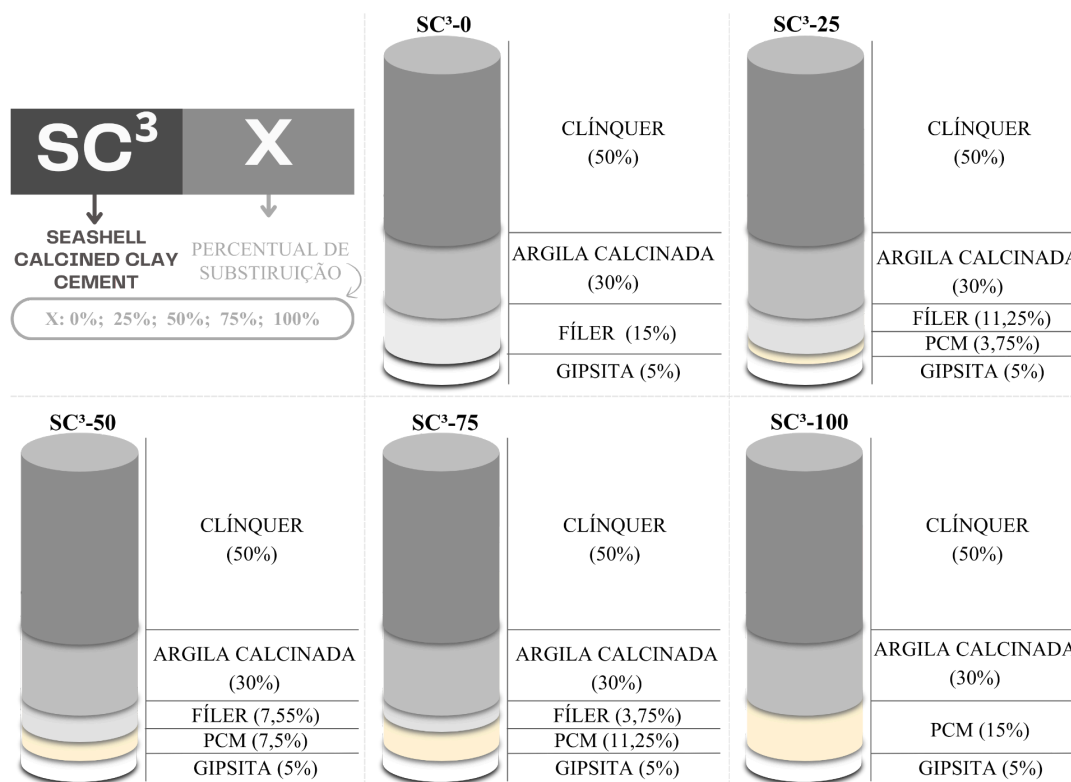
#### 4.2.3 Ensaio de caracterização mineralógica dos materiais

A identificação das fases cristalinas dos materiais foi realizada por Difração de Raios X (DRX), utilizando radiação Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ), com varredura angular no intervalo de 5° a 70° (2 $\theta$ ). As análises foram conduzidas em um difratômetro Bruker D8, no Núcleo de Pesquisa de Materiais (NEPEM) da UFPB. Adicionalmente, foi realizado o refinamento pelo método de Rietveld exclusivamente para o filer calcário e pó de concha de marisco, com o objetivo de comparar os teores relativos de carbonato de cálcio presentes nos materiais alvo desta pesquisa.

#### 4.3 Preparação das misturas de cimento

As análises foram realizadas a partir de um planejamento experimental estruturado, no qual apenas o teor de substituição do filer calcário por pó de conchas de marisco (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) foi considerada uma variável independente. A formulação e nomenclatura dos cimentos são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Composição das misturas de cimentos LC<sup>3</sup> em estudo



Fonte: Autoria própria, (2026).

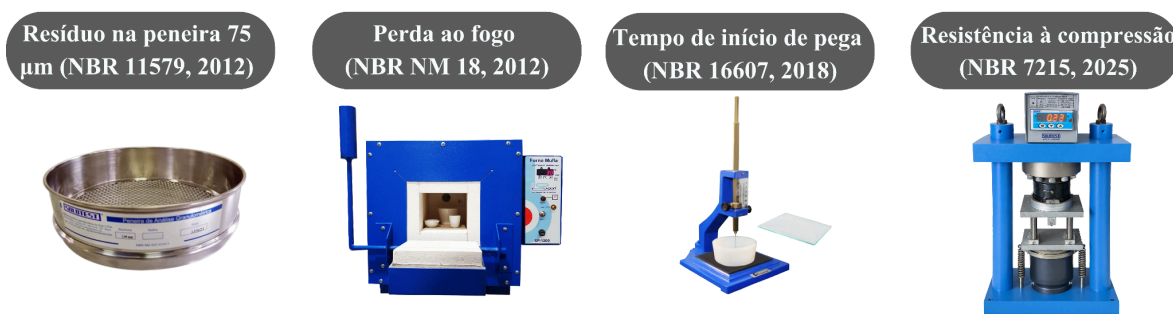
A formulação de referência do sistema LC<sup>3</sup> seguiu proporções amplamente estabelecidas na literatura: 50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de filer calcário e 5% de gesso em massa (Scrivener, 2018; Câmara, 2020; Avet; Scrivener, 2020; Moreira, 2020; Singh; Scrivener, 2022). Essa composição serviu como base para o estudo, sendo modificada apenas quanto ao teor de filer. Dessa forma, buscou-se isolar a variável independente e compreender sua influência nas variáveis-resposta, permitindo a comparação entre as formulações contendo pó de conchas de marisco.

Os cimentos foram identificados pela sigla SC<sup>3</sup>-X, na qual SC<sup>3</sup> corresponde a *Seashell Calcined Clay Cement* e X representa o percentual de pó de concha de marisco utilizado em substituição ao filer calcário. Assim, o cimento SC<sup>3</sup>-0 refere-se à mistura de referência, contendo 100% de filer calcário, enquanto o cimento SC<sup>3</sup>-100 corresponde à formulação na qual todo o teor de filer (15% em massa do cimento) foi substituído por pó de concha de marisco.

#### 4.3.1 Validação dos cimentos

A análise de validação dos cimentos apresentados anteriormente na Figura 12 do tópico 4.3, foi realizada com base nos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16697 (2018), que define os critérios químicos, físicos e mecânicos para cimentos Portland comerciais. Considerando as particularidades dos cimentos LC<sup>3</sup> modificados com pó de concha de marisco, foram avaliados os seguintes parâmetros normativos: Perda ao fogo, óxido de magnésio (MgO), trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>), finura (resíduo na peneira de 75 µm), tempo de início de pega e resistência à compressão. A Figura 13 apresenta um esquema sintético dos ensaios para a verificação dos requisitos normativos de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018).

Figura 13 – Requisitos normativos para validação dos cimentos segundo a NBR 16697 (2018)



(Fonte: Autoria própria, 2026).

### 4.3.1 Análise química

A Tabela 1 apresenta os requisitos químicos utilizados para a validação dos cimentos estudados conforme norma 16697 (ABNT,2108).

Tabela 1 – Requisitos normativos para validação dos cimentos segundo a NBR 16697 (2018)

<b>Requisitos químicos</b>	<b>Intervalos normalizados</b>
Perda ao fogo (PF)	$\leq 4,5$
Óxido de magnésio (MgO)	$\leq 6,5$
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	$\leq 4,5$

Fonte: Autoria própria, (2026).

A determinação da perda ao fogo (PF) dos cimentos foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos na NBR NM 18 (ABNT, 2012). O ensaio teve como objetivo quantificar a perda de massa associada à liberação de água combinada, dióxido de carbono e outros compostos voláteis. A análise foi realizada pelo método nº1 de determinação direta, ou também conhecido como método de referência. De início foi pesada 1,000 g + 0,001 g de amostra dos cimentos e colocado em um cadinho de porcelana de massa conhecida e calcinado em forno mufla à temperatura entre  $(950 \pm 50)^\circ\text{C}$ , por um período de 60 min. Posteriormente, a amostra foi esfriada em dessecador e pesada (NBR NM 18, 2012).

Os teores globais de óxido de magnésio (MgO) e trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) dos cimentos LC<sup>3</sup> em estudo foram estimados por meio da composição química individual dos materiais constituintes, obtidos por meio de análise de FRX e, de suas respectivas frações em massa nas misturas, utilizando o método de ponderação linear.

### 4.3.2 Análise de finura dos cimentos

A finura dos cimentos foi determinada como requisito físico estabelecido pela ABNT NBR 16697 (2018), por meio do ensaio de resíduo na peneira de 75  $\mu\text{m}$ , conforme procedimento descrito na ABNT NBR 11579 (2012). O índice de finura corresponde à relação entre a massa de cimento cujas dimensões de grãos são superiores a 75  $\mu\text{m}$  (fração retida) e a massa total da amostra, expressa em porcentagem.

Inicialmente, uma amostra de  $(50 \pm 0,05)$  g de cada cimento foi pesada e disposta sobre peneira com abertura nominal de 75  $\mu\text{m}$ , seca, limpa e em conformidade com a NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 1997) O peneiramento foi realizado manualmente por meio de

movimentos suaves e horizontais de vaivém, intercalados por etapas de limpeza da tela e do caixilho com auxílio de pincel e bastão, conforme prescrito pela norma.

#### 4.3.3 Tempo de início de pega

Para a verificação do tempo de início de pega foram formuladas pastas cimentícias, compostas por 500g de cimento e água destilada. A relação a/c foi determinada de acordo com a NBR 16606 (ABNT, 2018), o procedimento sugere que a consistência normal é encontrada no momento em que a sonda de Tetmajer penetra e estaciona a  $(6 \pm 1)$  mm da placa-base do molde tronco-cônico no aparelho de Vicat. O processo de mistura e moldagem das pastas seguiu os procedimentos descritos na NBR 16606 (ABNT, 2018).

A Tabela 2 apresenta a identificação e formulação das pastas cimentícias em estudo, assim como a quantidade de água necessária para obter-se consistência normal, a relação a/c variou entre 0,39 e 0,40.

Tabela 2 – Identificação e composição das pastas cimentícias

Misturas	Cimento (g)					Água destilada (%)
	SC <sup>3</sup> -0	SC <sup>3</sup> -25	SC <sup>3</sup> -50	SC <sup>3</sup> -75	SC <sup>3</sup> -100	
PC0	500	0	0	0	0	40
PC25	0	500	0	0	0	40
PC50	0	0	500	0	0	40
PC75	0	0	0	500	0	40
PC100	0	0	0	0	500	39

Fonte: Autoria própria, (2026).

A nomenclatura usada para a identificação das misturas seguiu a estrutura PCX, com PC correspondendo às pastas cimentícias, e X para a porcentagem de filer substituída pelo pó das conchas de marisco nas misturas LC<sup>3</sup>. Por exemplo, PC0 corresponde a pasta cimentícia de referência, contendo o cimento SC<sup>3</sup>-0, com 100% de filer calcário e 0% de substituição, já a mistura PC25 significa que 25% do filer foi substituído por pó das conchas de marisco, restando 75% de filer calcário, utilizando-se o cimento SC<sup>3</sup>-25.

#### 4.3.4 Análise de resistência à compressão

O requisito de resistência à compressão da NBR 16697 (ABNT, 2018) foi analisado em argamassas cimentícias. A dosagem, mistura, moldagem e rompimento das argamassas foram realizadas conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 2025). A argamassa foi preparada seguindo a proporção de uma parte de cimento e três partes de areia normal composta por frações granulométricas grossas, média grossa e média fina, em

proporções iguais e, uma relação a/c fixada em 0,48. A identificação e composição das argamassas estudadas pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 – Identificação e composição das argamassas

Misturas	Cimento (g)					Frações de areia normal (g)				Água destilada (g)
	SC <sup>3</sup> -0	SC <sup>3</sup> -25	SC <sup>3</sup> -50	SC <sup>3</sup> -75	SC <sup>3</sup> -100	Grossa	média grossa	média fina	fina	
A0	624	0	0	0	0	468	468	468	468	300
A25	0	624	0	0	0	468	468	468	468	300
A50	0	0	624	0	0	468	468	468	468	300
A75	0	0	0	624	0	468	468	468	468	300
A100	0	0	0	0	624	468	468	468	468	300

Fonte: Autoria própria, (2026).

As misturas de argamassa foram identificadas pela nomenclatura AX, em que A representa as argamassas e X indica a porcentagem de substituição do filer calcário por pó de conchas de marisco nas formulações LC<sup>3</sup>. Assim, A0 corresponde à argamassa de referência, produzida com o cimento SC<sup>3</sup>-0, enquanto A100 designa a mistura na qual houve substituição total do filer por pó de conchas de marisco, utilizando-se o cimento SC<sup>3</sup>-100.

A mistura das argamassas foi realizada em misturador mecânico planetário com capacidade aproximada de 5 dm<sup>3</sup>, seguindo a sequência padronizada: Inicialmente, toda a quantidade de água foi colocada na cuba do misturador, seguida da adição do cimento, momento em que se iniciou a contagem do tempo. A mistura foi conduzida em velocidade baixa por 30 s. Em seguida, a areia normal foi adicionada gradualmente ao longo de 30 s, sem interrupção da mistura. Após a incorporação completa da areia, a velocidade do misturador foi elevada, mantendo-se a mistura por mais 30 s.

Posteriormente, o misturador foi desligado, permitindo-se um período de repouso de 90 s. Durante os primeiros 30 s desse intervalo, a argamassa aderida às paredes da cuba foi removida com auxílio de uma espátula e reincorporada à mistura. Nos 60 s finais, a argamassa permaneceu em repouso, sem qualquer intervenção, conforme recomenda a NBR 7215 (ABNT, 2018).

A moldagem dos corpos de prova foi realizada imediatamente após o término da mistura. A argamassa foi inserida nos moldes metálicos não corrosivos, em quatro camadas sucessivas, sendo cada camada adensada com 30 golpes uniformes de soquete normalizado. Após o preenchimento, manteve-se um leve excesso de argamassa acima da borda do molde, assegurando o completo preenchimento.

Os corpos de prova permaneceram no molde por um período de 24 h. Após esse intervalo, procedeu-se à desmoldagem, sendo os corpos de prova imediatamente imersos em água saturada com cal, onde permaneceram até as idades previstas para os ensaios de resistência (NBR 7215, 2025).

A ruptura das amostras foi realizada conforme com o auxílio de uma máquina de ensaio de resistência à compressão Shimadzu, com capacidade de 10 kN, por fim os valores médios de resistência nas idades de ruptura em 1, 3, 7, 28 e 91 dias foram comparados com os valores mínimos para cimentos Portland comerciais conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), os valores de referência são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Requisitos de resistência à compressão diametral NBR 16697

<b>Idade de ruptura</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>
24 h	-
3 dias	$\geq 8,0$
7 dias	$\geq 15,0$
28 dias	$\geq 25,0$
91 dias	$\geq 32,0$

Fonte: Autoria própria, (2026).

#### 4.4 Análise dos produtos de hidratação

Após a validação dos cimentos LC<sup>3</sup> modificados com pó de concha de marisco, seguiu-se com o estudo dos produtos de hidratação formados nas pastas cimentícias PC0, PC25, PC50, PC75 e PC100 apresentadas anteriormente na Tabela 2 do tópico 4.3.3. O procedimento de mistura, moldagem também seguiu os procedimentos descritos na NBR 16606 (ABNT, 2018). As amostras foram desmoldadas e condicionadas a cura úmida por 24h e em seguida desmoldadas e submersas em solução de hidróxido de cálcio até os 28 dias de cura, seguindo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2025).

Para o estudo dos produtos de hidratação, após atingido os 28 dias de cura, as misturas foram trituradas por meio de moagem manual em um almofariz e mão de grau, seguido de peneiramento na peneira #200 (75  $\mu\text{m}$ ) até que todo o pó moído passasse. Às análises de DRX foram realizadas em um difratômetro Bruker D8 empregando radiação Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ), a uma taxa de varredura de  $0,003^\circ \cdot \text{s}^{-1}$  e uma faixa de ângulo entre 5 e  $70^\circ$  ( $2\theta$ ).

#### 4.5 Análise estatística

A análise estatística dos dados experimentais foi realizada com o auxílio do software Jamovi versão 2.6.44, almejando-se um tratamento estatístico consistente e confiável dos resultados. Os procedimentos adotados estão descritos no Quadro 6, que apresenta os testes estatísticos empregados e suas respectivas finalidades.

Quadro 6 – Testes estatísticos realizados

<b>Teste</b>	<b>Resposta</b>
Shapiro-Wilk e Levene	Validar o uso de análises paramétricas ou não paramétricas
Análise de variância	Identificar quais fatores e interações influenciam significativamente os resultados
Teste post hoc	Analisar se há diferenças reais entre os grupos
Correlação de Spearman	Avaliar a relação entre as variáveis medidas
Regressão linear	Modelar relações entre as variáveis e prever o comportamento das misturas

Fonte: Autoria própria, (2026).

A análise de normalidade e homogeneidade das variâncias foi realizada almejando-se validar o uso de testes paramétricos ou não. A ANOVA foi aplicada para identificar os fatores e interações com influência significativa nas respostas. A modelagem feita por regressão linear, gerou equações preditivas. Também foi utilizada a análise de correlação de Spearman para investigar relações entre variáveis como resistência, tempo de pega e teor de pó de concha de marisco (PCM).

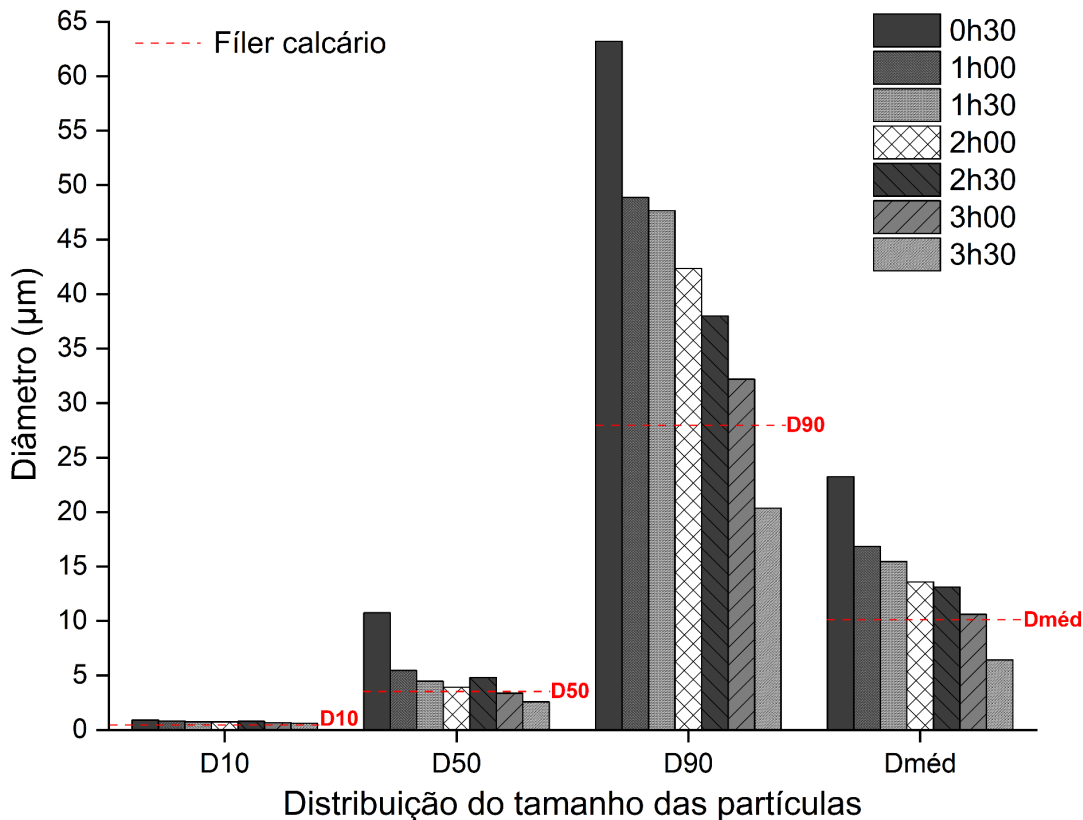
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios e análises descritos no Capítulo 4 (Materiais e Métodos), realizados em misturas de cimentos LC<sup>3</sup> modificados com pó de concha de marisco (SC<sup>3</sup>). Inicialmente, são apresentados os resultados referentes ao beneficiamento e à caracterização dos materiais utilizados. Em seguida, os cimentos desenvolvidos são avaliados frente aos requisitos estabelecidos pela NBR 16697 (2018), contemplando os aspectos químicos, a finura, os tempos de início e fim de pega e a resistência à compressão axial das argamassas. Adicionalmente, são apresentadas análises estatísticas dos resultados de resistência mecânica, bem como a investigação dos produtos de hidratação, visando correlacionar o comportamento mecânico com as transformações mineralógicas e microestruturais observadas.

### 5.1 Características dos materiais

A Figura 14 mostra a evolução dos diâmetros característicos (D10, D50, D90) e do diâmetro médio (D<sub>méd</sub>) do pó de concha ao longo do tempo de moagem, tendo como referência os valores do filer calcário (linha tracejada vermelha).

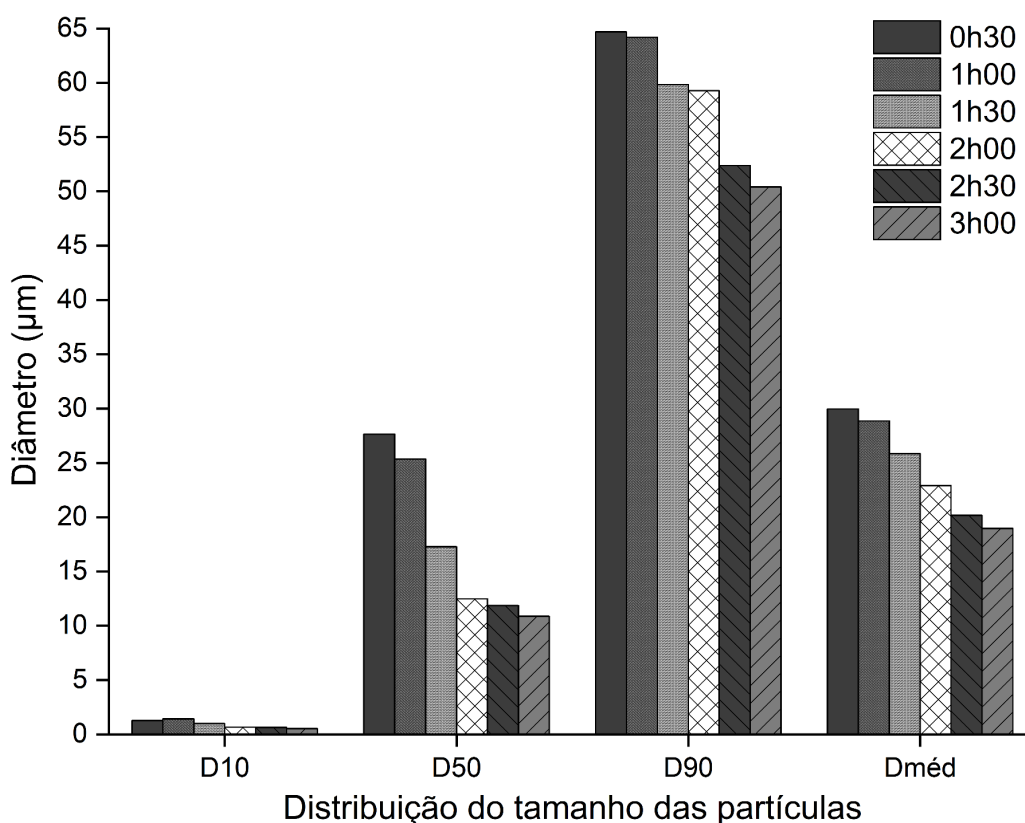
Figura 14 - Comparação dos diâmetros característicos do pó de concha e filer calcário



Observa-se uma diminuição monotônica de todos os parâmetros com o tempo de moagem. Após 3 horas, observa-se que os quatro indicadores apresentaram valores similares ao do filer calcário, enquanto para 3 horas e 30 minutos todos ficam abaixo das linhas de referência, caracterizando material mais fino. Por outro lado, tempos menores que 2 horas e meia mantêm D90 e Dméd acima da referência, indicando presença de grãos mais grossos. Assim, adotou-se 3 horas como tempo de moagem alvo das conchas para reproduzir a distribuição granulométrica do filer calcário.

Em seguida, o clínquer Portland também foi processado de forma análoga para determinar o seu tempo de moagem ideal. A progressão dos diâmetros característicos do clínquer durante o ciclo de moagem é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Diâmetros característicos do clínquer ao longo do ciclo de moagem

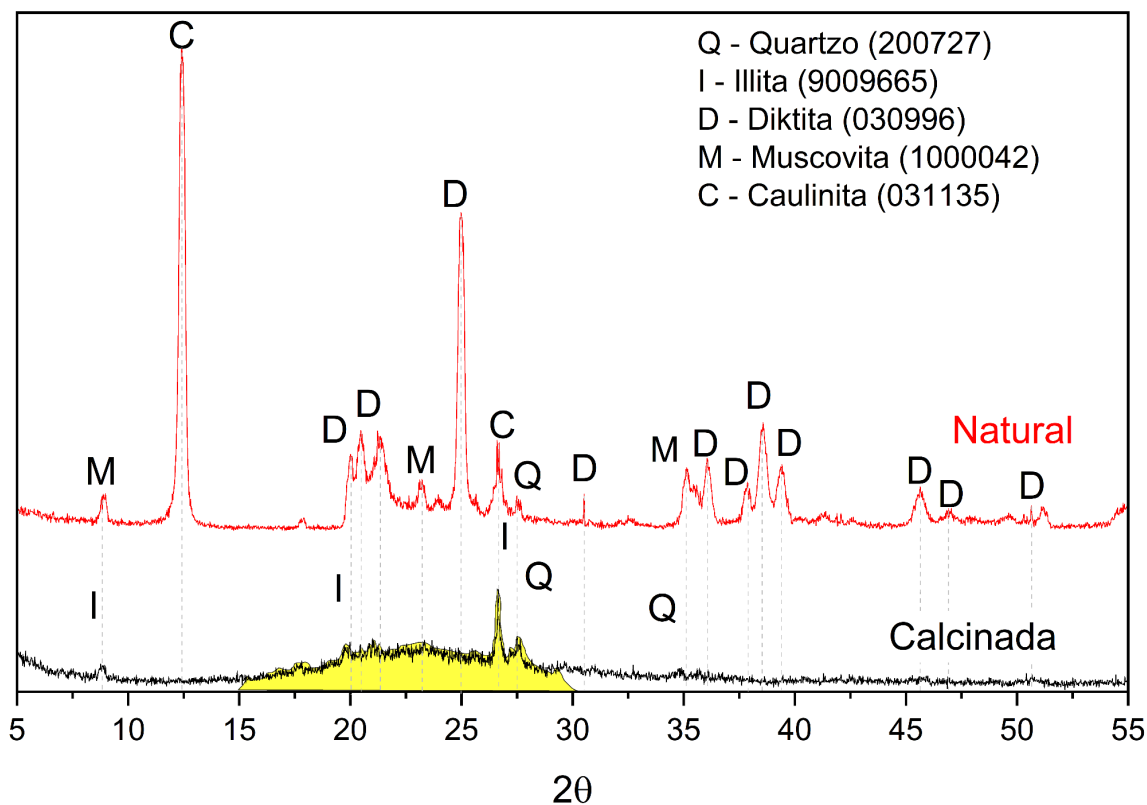


Fonte: Autoria própria, (2026).

Observa-se redução progressiva em todos os parâmetros, destacando-se que, ao final de 3 horas, os valores obtidos foram: D10 = 1,04 µm, D50 = 11,20 µm, D90 = 49,62 µm e Dméd = 18,88 µm. Embora esses valores sejam superiores aos encontrados em cimentos comerciais, estão em conformidade com resultados de moagem laboratorial. Malacarne (2019), em seu estudo sobre cimentos LC3, reportou valores semelhantes (D10 = 1,93 µm; D50 = 11,30 µm; D90 = 41,10 µm; Dméd = 17,10 µm), confirmando a adequação do tempo de 3h00.

Por fim, a validação do processo de calcinação da argila caulinitica natural por meio da análise de DRX, apresentada na Figura 16 e por FTIR que pode ser observado na Figura 17.

Figura 16 - Difratoograma de raios x das amostras de argilas caulínicas natural e calcinada

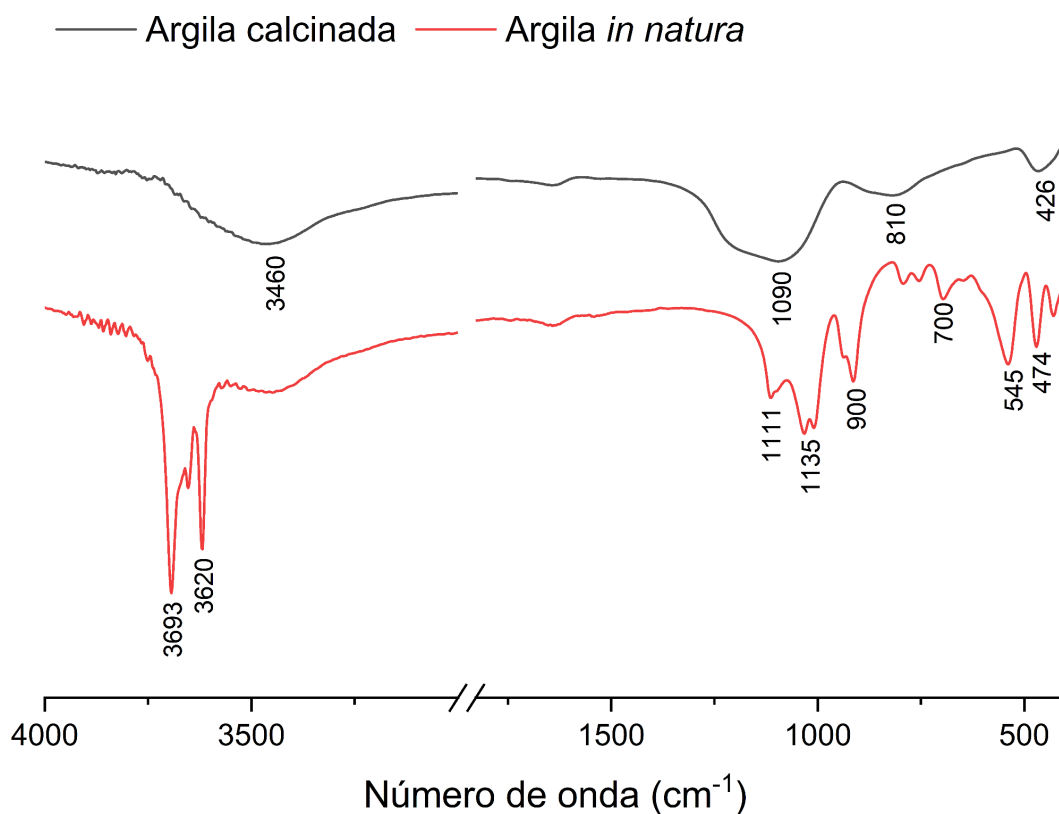


Fonte: Autoria própria, (2026).

Antes da calcinação, a argila caulínica natural apresentou elevada cristalinidade, com predominância de caulinita e dickita, que é um polimorfo da caulinita, indicando a presença de diferentes arranjos cristalinos da mesma composição mineralógica. Além de picos de menor intensidade de quartzo e muscovita.

Após a calcinação a 800 °C por 2 horas, os picos característicos da caulinita/dickita desapareceram, evidenciando a desidroxilação e a desordem estrutural que dão origem ao halo amorfo entre 15 e 30° (2θ), característico da metacaulinita, evidências diretas da transição para uma estrutura de metacaulinita desordenada e altamente reativa, o mesmo comportamento foi obtido por Blouch, Rashid e Ju (2023). Além disso, a persistência de fases como o quartzo e a illita (frequentemente associada a resquícios de muscovita) após o aquecimento é uma característica típica observada em argilas de baixa pureza utilizadas em outros trabalhos, uma vez que tais minerais permanecem termicamente estáveis nessa faixa de temperatura sem comprometer o desempenho mecânico final do sistema LC<sup>3</sup> (Avet; Scrivener, 2018; Blouch; Rashid; Ju, 2023; Py *et al.*, 2024).

Figura 17 - Espectros de absorção no infravermelho sobrepostos da argila caulinitica in natura e calcinada à 800°C



Fonte: Autoria própria, (2026).

Na argila *in natura*, observam-se bandas bem definidas na região de estiramento dos grupos hidroxila ( $3700\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ ), com picos em  $3693$  e  $3620\text{ cm}^{-1}$ . Essas bandas são características da caulinita e estão associadas, respectivamente, às vibrações de estiramento das hidroxilas da superfície interna da lamela e das hidroxilas internas localizadas no plano comum dos oxigênios apicais da folha tetraédrica (Grim, 1968). A maior intensidade relativa da banda em torno de  $3693\text{ cm}^{-1}$  em relação à de  $3620\text{ cm}^{-1}$  indica um maior grau de ordenamento estrutural da caulinita, conforme discutido por Girardi (2013).

Ainda na argila *in natura*, a região entre  $1135$  e  $1000\text{ cm}^{-1}$  apresenta bandas atribuídas às vibrações de estiramento Si–O–Si da folha tetraédrica. Destacam-se picos em  $1135$ ,  $1111$  e  $1009\text{ cm}^{-1}$ , associados ao estiramento do Si–O apical e às vibrações internas da rede tetraédrica, conforme descrito por Tari *et al.* (1999), Deng, White e Dixon (2002) e Koyuncu *et al.* (2007). O posicionamento dessas bandas em frequências relativamente elevadas sugere a presença de partículas finamente divididas de caulinita, em concordância com a interpretação proposta por Grim (1968). Na faixa de  $900\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ , observa-se uma banda em torno de  $900\text{ cm}^{-1}$ , atribuída à deformação angular Al–OH, típica da hidroxila interna da folha octaédrica da caulinita (Deng, White e Dixon, 2002). Em regiões de menor

número de onda, entre 700 e 400  $\text{cm}^{-1}$ , aparecem bandas em 700, 545 e 474  $\text{cm}^{-1}$ , relacionadas às vibrações angulares Si–O–Al e Al–O–Si, características de aluminossilicatos (Grim, 1968; Koyuncu et al., 2007; Sabino, 2021).

Após a calcinação a 800 °C, o espectro da argila calcinada apresenta modificações significativas. Nota-se a forte redução e alargamento da banda na região de  $\approx 3460 \text{ cm}^{-1}$ , indicando a desidroxilação da estrutura caulinítica e a consequente perda das hidroxilas estruturais, processo típico da transformação da caulinita em metacaulinita. A ausência das bandas discretas em 3693 e 3620  $\text{cm}^{-1}$  confirma a quebra das ligações Al–OH e a destruição do empilhamento cristalino da caulinita, em concordância com o comportamento descrito por Girardi (2013).

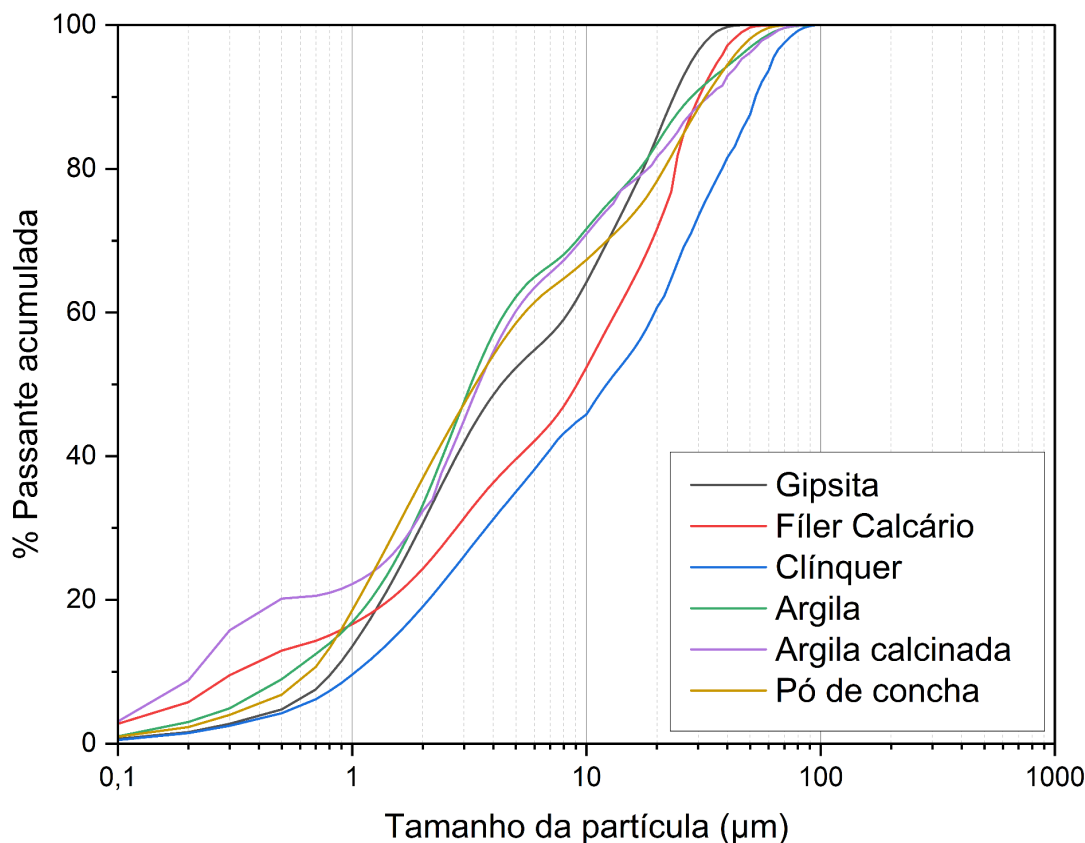
Na região dos silicatos, observa-se a persistência de uma banda larga centrada em torno de 1090  $\text{cm}^{-1}$ , atribuída às vibrações de estiramento Si–O–Si em uma estrutura mais desordenada, típica de aluminossilicatos amorfos. O alargamento e a menor definição dessa banda em comparação à argila *in natura* indicam a perda de cristalinidade e a formação de uma fase altamente reativa, característica da metacaulinita (Paiva, 2008; Reig *et al.*, 2013; Catauro *et al.*, 2017). Bandas residuais em 810 e 426  $\text{cm}^{-1}$  estão associadas a vibrações Si–O e Al–O–Si, corroborando a permanência da rede aluminossilicatos, porém em estado estrutural desordenado (Danner; Norden; Justnes, 2018).

## **5.2 Caracterização dos materiais**

### **5.2.1 Análise física dos materiais**

A distribuição granulométrica dos materiais estudados, obtida por difração a laser, é apresentada na Figura 18.

Figura 18 - Curva granulométrica dos materiais em estudo



Fonte: Autoria própria, (2026).

Observa-se que os materiais apresentam distribuições distintas que impactam diretamente no empacotamento de partículas da matriz cimentícia. O clínquer exibe a distribuição mais grosseira, contribuindo com partículas maiores que podem atuar como esqueleto granular. Em contraste, a argila calcinada e o pó de concha apresentam distribuições mais finas, com curvas deslocadas para a esquerda, o que sugere maior potencial de preenchimento dos vazios gerados pelas partículas maiores. O gesso e o fíler calcário apresentam comportamento intermediário, funcionando como partículas de ajuste granulométrico.

Os dados de diâmetro característico (D10, D50, D90) e o diâmetro médio das partículas para cada material são apresentados na Tabela 5, permitindo uma comparação objetiva entre as distribuições.

Tabela 5 - Diâmetros característicos dos materiais em estudo

Diâmetros	Materiais em estudo (#200)				
	Fíler	Clínquer	Argila calcinada	Pó de concha	Gipsita
D10*	0,32	1,04	0,21	0,66	0,83
D50**	9,11	11,20	3,47	3,36	4,33
D90***	32,20	49,62	35,06	32,19	23,57
Dméd****	13,18	18,88	10,81	10,60	8,99

\* Diâmetro a 10%; \*\* Diâmetro a 50%; \*\*\* Diâmetro a 90%; \*\*\*\* Diâmetro médio

Fonte: Autoria própria, (2026).

Ao comparar o fíler calcário e o pó de concha, observa-se que este último apresenta partículas mais finas no intervalo central da distribuição, com  $D50 = 3,36 \mu\text{m}$  em relação a  $9,11 \mu\text{m}$  do fíler, o que evidencia maior capacidade de preenchimento dos vazios entre os grãos de clínquer. No entanto, o parâmetro D90, que representa o limite inferior da fração mais grossa da distribuição, apresenta valores próximos para ambos os materiais ( $32,19 \mu\text{m}$  para o pó de concha e  $32,20 \mu\text{m}$  para o fíler). Isso indica que, embora o pó de concha seja mais fino na média, ele mantém uma fração de partículas mais grossas semelhante à do fíler, o que o configura como um substituto equivalente em termos de limite superior da distribuição granulométrica.

Além disso, observa-se que todos os materiais, com exceção do clínquer, apresentam diâmetro médio (Dméd) em uma faixa relativamente estreita, entre  $8,99$  e  $13,18 \mu\text{m}$ , o que pode favorecer o empacotamento complementar quando combinados na matriz cimentícia. Essa proximidade sugere que a utilização conjunta de adições minerais com distribuições sobrepostas pode reduzir a porosidade do sistema e aumentar a densificação da microestrutura.

Os resultados de massa específica dos materiais avaliados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa específica dos materiais em estudo

<b>Material</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Filer calcário	2,77
Clínquer	3,07
Argila calcinada	2,96
Gipsita	2,30
Pó de concha	2,86

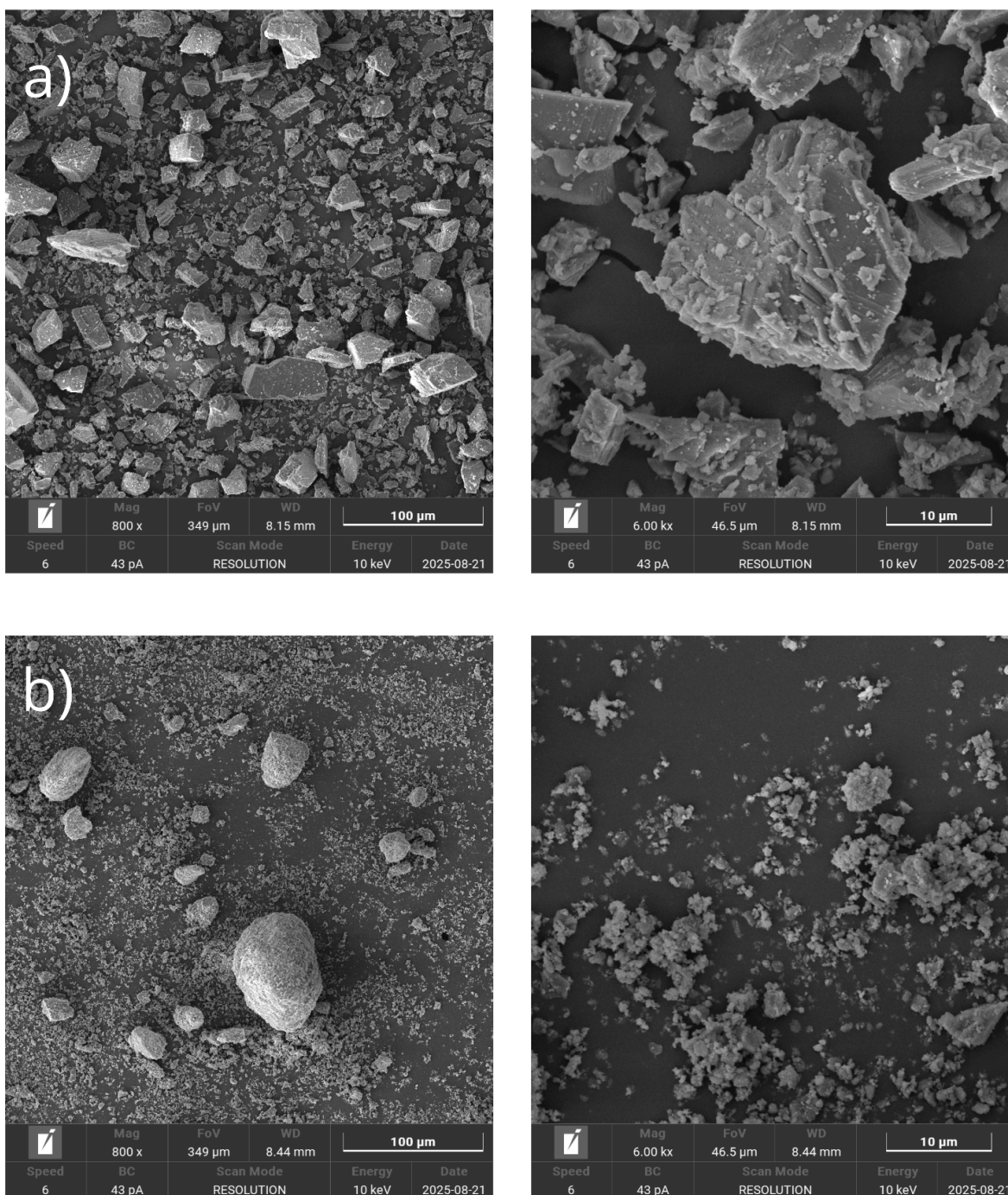
Fonte: Autoria própria, (2026).

Os resultados evidenciam diferenças relevantes entre os materiais constituintes, com impacto direto na dosagem volumétrica, no empacotamento das partículas e no desempenho reológico e mecânico da matriz cimentícia. A gipsita apresentou a menor massa específica (2,30 g/cm<sup>3</sup>), enquanto o clínquer apresentou o maior valor (3,07 g/cm<sup>3</sup>), a argila calcinada (2,96 g/cm<sup>3</sup>) mostrou proximidade ao clínquer, favorecendo o empacotamento e o preenchimento de vazios. O filer calcário (2,77 g/cm<sup>3</sup>) e o pó de concha (2,86 g/cm<sup>3</sup>) apresentaram valores próximos, indicando que a substituição entre ambos pode não gerar alterações volumétricas significativas, reforçando a viabilidade física do pó de concha como alternativa.

### 5.2.2 Análise microestrutural do pó de concha e filer calcário

A Figura 19 apresenta as micrografias de elétrons secundários do filer calcário e do pó de concha de marisco.

Figura 19 - Micrografias de elétrons secundários: (a) Fíler calcário em 800x e 6kx e (b) Pó de concha de marisco em 800x e 6kx



Fonte: Autoria própria, (2026).

Nas micrografias do filer calcário (Figura 19a), observa-se, na ampliação de 800x, a predominância de partículas com geometria angular, bordas irregulares e aspecto lamelar, características associadas ao processo de moagem industrial controlado. Em maior ampliação (6000x), nota-se que as partículas apresentam superfícies relativamente lisas,

com baixa rugosidade e ausência de porosidade significativa, indicando uma microestrutura mais homogênea e densa, típica da calcita (Zhao *et al.*, 2023).

Por sua vez, as micrografias do pó de concha de marisco (Figura 19b) evidenciam, na ampliação de 800x, partículas com formas mais arredondadas e morfologia heterogênea, além da presença de aglomerados finos aderidos às partículas maiores. Quando ampliado 6000x, observa-se uma superfície mais rugosa e irregular, com microestruturas associadas à organização biogênica do carbonato de cálcio, relacionadas à presença da fase aragonita, conforme reportado por Sarkar e Mahapatra (2010).

### 5.2.3 Análise química dos materiais

As composições químicas dos materiais em estudo são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química dos materiais

<b>Óxidos</b>	<b>Argila calcinada</b>	<b>Clínquer</b>	<b>Concha</b>	<b>Fíler</b>	<b>Gipsita</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	36,54	18,46	0,12	1,28	0,53
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	45,47	4,89	-	0,25	-
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5,72	1,89	0,48	0,69	0,17
<b>CaO</b>	1,37	63,9	53,93	56,09	30,93
<b>Rb<sub>2</sub>O</b>	0,36	-	-	-	-
<b>PbO</b>	0,30	-	-	-	-
<b>MgO</b>	-	-	-	1,26	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	2,83	0,67	0,46	0,97	54,53
<b>SrO</b>	0,15	2,24	0,99	0,20	2,19
<b>K<sub>2</sub>O</b>	3,95	0,18	-	0,25	-
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	1,08	-	-	0,25	1,54
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,30	-	-	0,20	-
<b>MnO</b>	0,34	-	-	-	-
<b>Outros</b>	0,48	0,08	0,04	-	-
<b>LOI</b>	1,11	7,55	43,97	38,67	10,11

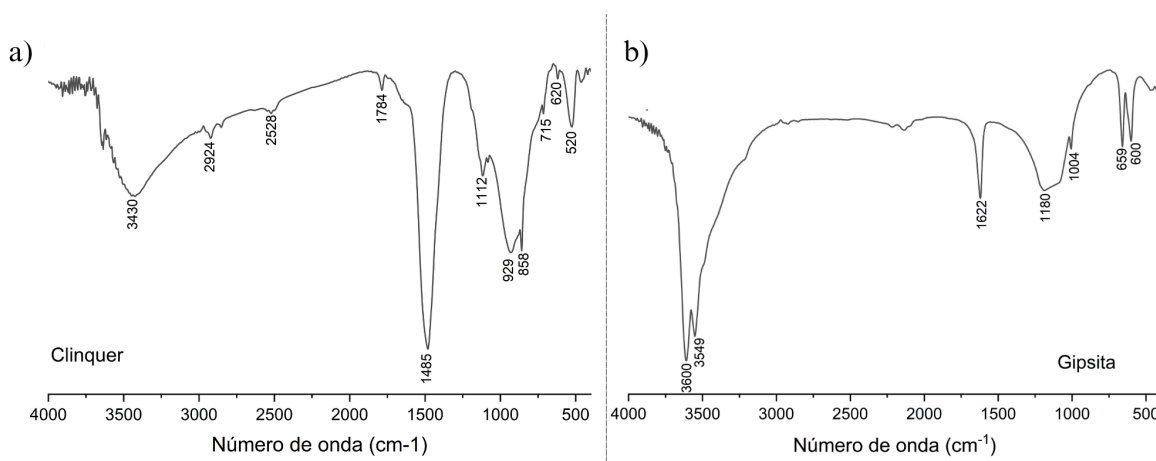
Fonte: Autoria própria, (2026).

Os resultados de FRX mostram que o pó de concha e o filer calcário apresentam teor de óxidos de cálcio semelhantes (53,9 e 56,0, respectivamente), com baixos teores de sílica e ferro, composição típica de materiais carbonáticos calcíticos (Meng; Shi; Ouyang, 2024). A maior perda de fogo (LOI) observada para o pó de concha (44%), quando comparada ao filer (38,67%) pode indicar presença de impurezas e materiais orgânicos.

Observa-se também que a argila calcinada apresentam teores elevados de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), característicos de argilas caulínicas e seus produtos calcinados. Já o clínquer apresenta um teor significativamente elevado de  $\text{CaO}$  e  $\text{SiO}_2$ , coerentes com a composição típica do clínquer Portland. A gipsita destaca-se pelo elevado teor de  $\text{SO}_3$  (54,53%) e  $\text{CaO}$  (30,93%), confirmando sua função como regulador de pega no sistema cimentício.

Adicionalmente, a Figura 20 apresenta os espectros de absorção para o clínquer Portland e Gipsita.

Figura 20 - Espectros de absorção no infravermelho sobrepostos: Clínquer (a) e Gipsita (b)



Fonte: Autoria própria, (2026).

O espectro de absorção no infravermelho do clínquer (Figura 20a) apresenta uma banda larga centrada em torno de  $3430\text{ cm}^{-1}$ , atribuída às vibrações de estiramento dos grupos O-H, associadas à água fisicamente adsorvida na superfície das partículas e a hidroxilas provenientes de hidratação superficial incipiente. A presença dessa banda é recorrente em clínqueres e cimentos anidros expostos à umidade ambiente e não indica, necessariamente, hidratação significativa do material.

Na região de menores números de onda, destacam-se as bandas em  $929$  e  $520\text{ cm}^{-1}$ , correspondentes, respectivamente, aos modos de vibração de estiramento e deformação da ligação Si-O, características das fases silicatadas do clínquer, principalmente alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ). Esse comportamento está em concordância com os resultados reportados por

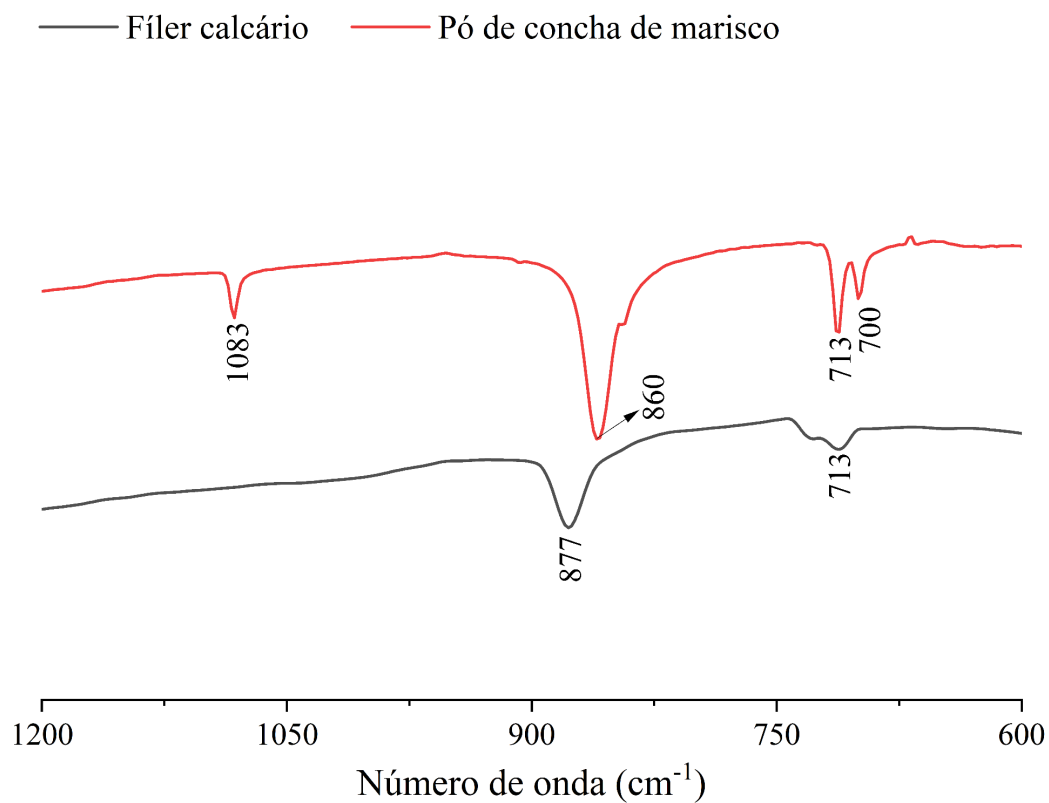
Amor *et al.* (2018), que atribuem essas bandas à predominância das fases silicatadas, as quais representam aproximadamente 80% da composição mineralógica do clínquer, justificando a baixa evidência espectral das fases aluminato (Farcas; Touzé, 2001).

Adicionalmente, observam-se bandas em 2924, 2528 e 1485  $\text{cm}^{-1}$ , bem como em torno de 712  $\text{cm}^{-1}$ , atribuídas às vibrações de estiramento e deformação do grupo  $\text{CO}_3^{2-}$ , indicativas da presença de carbonato de cálcio. Essas bandas confirmam a ocorrência de carbonatação superficial do clínquer, fenômeno comum durante o resfriamento e o armazenamento, conforme também observado por Amor *et al.* (2018), que associam bandas semelhantes aos modos vibracionais da ligação C–O em carbonatos secundários.

Além disso, com a análise dos espectros infravermelho da gipsita (Figura 20b) foi possível confirmar a presença dos seus grupos funcionais com bandas em 1622, 3549 e 3600  $\text{cm}^{-1}$  referentes ao grupo (O-H), estas são atribuídas às moléculas de água encontradas na estrutura. Os grupos sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) também foram identificados em 600, 659, 1004 e 1180  $\text{cm}^{-1}$  (Barbosa; Ferraz; Santos, 2014). Estes resultados corroboram com as análises da FRX e DRX, onde confirmam a presença do enxofre sob a forma do grupo sulfato.

Na Figura 21, observa-se que o pó de concha e o filer calcário apresentaram bandas comuns próximas de 860  $\text{cm}^{-1}$  e 713  $\text{cm}^{-1}$ , associadas às vibrações  $\nu_3$ ,  $\nu_2$  e  $\nu_4$  do ânion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), indicando a presença predominante de carbonatos de cálcio em ambas as amostras. No entanto, os materiais diferenciam-se quanto às bandas diagnósticas observadas exclusivamente no pó de concha, situadas em torno de 1083  $\text{cm}^{-1}$  e 700  $\text{cm}^{-1}$ , que correspondem aos modos vibracionais característicos da aragonita, conforme descrito por Sarkar e Mahapatra (2010). Esses picos confirmam que o  $\text{CaCO}_3$  presente no resíduo marinho encontra-se majoritariamente na forma de aragonita, enquanto o filer calcário apresenta o conjunto típico de bandas atribuídas à calcita.

Figura 21 - Espectros de absorção no infravermelho sobrepostos do fíler calcário e do pó de concha de marisco



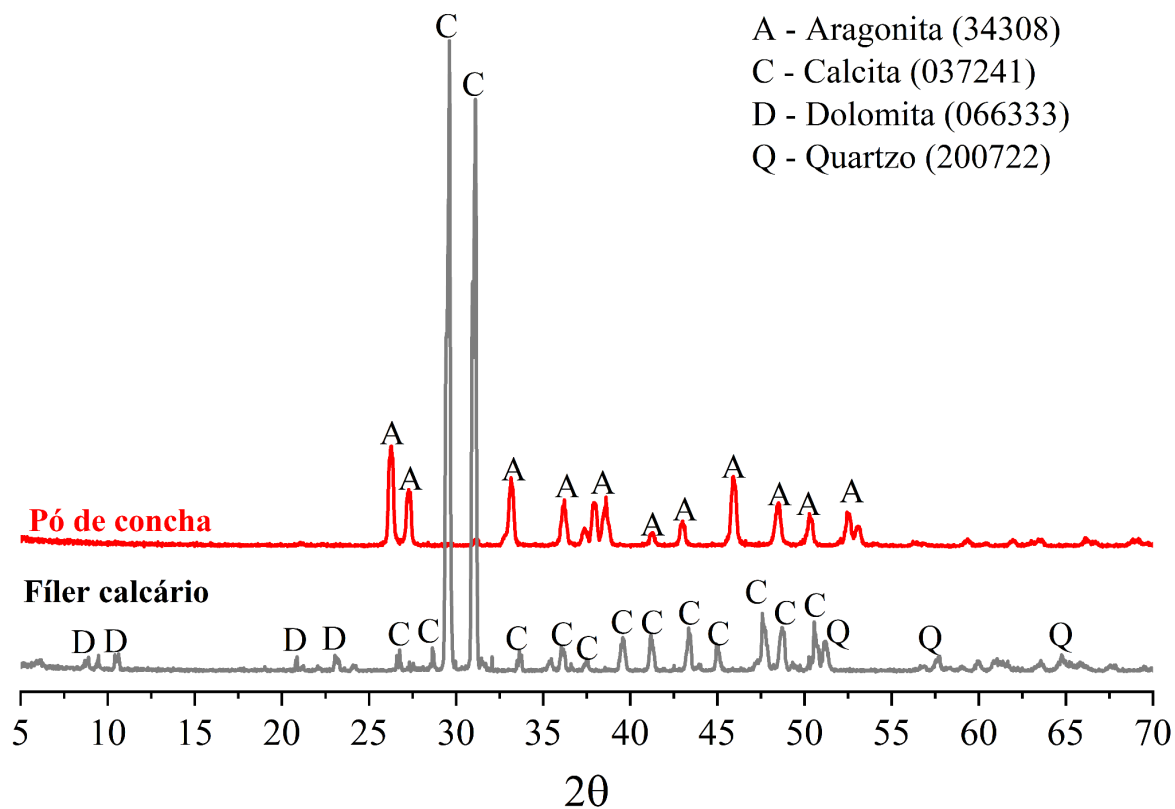
Fonte: Autoria própria, (2026).

A distinção entre os padrões espectrais evidencia diferenças mineralógicas relevantes entre os dois materiais, diretamente relacionadas aos distintos arranjos cristalinos do  $\text{CaCO}_3$ , que podem ser identificados por análise via DRX.

#### 5.2.4 Análise mineralógica dos materiais

A Figura 22 apresenta os difratogramas sobrepostos do pó de concha de marisco e do fíler calcário.

Figura 22 – Difratoformas de raios X (DRX) do fíler calcário e do pó de concha de marisco



Fonte: Autoria própria, (2026).

Os resultados do refinamento de Rietveld são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da Análise Mineralógica por DRX com refinamento de Rietveld

Amostra	Rexp	Rp	Rwp	Gof	Mineral (% em massa)	ICSD	Referência
Pó de concha de marisco	18,15	12,90	18,81	1,03	Aragonita (100%)	34308	Dickens e Bowen (1970)
					Calcita (77,0%)	37241	Wyckoff (1920)
Fíler calcário	14,32	14,91	20,32	1,41	Dolomita (20,7%)	40108	Paquette e Reeder (1990)
					Quartzo (2,30%)	200722	Jorgensen (1978)

Rexp - Fator R esperado; Rp - Fator R do perfil; Rwp - Fator R do perfil ponderado; Gof - Qualidade do ajuste; ICSD - Banco de dados de estruturas cristalinas inorgânicas

Fonte: Autoria própria, (2026).

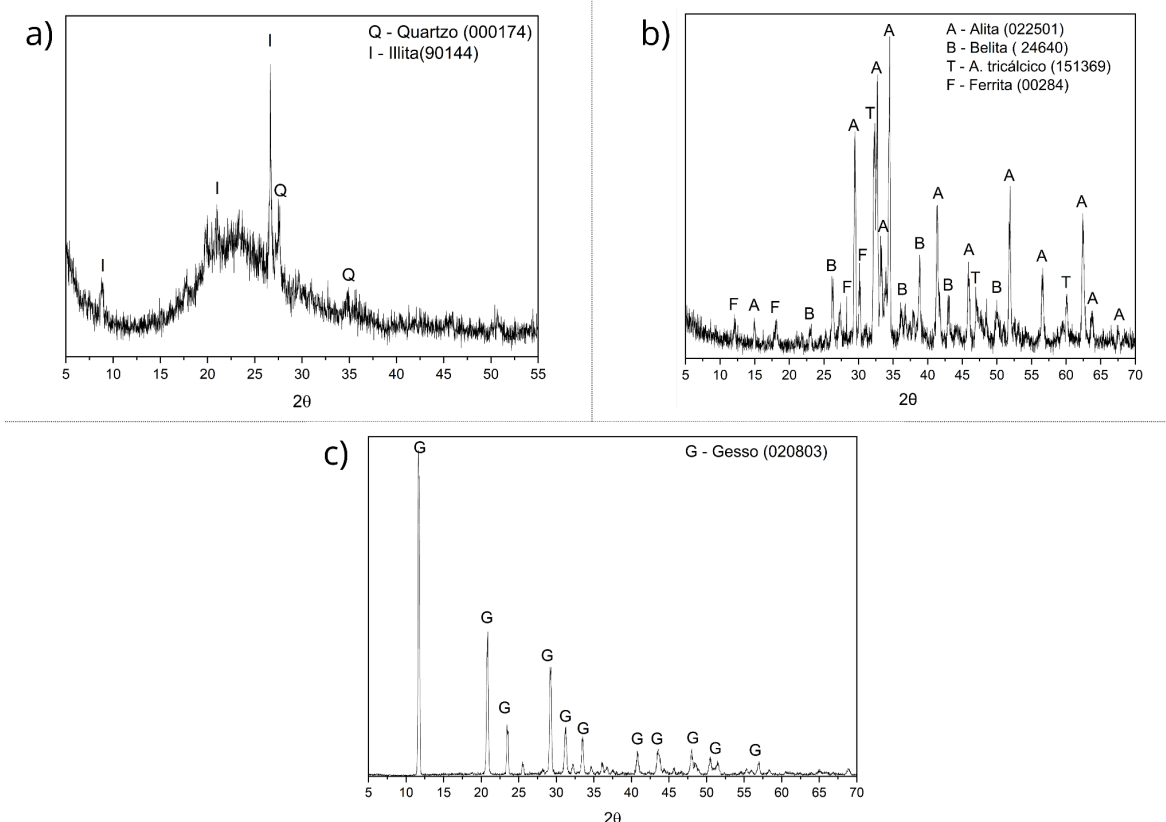
Foram observados picos de maior intensidade na amostra de pó de concha de marisco, concentrados na faixa de 25° a 55° (2 $\theta$ ), atribuídos ao carbonato de cálcio na forma cristalina ortorrômbica (aragonita). A análise quantitativa indicou a presença de 100% dessa fase cristalina. Resultados semelhantes foram reportados por Viana (2021), em estudo com conchas de marisco in natura coletadas no município de Cabedelo, Paraíba, corroborando a predominância da fase aragonita nesse tipo de resíduo biogênico.

O fíler calcário apresentou picos próximos de 30° (2 $\theta$ ), característicos da calcita (77%). Além disso, identificou-se presença de dolomita (20,7%) e pequena quantidade de quartzo (2,3%), indicando presença de dolomita e impurezas silicosas típicas de carbonatos sedimentares.

Os indicadores estatísticos obtidos no refinamento de Rietveld evidenciam a boa qualidade dos ajustes realizados para ambas as amostras. Os valores de Rexp, Rp e Rwp situaram-se dentro da faixa usualmente aceita para materiais carbonáticos, indicando baixa discrepância entre os dados observados e calculados. O fator de qualidade do ajuste *Goodness of Fit* (GoF) apresentou valores próximos de 1 representando um ajuste estatisticamente satisfatório.

A Figura 23 apresenta os difratogramas de raios X dos demais materiais constituintes, a saber: Figura 23a Argila caulínica calcinada, Figura 22b clínquer Portland e Figura 23c gipsita.

Figura 23 – Difratogramas de raios X (DRX) dos materiais analisados: (a) argila calcinada; (b) clínquer Portland e (c) gipsita



Fonte: Autoria própria, (2026).

No difratograma da argila calcinada (Figura 23a), observam-se picos característicos das fases quartzo (Q) e ilita (I), conforme discutido no tópico 5.1 deste capítulo. Já o difratograma do clínquer Portland (Figura 23b) revela a presença das fases minerais típicas desse material, com picos de alta intensidade associados à alita ( $C_3S$ ) e à aluminato tricálcico ( $C_3A$ ). Também são identificadas reflexões correspondentes a belita ( $C_2S$ ) e à ferrita tetracálcica aluminoferrita ( $C_4AF$ ), em menor intensidade relativa.

O difratograma da gipsita (Figura 23c) apresenta picos bem definidos e de elevada intensidade correspondentes exclusivamente à fase gesso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), evidenciando sua elevada pureza mineralógica. A ausência de fases secundárias indica que o material atende adequadamente à função de regulador de pega no sistema cimentício, controlando a reação do aluminato tricálcico e garantindo estabilidade no início do processo de hidratação.

### 5.3 Requisitos normativos dos cimentos modificados segundo a NBR 16697 (2018)

#### 5.3.1 Requisitos químicos

A Tabela 9 apresenta os teores globais estimados de óxido de magnésio (MgO), trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) e perda ao fogo dos cimentos LC<sup>3</sup> modificados com pó de concha de marisco.

Tabela 9 – Análise dos requisitos químicos segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018)

Cimento	Teores globais estimados		Perda ao fogo (%)	Limite NBR 1667 (2018)
	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)		
F0	0,19	3,07	10,1	
F25	0,14	3,05	10,8	
F50	0,09	3,03	11,5	≤ 27%
F75	0,05	3,01	12,2	
F100	0	2,99	12,9	

Fonte: A autoria própria, (2026).

Observa-se que os teores de MgO apresentaram valores inferiores a 0,2% em todas as composições, com tendência de diminuição à medida que o filer calcário foi progressivamente substituído pelo pó de concha de marisco. Esse comportamento está associado à menor contribuição de MgO do material substituinte em relação ao filer calcário comercial, mantendo os cimentos amplamente abaixo do limite máximo estabelecido pela ABNT NBR 16697 (2018), que é de 4,5%.

Em relação ao teor de SO<sub>3</sub>, os valores estimados situam-se em torno de 3,0% para todas as misturas analisadas, não sendo observada variação significativa em função do nível de substituição do filer por pó de concha. Tal comportamento evidencia que o teor de SO<sub>3</sub> é predominantemente controlado pela adição fixa de gipsita (5%), utilizada como regulador de pega, resultando em conformidade com o limite normativo máximo de 4,5% estabelecido pela ABNT NBR 16697 (2018).

Quanto à perda ao fogo, os cimentos LC<sup>3</sup> apresentaram valores variando entre 10,1% e 12,9%, com incremento progressivo à medida que aumentou o teor de pó de concha de marisco na composição. Esse aumento está diretamente relacionado à maior fração de materiais carbonáticos, cuja decomposição térmica contribui de forma significativa para a perda de massa (Leite *et al.*, 2024). Apesar desse comportamento, todos os valores permaneceram dentro da faixa admissível prevista pela ABNT NBR

16697 (2018), que estabelece limites máximos de perda ao fogo  $\leq 27,0\%$  dependendo da classe e da composição do cimento.

### 5.3.2 Finura dos cimentos

A finura influencia diretamente a reatividade e a velocidade de hidratação do cimento. Segundo a NBR 16697 (2018), o resíduo na peneira #200 (75  $\mu\text{m}$ ) não deve exceder 12,0% para cimentos comuns. Os resultados de resíduo na peneira #200 são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resíduo na peneira #200

<b>Amostra</b>	<b>Resíduo na peneira #200 (%)</b>
F0	8,52
F25	8,60
F50	9,00
F75	10,00
F100	11,75

Fonte: Autoria própria, (2026).

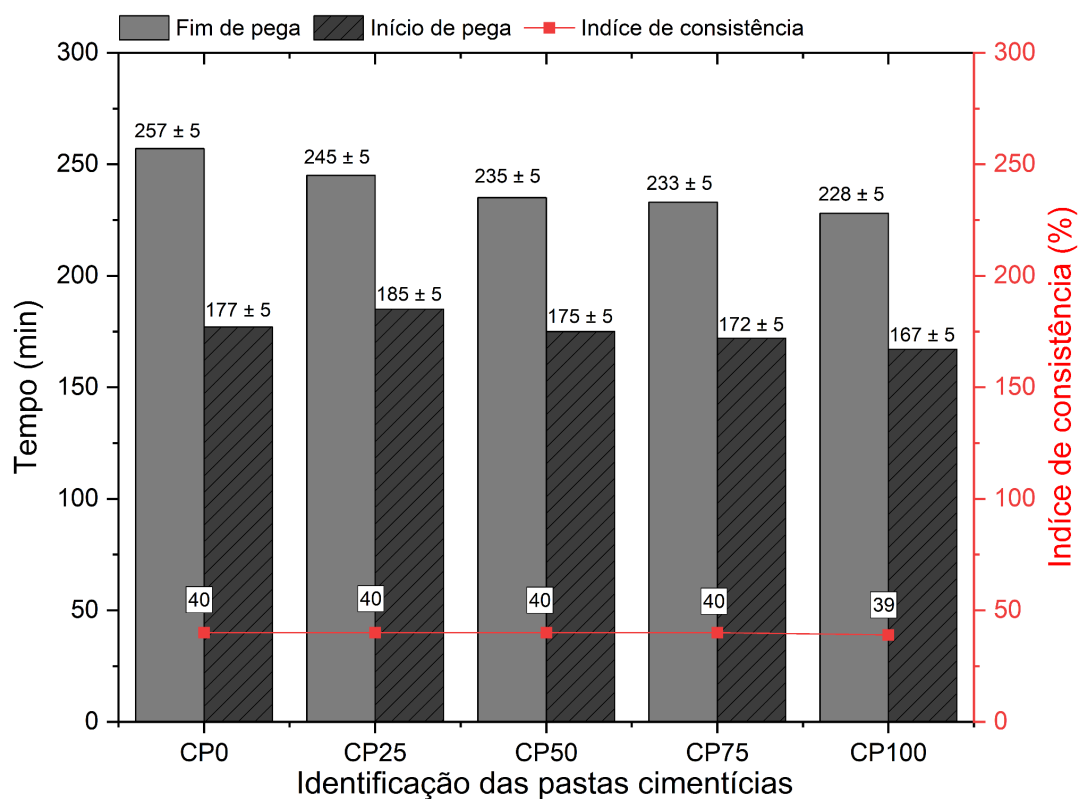
Observa-se que todas as formulações de cimentos LC<sup>3</sup> modificados com pó de cincha de marisco apresentaram valores de resíduo inferiores ao limite máximo normativo estabelecido de  $\leq 12,0\%$  a depender do tipo de cimento Portland, evidenciando a conformidade técnica dos cimentos produzidos quanto ao requisito de finura. Observa-se, entretanto, um aumento progressivo do resíduo retido à medida que se intensifica a substituição do filer calcário pelo pó de concha, com destaque para a formulação F100, que apresentou valor próximo ao limite máximo admissível.

Esse comportamento está em consonância com as características morfológicas e granulométricas previamente identificadas. As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) indicaram que o pó de concha de marisco apresenta partículas de geometria mais irregular, com bordas angulosas e maior tendência à aglomeração, o que contribui para uma distribuição granulométrica mais ampla e para o aumento da fração de partículas de maior tamanho.

### 5.3.3 Tempo de início e fim de pega

A Figura 24 apresenta os resultados dos tempos de início e fim de pega, bem como os índices de consistência das pastas cimentícias LC<sup>3</sup> produzidas com diferentes teores de substituição do filer calcário (FC) por pó de concha de marisco (PCM).

Figura 24 - Resultados das análises de tempos de pega e índice de consistência das pastas cimentícias



Fonte: Autoria própria, (2026).

No sistema LC<sup>3</sup>, a presença de argila calcinada tende a reduzir a quantidade de água livre disponível para a lubrificação das partículas, em razão de sua elevada área específica e caráter lamelar (Sabino, 2025). Entretanto, quando combinada com materiais carbonáticos, como o filer calcário, observa-se um efeito compensatório, uma vez que esses materiais apresentam baixa afinidade com a água, contribuindo para a manutenção da trabalhabilidade do sistema (Avet *et al.*, 2018). A substituição parcial ou total do filer calcário por PCM altera esse equilíbrio, influenciando a cinética de hidratação e, conseqüentemente, os tempos de pega. Segundo Liu *et al.* (2024) e Gu *et al.* (2024), os materiais carbonáticos de origem biogênica atuam simultaneamente como aceleradores físicos e químicos em matrizes cimentícias, fornecendo superfícies ativas que favorecem a

nucleação heterogênea dos produtos de hidratação, como o C–S–H e os carboaluminatos, promovendo o fechamento da microestrutura da pasta cimentícia em menor tempo.

A amostra de referência CP0 (100% FC) apresentou início de pega em 177 min. A substituição inicial de 25% do filer por PCM (CP25) resultou em um aumento de 8 min, atingindo 185 min, o que corresponde a um retardo de aproximadamente 4,5% em relação à referência. Esse comportamento inicial pode ser atribuído a um efeito de diluição e ajuste granulométrico, no qual a proporção PCM/FC ainda não é suficiente para intensificar o efeito de nucleação, predominando temporariamente a redução da fração reativa efetiva do sistema, conforme discutido por Her *et al.* (2024).

A partir da mistura CP25, observa-se uma redução progressiva do tempo de início de pega com o aumento do teor de PCM. As misturas CP50, CP75 e CP100 apresentaram tempos de início de 175, 172 e 167 min, respectivamente. Considerando uma margem de erro de  $\pm 5$  minutos, verifica-se que não houve alteração relevante entre os resultados, indicando que as variações observadas estão dentro do intervalo de incerteza experimental.

O tempo de fim de pega apresentou uma tendência clara de redução monotônica com o aumento do teor de PCM. A amostra CP0 apresentou fim de pega em 257 min, enquanto as misturas CP25, CP50, CP75 e CP100 atingiram valores de 245, 235, 233 e 228 min, respectivamente. Em termos percentuais, a substituição total do filer calcário por PCM (CP100) promoveu uma redução de 29 min no tempo de fim de pega em relação à referência, correspondendo a uma antecipação de aproximadamente 11,28%. A substituição parcial também resultou em reduções mínimas, como observado na CP25, que apresentou fim de pega 4,7% inferior ao da CP0. A redução dos tempos de pega observada nas misturas com maior teor de PCM foi diferente dos resultados reportados por Her *et al.* (2020) com a utilização de conchas de ostras, que identificaram uma redução do período de indução em sistemas cimentícios contendo pó de conchas, com antecipações da ordem de 2 a 4 horas, dependendo da dosagem e da finura do material. Embora as antecipações observadas neste estudo sejam menos pronunciadas do que as reportadas por Her *et al.* (2020), tal diferença pode ser atribuída a variações na finura do PCM, na proporção de argila calcinada e no procedimento experimental.

De forma geral, os resultados demonstram que a substituição progressiva do filer calcário por pó de concha de marisco promove uma antecipação favorável dos tempos de pega, sem comprometer a estabilidade reológica das pastas, tendo em vista que ambas as pastas mantiverem o índice de consistência em torno de 40%, o que indica que a

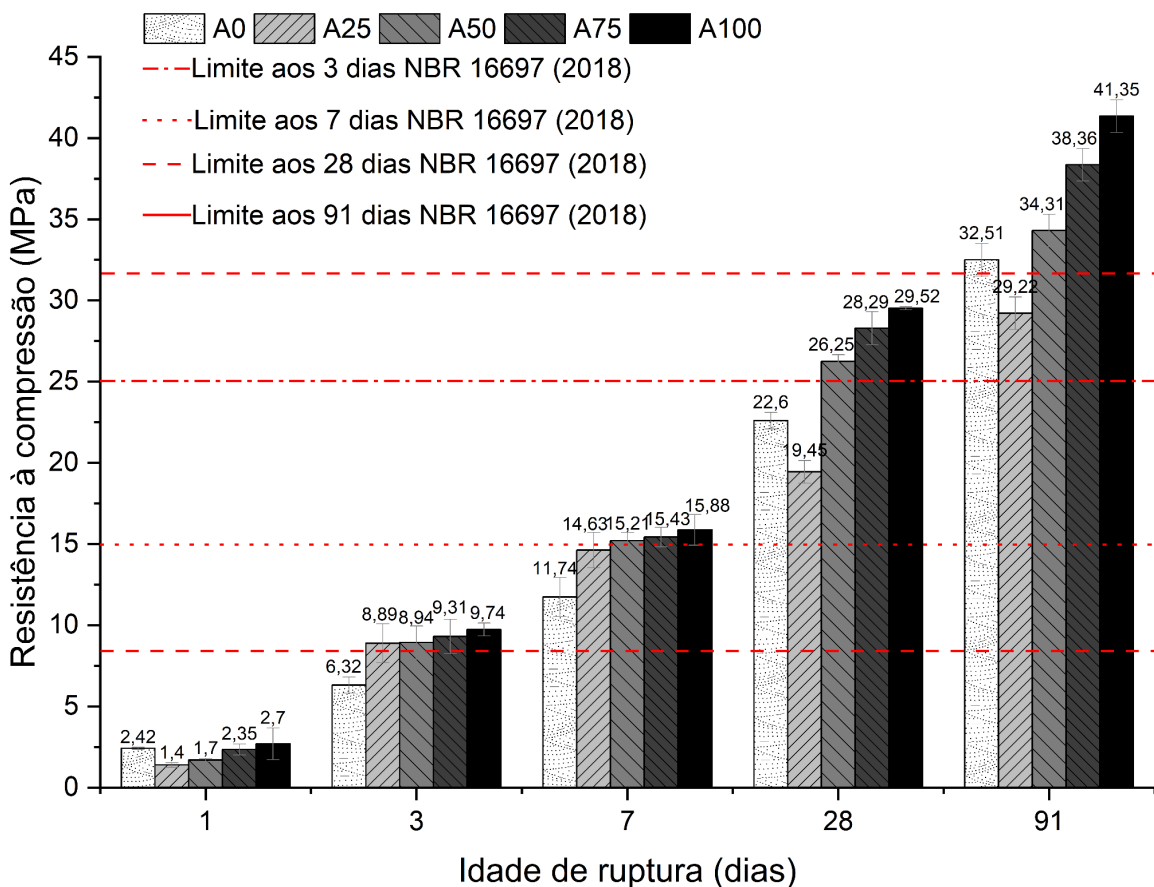
antecipação dos tempos de pega não está associada a perdas significativas de trabalhabilidade inicial.

Ademais, destaca-se que todas as misturas LC<sup>3</sup> modificadas obedecem ao requisito de início de pega da NBR 16697 (ABNT, 2018)  $\geq 60$  min. Esse comportamento confirma o potencial do PCM como material carbonático alternativo em sistemas LC<sup>3</sup>, atuando predominantemente por mecanismos físicos de nucleação e sinergia com a reação pozolânica, em consonância com a literatura recente.

### 5.3.4 Resistência à compressão axial das argamassas

A Figura 25 apresenta os resultados de resistência à compressão das argamassas LC<sup>3</sup> produzidas com diferentes teores de substituição do filer calcário por pó de concha de marisco (PCM), avaliadas nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Para a interpretação dos resultados apresentados na Figura 25. O relatório detalhado do ensaio contendo os valores de resistência individuais e os respectivos desvios relativos máximos é apresentado no apêndice A.

Figura 25 - Resultados de resistência à compressão diametral das argamassas ao longo do período de cura



Fonte: Aatoria própria, (2026).

O pressuposto de normalidade foi atendido em todas as idades de ruptura, de acordo com os resultados do teste de Shapiro-Wilk. A análise de homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene, indicou heterocedasticidade significativa nas idades de 24 h ( $p = 0,010$ ), 7 dias ( $p = 0,044$ ) e 91 dias ( $p = 0,035$ ), ao passo que, aos 3 dias ( $p = 0,183$ ) e 28 dias ( $p = 0,382$ ), o pressuposto foi atendido, o detalhamento dos testes utilizados neste tópico é apresentado no apêndice B. Dessa forma, optou-se pela aplicação da ANOVA a um fator com correção de Welch, metodologia robusta a essas violações e amplamente empregada na análise de dados experimentais de materiais cimentícios. Os resultados da ANOVA são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados da ANOVA para a resistência à compressão ao longo do período de cura

Idade de ruptura	F	g1	g2	p
24h	41,60	4	7,04	< 0,001
3dias	140,4	4	6,47	< 0,001
7 dias	14,4	4	6,23	0.003
28 dias	236	4	6,73	< 0,001
91 dias	108	4	7,26	< 0,001

F - razão entre a variabilidade entre os grupos; g1 - graus de liberdade; g2 - graus de liberdade ajustados de Welch; p-valor - probabilidade de obter um valor de F igual ou maior ao observado.

Fonte: Aatoria própria, (2026).

Os resultados da ANOVA de Welch indicaram efeito estatisticamente significativo do teor de substituição do filer calcário por pó de concha de marisco (PCM) sobre a resistência à compressão em todas as idades de cura analisadas, conforme evidenciado pelos valores da estatística F e pelos respectivos p-valores ( $p \leq 0,003$ ). Os maiores valores de F foram observados aos 3 dias ( $F = 140,4$ ) e aos 28 dias ( $F = 236,0$ ), indicando que, nessas idades, a influência do teor de PCM foi particularmente pronunciada. Esse comportamento evidencia que a incorporação do PCM altera de forma significativa o desenvolvimento da resistência mecânica ao longo do tempo.

Do ponto de vista da evolução da resistência com o teor de PCM, observa-se, aos 1 dia, um comportamento não monotônico. Onde inicialmente há uma diminuição de resistência à compressão, quando comparam-se a argamassa de referência A0 (2,42 MPa) à mistura A25 (1,40 MPa), correspondendo a uma redução de aproximadamente 42,1% com a substituição inicial de 25% do filer por PCM. Contudo, a partir desse teor, verifica-se uma recuperação progressiva da resistência, com aumentos de 21,4% (A50), 68,0% (A75) e 92,6% (A100) em relação à A25, culminando em valor superior ao da referência na mistura A100 (2,70 MPa), que representa um incremento de 11,6% em relação à A0. Esse comportamento sugere que, em idades muito precoces, há uma competição entre o efeito de diluição inicial e o efeito físico de nucleação promovido pelo PCM, que se torna dominante apenas em teores mais elevados.

No teste post-hoc de Tukey, observaram-se diferenças significativas entre a mistura de referência (A0) e A25, bem como entre A25 e as misturas com maiores teores de PCM (A75 e A100), evidenciando a elevada sensibilidade da resistência inicial à composição do sistema, conforme evidenciado na Tabela 12.

Tabela 12 - Diferenças médias obtidas por análise múltipla de médias pelo método de Tukey para os resultados de resistência à compressão às 24h

	A0	A25	A50	A75	A100
A0	-	0,95*	=	=	=
A25		-	=	-1,1**	-0,86*
A50			-	=	=
A75				-	=

\* p < 0,05; \*\* p < 0,01; \*\*\*p < 0,001

Fonte: Autoria própria, (2026).

A substituição inicial de 25% do filer calcário por PCM promoveu uma redução média de 0,95 MPa na resistência à compressão em relação à mistura de referência (A0), diferença estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ). Em contraste, as misturas com maiores teores de PCM apresentaram recuperação progressiva da resistência, sendo observadas diferenças médias de 1,10 MPa entre A25 e A75 ( $p < 0,01$ ) e de 0,86 MPa entre A25 e A100 ( $p < 0,05$ ). Adicionalmente, não foram observadas diferenças significativas entre A0, A50, A75 e A100, o que evidencia que, em idades muito precoces, apenas a substituição intermediária (25%) impacta negativamente o desempenho mecânico.

Aos 3 dias, o efeito benéfico da substituição torna-se mais evidente. Todas as misturas contendo PCM apresentaram resistências significativamente superiores à referência, com destaque para A75 e A100, confirmando a aceleração do desenvolvimento mecânico promovida pelo material carbonático biogênico, conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Diferenças médias obtidas por análise múltipla de médias pelo método de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 3 dias

	A0	A25	A50	A75	A100
A0	-	-2,3*	-27***	-3,7***	-3,7***
A25		-	=	=	-1,5***
A50			-	=	=
A75				-	=

\* p < 0,05; \*\* p < 0,01; \*\*\*p < 0,001

Fonte: Autoria própria, (2026).

Os resultados apresentados na Tabela 14 indicam que todas as formulações contendo PCM diferiram significativamente da mistura de referência. As diferenças médias em relação à A0 foram de 2,25 MPa (A25), 2,66 MPa (A50), 3,06 MPa (A75) e 3,71 MPa (A100), todas estatisticamente significativas ( $p < 0,001$ ). Entre as próprias misturas com PCM, apenas a comparação entre A25 e A100 apresentou diferença significativa, com incremento médio de 1,46 MPa, sugerindo que o principal ganho mecânico ocorre já a partir da introdução do PCM, sendo os incrementos adicionais mais graduais.

Esses resultados estão em consonância com os achados de Her *et al.* (2020) e Her *et al.* (2024), que demonstraram que sistemas LC<sup>3</sup> modificados com conchas de ostra pulverizadas (OC3) superam o LC<sup>3</sup> convencional e até mesmo o Cimento Portland em todas as idades. Esses autores atribuem esse comportamento à atuação simultânea do PCM como *filler* reativo e agente de nucleação, intensificando a formação precoce de produtos de hidratação.

Na idade de 7 dias, de maneira análoga aos 3 dias de cura, mantém-se a tendência de crescimento da resistência com o aumento do teor de PCM, conforme evidencia a Tabela 14.

Tabela 14 - Diferenças médias obtidas por análise múltipla de médias pelo método de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 7 dias

	A0	A25	A50	A75	A100
A0	-	2,7***	-3,2***	-3,5***	-4,3***
A25		-	=	=	-1,6***
A50			-	=	=
A75				-	=

\* p < 0,05; \*\* p < 0,01; \*\*\*p < 0,001

Fonte: Autoria própria, (2026).

Observa-se a manutenção do efeito positivo do PCM sobre a resistência à compressão. As diferenças médias entre a mistura de referência e as formulações com PCM variaram de 2,69 MPa (A25) a 4,31 MPa (A100), todas estatisticamente significativas ( $p < 0,001$ ). As comparações entre as misturas A25, A50 e A75 não apresentaram diferenças estatísticas relevantes, enquanto a mistura A100 apresentou resistência significativamente superior à A25, com diferença média de 1,63 MPa.

A evolução relativamente contínua, reforça a ideia de que existe um teor limiar de substituição a partir do qual os efeitos positivos do PCM superam o efeito de diluição do clínquer. Esse comportamento é análogo ao observado por Gu *et al.* (2024), que relataram aumentos superiores a 7 MPa na resistência inicial de argamassas LC<sup>3</sup> contendo pó de concha, atribuídos à aceleração da hidratação e à densificação da matriz cimentícia. Assim como neste estudo, os autores observaram que teores mais elevados de PCM resultaram em melhor desempenho mecânico, especialmente em idades iniciais e intermediárias.

Aos 28 dias, a Tabela 15 ilustra um claro escalonamento de desempenho mecânico.

Tabela 15 - Diferenças médias obtidas por análise múltipla de médias pelo método de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias

	A0	A25	A50	A75	A100
A0	-	3,25***	-3,5***	-5,6***	-6,8***
A25		-	7,0***	-9,2***	-10,3***
A50			-	2,15**	-3,3****
A75				-	=

\* p < 0,05; \*\* p < 0,01; \*\*\*p < 0,001

Fonte: Autoria própria, (2026).

A mistura A25 apresentou resistência média 3,25 MPa inferior à A0 ( $p < 0,001$ ), indicando que substituições reduzidas de PCM não são suficientes para compensar o efeito de diluição do clínquer em idades mais avançadas. Em contrapartida, as misturas A50, A75 e A100 apresentaram resistências significativamente superiores à referência, com diferenças médias de 3,48 MPa, 5,63 MPa e 6,82 MPa, respectivamente ( $p < 0,001$ ). Conforme indicado na Tabela 16, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre A75 e A100, sugerindo a formação de um patamar de desempenho mecânico estabilizado para teores elevados de PCM.

Esse comportamento está alinhado com os resultados de Liu *et al.* (2024), que identificaram desempenhos ótimos em misturas híbridas contendo calcário e pó de concha, com resistências próximas de 45 MPa aos 28 dias. Embora as dosagens e normas de ensaio sejam distintas, ambos os estudos convergem ao demonstrar que a substituição parcial ou total do calcário por PCM favorece a resistência mecânica quando adequadamente dosada.

Os resultados da Tabela 16 demonstram que o efeito benéfico do PCM se mantém em idades avançadas de cura.

Tabela 16 - Diferenças médias obtidas por análise múltipla de médias pelo método de Tukey para os resultados de resistência à compressão aos 91 dias

	A0	A25	A50	A75	A100
A0	-	2,6***	=	-4,9**	-9,7***
A25		-	-4,83**	-7,6***	-12,0***
A50			-	=	-7,16***
A75				-	-4,4*

\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\* $p < 0,001$

Fonte: Autoria própria, (2026).

As misturas A75 e A100 apresentaram resistências médias 4,94 MPa e 9,37 MPa superiores à A0, respectivamente, ambas com significância estatística ( $p < 0,01$ ). Além disso, a mistura A100 diferiu significativamente de todas as demais formulações, com diferenças médias superiores a 7 MPa em relação às misturas A25 e A50, conforme apresentado na Tabela 7. Esses resultados indicam que teores elevados de PCM promovem ganhos mecânicos ao longo do tempo.

Sob a ótica da conformidade com a NBR 16697 (ABNT, 2018), verifica-se que, aos 3 dias ( $\geq 8,0$  MPa), apenas a argamassa A0 não atende ao requisito normativo, enquanto

todas as misturas contendo PCM encontram-se em conformidade. Aos 7 dias ( $\geq 15,0$  MPa), as argamassas A0 e A25 permanecem fora de conformidade, ao passo que A50, A75 e A100 atendem plenamente ao critério normativo. Já aos 28 dias ( $\geq 25,0$  MPa), observa-se novamente que apenas as formulações com 50% ou mais de PCM (A50, A75 e A100) estão em conformidade, enquanto A0 e A25 não atingem o valor mínimo exigido.

Adicionalmente, considerando o requisito complementar de resistência aos 91 dias de cura ( $\geq 32$  MPa), observa-se que apenas a argamassa A25 com 25% de substituição do filer calcário por pó de concha de marisco (SC<sup>3</sup>-25) não atingiu o valor mínimo de referência. Dessa forma, as formulações SC<sup>3</sup>-50, SC<sup>3</sup>-75 e SC<sup>3</sup>-100 atendem plenamente aos requisitos normativos aplicáveis, tanto nas idades iniciais quanto em idades avançadas de cura.

De forma integrada, os resultados demonstram que o aumento progressivo do teor de pó de concha de marisco, aliado à redução do filer calcário, exerce influência positiva e sistemática sobre o desenvolvimento da resistência mecânica das argamassas LC<sup>3</sup>, especialmente a partir de teores iguais ou superiores a 50% de substituição. Esse comportamento reforça a viabilidade técnica do PCM como substituinte do filer calcário em sistemas cimentícios de baixo teor de clínquer, contribuindo simultaneamente para o desempenho mecânico e para a sustentabilidade do material.

## **5.4 Análise de regressão linear**

### **5.4.1 Correlações estatísticas**

A Figura 26 apresenta os coeficientes de correlação de Spearman ( $\rho$ ) entre as variáveis independentes: teor de substituição do filer calcário por pó de concha de marisco (PCM) e finura dos cimentos (Finura), e as variáveis resposta, compreendendo a resistência à compressão das argamassas LC<sup>3</sup> nas idades de 24 h, 3d, 7d, 28d e 91d dias de cura, bem como os tempos de início (T.início) e fim de pega (T.fim).



Para o tempo de início de pega, observou-se uma correlação negativa com o teor de PCM ( $\rho = -0,87$ ), indicando que o aumento da substituição do filer calcário por PCM está associado à antecipação desse parâmetro. Embora o p-valor ( $p = 0,054$ ) situe-se ligeiramente acima do nível clássico de significância de 5%, o resultado pode ser interpretado como estatisticamente marginal, sugerindo uma tendência consistente que se alinha com o comportamento observado experimentalmente.

Em contraste, para o tempo de fim de pega, verificou-se uma correlação negativa forte e estatisticamente significativa ( $\rho = -0,975$ ;  $p = 0,005$ ), evidenciando uma associação monotônica robusta entre o aumento do teor de PCM e a redução sistemática do tempo necessário para a consolidação completa da pasta. Embora a baixa magnitude da variação observada, os resultados indicam que o teor de PCM exerce papel determinante na cinética de endurecimento do sistema LC<sup>3</sup>, particularmente na fase final da pega.

A finura dos cimentos apresentou correlação significativa com o tempo de fim de pega ( $\rho = 1,00$ ;  $p < 0,005$ ), enquanto não se mostrou estatisticamente significativa para o tempo de início de pega

#### 5.4.2 Modelos de regressão linear

Com base nas correlações observadas, procedeu-se à análise de regressão linear simples as variáveis resposta que apresentaram associação estatisticamente relevante. O apêndice C apresenta a verificação dos pressupostos e detalhamento completo dos testes utilizados nos modelos de regressão linear apresentados a seguir.

A Tabela 17 apresenta as medidas de ajustamento do modelo de regressão linear aplicado à resistência à compressão aos 28 dias de cura.

Tabela 17 - Medidas de ajustamento do modelo de resistência à compressão aos 28 dias

R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Teste ao modelo global			
			F	gl <sub>1</sub>	gl <sub>2</sub>	p
0,842	0,709	0,693	43,8	1	18	< 0,001

R - Coeficiente de correlação linear; R<sup>2</sup> (coeficiente de determinação); F - razão entre a variância explicada pelo modelo e a residual; gl<sub>1</sub> - Graus de liberdade do numerador do teste F; gl<sub>2</sub> - Graus de liberdade do denominador do teste F; p - Indicador de significância a 5%.

Fonte: Autoria própria, (2026).

A influência do teor de PCM sobre a resistência à compressão aos 28 dias foi avaliada considerando um tamanho amostral de N = 20. O modelo apresentou bom ajuste

aos dados experimentais, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,709$ , indicando que aproximadamente 70,9% da variabilidade da resistência à compressão pode ser explicada pelo teor de PCM. O valor de  $R^2$  ajustado (0,693) confirma a consistência do modelo após a penalização pelo número de parâmetros.

O teste global do modelo foi estatisticamente significativo ( $F(1,18) = 43,8$ ;  $p < 0,001$ ), evidenciando que a regressão linear descreve de forma adequada a relação entre as variáveis analisadas. A análise de variância (ANOVA omnibus) confirmou que o teor de PCM exerce influência estatisticamente significativa sobre a resistência à compressão aos 28 dias, sendo responsável pela maior parcela da soma de quadrados do modelo (207,8), quando comparada à soma de quadrados residual (85,3).

O modelo linear ajustado pode ser expresso pela Equação (1):

$$fc_{28} = 20,67 + 0,091 \cdot PCM \quad (1)$$

Em que  $fc_{28}$  representa a resistência à compressão aos 28 dias (MPa) e PCM o teor de pó de concha de marisco (%).

Obteve-se um coeficiente angular positivo e estatisticamente significativo ( $t = 6,62$ ;  $p < 0,001$ ) indicando que o aumento do teor de PCM está associado a um incremento da resistência à compressão nessa idade de cura. O intercepto também apresentou significância estatística ( $p < 0,001$ ).

A avaliação dos pressupostos do modelo indicou ausência de multicolinearidade, ( $VIF = 1,00$ ), e a análise da Distância de Cook revelou valores baixos (máximo de 0,238), não sendo identificados pontos influentes capazes de comprometer o ajuste do modelo.

A Tabela 18 apresenta as medidas de ajustamento do modelo de regressão linear aplicado ao tempo de início de pega.

Tabela 18 – Medidas de ajustamento do modelo de regressão linear para o tempo de início de pega

R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Teste ao modelo global			
			F	gl <sub>1</sub>	gl <sub>2</sub>	p
0,715	0,512	0,349	3,14	1	3	0,174

R - Coeficiente de correlação linear; R<sup>2</sup> (coeficiente de determinação); F - razão entre a variância explicada pelo modelo e a residual; gl<sub>1</sub> - Graus de liberdade do numerador do teste F; gl<sub>2</sub> - Graus de liberdade do denominador do teste F; p - Indicador de significância a 5%.

Fonte: Autoria própria, (2026).

O modelo apresentou ajuste moderado, com  $R^2 = 0,512$ , indicando que cerca de 51,2% da variabilidade do tempo de início de pega pode ser explicada pelo teor de PCM. Entretanto, o teste global não indicou significância estatística ( $p = 0,174$ ), sugerindo que, nas condições avaliadas, o teor de PCM não exerce influência estatisticamente significativa sobre o tempo de início de pega, embora se observe uma tendência de redução desse tempo com o aumento do teor de substituição.

Para o tempo de fim de pega, a Tabela 19 apresenta as medidas de ajustamento do modelo.

Tabela 19 – Medidas de ajustamento do modelo de regressão linear para o tempo de fim de pega

R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Teste ao modelo global			
			F	gl1	gl2	p
0,972	0,944	0,926	50,8	1	18	0,006

R - Coeficiente de correlação linear; R<sup>2</sup> (coeficiente de determinação); F - razão entre a variância explicada pelo modelo e a residual; gl<sub>1</sub> - Graus de liberdade do numerador do teste F; gl<sub>2</sub> - Graus de liberdade do denominador do teste F; p - Indicador de significância a 5%.

Fonte: Autoria própria, (2026).

Apesar do baixo tamanho amostral ( $N = 5$ ), o modelo apresentou elevado grau de ajuste, com  $R^2 = 0,944$ , indicando que 94,4% da variabilidade do tempo de fim de pega pode ser explicada pelo teor de PCM. O teste global do modelo foi estatisticamente significativo ( $F(1,3) = 50,8$ ;  $p = 0,006$ ). A análise de variância (ANOVA omnibus) evidenciou que o teor de pó de concha de marisco exerce influência estatisticamente significativa sobre o tempo de fim de pega ( $p = 0,006$ ), sendo responsável pela maior parcela da variabilidade observada, conforme indicado pela soma de quadrados do modelo (501,6) em comparação à soma de quadrados residual (29,6).

O modelo ajustado pode ser expresso pela Equação (2):

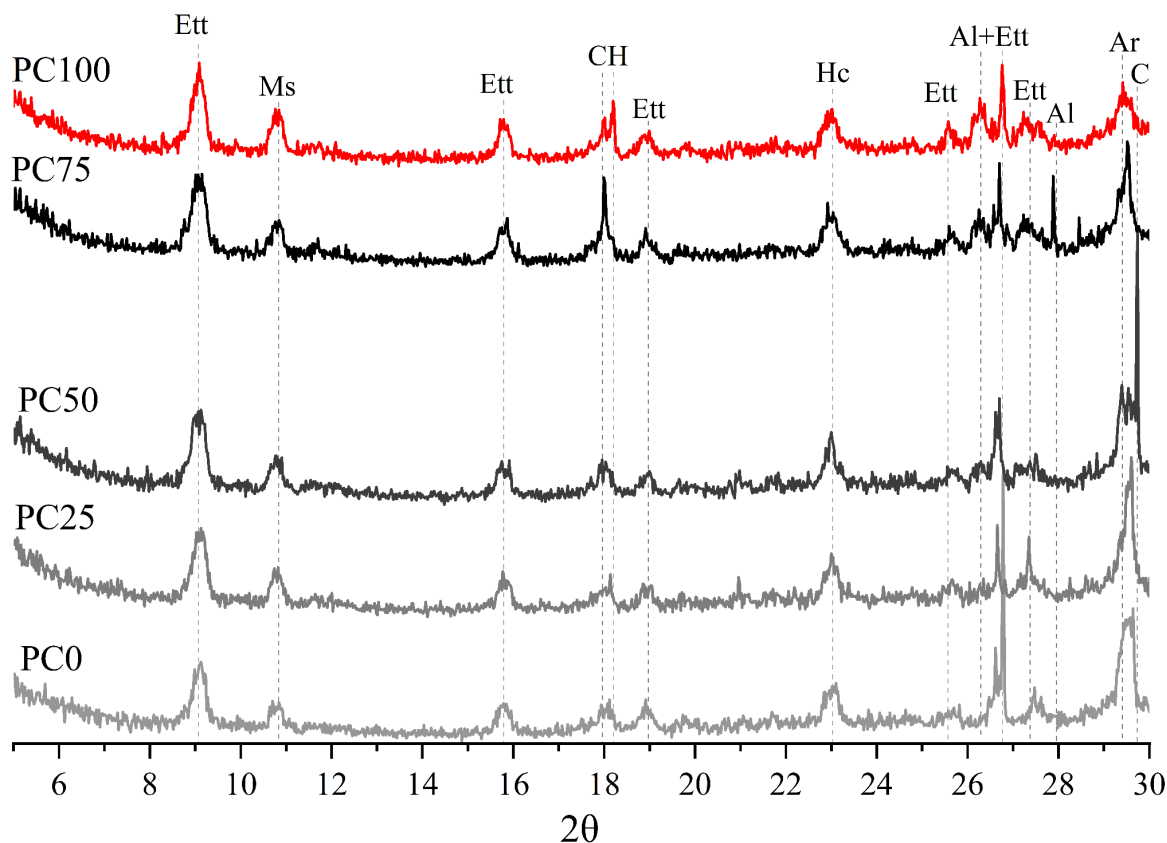
$$T_f = 255,06 - 0,344 \cdot PCM \quad (2)$$

Onde  $T_f$  representa o tempo de fim de pega (min). O coeficiente angular negativo e estatisticamente significativo ( $t = -7,12$ ;  $p = 0,006$ ) indica que o aumento do teor de PCM está associado à redução do tempo de fim de pega, sugerindo um efeito acelerador do material sobre a consolidação final da pasta. O intercepto também apresentou significância estatística ( $p < 0,001$ ).

### **5.5 Produtos de hidratação**

A Figura 27 reúne os difratogramas de raios X das pastas cimentícias LC<sup>3</sup> com diferentes teores de substituição do filer calcário por pó de concha de marisco (P0, P25, P50, P75 e P100), permitindo avaliar a evolução das fases cristalinas em função do aumento do conteúdo de carbonato biogênico no sistema.

Figura 27 - Resultados da análise dos produtos de hidratação das pastas cimentícias via DRX: Ett - Etringita; Ms: Monocarboaluminato; CH - Portlandita; Al - Alita; Ar - Aragonita; C - Calcita



Fonte: Autoria própria, (2026).

A análise comparativa dos difratogramas de raios X das pastas cimentícias evidencia uma evolução sistemática da mineralogia dos produtos de hidratação em função do aumento do teor de pó de concha de marisco (PCM), particularmente associada à introdução e ao progressivo predomínio da aragonita como fonte carbonática no sistema LC<sup>3</sup>.

No difratograma da composição de referência (P0), contendo exclusivamente filer calcário como fonte de  $\text{CaCO}_3$ , observam-se picos intensos atribuídos à calcita, com reflexão principal em torno de  $29,4^\circ$  ( $2\theta$ ), além da presença de alita como fase anidra residual do clínquer, indicando que o processo de hidratação não se encontra completamente finalizado aos 28 dias de cura. Nessa formulação, também se destaca a presença bem definida de portlandita, cujas reflexões características em aproximadamente  $18,0^\circ$  e  $34,1^\circ$  ( $2\theta$ ) apresentam intensidades relativamente elevadas, evidenciando que uma fração significativa do  $\text{Ca(OH)}_2$  formado durante a hidratação inicial do clínquer ainda

permanece no sistema. Esse comportamento é típico de sistemas LC<sup>3</sup>, nos quais a formação de portlandita ocorre predominantemente nas idades iniciais, sendo progressivamente mitigada pela reação pozolânica da argila calcinada, responsável pelo consumo de Ca(OH)<sub>2</sub> e pela formação de produtos secundários ricos em alumínio (Her *et al.*, 2020).

Com a introdução progressiva do pó de concha de marisco, as formulações com teor de substituição do filer por PCM iguais ou superiores a 50% (P50, P75 e P100), tornam-se claramente evidentes picos característicos da aragonita, especialmente nas regiões de aproximadamente 29° (2θ) e a ausência do pico de calcita. A persistência desses picos aos 28 dias de hidratação indica que a aragonita apresenta elevada estabilidade mineralógica no ambiente altamente alcalino da pasta cimentícia, não ocorrendo transformação polimórfica significativa para calcita no intervalo de tempo analisado. Esse comportamento está em consonância com os resultados reportados por Jiang *et al.* (2025) e Liu *et al.* (2024), que também observaram a manutenção da aragonita em sistemas LC<sup>3</sup> modificados com carbonatos biogênicos, mesmo em idades intermediárias de hidratação.

Além disso, observa-se a redução da intensidade dos picos atribuídos à aragonita, indicando o consumo progressivo do CaCO<sub>3</sub> ao longo da hidratação. Resultados complementares reportados por Her *et al.* (2024) corroboram essa interpretação ao demonstrar que, em sistemas LC<sup>3</sup> modificados com pó de concha de ostras, o teor total de CaCO<sub>3</sub> tende a diminuir levemente com o avanço da hidratação, evidenciando sua participação ativa na formação de fases carboaluminatas.

Paralelamente, são identificados picos associados à etringita (AFt), ao monossulfoaluminato (Ms) e ao hemicarboaluminato (Hc), refletindo o equilíbrio típico dos sistemas LC<sup>3</sup>, nos quais parte do alumínio dissolvido é estabilizada na forma de fases AFm carbonatadas. Observa-se um aumento relativo da intensidade dos picos atribuídos ao hemicarboaluminato com o incremento do teor de PCM, particularmente nas composições P75 e P100. Esse comportamento indica a estabilização progressiva de fases AFm carbonatadas em detrimento da formação de monossulfato, fenômeno amplamente descrito na literatura para sistemas LC<sup>3</sup>.

A maior reatividade superficial da aragonita, associada à sua morfologia e à maior energia de superfície quando comparada à calcita, favorece uma liberação mais eficiente de íons carbonato na solução dos poros, intensificando a formação de carboaluminatos e acelerando a redistribuição do alumínio dissolvido no sistema (Zhao *et al.*, 2023).

A presença de fases do tipo AFm em todas as formulações era esperada, em função da reação entre o aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) do cimento e os íons carbonato disponíveis na

solução dos poros (Meng; Shi; Ouyang, 2024). A formação dessas fases indica que uma parcela significativa do alumínio dissolvido é direcionada para a estabilização de carboaluminatos, reduzindo a formação de monossulfato e evidenciando a forte influência da disponibilidade de  $\text{CaCO}_3$  na trajetória de hidratação do aluminato.

A maior intensidade do pico próximo de  $27^\circ$  ( $2\theta$ ), associado à alita, observada na pasta PC0, bem como a sua redução progressiva à medida que se aumenta o percentual de substituição do filer por PCM, indica que a incorporação do pó de concha intensifica o consumo das fases silicatadas do clínquer. Esse comportamento está relacionado à presença de aragonita, que atua promovendo a aceleração das reações e um maior grau de hidratação do sistema cimentício, conforme reportado por Zhao *et al.* (2023) e Li, Cao e Yin (2019).

Ademais, compreende-se que os mecanismos globais de hidratação da argila caulínica calcinada e do clínquer permanecem essencialmente inalterados quando o filer calcário é substituído por conchas de mariscos. Dessa forma, a substituição por PCM mostra-se tecnicamente viável, uma vez que preserva a rota fundamental de hidratação do sistema  $\text{LC}^3$ , ao mesmo tempo em que promove ajustes cinéticos e mineralógicos favoráveis, associados à maior disponibilidade de carbonatos reativos, sem prejuízos à estabilidade das fases hidratadas formadas.

## 6 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a influência da utilização do pó de concha de marisco (PCM), cujo carbonato de cálcio encontra-se predominantemente na forma de aragonita, como material alternativo ao filer calcário em cimentos LC<sup>3</sup>, considerando teores de substituição de 25%, 50%, 75% e 100% do material carbonático em relação à massa total do sistema (50% de clínquer, 15% de material carbonático, 30% argila calcinada e 5% de gipsita). Com base nos resultados obtidos, podem ser destacadas as seguintes conclusões:

- Os cimentos produzidas com substituições iguais ou superiores a 50% do filer calcário por pó de concha de marisco apresentaram resistência à compressão superior (30%) a composição de referência, em todas as idades de cura avaliadas;
- Do ponto de vista mineralógico, a aragonita presente no PCM mostrou-se estável no ambiente alcalino da pasta cimentícia até os 28 dias de cura, sem evidências de transformação polimórfica em calcita;
- O aumento do teor de pó de concha de marisco substituindo o filer calcário promoveu uma antecipação dos tempos de início e fim de pega, sobretudo para teores de substituição iguais ou superiores a 50%, associada ao efeito físico de nucleação exercido pelo PCM;
- As formulações com substituição de 50%, 75% e 100% do filer calcário por PCM (SC<sup>3</sup>-50, SC<sup>3</sup>-75 e SC<sup>3</sup>-100) atenderam plenamente aos requisitos químicos, físicos e mecânicos estabelecidos pela ABNT NBR 16697 (2018), destacando-se quanto à resistência à compressão nas idades normativas de 3, 7, 28 e 91 dias. Em contrapartida, as misturas com menor teor de substituição (25%) apresentaram desempenho inferior, indicando que a utilização do PCM é tecnicamente mais eficiente quando empregada em teores moderados a elevados.

De forma integrada, os resultados demonstram que o pó de concha de marisco constitui uma alternativa tecnicamente viável em substituição ao filer calcário em sistemas LC<sup>3</sup>, especialmente para substituições iguais ou superiores a 50%. Além de manter ou melhorar o desempenho tecnológico e mecânico dos cimentos, sua utilização contribui para a valorização de um resíduo abundante no litoral nordestino, contribuindo para a economia

circular, reduzindo a demanda por calcário natural e reforçando o potencial dos cimentos LC<sup>3</sup> como solução de menor impacto ambiental para a indústria da construção civil.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para ampliar o entendimento sobre o comportamento deste material, recomenda-se que pesquisas futuras possam avaliar:

- (i) Análise das propriedades reológicas, verificando a tensão de escoamento estática e dinâmica e a tixotropia, a fim de quantificar o impacto da morfologia acicular da aragonita na reologia das pastas cimentícias;
- (ii) Modelagem cinética da hidratação, permitindo identificar a contribuição específica da aragonita como sítio nucleante; e
- (iii) Avaliação do ciclo de vida (ACV) do sistema, etapa essencial para verificar se a substituição do filer calcário por pó de concha resulta em benefícios ambientais líquidos quando considerados impactos de coleta, processamento, transporte e incorporação.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ÁGUILA-ALMANZA, E. *et al.* Recuperation and characterization of calcium carbonate from residual oyster and clamshells and their incorporation into a residential finish. **Chemosphere**, [S.L.], v. 288, p. 1-9, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132550>.

ANTONI, M. *et al.* Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 42, n. 12, p. 1579-1589, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>.

AMOR, F. *et al.* Development of Zn-Al-Ti mixed oxides-modified cement phases for surface photocatalytic performance. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 9, p. 1-13, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00209>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13281-1**: Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios. Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura para realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281-2**: Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaio parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479**: Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200). Rio de Janeiro, RJ. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310-1**. Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018c. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2025.

AVET, F.; SCRIVENER, K. Influence of pH on the chloride binding capacity of Limestone Calcined Clay Cements (LC3). **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 131, p. 106031, mai. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106031>.

BARBOSA, A.; FERRAZ, V. A.; SANTOS, G. A. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso  $\beta$  obtido do pó do Araripe. **Cerâmica**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 501-508, jan. 2014.

BERRIEL, S. S *et al.* Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 124, p. 361-369, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125>.

BLOUCH, N.; RASHID, K.; JU, M. Exploring low-grade clay minerals diving into limestone calcined clay cement (LC<sup>3</sup>): Characterization - Hydration - Performance. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 426, p. 1-12, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139065>.

BOEHS, G *et al.* Parasites of three commercially exploited bivalve mollusc species of the estuarine region of the Cachoeira river (Ilhéus, Bahia, Brazil). **Journal of Invertebrate Pathology**, v.103, n.1, p.43-47, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2009.10.008>.

BLOUCH, N; RASHID, K; JU, Mi. Exploring low-grade clay minerals diving into limestone calcined clay cement (LC3): characterization hydration performance. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 426, n. 139065, p. 1-12, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139065>.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Instrução Normativa nº 105, de 20 de julho de 2006**. Brasília, DF: IBAMA, 2006. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=112605>. Acesso em: 23 ago. 2025.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Instrução Normativa nº 13, de 18 de dezembro de 2012**. Brasília, DF: IBAMA, 2012. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=128945>. Acesso em: 23 ago. 2025.

CALDAS, A. A. Uso de conchas de marisco na fabricação de blocos vazados de concreto simples para alvenaria. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 248-257, 24 set. 2018. Companhia Brasileira de Produção Científica. <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2018.005.0022>.

CÂMARA, M. Y. de F. **Estudo da durabilidade de concretos com utilização do cimento LC<sup>3</sup>**. 2020. 149f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e materiais de construção civil, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2020.

CAO, M.; XU, L.; ZHANG, C. Rheology, fiber distribution and mechanical properties of calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) whisker reinforced cement mortar. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S.L.], v. 90, p. 662-669, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.08.033>.

CATAURO, M. *et al.* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>· 2SiO<sub>2</sub> powders synthesized via sol-gel as pure raw material in geopolymer preparation. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 100, n. 5, p. 1919-1927, 2017.

COSTA, E. B da. *et al.* Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 75-86, jun. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212013000200007>.

DANNER, T., NORDEN, G., JUSTNES, H. Characterisation of calcined raw clays suitable as supplementary cementitious materials. **Applied Clay Science**, v. 162, p. 391-402, 2018.

DENG, Y.; WHITE, G. N.; DIXONAL, J. B. Effect of structural stress on the intercalation rate of kaolinite. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 250, p. 379-393, 2002.

DICKENS, B; BOWEN, J. Refinement of the Crystal Structure of the Aragonite Phase of  $\text{CaCO}_3$ . **Journal Of Research Of The National Bureau Of Standards**-. A. Physics and Chemistry, Washington, v. 75, n. 1, p. 27-32, 31 jul. 1970.

FAGUNDES, T. F. da S; SILVA, L. B da. Potencial uso dos resíduos de conchas de moluscos: uma revisão. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 1-11, 2 mar. 2022. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26614>.

FARCAS, Fabienne; TOUZE, Philippe. La spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF): Une méthode intéressante pour la caractérisation des ciments. **BLPC-Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, n. 230, p. pp 77-88, 2001.

FERNANDES, F. S. P. **Concreto com substituição do agregado miúdo pelo carbonato de cálcio proveniente da concha de marisco**: propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido . 2023. 95f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

FERNANDEZ-DIAZ, L. *et al.* The Role of Magnesium in the Crystallization of Calcite and Aragonite in a Porous Medium. **Journal Of Sedimentary Research**, [S.L.], v. 66, n. 3, p. 482-491, jan. 1996. Society for Sedimentary Geology. <http://dx.doi.org/10.1306/d4268388-2b26-11d7-8648000102c1865d>.

FERNANDEZ, R.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: a comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 1, p. 113-122, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013>.

FULGÊNCIO, E. B. G. A *et al.* Uso de conchas de mariscos na preparação de  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  para aplicações energéticas. In: **10º Fórum internacional de resíduos sólidos**, João Pessoa, 2019.

FULGÊNCIO, E. B. G. A. *et al.* Estudo da incorporação de pó de concha de marisco em massa de porcelanato. **Cerâmica**, [S.L.], v. 64, n. 371, p. 381-387, set. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643712368>.

FU, Q.; LIU, Y.; NIU, D. Hydration characteristics and microstructure of limestone calcined clay cement. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 117, p. 114729, jan. 2026. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2025.114729>.

GIRARDI, F. **Modificação superficial de argila caulínica**: oclusão de agentes tensoativos. 2013. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. [S.l.]: [SI]: McGraw-Hill, 1968.

GU, X. *et al.* Optimizing the pore structure and permeability of calcined clay limestone cement through shell powder. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 91, p. 1-14, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109582>.

HAMESTER, M. R. R.; BECKER, D. Obtenção de carbonato de cálcio a partir de conchas de mariscos. In: **Proceedings of the 19th Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais—CBECiMat**, Campos do Jordão, SP, Brasil. 2010. p. 21-25.

HAN, Q. *et al.* Regulation of calcium carbonate polymorphs from recycled cement paste powder leachate and their impact on cement properties. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 486, p. 1-14, ago. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141929>.

HE, C.; MAKOVICKY, E.; OSBAECK, B. Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin. **Applied Clay Science**, v. 9, n. 3, p. 165-187, set. 1994.

HER, S. *et al.* A Sustainable and Viable Method to Recycle Oyster Shell Waste as an Alternative of Limestone in Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Journal Of The Korean Recycled Construction Resources Institute**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 219-226, jun. 2020. 한국건설순환자원학회. <http://dx.doi.org/10.14190/JRCR.2020.8.2.219>.

HER, S. *et al.* Exploring the potential of pulverized oyster shell as a limestone substitute in limestone calcined clay cement (LC3) and its implications for performance. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 425, p. 1-12, abr. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135918>.

ILIC, B.; MITROVIC, A.; MILICIC, L. Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin. **Hemijaska Industrija**, [S.L.], v. 64, n. 4, p. 351-356, 2010. National Library of Serbia. <http://dx.doi.org/10.2298/hemind100322014i>.

ISLAM, K. N. *et al.* Characterisation of calcium carbonate and its polymorphs from cockle shells (*Anadara granosa*). **Powder Technology**, [S.L.], v. 213, n. 1-3, p. 188-191, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2011.07.031>.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos avançados**, v.25 n.71, 2011.

JIANG, J. *et al.* Multiscale investigation of hydration and hardening mechanism in cementitious composite containing CO<sub>2</sub>-activation recycled cement paste powder with aragonite whiskers. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 112, p. 1-16, out. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113888>.

KONTOYANNIS, C. G.; VAGENAS, N. V. Calcium carbonate phase analysis using XRD and FT-Raman spectroscopy. **The Analyst**, [S.L.], v. 125, n. 2, p. 251-255, 2000. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/a908609i>.

KOYUNCU, H. *et al.* Equilibrium and kinetic studies for the sorption of 3-methoxybenzaldehyde on activated kaolinites. **Journal of hazardous Materials**, v. 141, p. 128-139, 2007.

LEITE, L. P *et al.* Desenvolvimento e caracterização de concreto sustentável com resíduos de conchas marinhas. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 24, p. 1-12, dez. 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100723>.

LI, L.; CAO, M.; Yin, H. Comparative roles between aragonite and calcite calcium carbonate whiskers in the hydration and strength of cement paste, **Cement and Concrete Composites**. 104 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103350>.

LI, Z. *et al.* A novel approach for revealing the strength evolution mechanism of limestone-calcined clay cement with self-ignition coal gangue and shell powder. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 444, p. 1-21, set. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137854>.

LINS, D. N. **Análise da Resistência à Compressão do Cimento LC<sup>3</sup> e a Influência das Adições Minerais em seu Desempenho**. 2017. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

LIU, B. *et al.* Study on the mechanism of early strength strengthening and hydration of LC3 raised by shell powder. **Journal of Building Engineering**, [S.L.], v. 98, p. 1-15, dez. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobeb.2024.111422>.

LOTTHENBACH, B. *et al.* Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 848–860, 2008.

LU, B. *et al.* Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 699–708, 2018.

LU, J. *et al.* Recycling of shell wastes into nanosized calcium carbonate powders with different phase compositions. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 92, p. 223-229, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.093>.

MALACARNE, C. S. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos LC3 – cimentos ternários a base de argila calcinada e calcário – a partir de matérias primas do Rio Grande do Sul**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

MARANGU, J. M. Physico-chemical properties of Kenyan made calcined Clay-Limestone cement (LC3). **Case Studies In Construction Materials**, [s.l.], v. 12, p. 1-13, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00333>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 4. ed. (inglês) / 2.ed. (Português). Berkeley: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade da Califórnia, 2014.

MENG, S.; SHI, Z.; OUYANG, X. Impact of aragonite coral powder on hydration, strength, and rheology of cement paste. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 92, p. 1-20, set. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobeb.2024.109688>.

MIKULIS, L. A *et al.* Resistência à compressão residual e mineralogia de cimentos LC3 expostos a elevadas temperaturas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 28, n. 4, p. 1-14, out. 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2023-0264>.

MO, K. H. *et al.* Recycling of seashell waste in concrete: a review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 162, p. 751-764, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009>.

MOREIRA, C. **Efeitos do Teor de Gipsita na Microestrutura de Pastas de Cimento LC3**. 2020. 216f. Tese (Doutorado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

NBN, E. N. 197-1. Cement—part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cement. **Brussels: BIN**, 2000.

NEBEL, H.; EPPLE, M. Continuous Preparation of Calcite, Aragonite and Vaterite, and of Magnesium-Substituted Amorphous Calcium Carbonate (Mg-ACC). **Zeitschrift Für Anorganische Und Allgemeine Chemie**, [S.L.], v. 634, n. 8, p. 1439-1443, 26 maio 2008. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/zaac.200800134>.

OLIVEIRA, B. M. C de. **A gestão dos resíduos da mariscagem pernambucana**. 2016. 130f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

OLIVEIRA, B. M. C.; de CASTILHO, C. J. M.; EL-DEIR, S. G. Por uma gestão ambiental integrada na mariscagem pernambucana. **Revista Movimentos Sociais e Dinâmicas Espaciais**, v. 5, n. 1, p. 160-183, 2016.

OLIVEIRA, E. A. F de *et al.* Impactos ambientais oriundos da extração de calcário laminado em Santana do Cariri (CE). **Natural Resources**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 21-30, 24 set. 2018. Companhia Brasileira de Produção Científica. <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2237-9290.2018.002.0003>.

JORGENSEN, J. D.. Compression mechanisms in  $\alpha$ -quartz structures—SiO<sub>2</sub> and GeO<sub>2</sub>. **Journal Of Applied Physics**, [S.L.], v. 49, n. 11, p. 5473-5478, 1 nov. 1978. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.324517>.

PAIVA, M. D. **Otimização e análise mecânica de pastas geopoliméricas para uso em poços sujeitos à injeção cíclica de vapor**. 2008. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

PAQUETTE, J; REEDER, R J. Single-crystal X-ray structure refinements of two biogenic magnesian calcite crystals. **American Mineralogist**, [S.L.], v. 75, p. 1151-1158, 1990. Disponível em: [https://rruff.geo.arizona.edu/doclib/am/vol75/AM75\\_1151.pdf](https://rruff.geo.arizona.edu/doclib/am/vol75/AM75_1151.pdf). Acesso em: 07 dez. 2025.

PETCOV, H. F. D. Estudo de viabilidade técnica, econômica e financeira de implantação da unidade de beneficiamento de mexilhão. **EPAGRI**, 2007.

PY, L. G. *et al.* Evaluation of ultrafine calcined clays on LC3 cements on the sulfate requirement, water demand and strength development. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 57, n. 1, p. 1-16, 3 jan. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-023-02288-5>.

REIG, L. *et al.* Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 98-106, 2013.

REIS, D.C. *et al.* Potential CO2 reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, n. 2, pp. 344–358, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.13130>.

ROCHA, J.H.A.; TOLEDO FILHO, R.D.; CAYO-CHILENO, N.G.. Sustainable alternatives to CO2 reduction in the cement industry: a short review. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 57, p. 436-439, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.565>.

RUX, K.; TUEN, M.; SURANENI, P. Utilization of common shell wastes as a limestone alternative in cementitious materials. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 58, n. 9, p. 1-15, 24 out. 2025. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-025-02832-5>.

SABINO, E. D. **Argamassas sustentáveis com LC<sup>3</sup>: avaliação de propriedades mecânicas e microestruturais em idades avançadas**. 2025. 22 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.

SANTANA, R. F de; ARAGÃO JÚNIOR, W. R. Aproveitamento de resíduos da mariscação: revisão sistemática da literatura com meta-análise. **Holos**, [S.L.], v. 4, n. 39, p. 1-23, mar. 2023. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/10110>. Acesso em: 19 fev. 2025.

SARKAR, A.; MAHAPATRA, S. Mechanism of unusual polymorph transformations in calcium carbonate: dissolution-recrystallization vs additive-mediated nucleation. **Journal Of Chemical Sciences**, [S.L.], v. 124, n. 6, p. 1399-1404, nov. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12039-012-0339-9>.

SAULAT, H. *al.* Preparation and applications of calcium carbonate whisker with a special focus on construction materials, **Construction and Building Materials**. 236 (2020) 117613, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117613>.

SAWAI, J. Antimicrobial Characteristics of Heated Scallop Shell Powder and Its Application. **Biocontrol Science**, [S.L.], v. 16, n. 3, p. 95-102, 2011. The Society for Antibacterial and Antifungal Agents, Japan. <http://dx.doi.org/10.4265/bio.16.95>.

SCRIVENER, K *et al.* Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 114, p. 49-56, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.

SCRIVENER, K *et al.* Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3). **Green Materials**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 3-14, 1 mar. 2019. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/jgrma.18.00029>.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **Indian Concr.** [S.L.], v. 88, n. 7, p. 11-21, 2014.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-co2 cement-based materials industry. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 114, p. 2-26, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.

SHAO, Z.; CAO, M. Hydration mechanism of limestone calcined clay cement containing calcined coal gangue. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 438, p. 136906, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136906>.

SHAO, Z.; CAO, M.; ZHENG, X. Limestone particle sizes and sulfate impact on the early hydration of limestone calcined clay cement. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 97, p. 110848, nov. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110848>.

SHEN, P. *et al.* Preparation aragonite whisker-rich materials by wet carbonation of cement: towards yielding micro-fiber reinforced cement and sequestering co2. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 159, p. 106891, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106891>.

SILVA, R. L da *et al.* Impactos ambientais causados pela extração de calcário em comunidade rural do semiárido potiguar. **Interações (Campo Grande)**, [S.L.], p. 893-909, 20 out. 2023. Universidade Católica Dom Bosco. <http://dx.doi.org/10.20435/inter.v24i3.3563>.

SILVESTRO, L *et al.* Rheological behavior, hydration, and mechanical properties of LC3 systems with the incorporation of functionalized multi-walled carbon nanotubes. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 1-15, mar. 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952024000100006>.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. 2023. **Relatório anual**, 2023.

SINGH, G. V. P. B.; SCRIVENER, K. L. Investigation of phase formation, microstructure and mechanical properties of LC3 based autoclaved aerated blocks. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 344, p. 1-9, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128198>.

SOARES, L. W. **Utilização da cinza da casca de arroz em cimentação de poços de petróleo**. 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SUN, J.; ZUNINO, F.; SCRIVENER, K. Hydration and phase assemblage of limestone calcined clay cements (LC3) with clinker content below 50 %. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 177, p. 107417, mar. 2024. Elsevier BV.

TARI, G. et al. Modification of Surface Charge Properties during Kaolinite to Halloysite-7Å Transformation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 210, p. 360-366, 1999.

THE STATE OF WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE 2024  
<https://doi.org/10.4060/cd0683en>.

USÓN, A. A *et al.* Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 23, p. 242-260, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.024>.

VIANA, L. R. **Uso da concha de Marisco na formulação de fluidos de perfuração de petróleo** 2021. 121f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

VIZCAÍNO-ANDRÉS, L. M. *et al.* Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement. **Materiales de Construcción**, [S.L.], v. 65, n. 317, p. 1-11, 30 mar. 2015. Editorial CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.00614>.

WOLF, T. J. **A reutilização dos resíduos de ostras: um estudo exploratório**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

WYCKOFF, R. W. G.. The crystal structures of some carbonates of the calcite group. **American Journal Of Science**, [S.L.], v. 4-50, n. 299, p. 317-360, 1 nov. 1920. American Journal of Science (AJS). <http://dx.doi.org/10.2475/ajs.s4-50.299.317>.

ZHANG, Z. *et al.* Transformation of amorphous calcium carbonate into aragonite. **Journal of Crystal Growth**, v. 343, n. 1, p. 62–67, 2012.

ZHAO, D. *et al.* Hydration of cement pastes with calcium carbonate polymorphs. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 173, p. 1-14, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2023a.107270>.

ZHAO, D. *et al.* Rheology of cement pastes with calcium carbonate polymorphs. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 172, p. 1-13, out. 2023b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107214>.

## APÊNDICE A

### RELATÓRIO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

**Tabela A1 - Resistência à 24h**

Amostra	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	DRM (%)
A0	2,30	2,42	5,15
	2,45		-1,03
	2,45		-1,03
	2,40		1,03
A25	1,65	1,40	17,86*
	1,35		3,57
	1,40		0
	1,40		0
A50	1,90	1,70	11,76*
	1,70		0
	1,65		2,94
	1,75		2,94
A75	2,35	2,35	0
	3,05		29,79*
	2,35		0
	2,45		4,26
A100	1,15	2,70	57,41*
	2,60		3,70
	2,80		3,70
	2,70		0
Desvio relativo máximo superior a 6%			

**Tabela A2 - Resistência aos 3 dias**

Amostra	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	DRM (%)
A0	6,29	6,32	0,40
	6,34		-0,40
	6,44		-1,98
	6,24		1,19
A25	8,59	8,89	3,37
	8,89		0,00
	8,94		-0,56
	7,89		11,24*
A50	8,84	8,94	1,12
	8,69		2,79
	9,39		-5,03
	9,04		-1,12
A75	9,09	9,31	2,41
	9,84		-5,63
	9,49		-1,88
	9,14		1,88
A100	9,69	9,74	0,51
	9,84		-1,03
	9,74		0,00
	10,89		-11,79*

\* Desvio relativo máximo superior a 6%

**Tabela A3 - Resistência aos 7 dias**

Amostra	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	DRM (%)
A0	11,09	2,42	5,53
	11,89		-1,28
	13,29		-13,19*
	11,74		0,00
A25	15,33	1,40	-4,78
	14,18		3,07
	14,43		1,37
	14,83		-1,37
A50	15,23	1,70	-0,16
	15,33		-0,82
	14,98		1,48
	15,18		0,16
A75	15,38	2,35	0,32
	15,48		-0,32

	15,43		0,00
	15,43		0,00
	15,88		0,00
A100	15,63	2,70	1,57
	15,98		-0,63
	17,78		-11,95*

\* Desvio relativo máximo superior a 6%

**Tabela A4 - Resistência aos 28 dias**

Amostra	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	DRM (%)
A0	21,83	2,42	3,43
	22,82		-0,99
	22,38		0,99
	23,97		-6,08
A25	19,68	1,40	-1,16
	18,33		5,78
	19,68		-1,16
	19,23		1,16
A50	25,57	1,70	2,57
	26,27		-0,10
	26,87		-2,38
	26,22		0,10
A75	27,87	2,35	1,50
	28,42		-0,44
	29,07		-2,74
	28,17		0,44
A100	29,42	2,70	0,34
	29,57		-0,17
	29,47		0,17
	29,82		-1,02

\* Desvio relativo máximo superior a 6%

**Tabela A5 - Resistência aos 91 dias**

Amostra	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	DRM (%)
A0	30,02	32,51	6,46
	32,51		-1,32
	31,66		1,32
	33,06		-3,04
A25	29,87	29,22	-2,22
	29,27		-0,17
	28,42		2,74
	29,17		0,17
A50	34,56	34,31	-0,73
	32,88		4,18
	34,46		-0,44
	34,16		0,44
A75	37,66	38,36	0,92

	39,01		-2,63
	38,36		-0,92
	31,96		15,90*
	40,06		3,14
A100	41,00	41,35	0,85
	41,70		-0,85
	41,95		-1,45
Desvio relativo máximo superior a 6%			

## APÊNDICE B

### TRATAMENTO ESTATÍSTICOS DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AO LONGO DO TEMPO DE CURA

**Tabela B1 - Análise da normalidade dos dados com o teste de Shapiro-Wilk**

	identificação das argamassas	Idade de ruptura				
		24h	3dias	7 dias	28 dias	91 dias
W de Shapiro-Wilk	A0	0.827	0.971	0.918	0.963	0.943
	A25	0.773	0.848	0.970	0.827	0.967
	A50	0.927	0.962	0.953	0.960	0.804
	A75	0.729	0.902	0.945	0.960	0.782
	A100	0.727	0.726	0.765	0.895	0.932
p Shapiro-Wilk	A0	0.161	0.850	0.528	0.795	0.670
	A25	0.062	0.220	0.842	0.161	0.821
	A50	0.577	0.792	0.734	0.780	0.110
	A75	0.054	0.439	0.683	0.778	0.074
	A100	0.053	0.052	0.053	0.405	0.605

**Tabela B2 - Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)**

Idade de cura	F	gl1	gl2	p
24h	4,94	4	15	0,010
3 dias	1,79	4	15	0,183
7 dias	3,18	4	15	0,044
28 dias	1,12	4	15	0,382
91 dias	3,43	4	15	0,035

**Tabela B3 - Teste Post-Hoc de Tukey – Resistência à compressão a 24h de cura**

		<b>A0</b>	<b>A25</b>	<b>A50</b>	<b>A75</b>	<b>A100</b>
<b>A0</b>	Diferença média	-	0.950*	0.650	-0.150	0.0875
	Valor de p	-	0,025	0.179	0.981	0.998
<b>A25</b>	Diferença média		-	-0.300	-1.100*	-0.8625*
	Valor de p		-	0.808	0.009	0.046
<b>A50</b>	Diferença média			-	-0.800	-0.5625
	Valor de p			-	0.069	0.292
<b>A75</b>	Diferença média				-	0.2375
	Valor de p				-	0.906

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

**Tabela B4 - Teste Post-Hoc de Tukey – Resistência à compressão aos 3 dias de cura**

		<b>A0</b>	<b>A25</b>	<b>A50</b>	<b>A75</b>	<b>A100</b>
<b>A0</b>	Diferença média	-	-2.25***	-2.662***	-3.063***	-3.712***
	Valor de p	-	-2.25***	-2.662***	-3.063***	-3.712***
<b>A25</b>	Diferença média		-	-0.412	-0.813	-1.462***
	Valor de p		-	0.591	0.069	<.001
<b>A50</b>	Diferença média			-	-0.400	-1.050*

	Valor de p	-	0.618	0.014
<b>A75</b>	Diferença média		-	-0.650
	Valor de p		-	0.190

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

**Tabela B5 - Teste Post-Hoc de Tukey – Resistência à compressão aos 7 dias de cura**

		<b>A0</b>	<b>A25</b>	<b>A50</b>	<b>A75</b>	<b>A100</b>
<b>A0</b>	Diferença média	-	-2.69***	-3.178***	-3.428***	-4.315***
	Valor de p	-	<.001	<.001	<.001	<.001
<b>A25</b>	Diferença média		—	-0.488	-0.738	-1.625*
	Valor de p		—	0.822	0.515	0.021
<b>A50</b>	Diferença média			—	-0.250	-1.138
	Valor de p			—	0.981	0.148
<b>A75</b>	Diferença média				—	-0.888
	Valor de p				—	0.342

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

**Tabela B6 - Teste Post-Hoc de Tukey – Resistência à compressão aos 7 dias de cura**

		<b>A0</b>	<b>A25</b>	<b>A50</b>	<b>A75</b>	<b>A100</b>
<b>A0</b>	Diferença média	—	-2.69***	-3.178***	-3.428***	-4.315***
	Valor de p	—	<.001	<.001	<.001	<.001
<b>A25</b>	Diferença média		—	-0.488	-0.738	-1.625*
	Valor de p		—	0.822	0.515	0.021
<b>A50</b>	Diferença média			—	-0.250	-1.138

	Valor de p	—	0.981	0.148
<b>A75</b>	Diferença média		—	-0.888
	Valor de p		—	0.342

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

**Tabela B7 - Teste Post-Hoc de Tukey – Resistência à compressão aos 28 dias de cura**

		<b>A0</b>	<b>A25</b>	<b>A50</b>	<b>A75</b>	<b>A100</b>
<b>A0</b>	Diferença média	-	3.52* **	-3.48***	-5.63***	-6.82***
	Valor de p	-	<.001	<.001	<.001	<.001
<b>A25</b>	Diferença média		—	-7.00***	-9.15***	-10.34***
	Valor de p		—	<.001	<.001	<.001
<b>A50</b>	Diferença média			—	-2.15**	-3.34***
	Valor de p			—	0.001	<.001
<b>A75</b>	Diferença média				—	-1.19
	Valor de p				—	0.085

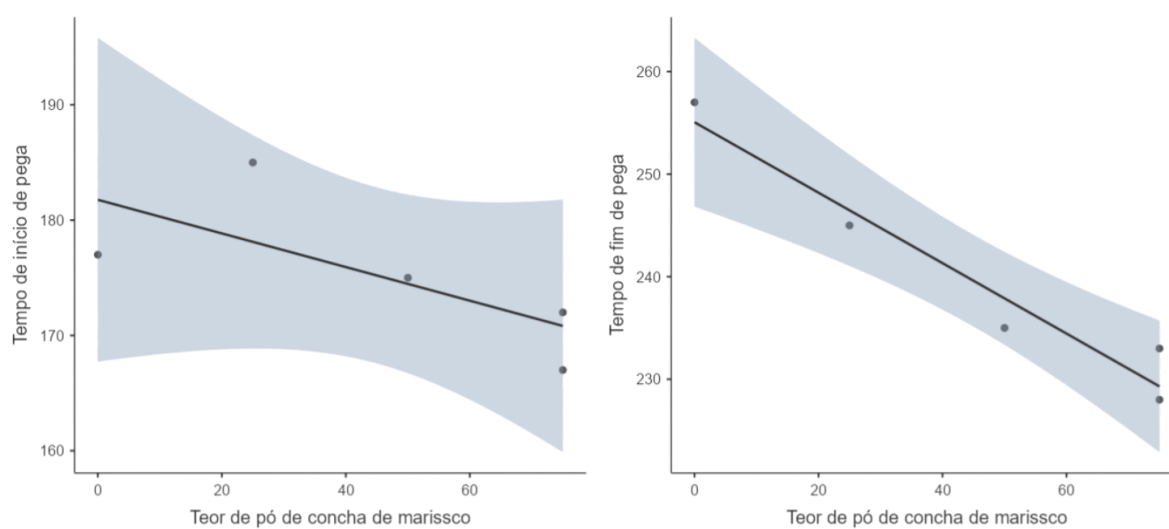
Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

**Tabela B8 - Teste Post-Hoc de Tukey – Resistência à compressão aos 91 dias de cura**

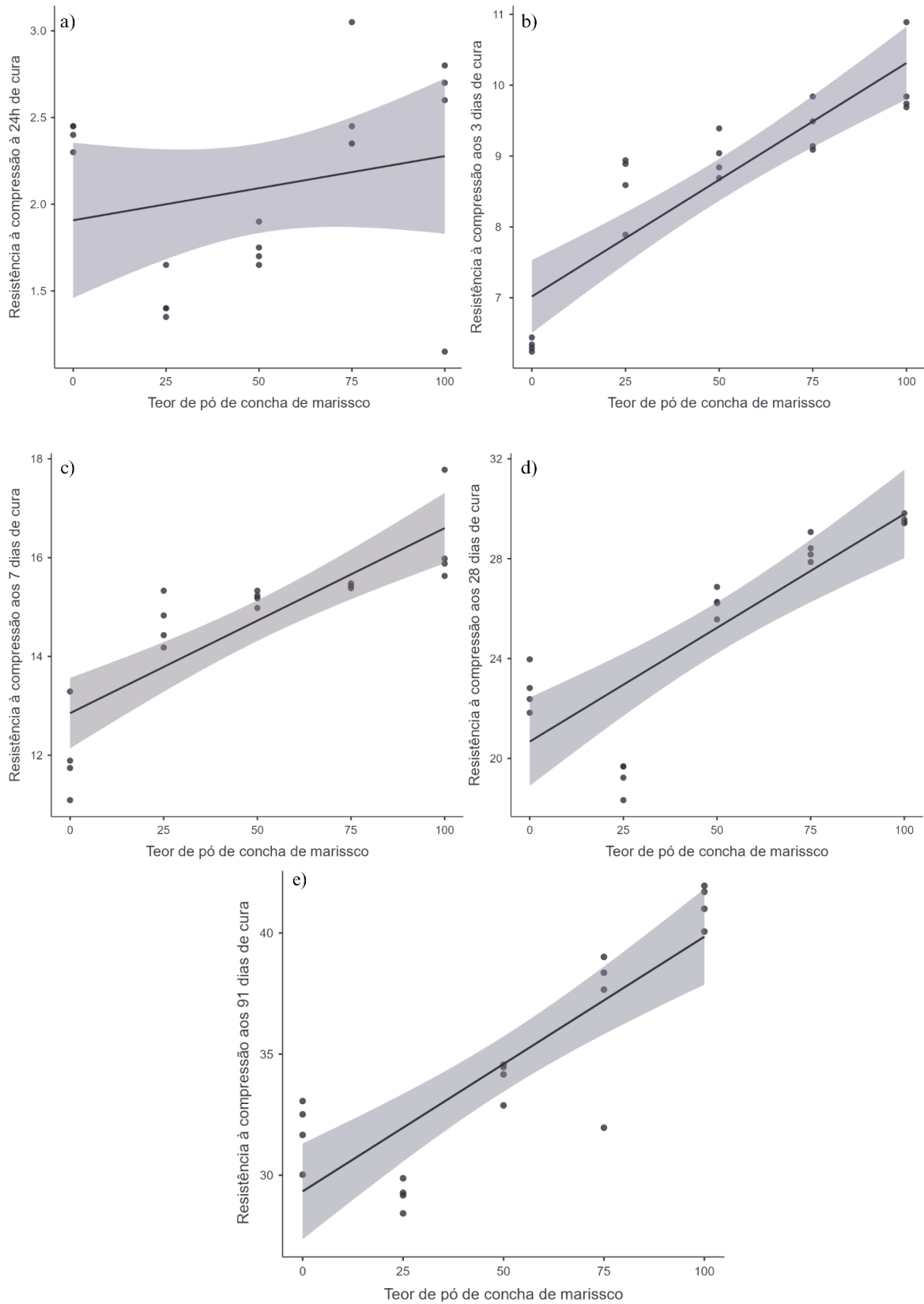
		<b>A0</b>	<b>A25</b>	<b>A50</b>	<b>A75</b>	<b>A100</b>
<b>A0</b>	Diferença média	-	2.63	-2.20	-4.94**	-9.37***
	Valor de p	-	0.222	0.375	0.006	<.001
<b>A25</b>	Diferença média		—	-4.83**	-7.57***	-12.00***
	Valor de p		—	0.007	<.001	<.001

<b>A50</b>	Diferença média	—	-2.73	-7.16***
	Valor de p	—	0.193	<.001
<b>A75</b>	Diferença média	—	—	-4.43*
	Valor de p	—	—	0.014

Nota. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$



**Figura B2 - Dispersão dos resultados de tempo de pega em função do teor de pó de concha de marisco (Fonte: Autoria própria, 2026).**



**Figura B2 - Dispersão dos resultados de resistência à compressão em função do teor de pó de concha de marisco: 24h (a), 3 dias (b), 7 dias (c), 28 dias (d) e 91 dias (e) (Fonte: Autoria própria, 2026).**

## APÊNDICE C

### ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR DAS VARIÁVEIS RESPOSTAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE PÓ DE CONCHA DE MARISCO

**Tabela C1 - Teste ANOVA omnibus: Resistência à compressão aos 28 dias de cura**

	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
PCM	207,8	1	207,8	43,8	< 0,001
Resíduo	85,3	18	4,7		

*Nota. Soma de Quadrados de tipo 3*

**Tabela C2 - Coeficientes do Modelo: Resistência à compressão aos 28 dias de cura**

Preditor	Estimativas	Erro-padrão	t	p
Intercepto	20,6745	0,8433	24,5	< 0,001
PCM	0,0912	0,0138	6,62	< 0,001

**Tabela C3 - Distância de Cook: Resistência à compressão aos 28 dias de cura**

Média	Mediana	Desvio-padrão	mínimo	máximo
0.0513	0.0116	0.0707	1.78e-5	0.238

**Tabela C4 - Estatísticas de Colinearidade : Resistência à compressão aos 28 dias de cura**

Autocorrelação	Estatística DW	p
0,573	0,839	0,002

**Tabela C5 - Distância de Cook: Resistência à compressão aos 28 dias de cura**

	VIF	Tolerância
PCM	1,00	1,00

**Tabela C6 - Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk): Resistência à compressão aos 28 dias de cura**

Estatística	p
0,883	0,200

**Tabela C7 - Teste ANOVA omnibus: Tempo de fim de pega**

	<b>Soma de quadrados</b>	<b>gl</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
PCM	501,6	1	501,55	50,8	0,006
Resíduo	29,6	3	9,88		

*Nota. Soma de Quadrados de tipo 3*

**Tabela C8 - Coeficientes do Modelo: Tempo de fim de pega**

<b>Preditor</b>	<b>Estimativas</b>	<b>Erro-padrão</b>	<b>t</b>	<b>p</b>
Intercepto	255,059	2,5856	98,6	< 0,001
PCM	-0,344	0,0482	-7,12	0,006

**Tabela C9 - Distância de Cook: Tempo de fim de pega**

<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>mínimo</b>	<b>máximo</b>
0,472	0,137	0,529	0,0646	1,23

**Tabela C10 - Estatísticas de Colinearidade : Tempo de fim de pega**

<b>Autocorrelação</b>	<b>Estatística DW</b>	<b>p</b>
-0,475	2,77	0,686

**Tabela C11 - Distância de Cook: Tempo de fim de pega**

	<b>VIF</b>	<b>Tolerância</b>
<b>PCM</b>	1,00	1,00

**Tabela C12 - Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk): Tempo de fim de pega**

<b>Estatística</b>	<b>p</b>
0,913	0,485