



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

ALISON LOPES DA SILVA

**PROPOSTA DE CIMENTO PORTLAND COMPOSTO COM ADIÇÃO
DE FILLER DE CONCHA DE SURURU**

Recife, PE
2025



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

ALISON LOPES DA SILVA

**PROPOSTA DE CIMENTO PORTLAND COMPOSTO COM ADIÇÃO
DE FILLER DE CONCHA DE SURURU**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Emilia Rahnemay Kohlman Rabbani

Coorientador: Prof.^o Dr. Mahmoud Shakouri

Membro interno: Prof.^o Dr. Victor Marcelo Estolano de Lima

Membro externo: Prof.^o Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

Recife, PE
2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco

S586p Silva, Alison Lopes da
Proposta de cimento portland composto com adição de filler de concha de sururu / Alison Lopes da Silva. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2025.

127 f. il.
Inclui apêndice e anexos

Orientadora: Profa. Dra. Emilia R. Kohlman Rabbani
Coorientador: Prof. Dr. Mahmoud Shakouri

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

1. Cimento Composto. 2. Conchas Marinhas. 3. Sururu. 4. Viabilidade Técnica. I. Construção Civil – Dissertação. II. Rabbani, Emilia Rahnemay Kohlman (orient.). III. Shakouri, Mahmoud (coorientador). IV. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. V. Título.

CDD: 690.028 – 23. ed.
Eliane Leitão – CRB4/827

ALISON LOPES DA SILVA

**PROPOSTA DE CIMENTO PORTLAND COMPOSTO COM
ADIÇÃO DE FILLER DE CONCHA DE SURURU**

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **EMILIA RAHNEMAY KOHLMAN RABBANI**
Data: 07/04/2025 19:01:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Emilia Rahnemay Kohlman Rabbani
Universidade de Pernambuco

Coorientador



Prof. Dr. Mahmoud Shakouri
Colorado State University (EUA)

Examinador(a)

Documento assinado digitalmente
 **VICTOR MARCELO ESTOLANO DE LIMA**
Data: 07/04/2025 13:14:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Victor Marcelo Estolano de Lima
Universidade de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **ARNALDO MANOEL PEREIRA CARNEIRO**
Data: 04/04/2025 23:16:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro
Universidade Federal de Pernambuco

Recife-PE
2025

AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer pela conclusão deste trabalho, uma vez que ele é fruto do esforço de muitas mãos e mentes.

Primeiramente, gostaria de agradecer à professora Emilia, minha orientadora de TCC e mestrado, por enxergar meu potencial e me ajudar a explorá-lo, oferecendo suporte e propondo desafios para que eu pudesse me desenvolver. Tudo isso contribuiu para que eu recuperasse minha confiança em mim mesmo, algo que levarei para a vida.

Agradeço ao professor Mahmoud, meu coorientador, por me auxiliar no meu desenvolvimento, especialmente com o suporte técnico. Apesar da minha dicção enferrujada em inglês e da pouca experiência na área de materiais, o senhor continuou me motivando e transmitindo seus valiosos conhecimentos.

Sou grato a CAPES e a UPE pelo suporte financeiro, que permitiu minha dedicação integral aos estudos nesta etapa. Agradeço também a todos os professores que fizeram e fazem parte da minha trajetória, desde o professor Jaézio, no primário, até os dias atuais, por se dedicarem para que eu pudesse seguir em frente. Dificilmente estaria aqui se minha experiência com o ensino não tivesse sido tão rica e inspiradora.

Agradeço a todos da UFPE que contribuíram para a concretização deste trabalho, em especial aos técnicos de laboratório Cazusa, Cadinho e Ezequiel (*in memoriam*) pelo apoio e motivação; aos mestrandos e doutorandos Iranilza, Marcos, Danilo, Igor, Marcela, Tacila e Karina por me guiarem em diversos momentos; e aos professores Arnaldo Carneiro e Victor Estolano, pelos inúmeros ensinamentos na área de materiais e por aceitarem compor minha banca de avaliação. Agradeço ainda aos técnicos do CETENE e do LTM-UFPE pelas análises realizadas e ao POLICOM da POLI, principalmente Siberia, por sua disponibilidade em analisar meu material. Obrigado Matheus, Caio e Ariane pelos conhecimentos prévios e suporte.

Por fim, gostaria de agradecer a Alexandre Elyott, Flávio Calisto, Roberto Guerra e ao meu companheiro Antônio Clemente por sempre fazerem de tudo para que eu pudesse seguir adiante, por compreenderem meus sacrifícios, por me motivarem e por celebrarem comigo cada etapa e conquista. Sou imensamente grato à minha família, especialmente à minha mãe, Joelma, e ao meu pai, Cícero, que, mesmo sem compreenderem exatamente o que venho fazendo nesse tal de mestrado, nunca hesitaram em me oferecer suporte, carinho e motivação, assim como em todas as etapas da minha vida.

Por tudo isso, estas e outras pessoas agora fazem parte da minha história, salvo aquelas que já fazem há muito tempo.

“O conhecimento é poder. A informação é libertadora. A educação é a premissa do progresso,
em cada sociedade e em cada família.”

Kofi Annan

RESUMO

A incorporação de adições minerais em compósitos cimentícios é uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de carbono e o consumo de matéria-prima virgem na construção civil. Entre os materiais com potencial de uso como adição em cimentos compostos, destacam-se as conchas marinhas, cujo descarte irregular representa um problema ambiental em diversas comunidades pesqueiras. Este estudo investigou as propriedades mecânicas de pastas cimentícias com substituição parcial do cimento pelo *filler* de concha de sururu (FCS), proveniente da comunidade Ilha de Deus, Recife-PE, avaliando seu potencial como adição mineral para cimentos compostos com adição de material carbonático. Inicialmente, foi realizada uma revisão sistemática da literatura para a síntese dos estudos referentes ao tema. No programa experimental da pesquisa, o FCS foi obtido por meio da coleta, lavagem, secagem, trituração e peneiramento das conchas e caracterizado quanto às propriedades físicas, mineralógicas e morfológicas. Foram formuladas cinco famílias de pastas cimentícias: três com substituições de 5%, 10% e 15% de FCS no cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) e duas referências, uma com CP V-ARI puro e outra com cimento composto com *filler* calcário disponível no mercado (CP II-F). Todas as misturas foram feitas com relação água/cimento de 0,40. As misturas foram submetidas a ensaios de mini slump, resistência à compressão e à tração diametral, absorção de água, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e análise termogravimétrica. Os resultados indicaram que o FCS alterou a consistência das pastas de forma não linear, aumentando-a com 5%, reduzindo-a com 10% e elevando-a novamente com 15% em comparação à pasta com CP V-ARI puro. A resistência à compressão diminuiu com o aumento do teor de FCS devido ao efeito de diluição e à menor quantidade de partículas de cimento, comportamento semelhante ao de outros pós de conchas não calcinados na literatura. Ainda assim, a pasta com 5% de FCS apresentou resistência superior à referência com CP II-F. A absorção de água aumentou proporcionalmente ao teor de FCS, indicando maior porosidade na matriz cimentícia. Essa porosidade foi confirmada através do ensaio de propagação de onda ultrassônica. Conclui-se que o FCS tem potencial para ser empregado como *filler* em cimentos compostos. Pastas com 5% e 10% de FCS demonstraram potencial para classificação como classes 42 MPa e 32 MPa, respectivamente, segundo a NBR 16.697. Estudos adicionais são recomendados para avaliar a durabilidade dos compósitos com FCS, sua viabilidade ambiental e econômica, bem como a influência de diferentes formas de beneficiamento e da dosagem nas propriedades finais.

Palavras-chave: Cimento composto; Conchas marinhas; Sururu; Viabilidade técnica.

ABSTRACT

The incorporation of mineral additions in cementitious composites is an effective strategy to reduce carbon emissions and the consumption of virgin raw materials in the construction industry. Among the materials with potential for use as additions in blended cement, seashells stand out, as their improper disposal represents an environmental problem in several fishing communities. This study investigated the mechanical properties of cement pastes with partial cement replacement by sururu shell filler (FCS), sourced from the Ilha de Deus community, Recife-PE, assessing its potential as a mineral addition for blended cements containing carbonate material. Initially, a systematic literature review was conducted to synthesize studies related to the topic. In the experimental program, FCS was obtained through the collection, washing, drying, grinding, and sieving of shells and was characterized regarding its physical, mineralogical, and morphological properties. Five families of cement pastes were formulated: three with 5%, 10%, and 15% FCS replacement in high-early-strength Portland cement (CP V-ARI) and two reference mixes, one with pure CP V-ARI and another with commercially available blended cement containing limestone filler (CP II-F). All mixtures were prepared with a water-to-cement ratio of 0.40. The mixtures were subjected to mini slump, compressive and splitting tensile strength, water absorption, ultrasonic pulse velocity, and thermogravimetric analysis tests. The results indicated that FCS non-linearly altered the consistency of the pastes, increasing it at 5%, reducing it at 10%, and increasing it again at 15% compared to the paste with pure CP V-ARI. Compressive strength decreased with increasing FCS content due to the dilution effect and the lower amount of cement particles, a behavior similar to that of other non-calcined shell powders reported in the literature. Nevertheless, the paste with 5% FCS exhibited higher strength than the reference mix with CP II-F. Water absorption increased proportionally to the FCS content, indicating greater porosity in the cementitious matrix, which was confirmed through the ultrasonic pulse velocity test. It is concluded that FCS has potential as a filler in blended cements. Pastes with 5% and 10% FCS demonstrated potential for classification as 42 MPa and 32 MPa strength classes, respectively, according to NBR 16.697. Further studies are recommended to assess the durability of FCS-containing composites, their environmental and economic feasibility, as well as the influence of different processing methods and dosage levels on final properties.

Keywords: Blended cement; Seashells; Sururu; Technical viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Registros fotográficos de depósitos de conchas de sururu na Ilha de Deus	18
Figura 2 - Sumarização do processo de seleção dos artigos.....	24
Figura 3 - Compósitos cimentícios estudados em cada artigo.....	25
Figura 4 - Temperaturas de calcinação das conchas.....	28
Figura 5 - Principais etapas do beneficiamento das conchas marinhas.....	29
Figura 6 - Resumo estatístico dos componentes químicos e perda ao fogo das conchas	31
Figura 7 - Peso específico, dimensão média e área de superfície específica do pó das conchas	33
Figura 8 - Tipos de cimentos utilizados nas dosagens dos experimentos	35
Figura 9 - Relações água/cimento utilizadas nas dosagens dos estudos	36
Figura 10 - Distribuição dos dados sobre os teores de substituição ensaiados	36
Figura 11 - Ensaio de caracterização conduzidos	39
Figura 12 - Ensaio conduzidos no estado fresco.....	42
Figura 13 - Impactos do pó de conchas na consistência de misturas binárias.....	43
Figura 14 - Impacto da incorporação do pó de concha no tempo de pega de misturas binárias	44
Figura 15 - Ensaio conduzidos no estado endurecido.....	45
Figura 16 - Efeitos pó de conchas não calcinado na resistência à compressão de misturas binárias após 28 dias de cura	46
Figura 17 - Efeitos pó de conchas calcinado na resistência à compressão de misturas binárias após 28 dias de cura.....	48
Figura 18 - Efeitos pó de conchas calcinado na resistência à tração diametral de misturas binárias após 28 dias de cura	49
Figura 19 - Efeitos pó de conchas calcinado na resistência à flexão de misturas binárias após 28 dias de cura.....	50
Figura 20 - Efeitos pó de conchas calcinado na absorção de água por imersão e por capilaridade de misturas binárias após 28 dias de cura.....	51
Figura 21 - Ensaio de aspectos da durabilidade dos compósitos	53
Figura 22 - Resumo do programa experimental da pesquisa.....	59
Figura 23 - Etapas de beneficiamento das conchas de sururu para produção do FCS	62
Figura 24 - Registros fotográficos do procedimento de moldagem dos corpos de prova	63

Figura 25 - Equipamento para realização dos ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral	68
Figura 26 - Equipamento para o ensaio de UPV	70
Figura 27 - Equipamento usado para a análise termogravimétrica das pastas	71
Figura 28 - Curvas de distribuição granulométrica dos materiais empregados.....	73
Figura 29 - Propriedades físicas do FCS em relação às relatadas na literatura.....	74
Figura 30 - Difratoograma do FCS.....	75
Figura 31 - Microestrutura do FCS em diferentes ampliações de MEV	76
Figura 32 - Espectroscopia por energia dispersiva do FCS.....	77
Figura 33 - Análise termogravimétrica do FCS.....	78
Figura 34 - Análise termogravimétrica do pó de concha de sururu calcinado	79
Figura 35 - Fluxo de calor de hidratação das pastas com pó de concha não calcinado.....	80
Figura 36 - Calor de hidratação acumulado das pastas com FCS	81
Figura 37 - Evolução do calor de hidratação das pastas com o pó de concha calcinado	82
Figura 38 - Calor de hidratação acumulado das pastas com o pó de concha calcinado	83
Figura 39 - Valores de liberação de calor obtidos no teste R ³ modificado.....	84
Figura 40 - Registros fotográficos do abatimento das pastas	85
Figura 41 - Consistência das pastas pelo ensaio de abatimento por mini cone	85
Figura 42 - Resistência à compressão em diferentes idades de cura	87
Figura 43 - Resistência à compressão normalizada das pastas com FCS em relação ao CP II-F	88
Figura 44 - Resistência à compressão normalizada das pastas com FCS em relação ao CP V ARI	88
Figura 45 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cura.....	90
Figura 46 - Absorção de água por imersão aos 28 dias de cura	91
Figura 47 - Massa específica real dos corpos de prova aos 28 dias de cura.....	92
Figura 48 - Velocidades de propagação da onda ultrassônica aos 28 dias de cura	93
Figura 49 - Curvas de perda de massa e derivada da perda de massa das pastas em função da temperatura.....	95
Figura 50 - Curvas combinadas da redução de massa em função da temperatura	96
Figura 51 - Curvas combinadas da derivada da massa em função da temperatura	97
Figura 52 - Gráfico de correlação entre o teor de FCS e as propriedades físico-mecânicas das pastas	99

Figura 53 - Efeito da incorporação do FCS na consistência das pastas em comparação com dados da literatura.....	101
Figura 54 - Efeito da incorporação do FCS na resistência à compressão das pastas aos 28 dias em comparação com dados da literatura.....	102
Figura 55 - Efeito da incorporação do FCS na resistência à tração diametral das pastas aos 28 dias em comparação com dados da literatura	104
Figura 56 - Efeito da incorporação do FCS na absorção de água aos 28 dias em comparação com dados da literatura.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perda de resistência à compressão em compósitos cimentícios causada por ataque de sulfato	53
Tabela 2 - Limites de composição dos cimentos utilizados nos experimentos	60
Tabela 3 - Composição química das conchas de sururu da Ilha de Deus	61
Tabela 4 - Descrição das misturas realizadas para os ensaios	63
Tabela 5 - Ensaios conduzidos para caracterização do FCS	64
Tabela 6 - Diâmetros notáveis das partículas e área de superfície específica	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Contextualização e Justificativa	17
1.2 Objetivos.....	19
2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	21
2.1 Procedimentos para a seleção de artigos	21
2.1.1 Fontes dos dados.....	22
2.1.2 Critérios de seleção dos estudos	22
2.2 Síntese da literatura	25
2.2.1 Processo de beneficiamento das conchas	26
2.2.2 Características físico-químicas das conchas.....	29
2.2.3 Dosagens usadas nos experimentos	34
2.2.4 Ensaio laboratoriais conduzidos.....	39
2.2.4.1 Caracterização do pó de concha	39
2.2.4.2 Propriedades no estado fresco	42
2.2.4.3 Propriedades no estado endurecido	45
2.2.4.4 Durabilidade dos compósitos	52
2.2.5 Emissões de carbono	55
2.3 Conclusões da revisão da literatura	57
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1 Materiais	59
3.1.1 Aglomerantes.....	60
3.1.2 Filler experimental.....	61
3.2 Beneficiamento das conchas para produção do FCS.....	61
3.3 Preparação das amostras	62
3.4 Ensaio conduzidos	64
3.4.1 Caracterização do FCS	64
3.4.2 Calorimetria isotérmica	65
3.4.3 Reatividade pelo teste modificado de R ³	66
3.5 Ensaio conduzidos nas pastas de cimento.....	66
3.5.1 Abatimento por mini cone	67
3.5.2 Resistência à compressão e à tração por compressão diametral.....	67

3.5.3 Absorção de água por imersão.....	69
3.5.4 Velocidade de propagação de onda ultrassônica	69
3.5.5 Análise termogravimétrica das pastas	70
3.6 Correlação entre as propriedades.....	71
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1 Caracterização do FCS	72
4.1.1 Massa específica e tamanho das partículas.....	72
4.1.2 Análise mineralógica e morfológica do FCS.....	75
4.1.3 Análise termogravimétrica do pó de concha de sururu	77
4.2 Calor de hidratação das pastas com pó de concha de sururu.....	79
4.3 Reatividade do pó da concha de sururu	83
4.4 Propriedades mecânicas das pastas contendo FCS.....	84
4.4.1 Consistência.....	84
4.4.2 Resistência à compressão	86
4.4.3 Resistência à tração por compressão diametral	89
4.4.4 Absorção de água.....	90
4.4.5 Massa específica real	91
4.4.6 Velocidade de propagação de onda ultrassônica (UPV)	92
4.4.7 Análise termogravimétrica das pastas	94
4.5 Correlação entre as propriedades.....	98
4.6 Discussões	100
5 CONCLUSÕES.....	106
6 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	108
REFERÊNCIAS	110
APÊNDICE A – PROTOCOLO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	119
ANEXO A – CERTIFICADO DE ENSAIOS NO CIMENTO CP II-F 32	126
ANEXO B – CERTIFICADO DE ENSAIOS NO CIMENTO CP V ARI RS MAX.....	127

1 INTRODUÇÃO

Embora a indústria da construção civil desempenhe um papel essencial no desenvolvimento da sociedade, ela exige um elevado consumo de recursos naturais e energia. Além disso, o setor é responsável por 38% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), conforme o mais recente Relatório de Status Global 2020 para Edifícios e Construção (UNEP, 2020). O dióxido de carbono é um dos principais gases de efeito estufa (GEE) que contribuem com as crises climáticas e desastres ambientais (Filonchyk *et al.*, 2024).

O aumento populacional contribui diretamente para o crescimento das emissões de GEE pela construção civil. A Agência Internacional de Energia (IEA) estima que a demanda global por cimento crescerá 23% até 2050 (IEA, 2018). Diante das preocupações com o aquecimento global, o setor desempenha um papel importante tanto no desenvolvimento socioeconômico quanto no combate às mudanças climáticas.

Na fabricação de cimento, as emissões de GEE são consideráveis devido à descarbonização do calcário e à queima de combustíveis fósseis no processo de produção do clínquer (Felix; Possan, 2018). Esse processo, isoladamente, é responsável por 50% a 60% das emissões totais da indústria do cimento (Guo *et al.*, 2024). Uma estratégia para reduzir essas emissões é a substituição parcial do clínquer ou do cimento em matrizes cimentícias, visando seu menor consumo.

A substituição parcial do cimento por adições minerais é uma estratégia amplamente utilizada para mitigar as emissões de GEE na fabricação de cimento. Essas adições são classificadas em dois grupos principais: Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), que apresentam reatividade devido à presença de material amorfo, e *fillers*, como o calcário, que possuem baixa ou nenhuma reatividade na matriz cimentícia, sendo considerados inertes (Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023). Materiais de ambos os tipos (reativos e inertes) já são regulamentados em diversos países para substituição parcial do cimento, com teores de até 35% na Europa e África do Sul para o *filler* calcário, e de até 33% para cinzas volantes e 45% para sílica ativa no cimento Portland CEM I na Europa, por exemplo (EN, 2013; John *et al.*, 2018).

Outro benefício do uso de adições minerais em compósitos cimentícios é o reaproveitamento de subprodutos de outras indústrias. As escórias (como de ferroníquel ou de alto forno) e as

cinzas volantes feitas a partir da queima de resíduos agrícolas (bagaço da cana-de-açúcar, palha de arroz e de milho) são exemplos de resíduos que seriam destinados a aterros sanitários, mas que podem ser muito bem aproveitados na produção de concreto. Além desta ser uma solução ambientalmente adequada, ela ainda contribui para a redução das emissões de GEE, o consumo de combustível e o uso de recursos naturais não renováveis na construção civil (SNIC, 2020).

No entanto, adições minerais de qualidade podem ter disponibilidade limitada em algumas regiões. Além disso, os processos industriais têm se renovado para diminuir ou reaproveitar estes subprodutos em sua própria cadeia produtiva para se tornarem mais sustentáveis, diminuindo a oferta desses materiais (Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023). Dessa forma, a busca por novos materiais que possuam viabilidade para uso como adições minerais tem levado a diversos estudos pelo mundo. Uma dessas alternativas investigadas é a concha marinha. Conchas marinhas, como a de moluscos bivalves e gastrópodes, possuem mais de 90% de carbonato de cálcio (CaCO_3) em sua composição química, semelhantemente ao calcário usado na produção de cimento (El Biriane; Barbachi, 2021).

Países com alta produção na pesca de moluscos, como China, Japão e França, geram anualmente cerca de 10 milhões, 2 milhões e 160.000 toneladas de conchas marinhas, respectivamente. Vale ressaltar que as conchas compõem a maior parte do peso dos moluscos, podendo corresponder até 76% em algumas espécies (Tokeshi; Ota; Kawai, 2000). Com isso, essas e outras nações têm se preocupado com o destino dessa grande quantidade de resíduos (El Biriane; Barbachi, 2021; Hart, 2020).

Além de grandes indústrias, a pesca de moluscos tem participação considerável da pesca artesanal, frequente em populações tradicionais em situações vulneráveis, principalmente na Ásia, África e América Latina (Brasil, 2018). Essas populações exercem frequentemente a pesca de pequena escala como sua principal atividade de subsistência. No entanto, o descarte dos resíduos gerados muitas vezes ocorre inadequadamente nos arredores da própria comunidade pesqueira ou local de pesca, ocasionando riscos à saúde, poluição visual e fortes odores que prejudicam a população local (El Biriane; Barbachi, 2021; Topić Popović *et al.*, 2023).

Comunidades pesqueiras ao longo da costa de Pernambuco enfrentam os impactos decorrentes do descarte inadequado de resíduos da pesca. As comunidades da Ilha de Deus, em Recife, e da

Área de Proteção Ambiental (APA) de Nova Cruz, em Igarassu, são exemplos de locais afetados pelo acúmulo de conchas, sobretudo das espécies sururu (*Mytella falcata*) e marisco (*Anomalocardia brasiliiana*). Além de riscos à saúde, poluição visual e odores fortes, esses acúmulos têm ocasionado assoreamento de rios, desequilíbrio na dinâmica dos manguezais locais, redução na qualidade e quantidade de bivalves e supressão vegetal (Paiva, 2015; Oliveira, 2016; Cardoso, 2019; Silva; Silva; Lafayette, 2024).

Estudos locais têm sido conduzidos em busca de alternativas para reutilizar estas conchas como materiais de construção. O grupo de pesquisa Desenvolvimento Seguro e Sustentável — DESS (associado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil — PEC da Universidade de Pernambuco — UPE) tem investigado principalmente o comportamento do concreto, argamassa e bloco intertravado para pavimentação com a incorporação da concha de sururu da Ilha de Deus substituindo parte da areia, resultando em possíveis soluções para reutilização (Cardoso, 2019; Pedrosa Júnior, 2022; Vasconcelos, 2022; Sá, 2024). No entanto, nenhum estudo local investigou o comportamento físico-mecânico de compósitos cimentícios produzidos com o pó de concha de sururu não calcinada substituindo parcialmente o cimento.

Diferentes tipos de conchas marinhas têm sido investigados como *filler* substituindo parcialmente o cimento no concreto, tanto com a concha calcinada, como não calcinada (Hamada *et al.*, 2023). Em alguns casos, foram observadas vantagens técnicas sobre o concreto comum, como redução de densidade, aumento do tempo de pega e ganho de resistência mecânica (Soltanzadeh *et al.*, 2018; Bamigboye *et al.*, 2020). Ao utilizar conchas de berbigão não calcinadas, Soltanzadeh *et al.* (2018) também demonstraram uma redução no custo de produção do concreto e na emissão de CO₂ associada à aplicação.

Contudo, a literatura carece de mais estudos sobre o uso de conchas de sururu como adição mineral em compósitos cimentícios. Nesse contexto, esta pesquisa propõe utilizar a concha de sururu local substituindo parcialmente o cimento na produção de compósitos cimentícios para avaliar a viabilidade técnica do seu uso como um *filler*, comparando as propriedades físicas e mecânicas com as de compósitos convencionais. A pesquisa enfatiza a reutilização da concha de sururu não calcinada como uma alternativa para substituir o cimento por um material com baixa emissão de CO₂, além de facilitar o processo de beneficiamento do produto.

1.1 Contextualização e Justificativa

A comunidade pesqueira da Ilha de Deus está localizada na zona sul da cidade do Recife – PE, em um território insular entre os bairros da Imbiribeira e do Pina, no extremo norte do Parque dos Manguezais. Este parque é reconhecido como uma das áreas de manguezais urbanos mais importantes do Brasil, sendo classificado como Zona Especial de Preservação Ambiental (ZEPA) pelo plano diretor da cidade. A ocupação do território da ilha data de 1950, quando pessoas em situação de extrema vulnerabilidade social se estabeleceram na área, utilizando a pesca artesanal para sustento (Rabelo, 2010; Moraes; Marques, 2017).

Atualmente, a comunidade possui mais de 2.000 habitantes (Bezerra, 2022), a maioria envolvida na pesca artesanal de moluscos e camarões há gerações. Outra atividade relevante na Ilha de Deus é o turismo de base comunitária, promovido pela Organização Não Governamental (ONG) Saber Viver, em parceria com outros grupos.

A pesca de sururu e mariscos na ilha gera quantidades consideráveis de resíduos de concha. Estima-se que a produção de conchas de sururu, o molusco bivalve mais pescado localmente, seja de 408 toneladas anuais (Cardoso, 2019). O acesso terrestre ao território insular é feito através da ponte Vitória das Mulheres, que possui limitações de tamanho e carga de veículos, além de ter uma faixa única para mão dupla. Isso impede a entrada de caminhões da rede de coleta de resíduos para a retirada das conchas produzidas. Conseqüentemente, os pescadores depositam as conchas nos leitos dos rios que cercam o território.

No processo de retirada da parte comestível do molusco, um pouco da carne permanece nas conchas. Com o acúmulo nestas áreas, os depósitos de conchas atraem insetos e outros vetores que se alimentam da matéria orgânica restante, trazendo riscos à saúde dos moradores locais. A poluição visual ao redor da ilha e o odor característico da decomposição também são preocupações, afetando tanto os residentes quanto a atividade de turismo comunitário.

Durante uma visita *in loco* (Figura 1), foi observado que os depósitos de conchas avançam sobre a mata de mangue e os rios, até mesmo com estruturas precárias sendo construídas em cima. Esse acúmulo causa o assoreamento dos rios locais e impede a manutenção natural do manguezal, desequilibrando o ecossistema (Silva; Silva; Lafayette, 2024). Esse desequilíbrio

prejudica a própria pesca local, forçando os moradores a se afastarem cada vez mais para encontrar os moluscos.

Figura 1 - Registros fotográficos de depósitos de conchas de sururu na Ilha de Deus



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora as conchas resultantes da pesca local representem um desafio socioambiental, elas também apresentam potencial como fonte de renda complementar para os pescadores. Esta pesquisa foi desenvolvida para avaliar o possível reuso das conchas como insumo para a construção local (adição mineral), a fim de agregar valor e recomendar seu processamento para uso próprio dos moradores ou até mesmo seu comércio.

Nesse contexto, a solução se mostra interessante tanto do ponto de vista social quanto ambiental, uma vez que fornece uma destinação adequada para o resíduo e contribui para a mitigação do desequilíbrio ambiental na área.

Do ponto de vista ambiental, é possível afirmar que a pesquisa está alinhada com a Política Estadual de Enfrentamento às Mudanças Climáticas de Pernambuco, instituída pela Lei nº 14.090 de 17/06/2010. Esta política inclui estratégias de mitigação e adaptação na Seção III referente à indústria e mineração, como “promover processos menos intensivos no uso de combustíveis fósseis”, “minimizar o consumo, promover a reutilização”, “coleta seletiva e reciclagem de materiais”, “investir em novas tecnologias menos intensivas no consumo de energia e menos poluentes” e “estimular a participação das indústrias nos mercados de carbono”, entre outras (Pernambuco, 2010).

Da mesma forma, o Plano de Descarbonização de Pernambuco (PDPE), instituído pelo Decreto nº 52458 de 16/03/2022, contempla como uma das medidas de mitigação para descarbonização no eixo estratégico Energia & Indústria do estado, a “produção industrial de baixo carbono”. O PDPE ainda propõe que o estado “fomente a pesquisa, desenvolvimento e inovação de tecnologias de baixo carbono” para superar barreiras técnicas e tecnológicas (Pernambuco, 2022). Ao propor e investigar uma alternativa para diminuir as emissões de GEE na construção civil local, esta pesquisa contribui para o plano estadual de redução de poluentes.

Por fim, apesar do contexto mais restrito à região, é relevante frisar que esta pesquisa se alinha ao propósito de “pensar globalmente, agir localmente”, onde ações em menores escalas se combinam para efeitos em escala global (Carson, 2015). A pesquisa também está em conformidade com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12, de Consumo e produção responsáveis, e 13, de Ação contra a mudança global do clima (ONU, 2015).

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é avaliar os efeitos da substituição parcial do cimento pelo pó de concha de sururu (*Mytella falcata*) nas propriedades de compósitos cimentícios.

Os objetivos específicos consistem em:

- Identificar os métodos de processamento de conchas marinhas para uso como substituto parcial do cimento, abrangendo as proporções de dosagem aplicadas, os ensaios realizados e as propriedades físico-mecânicas dos compósitos cimentícios resultantes;

- Produzir e caracterizar o pó de concha de sururu da Ilha de Deus, Recife-PE, para aplicação como *filler*;
- Avaliar o efeito da substituição parcial do cimento pelo *filler* de concha de sururu na mineralogia dos compósitos cimentícios;
- Avaliar as propriedades físico-mecânicas de pastas com diferentes teores do *filler* experimental, comparando os resultados aos do cimento composto com *filler* carbonático regulamentado no Brasil.

2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) conduzida para o embasamento teórico do programa experimental da pesquisa.

A RSL teve como objetivo sintetizar a condução de experimentos em estudos que investigam a substituição parcial do cimento por conchas marinhas em compósitos cimentícios, especificamente pasta de cimento, argamassa e concreto. Foram analisados os procedimentos de beneficiamento das conchas, suas características físico-químicas, as dosagens e teores de substituição do cimento adotados, os ensaios realizados para avaliar as propriedades mecânicas e aspectos da durabilidade e a influência da incorporação do pó de concha nas propriedades dos compósitos.

Esta RSL foi publicada no periódico *Sustainability* (ISSN: 2071-1050), classificado como Qualis A2 no sistema de avaliação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A referência e o link de acesso do artigo podem ser consultados na seção Referências desta pesquisa (Silva; Kohlman Rabbani; Shakouri, 2025a).

2.1 Procedimentos para a seleção de artigos

O planejamento da RSL incluiu a elaboração de um protocolo detalhado, apresentado no Apêndice A e publicado na plataforma *Protocols.io* (Silva; Kohlman Rabbani; Shakouri, 2025b) para consulta pública. Após a etapa de planejamento, executou-se a seleção dos artigos conforme os critérios previamente estabelecidos e realizou-se a sumarização (relato da seleção) do processo.

A revisão foi orientada por cinco perguntas principais: “Quais procedimentos de beneficiamento têm sido executados em estudos que utilizam conchas marinhas em compósitos cimentícios substituindo parcialmente o cimento?”, “Quais as propriedades físico-químicas do pó de conchas utilizado nas substituições?”, “Quais os teores de substituição e tipos de cimento mais utilizados?”, “Quais os ensaios laboratoriais que são conduzidos nos experimentos para caracterizar o material e avaliar as propriedades mecânicas e durabilidades dos compósitos produzidos?” e por fim, “Como a adição do pó de conchas impacta as propriedades mecânicas do compósito produzido?”.

2.1.1 Fontes dos dados

As buscas por artigos científicos foram realizadas em bases de dados internacionais: Science Direct, Web of Science (WoS), Scopus, Engineering Village, American Society of Civil Engineers (ASCE) e Google Scholar. Para cada base, foram utilizadas *strings* de busca adaptadas, contendo os termos de interesse e operadores booleanos, conforme descrito no Quadro 1.

Quadro 1 - *Strings* adaptadas para buscas nas bases de dados científicos

Base de dados	<i>String Adaptada</i>
Science Direct	(Seashell waste OR seashell powder OR mollusk shell) AND (Cementitious composites OR cement paste OR mortar OR concrete) AND (Replacing cement OR cement replacement)
Web of Science	ALL=((seashell) OR (shell waste) OR (mollusk shell) OR (seashell powder) OR (seashell ash)) AND ((cementitious composites) OR (cement paste) OR (mortar) OR (concrete)) AND ((cement replacement) OR (replacing cement) OR (binder replacement) OR (as binder))
Scopus	(seashell OR "seashell waste" OR "mollusk shell" OR "seashell powder") AND ("cementitious composites" OR "cement paste" OR mortar OR concrete) AND ("cement replacement" OR "replacing cement" OR "binder replacement" OR "as binder")
Engineering Village	((Seashell OR shell waste OR seashell powder) AND (Cementitious composites OR cement paste OR mortar OR concrete) AND (Replacing cement OR cement replacement))
American Society of Civil Engineers	(Seashell OR shell waste OR seashell powder OR mollusk shell) AND (Cementitious composites OR cement paste OR mortar OR concrete) AND (Replacing cement OR cement replacement OR binder replacement OR as binder)
Google Scholar	(seashell OR seashell waste OR mollusk shell OR seashell powder OR seashell ash) AND (cementitious composites OR cement paste OR mortar OR concrete) AND (cement replacement OR replacing cement OR binder replacement OR as binder)

Fonte: Elaborado pelo autor.

As bases de dados Science Direct, Web of Science e Scopus, bem como o buscador Google Scholar, foram escolhidas devido ao seu grande acervo e por serem multidisciplinares, abrangendo uma ampla cobertura de publicações científicas. Já as bases Engineering Village e ASCE foram selecionadas por serem especializadas na área de interesse do tema, a construção civil.

2.1.2 Critérios de seleção dos estudos

Os critérios de inclusão restringiram a análise a artigos científicos primários, publicados em periódicos entre 2013 e 2023, e redigidos em língua inglesa. As limitações de ano e tipo de publicação foram executadas por meio dos filtros e limitadores disponíveis nas bases.

Na triagem inicial, foram excluídos os artigos duplicados entre as bases, aqueles que não atendiam aos critérios de inclusão, mesmo após a aplicação de filtros e limitadores, e os artigos sem acesso ao texto completo. Artigos que não conduziram experimentos com a utilização de alguma concha marinha em substituição do cimento na produção de pastas de cimento, argamassa ou concreto não foram considerados nesta revisão. Dessa forma, aqueles que abordam a produção de clínquer (substituição do calcário) e de geopolímeros (sem uso de cimento) não foram incluídos. O Quadro 2 resume os critérios utilizados na RSL, atribuindo-os nomenclaturas para identificação.

Quadro 2 - Critérios utilizados na condução da RSL

Critérios de inclusão (CI)	CI-1: O estudo foi publicado entre 2013 e 2023.
	CI-2: O estudo é classificado como estudo primário (não se trata de uma revisão).
	CI-3: O estudo foi publicado como artigo científico na língua inglesa em um periódico.
Critérios de exclusão (CE)	CE-1: Estudo duplicado.
	CE-2: O estudo foi publicado antes de 2013.
	CE-3: O estudo não é classificado como primário.
	CE-4: Conteúdo em idioma diferente do inglês.
	CE-5: O estudo foi publicado em congressos, livros e outros tipos de publicações que não sejam em periódicos.
	CE-6: O acesso ao estudo não está disponível para leitura integral.
	CE-7: O estudo não aborda o uso da concha marinha em algum compósito cimentício como substituto total ou parcial do cimento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

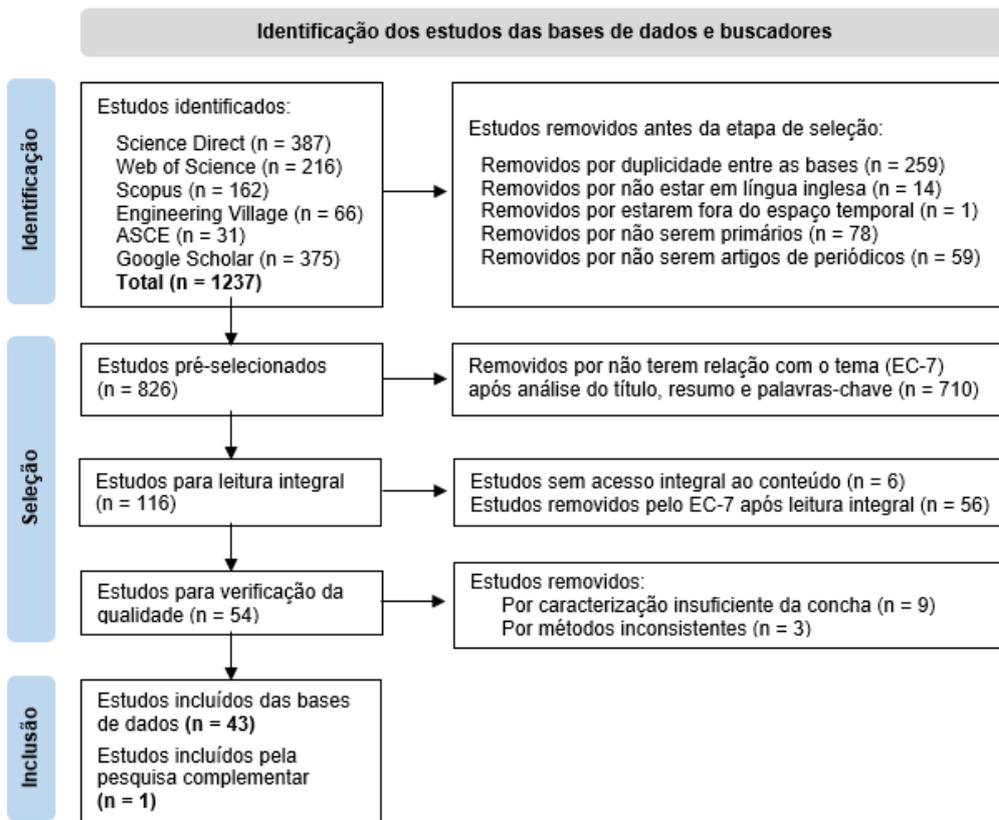
Na triagem inicial, realizou-se a seleção por título, resumo e palavras-chaves presentes nos dados (cadastrados nas bases), a fim de identificar preliminarmente quais estudos estavam em acordo com os critérios de inclusão e abordavam o tema pesquisado. Após esta etapa, conduziu-se uma triagem profunda, onde os artigos foram lidos integralmente para verificação da conformidade com os critérios estabelecidos.

Após a triagem profunda, a qualidade metodológica dos artigos foi avaliada com base em critérios específicos (CQ), considerando a clareza das informações sobre métodos e materiais utilizados nos experimentos. O CQ-1 foi atribuído a estudos eliminados por inconsistência quanto à caracterização dos materiais empregados, especificamente das conchas (composição química com os principais elementos e propriedades físicas como formato, peso específico, área de superfície específica, etc.). Já o CQ-2 foi atribuído à estudos eliminados por inconsistência quando à dosagem do compósito cimentício produzido (proporção do traço, materiais utilizados na dosagem e tipo de cimento utilizado).

Para aumentar o escopo da pesquisa, as referências dos artigos aprovados em todas as etapas foram examinadas, garantindo a inclusão de estudos relevantes que poderiam não ter sido identificados pelas buscas iniciais. Esse método visou ampliar o escopo da pesquisa e abranger possíveis artigos não identificados inicialmente pelos mecanismos de busca das bases de dados. Os artigos encontrados através desta pesquisa suplementar foram submetidos aos mesmos critérios de exclusão da coleta inicial. Se satisfizessem estas condições, eram incluídos na amostra final.

A seleção dos artigos resultou em uma amostra final de 44 estudos, que foram analisados em detalhes nas etapas subsequentes. A Figura 2 resume o processo de seleção, detalhando a quantidade de artigos excluídos com base em cada critério.

Figura 2 - Sumarização do processo de seleção dos artigos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os 44 estudos selecionados sistematicamente foram então utilizados como base para a análise dos procedimentos de beneficiamento das conchas e sua composição química, das características do cimento e relação água/cimento empregados na dosagem e dos testes realizados na caracterização e nos estados fresco e endurecido, além de testes de durabilidade.

2.2 Síntese da literatura

A análise dos 44 estudos selecionados para esta RSL mostrou que a maioria deles investigou a substituição de cimento por conchas em argamassas, seguida de concretos e pastas de cimento. Alguns autores também analisaram variações desses compósitos cimentícios. Palaniappan, Komarasamy e Murugan (2022) produziram argamassa de espuma com diferentes teores de resíduo. Punthama, Supakata e Kanokkantapong (2019) elaboraram blocos de concreto, enquanto Raghav *et al.* (2021) estudaram a influência do resíduo no concreto armado. Por fim, Maglad *et al.* (2023) investigaram as propriedades de concreto leve produzido com essa abordagem.

A Figura 3 resume que tipo de compósito cimentício foi estudado em maior profundidade por cada artigo. Alguns autores produziram espécimes de concreto ou argamassa como o compósito principal, mas para alguns testes específicos, foram produzidos espécimes de pasta de cimento. Neste caso, foi considerado o compósito principal. Os estudos aqui citados como tendo a pasta de cimento como compósito principal realizaram a sua investigação especificamente neste compósito.

Figura 3 - Compósitos cimentícios estudados em cada artigo

Peceño et al. (2023) Han, Lin e Wang (2022b) Deboucha et al. (2021) Wang e Liu (2020) Wang, Lui e Li (2019)	Alla e Sankar (2023) Liao et al. (2023) Xuan et al. (2023) Hay, Peng e Celik (2023) Liu et al. (2022b) Palaniappan, Komarasamy e Murugan (2022) Liu et al. (2022a) Bouasria et al. (2022) Han, Lin e Wang (2022a) Alla e Asadi (2022) Monisha e Balasubramanian (2022) El Mendili e Benzaama (2022) Liao et al. (2022) Bouasria et al. (2021) Hasan et al. (2021) Soltanzadeh et al. (2021) Edalat-Behbahani et al. (2021) Rodriguez-Galán et al. (2019) Seo et al. (2019) Soltanzadeh et al. (2018) Ez-zaki e Diouri (2018)	Fu et al. (2023) Bahadori, Hedayat e Mohammadzadeh (2023) Maglad et al. (2023) Shetty et al. (2023) Stel'makh et al. (2023) Sangeetha et al. (2022) Stel'makh et al. (2022) Raghav et al. (2021) Ubachukwu e Okafor (2020) Bunyamin e Mukhlis (2020) Tayeh et al. (2020) Attah, Etim e Sani (2019) Hussin, Othman e Wan Ibrahim (2019) Punthama, Supakata e Kanokkantapong (2019) Sainudin et al. (2019) Joseph e Abraham (2017) Umoh et al. (2013) Umoh e Olusola (2013)
Pasta de cimento	Argamassa	Concreto

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tópicos seguintes fornecem as respostas às questões inicialmente propostas nesta revisão.

2.2.1 Processo de beneficiamento das conchas

A análise dos estudos permitiu identificar as principais etapas do processamento das conchas para produzir o pó destinado à substituição do cimento nas matrizes cimentícias. Basicamente, elas foram: coleta das conchas, limpeza, secagem, trituração, calcinação (opcional) e peneiramento, nessa ordem.

Ainda entre essas etapas, alguns autores observaram a necessidade de adicionar algumas outras ou mudar a ordem das mencionadas. Attah, Etim e Sani (2019) e Stel'makh *et al.* (2022), por exemplo, trituraram as conchas após a etapa de calcinação. Liao *et al.* (2022) triturou as conchas antes da calcinação e novamente depois.

A maioria dos estudos descreveu a etapa de coleta do resíduo. A partir disso, foi possível identificar que as conchas utilizadas nos estudos provêm de diferentes fontes. Dos 44 estudos analisados, 14 coletaram conchas de costas marítimas ou leitos de rios. 12 relataram obter as conchas de empresas ou indústrias locais, enquanto 5 afirmaram que coletaram o material de aterros ao ar livre. Restaurantes também foram fornecedores das conchas para 2 estudos, assim como pescadores foram para 1 estudo. No total, 9 estudos não especificaram a origem das conchas estudadas.

Diferentes técnicas foram usadas para limpeza do material. Alguns autores não descreveram em detalhe como ocorreu a lavagem, mas a maioria relatou o uso de água corrente ou imersão das conchas em tanques com água. Além destes, a imersão também foi realizada em soluções contendo vinagre (Hasan *et al.*, 2021; Tayeh *et al.*, 2020), acetona (Raghav *et al.*, 2021) ou ácidos não especificados (Monisha; Balasubramanian, 2022). O tempo de imersão variou entre 24 e 48 horas (tanto para soluções quanto para imersão apenas em água). Maglad *et al.* (2023) também ferveram as conchas por 20 minutos durante a etapa de limpeza, atestando remoção de impurezas. A escovação também foi uma das técnicas complementares utilizadas em alguns estudos.

É importante salientar que houve estudos que demonstraram preocupação com o nível de sódio presente nas conchas, uma vez que a grande maioria é proveniente do mar. Seo *et al.* (2019), por exemplo, optaram por deixar as conchas de molho em água por uma semana para remover o sal, após a limpeza com escova. Semelhantemente, Hasan *et al.* (2021) justificaram o uso de

imersão em solução de água e vinagre devido à preocupação com os níveis de sódio presentes nos resíduos.

Foram identificados diferentes métodos de secagem após a limpeza. Esta etapa é importante não só para remover a água da lavagem, mas também para remover o material orgânico ainda presente nas conchas. O procedimento de secagem foi realizado tanto por exposição ao sol e ao vento (naturalmente), quanto com o auxílio de fornos e maquinários apropriados. Embora não detalhado em todos os casos, observou-se que a temperatura de secagem variou entre 40 e 120 °C com duração entre 12 e 48 horas para o uso desses dispositivos, exceto por Maglad *et al.* (2023), que secaram suas conchas a 220 °C por 1 hora. A secagem natural (ao sol e vento) levou até 3 dias.

A moagem das conchas também foi realizada usando equipamentos, principalmente moinhos de bolas. Máquinas de abrasão do tipo Los Angeles (semelhante ao moinho de bolas), moinhos de copo, de pedra e de tambor de aço (*steel drum*) também foram utilizados, além de outros dispositivos não claramente especificados. Esta etapa foi aplicada tanto antes quanto após a calcinação entre os estudos.

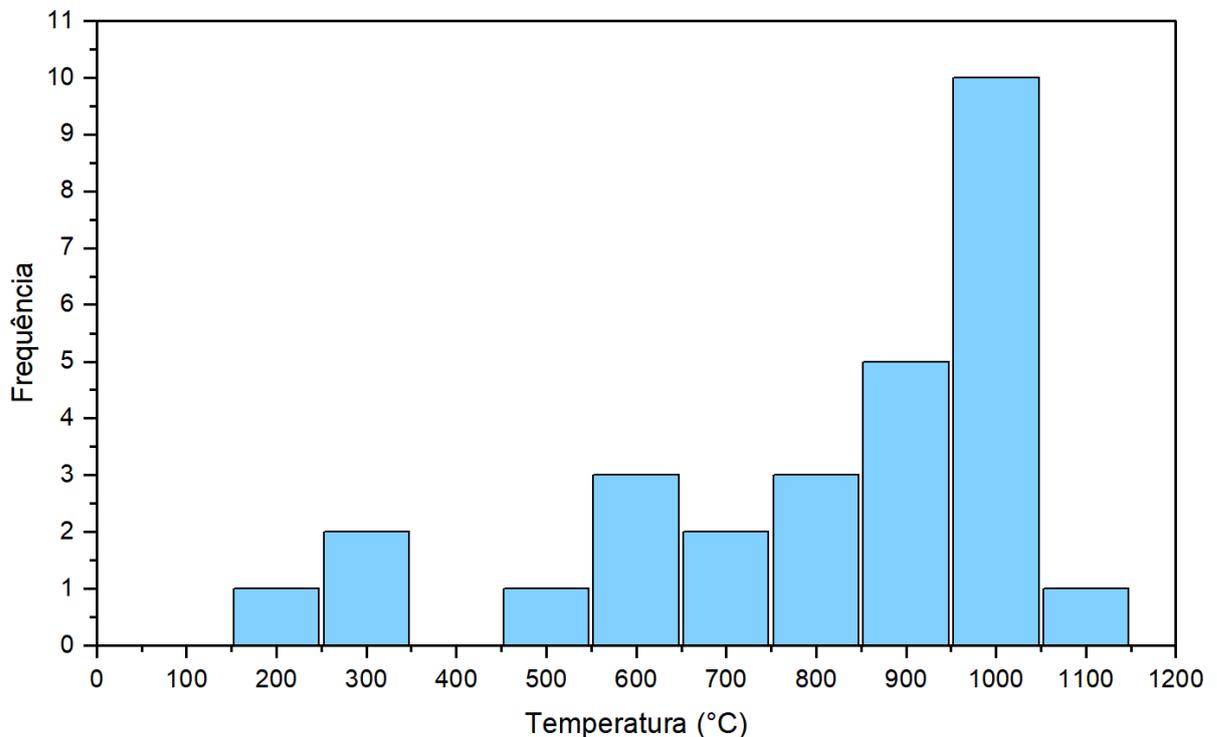
A etapa de calcinação é o que confere ao pó produzido diferentes características físico-químicas, comparado com o pó não calcinado. Alguns autores, como Wang, Lui e Li (2019), Ubachukwu e Okafor (2020) e Bouasria *et al.* (2021), usaram pó de conchas não calcinadas em seus experimentos. Dessa forma, o material se comporta de maneira semelhante a um *filler* calcário no compósito produzido, sendo composto basicamente por CaCO_3 . Já a maioria dos estudos utilizou pó de conchas calcinadas, com o CaCO_3 transformado em CaO , buscando-se maior reatividade na mistura. Nesses casos, a calcinação ocorreu em temperaturas variando de 200 a 1100 °C e durando entre 1 e 4 horas. Apesar de serem relatadas temperaturas inferiores a 600 °C para calcinação, esse processo costuma ocorrer de fato em temperaturas superiores aos 600 °C (Deboucha *et al.*, 2017).

É importante mencionar que a adição de CaO (principal composição do pó de conchas calcinado) em materiais cimentícios pode afetar algumas propriedades. A adição de CaO (principal componente do pó de conchas calcinado) em materiais cimentícios pode influenciar algumas propriedades. Mira, Papadakis e Tsimas (2002) relataram variações na resistência à compressão de concretos contendo misturas de cimento Portland comum e CaO , além de

aumento na porosidade e na profundidade de carbonatação. Courard, Degée e Darimont (2014) também indicaram que o CaO promove expansividade em concretos, causando tensões e deformações no compósito, o que pode impactar suas propriedades. No entanto, quando o óxido de cálcio hidratado ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) é utilizado junto com materiais cimentícios suplementares (MCS) altamente reativos, como cinzas volantes e pozolana, as matrizes cimentícias podem apresentar melhorias devido ao maior fornecimento de hidróxido de cálcio, que reage com estas adições e resultam em maior resistência mecânica e menor porosidade (Mira; Papadakis; Tsimas, 2002; Courard; Degée; Darimont, 2014).

As temperaturas mais usuais para calcinação do pó de conchas estão entre 800 e 1000 °C, como mostra o histograma de distribuição das temperaturas relatadas nos estudos, presente na Figura 4. É importante frisar que a quantidade de conchas levadas à calcinação pode influenciar no tempo do processo, com maiores porções necessitando de mais tempo para calcinar adequadamente.

Figura 4 - Temperaturas de calcinação das conchas



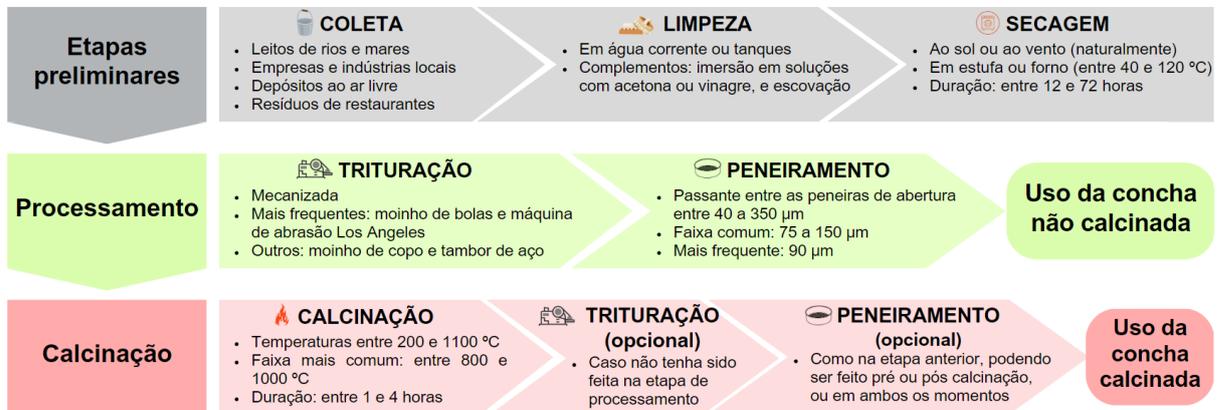
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a calcinação, alguns autores também optaram por aguardar entre 2 e 3 dias para o resfriamento do pó. No entanto, essa etapa não foi detalhada na maioria dos estudos que optaram pela queima.

A próxima etapa, o peneiramento, é onde os pesquisadores definem o tamanho máximo das partículas do pó gerado. Esse fator influencia principalmente a trabalhabilidade, a hidratação e a demanda de água do compósito, uma vez que está diretamente ligado à área de superfície específica das partículas. Nos estudos analisados, as aberturas das peneiras utilizadas variaram de 40 a 350 μm , sendo as mais comuns entre 75 e 150 μm . Partículas menores, geralmente abaixo de 75 μm , contribuem para a distribuição granulométrica do cimento ao promover o efeito de preenchimento, ou *filler*.

Com o levantamento das características do beneficiamento das conchas, elaborou-se a Figura 5 com o resumo das principais etapas identificadas e os procedimentos realizados em cada uma delas.

Figura 5 - Principais etapas do beneficiamento das conchas marinhas



Fonte: Elaborado pelo autor.

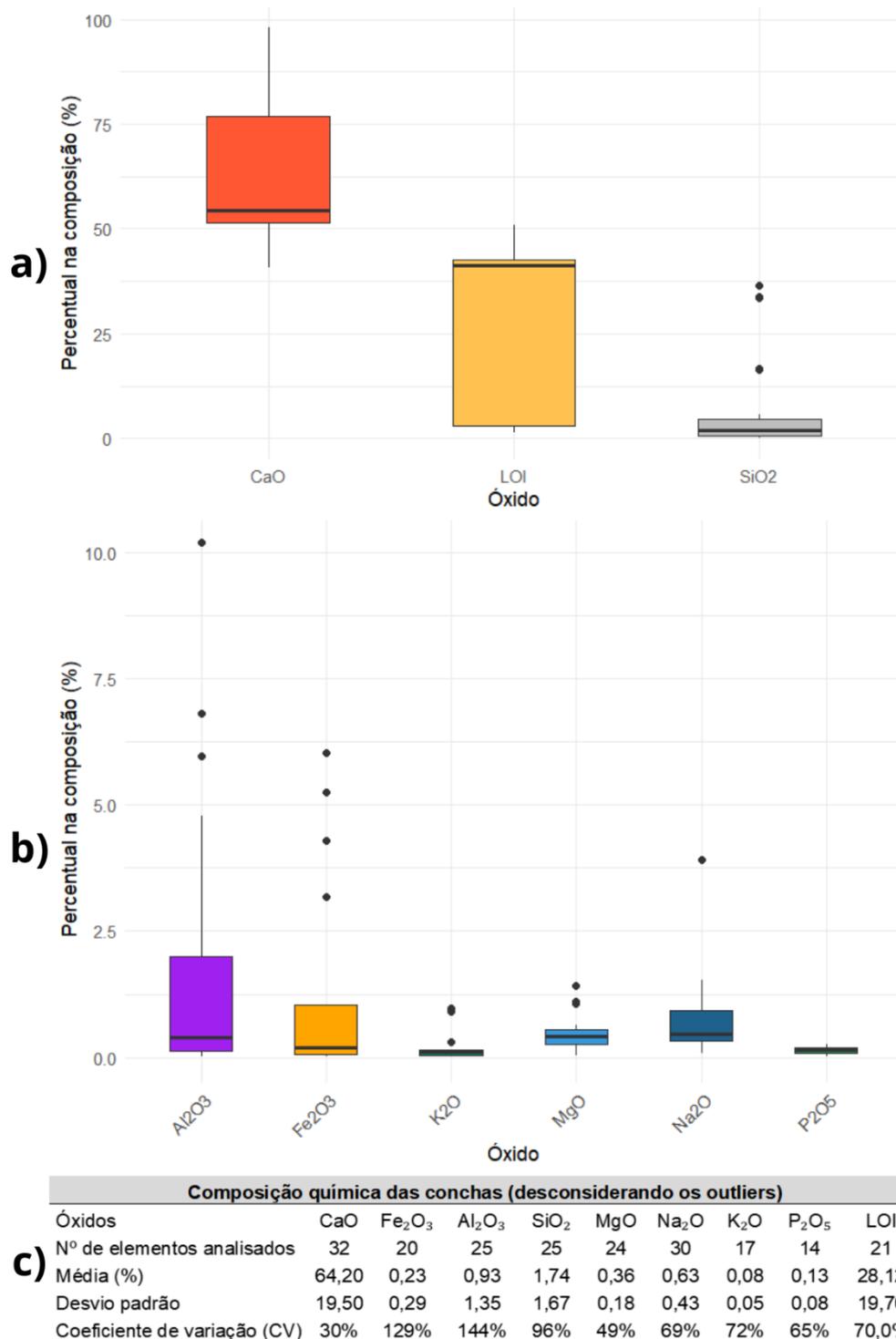
2.2.2 Características físico-químicas das conchas

A composição química das conchas é um dado importante para a caracterização do pó produzido, sendo imprescindível para as interpretações na avaliação das propriedades do compósito gerado. Além disso, a partir desse dado é possível se ter uma ideia preliminar de seu comportamento na mistura cimentícia, comparando com outros materiais de composição semelhante.

Outro indicador que pode ser obtido a partir da composição química é a presença de elementos que podem prejudicar as propriedades da matriz cimentícia, como alto teor de potássio e sódio, por exemplo. Como mencionado no tópico anterior, alguns autores (Seo *et al.*, 2019; Hasan *et al.*, 2021) também consideram o teor de óxido de sódio (Na_2O) presente nas conchas para tomar precauções extras na etapa de limpeza.

Com base nos dados relatados nos estudos desta RSL, foi possível compilar os gráficos e tabela da Figura 6 com uma análise estatística de distribuição dos óxidos constituintes das conchas (quando presentes) e da perda ao fogo (LOI). É essencial destacar que foram utilizados apenas os dados referentes aos compostos constituintes (óxidos) das conchas, por ser esta a forma de relato mais frequente em estudos da área. Por consequência, não foram incluídos os relatos de teores dos elementos isolados.

Figura 6 - Resumo estatístico dos componentes químicos e perda ao fogo das conchas



a) Boxplot do CaO, LOI e SiO₂; b) Boxplot dos demais óxidos; c) Tabela de estatística descritiva sem os outliers. Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise estatística descritiva dos dados, é possível afirmar que há uma alta variação entre as composições químicas. Como esperado, o CaO representa a maior parte das conchas marinhas. Os teores chegam a variar entre 40,84 e 98%. No entanto, quando o CaCO₃ é

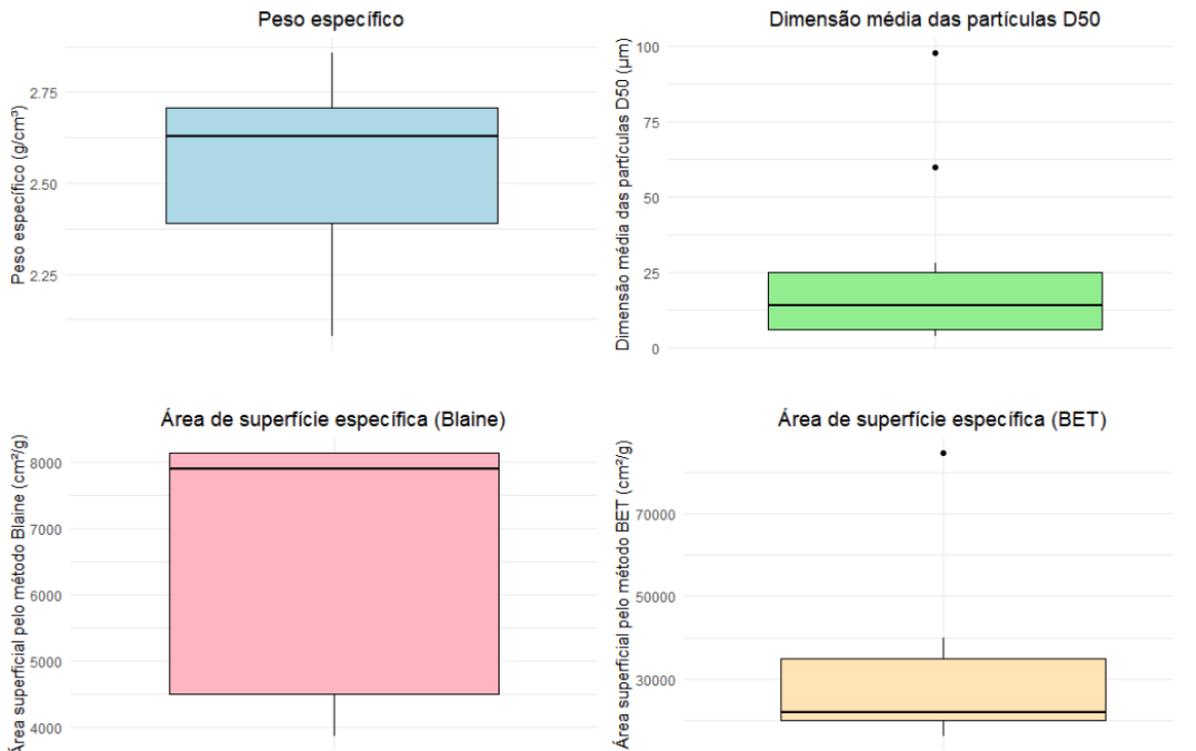
calcinado e se transforma em CaO, há uma grande perda de material associada à liberação de CO₂, registrada como perda ao fogo. Esta perda é de cerca de 40 a 50% na maioria dos estudos. É, portanto, provável que alguns autores não tenham expressado a composição química da concha incluindo esta perda, resultando em teores de CaO próximos aos de CaCO₃ antes da calcinação.

Da mesma forma, a perda ao fogo registrou um coeficiente de variação alto (CV=70%), principalmente por algumas observações com valores abaixo de 10%. Apesar desses casos serem 7 em 21 observações, eles contribuem bastante para a queda na média dos registros de LOI. Os outros óxidos em menores teores nas conchas também apresentam alta variabilidade e registros de *outliers* em praticamente todos eles. O óxido de magnésio (MgO), por exemplo, comumente aparece em teores entre 0,03 e 1,43%, com exceção dos estudos de Liu *et al.* (2022a, 2022b), que relatam valores de 36,3% da composição correspondente ao MgO.

Esses dados demonstram que, apesar das conchas marinhas serem basicamente compostas por carbonato de cálcio e óxido de cálcio quando calcinadas, elas apresentam uma heterogeneidade na distribuição das composições químicas que deve ser considerada. É possível que formas de relatar os dados nos artigos científicos contribuam para a alta variabilidade nos teores de CaO e LOI. No entanto, os componentes constituintes das conchas variam entre espécie e localidade, dificultando a generalização do comportamento desse resíduo na produção de compósitos cimentícios.

A caracterização física do pó das conchas também é crucial para se entender o impacto nas propriedades dos compósitos produzidos. Os dados reportados de caracterização física reportados foram extraídos e analisados. A Figura 7 apresenta a distribuição de dados para quatro variáveis importantes na caracterização física do pó produzido e suas médias: o peso específico, o tamanho médio das partículas (D50) e a área de superfície específica, estimada tanto pelo método Blaine como pelo método Brunauer-Emmett-Teller (BET). Os dois métodos de cálculo da área de superfície específica foram diferenciados por suas divergências na grandeza dos resultados expressos e no procedimento de aferição. O teste Blaine é comumente utilizado pela indústria do cimento por sua simplicidade e consistência, enquanto o BET é recorrente em pesquisas científicas por sua base de natureza semiempírica (Mantellato; Palacios; Flatt, 2015).

Figura 7 - Peso específico, dimensão média e área de superfície específica do pó das conchas



Características físicas	Peso específico (g/cm³)	Dimensão média das partículas D50 (µm)	Área de superfície específica pelo Blaine (cm²/g)	Área de superfície específica pelo BET (cm²/g)
Média	2,55	21,39	6508	30.658

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como observado, o peso específico do pó das conchas varia entre 2,08 e 2,86 g/cm³, enquanto o tamanho médio das partículas (D50) costuma ser entre 4,03 e 98 µm. No entanto, pela amostra analisada, dois outliers foram apontados no D50, sendo eles 60 e 98 µm. Retirando estes valores, o valor médio para a D50 cai para 12,4 µm. Esta característica física está relacionada com a trituração e calcinação das conchas, ou até mesmo à sua estrutura (Bahadori; Hedayat; Mohammadzadeh, 2023).

Já para as medidas de área de superfície específica, foram reportados valores entre 3870 e 8140 cm²/g usando o teste Blaine. A maioria dos estudos utilizam o método BET para calcular a propriedade física, com valores variando entre 16240 e 84790 cm²/g. Pela amostra de dados extraída, o maior valor é considerado um *outlier*, como apresenta o *boxplot*. Com a retirada dessa observação, o valor médio da área de superfície específica pelo BET cai de 30658 para 24643 cm²/g.

Além destes valores para a área de superfície específica pelo BET, Alla e Asadi (2022) e Alla e Sankar (2023) reportaram um valor de 19000 m²/kg (190000 cm²/g) para o pó de conchas produzidos, sendo este um valor considerado atípico para o material.

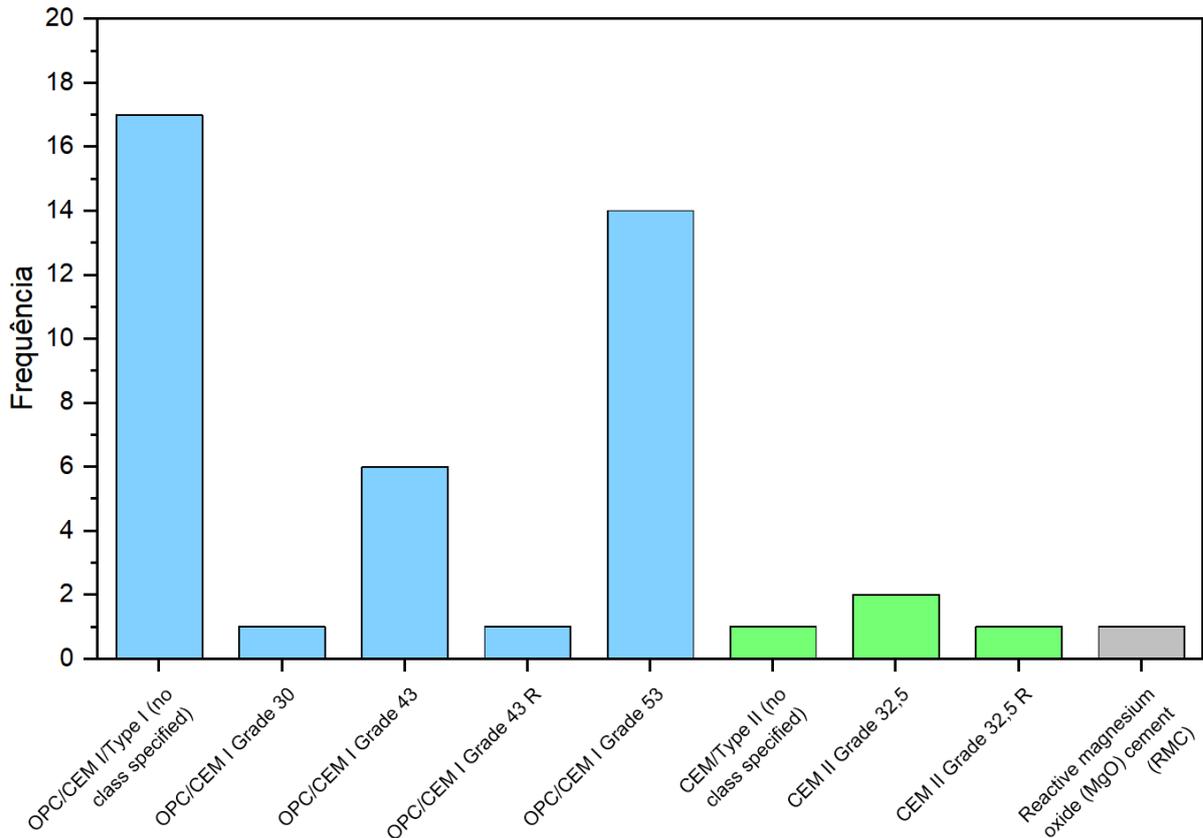
Os valores de massa específica reportados para o pó de conchas marinhas são inferiores aos frequentemente encontrados no cimento, o que impacta na densidade dos compósitos resultantes. Por outro lado, os valores de área de superfície específica são muitas vezes mais elevados, o que pode influenciar a demanda de água da mistura.

2.2.3 Dosagens usadas nos experimentos

Ao analisar as dosagens de cada experimento realizado nos estudos, foi possível reunir dados sobre o tipo de cimento utilizado, bem como a relação água/cimento adotada e as porcentagens de cimento substituído por pó de concha. A partir destes dados, podem ser observados alguns padrões.

Nos ensaios analisados, o tipo de cimento utilizado com maior frequência foi o OPC (*Ordinary Portland Cement*), tratado pelos Estados Unidos como *Type I* (Tipo I) e pela Europa como CEM I. Alguns autores ainda detalharam a classe de resistência à compressão esperada aos 28 dias, expressa pelo *Grade* nos cimentos CEM europeus e no OPC pelo mundo. Além do OPC, foram utilizados o cimento *Type II*/CEM II, com maior resistência a ambientes com sulfatos, e o Cimento Reativo de Óxido de Magnésio (MgO), conhecido como RMC. A frequência de utilização de cada tipo de cimento, incluindo os *Grades*, é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Tipos de cimentos utilizados nas dosagens dos experimentos

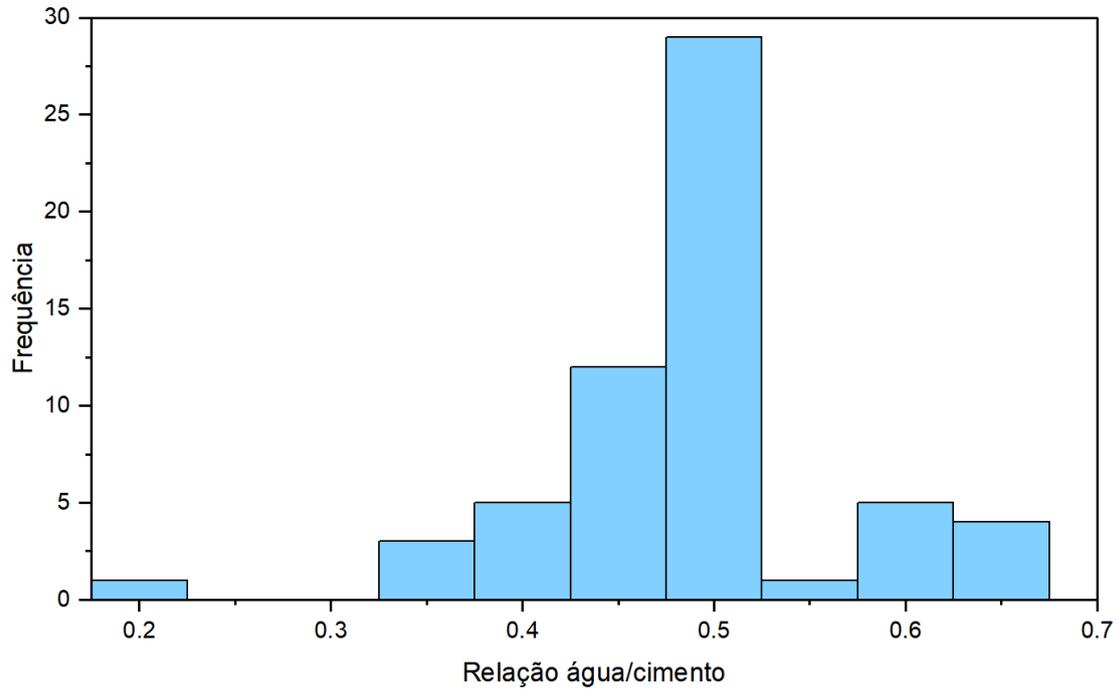


Fonte: Elaborado pelo autor.

Não foram identificados estudos que utilizassem dois ou mais tipos de cimento no experimento, com a finalidade de analisar a diferença entre as propriedades adquiridas. Esta poderia ser outra possibilidade para futuras pesquisas.

A relação água/cimento (a/c) é um parâmetro que tem uma influência considerável nas propriedades do compósito final. Nos estudos analisados, o teor de a/c variou entre 0,20 e 0,65, sendo o uso mais frequente entre 0,45 e 0,50 (Figura 9). Alguns autores utilizaram diferentes relações a/c em seus estudos, ampliando a investigação sobre a influência da substituição parcial do cimento por pó de casca em compósitos e buscando o teor ideal. Wang, Liu e Li (2019), por exemplo, observaram que a incorporação de conchas em pastas de cimento com relações a/c de 0,40, 0,45 e 0,50 promove um ganho de resistência à compressão ao longo do tempo que pode, inclusive, melhorar essa propriedade em pastas com relações a/c mais altas (0,50), que normalmente atingem resistências menores em relação àquelas com menor relação a/c .

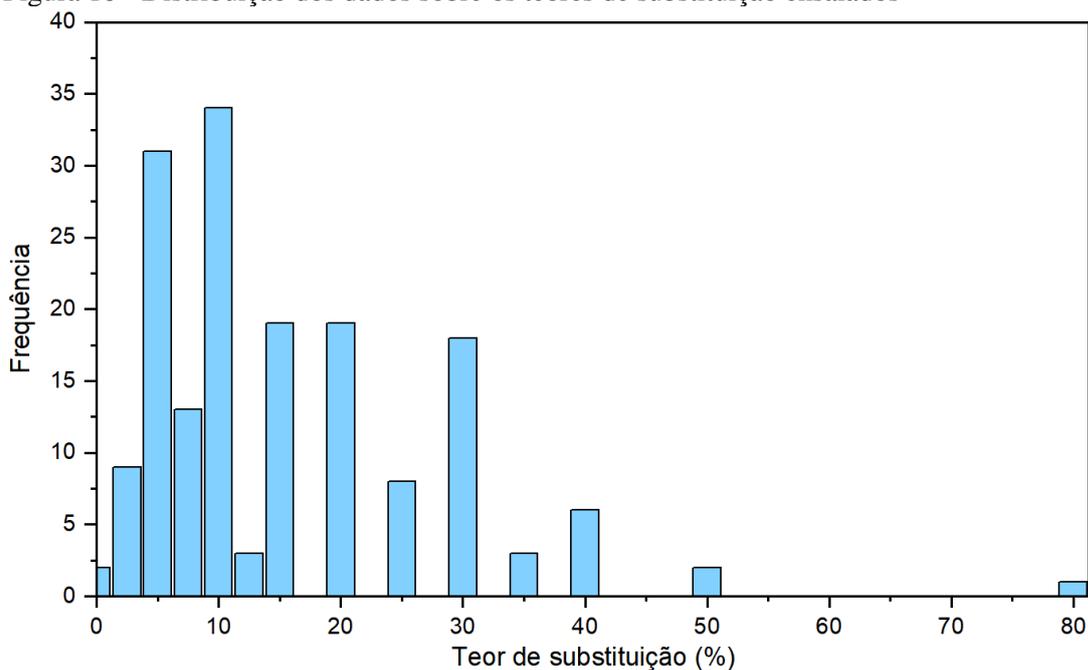
Figura 9 - Relações água/cimento utilizadas nas dosagens dos estudos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os teores de substituição do cimento, os autores variaram entre 2% e 80%. No entanto, os teores mais utilizados ficam na faixa entre 5% e 30% nos experimentos realizados, como mostra a Figura 10 através do histograma baseado na frequência das porcentagens relatadas.

Figura 10 - Distribuição dos dados sobre os teores de substituição ensaiados



Fonte: Elaborado pelo autor.

O teor de substituição de 80% pode ser considerado atípico para ensaios com *fillers*. Esse valor foi especificamente adotado no estudo de Peceño *et al.* (2023) com o intuito realizar uma análise radiológica (detecção de Material Radioativo Naturalmente Ocorrente) do compósito produzido, e assim obterem diferenças mais significativas no ensaio em relação aos outros percentuais.

Alguns fatores podem estar relacionados com a seleção de percentuais de substituição em torno de 5% e 30%. Depois de analisar vários estudos que realizaram experiências com diferentes MCSs no seu estudo de revisão, Fode, Jande e Kivevele (2023) concluíram que os níveis de adição em compósitos cimentícios de 15% para a bentonita, cinzas de biomassa e calio isoladamente, bem como 20% para as cinzas vulcânicas, provaram ser ideais para a obtenção de melhores resistências à compressão e à tração. Para as cinzas volantes, a sílica ativa e o zeólito, 10% representam o teor ideal para estas condições. Assim, a maioria das percentagens escolhidas para as experiências que utilizam conchas marinhas como adição mineral estão em conformidade com as que proporcionaram as melhores propriedades mecânicas em compósitos produzidos com outros MSC amplamente estudados.

Do mesmo modo, as normas utilizadas em diferentes países fornecem recomendações sobre os níveis de MSC adicionados ao concreto. O código AIC 318-19 de requisitos para concreto estrutural para edifícios, elaborado pelo American Concrete Institute (AIC), estabelece limites para a substituição de MCS por cimento Portland Tipo I ou I/II em um máximo de 50%, e para o cimento *Type II* uma taxa de substituição máxima de 25% (AIC, 2019). A norma EN 206:2013 do Comité Europeu de Normalização (CEN) estabelece os limites para a substituição de MCS no cimento Portland CEM I em até 33% para cinzas volantes e 45% para sílica ativa, enquanto para o cimento Portland CEM II/A o limite diminui para até 25% para cinzas volantes (EN, 2013).

Outro fator que influenciou este aspecto foi a experiência de estudos anteriores. Alguns autores relataram durante a descrição da metodologia que a escolha do percentual foi baseada nos resultados obtidos em outras experiências de estudos anteriores que incorporaram pó de concha em substituição ao cimento (Hussin; Othman; Wan Ibrahim, 2019; Deboucha *et al.*, 2021; Han; Lin; Wang, 2022b; Bahadori; Hedayat; Mohammadzadeh, 2023; Liao *et al.*, 2023).

Ainda dos estudos analisados, pôde-se observar que não foram utilizadas muitas porcentagens de substituição (entre 1 e 2 diferentes), exceto para Bahadori, Hedayat e Mohammadzadeh (2023), que utilizaram 5 níveis diferentes de substituição. Este fato é compreensível, pois ao utilizar outras referências que recomendam os níveis adequados, novos estudos verificarão se os mesmos (ou próximos a eles) trarão melhores resultados em seus experimentos.

Entre os estudos, observou-se o emprego de diferentes materiais para dosagens com misturas ternárias ou com mais adições além das conchas, assim como o uso de agregados não convencionais e dosagem com superplastificantes em alguns casos. O Quadro 3 descreve os estudos que foram além da avaliação das propriedades dos compósitos com misturas binárias.

Quadro 3 - Dosagens com uso de outros materiais e aditivos

Característica	Materiais empregados	Estudos
Misturas ternárias ou com mais adições	Folhas de bambu	Umoh <i>et al.</i> (2013)
	Resíduo de concreto	Punthama, Supakata e Kanokkantapong (2019)
	Resíduo de construção e demolição e escória	Rodríguez-Galán <i>et al.</i> (2019)
	Pó de vidro	Joseph e Abraham (2017)
	Pozolana	Soltanzadeh <i>et al.</i> (2018)
	Metakaolin	Liao <i>et al.</i> (2022)
		Liao <i>et al.</i> (2023)
	Cinza de combustível de óleo de palma	Hasan <i>et al.</i> (2021)
	Cinzas volantes	Bouasria <i>et al.</i> (2022)
	Cinzas volantes e sílica ativa	Shetty <i>et al.</i> (2023)
	Cinzas volantes, sílica ativa, compósito de CaCO ₃ -TiO ₂ , escória de alto forno	Fu <i>et al.</i> (2023)
	Escória granulada de alto forno	Deboucha <i>et al.</i> (2021)
		Monisha e Balasubramanian (2022)
	Escória de Ferroníquel	Bouasria <i>et al.</i> (2021)
	Escória de alto forno	Han, Lin e Wang (2022a)
		Han, Lin e Wang (2022b)
Escória de lítio e escória granulada de alto forno	Liu <i>et al.</i> (2022a)	
Concha de luma (<i>Lumashell</i>)	Bahadori, Hedayat e Mohammadzadeh (2023)	
Uso de agregados alternativos	Resíduos de dragagem	Ez-zaki <i>et al.</i> (2018)
	Pó de vidro	Punthama, Supakata e Kanokkantapong (2019)
	Pó de vidro e fibras de aço	Shetty <i>et al.</i> (2023)
	Concha marinha	Bunyamin e Mukhlis (2020)
Sangeetha <i>et al.</i> (2022)		
Uso de aditivos	Superplastificante	Joseph e Abraham (2017)
		Liao <i>et al.</i> (2022)
		Monisha e Balasubramanian (2022)
		Shetty <i>et al.</i> (2023)
		Fu <i>et al.</i> (2023)
		Liao <i>et al.</i> (2023)
	Pó de estearato de zinco e superplastificante	Palaniappan, Komarasamy e Murugan (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor.

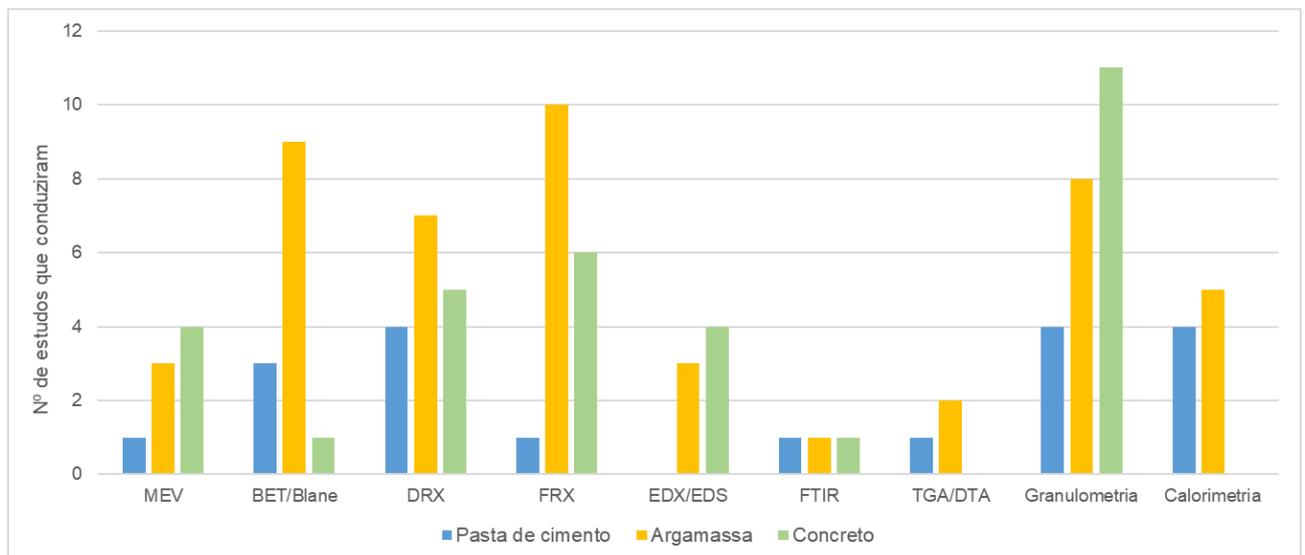
2.2.4 Ensaios laboratoriais conduzidos

Os ensaios laboratoriais realizados nos estudos foram divididos em ensaios de caracterização e nos estados fresco e endurecido, bem como ensaios de durabilidade para cada tipo de compósito. Em cada categoria considerada, os ensaios realizados foram os especificados no texto dos artigos. Houve estudos que forneceram alguns dados de caracterização do material sem indicar claramente que ensaio foi utilizado para recolher os dados e como foi conduzido. Outros utilizaram dados de estudos passados que investigaram o mesmo material. Nestes casos, os dados reportados não foram considerados na quantificação dos ensaios seguintes.

2.2.4.1 Caracterização do pó de concha

Na caracterização dos materiais, foram identificados diferentes ensaios para determinar as propriedades físico-químicas, principalmente das conchas utilizadas. Nesta categoria, foram identificados os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), Difração de Raios X (DRX), Fluorescência de Raios X (XRF), Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Análise Termogravimétrica (TGA), Análise Térmica Diferencial (DTA), testes Blaine/BET, granulometria e calorimetria. A Figura 11 mostra a quantidade de estudos que adoção cada ensaio de caracterização por tipo de compósito cimentício.

Figura 11 - Ensaios de caracterização conduzidos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a quantificação dos ensaios conduzidos, é possível verificar que nos experimentos em pastas de cimento, destaca-se o ensaio de BET/Blaine para determinação da área superficial específica, o DRX para identificação das fases cristalinas dos materiais, a granulometria para quantificar a distribuição do tamanho das partículas e a calorimetria para análise do processo de hidratação do cimento com as conchas. Para os estudos com argamassa, os ensaios mais frequentes foram o FRX para determinação da composição química, o BET/Blaine, a granulometria e o DRX para determinação das fases dos constituintes do material analisado. Por sua vez, nos estudos com concreto a granulometria foi o ensaio mais frequente.

A caracterização dos materiais cimentícios suplementares por meio de ensaios adequados fornece dados importantes para a criação de modelos e compreensão da relação entre as propriedades dos materiais e as propriedades dos compósitos produzidos, como afirmam Juenger, Snellings e Bernal (2019). Portanto, a condução de mais ensaios de caracterização é necessária para avançar no conhecimento da influência das conchas nos compósitos.

As análises de DRX indicaram que a composição da maioria das conchas marinhas corresponde à fase de aragonita. A aragonita é uma forma cristalina de carbonato de cálcio, assim como a calcita que constitui o calcário. No entanto, enquanto a calcita é a forma polimórfica mais estável do carbonato de cálcio, a aragonita é uma forma metaestável, entre os estados amorfo e cristalino (Wang; Liu; Li, 2019).

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram que a superfície do pó de conchas marinhas exibe protuberâncias e irregularidades microscópicas, especialmente quando comparada à superfície do cimento e do *filler* de calcário. Wang, Liu e Li (2019) apontaram que essa morfologia explica a maior área de superfície do pó de conchas em comparação com o cimento e o *filler* de calcário usados em seu estudo, o que impacta positivamente as propriedades reológicas, o desenvolvimento da hidratação e a resistência mecânica da pasta de cimento.

Estudos mostraram que a substituição parcial do cimento por pó de conchas marinhas reduz o calor acumulado de hidratação (Rodríguez-Galán *et al.*, 2019; Seo *et al.*, 2019; Wang; Liu; Li, 2019; Wang; Liu, 2020; Han; Lin; Wang, 2022a; Xuan *et al.*, 2023). Esta redução é atribuída principalmente à diminuição do cimento na mistura. Como o pó de conchas é menos reativo do que o cimento, ele não sustenta os mesmos níveis elevados de liberação de calor observados

nas amostras de referência compostas apenas por cimento. Além disso, a redução da quantidade de cimento aumenta o teor água/cimento efetivo, reduzindo ainda mais a liberação de calor.

Misturas contendo pó de conchas calcinado exibiram maior fluxo de calor durante a reação de hidratação inicial do que misturas contendo apenas cimento (Rodríguez-Galán *et al.*, 2019; Seo *et al.*, 2019; Han; Lin; Wang, 2022a). Segundo Seo *et al.* (2019), o CaO presente no pó calcinado reage com a água, acelerando a reação do Ca(OH)_2 e aumentando o pico de calor de hidratação durante esta fase inicial.

Efeitos relevantes também foram observados durante o período aceleratório da reação de hidratação. De modo geral, em amostras contendo pó de conchas, o pico de liberação de calor foi antecipado em relação às amostras de referência (Wang; Liu; Li, 2019; Han; Lin; Wang, 2022a; Han; Lin; Wang, 2022b; Hay; Peng; Celik, 2023; Xuan *et al.*, 2023). Essa aceleração do processo de hidratação é atribuída a modificações em dois mecanismos principais: o efeito de diluição e o efeito de nucleação, também conhecido como efeito *filler*.

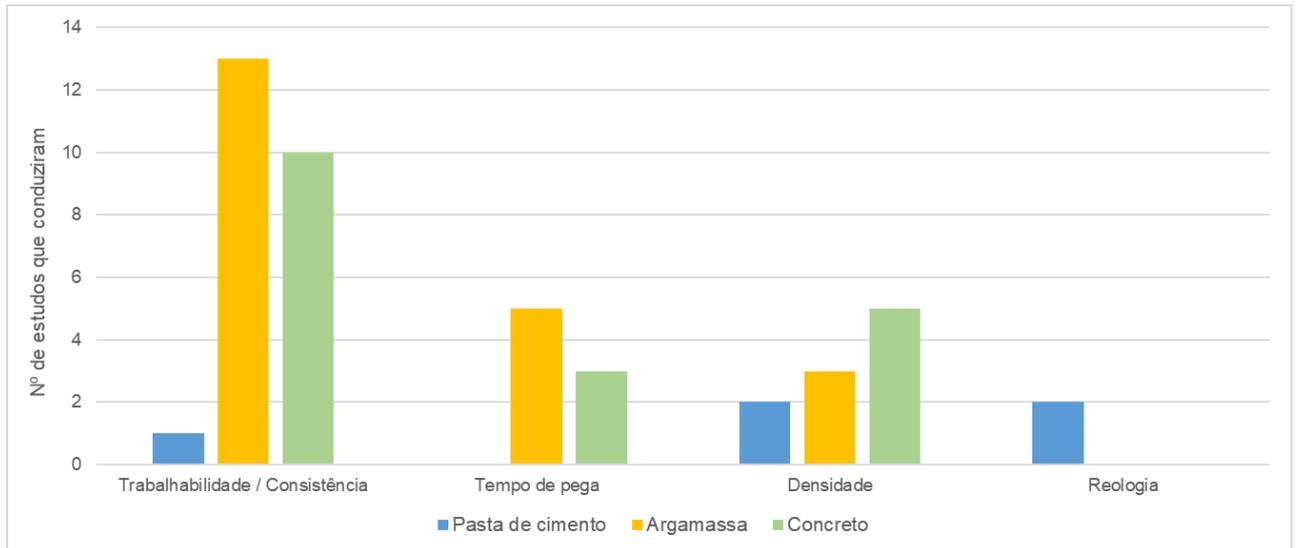
O efeito de diluição é intensificado pela maior exposição dos grãos de cimento à água devido ao menor conteúdo de cimento na mistura e à maior dispersão. Wang e Liu (2020) enfatizam que esse aumento no efeito de diluição impacta diretamente a reologia das misturas de cimento, sugerindo que o pó de conchas poderia contribuir para uma possível redução na razão água/cimento e, conseqüentemente, para a melhoria das propriedades mecânicas. O efeito de nucleação do pó de conchas promove a precipitação de produtos de hidratação e cria mais espaço para seu crescimento (Xuan *et al.*, 2023). Han, Lin e Wang (2022a) afirmam que o pó de conchas com tamanhos de partículas menores fornece mais sítios de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação.

Esses efeitos de diluição e nucleação podem interagir de formas diferentes na hidratação, dependendo dos níveis de substituição de cimento por pó de conchas. Xuan *et al.* (2023) observaram um aumento na intensidade do pico de hidratação em misturas com níveis de substituição de até 15%, atribuído ao efeito de nucleação, enquanto níveis entre 15% e 30% resultaram em picos menores, atribuídos ao efeito de diluição mais acentuado.

2.2.4.2 Propriedades no estado fresco

No estado fresco, os ensaios realizados pelos autores foram trabalhabilidade e/ou consistência, tempo de pega, densidade e reologia. O gráfico da Figura 12 mostra a quantificação de cada ensaio adotado no estado fresco dos experimentos analisados.

Figura 12 - Ensaio conduzidos no estado fresco

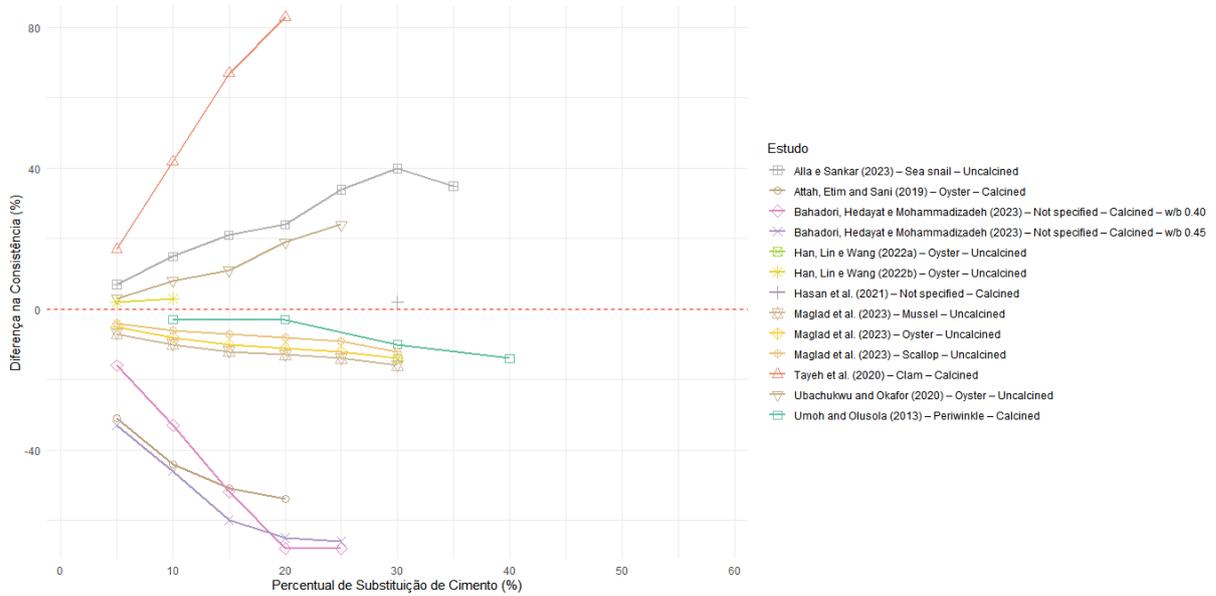


Fonte: Elaborado pelo autor.

Como demonstrado, os ensaios de trabalhabilidade e/ou consistência foram os mais frequentemente realizados em compósitos no estado fresco, especialmente em pesquisas com argamassas e concretos com a incorporação das conchas. Estas propriedades são relevantes para avaliar a influência do pó de concha na demanda de água e na consistência da matriz cimentícia imediatamente após a mistura. Os ensaios reológicos, que analisam a fluidez das misturas, foram aplicados apenas em estudos focados nas pastas de cimento.

A Figura 13 ilustra graficamente os efeitos na consistência dos compósitos em diferentes dosagens em misturas binárias. Um efeito nulo é representado pela linha vermelha tracejada no centro, com valores acima da linha indicando um aumento na consistência ou trabalhabilidade e valores abaixo da linha indicando uma redução.

Figura 13 - Impactos do pó de conchas na consistência de misturas binárias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os efeitos do pó de conchas na consistência dos compósitos variam entre os estudos. Enquanto alguns relatam aumento na consistência, outros observam uma diminuição dessa propriedade. Apesar dessas diferenças, uma tendência geral sugere que níveis mais altos de incorporação de pó de conchas levam a mudanças mais consideráveis na consistência.

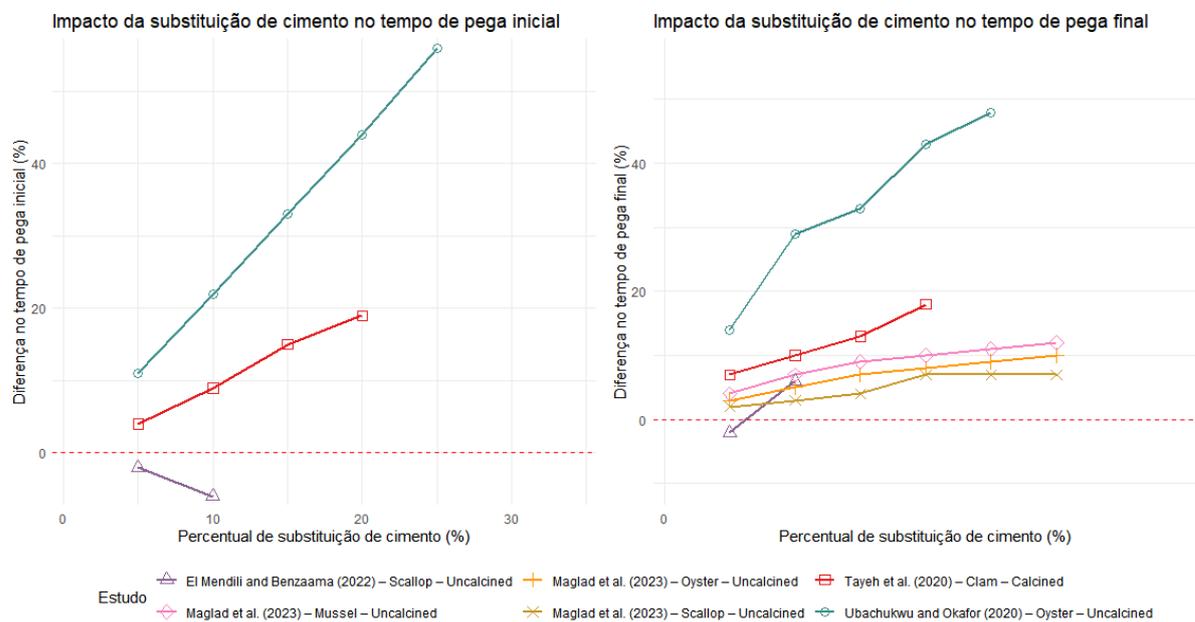
A influência na consistência não depende necessariamente de o pó de conchas ter sido calcinado ou não. Enquanto alguns estudos usando pó de conchas não calcinado observaram aumento na consistência ao aumentar o conteúdo do pó (Ubachukwu; Okafor, 2020; Han; Lin; Wang, 2022b; Alla; Sankar, 2023), outros relataram uma redução dessa propriedade ao usar pó não calcinado (Han; Lin; Wang, 2022a; Maglad *et al.*, 2023). Uma tendência semelhante é observada em relação ao uso do pó calcinado. Enquanto Attah, Etim e Sani (2019), Bahadori, Hedayat e Mohammadzadeh (2023) e Umoh e Olusola (2013) relataram uma redução na consistência com pó calcinado, Hasan *et al.* (2021) e Tayeh *et al.* (2020) observaram um aumento nessa propriedade usando o mesmo tipo de pó.

No estudo de Wang, Lui e Li (2019), o pó de conchas não calcinado afetou as propriedades reológicas das misturas cimentícias. A viscosidade e o esforço de cisalhamento dinâmico diminuíram à medida que o conteúdo de pó de conchas aumentava. A diferença foi atribuída ao efeito dispersivo do pó de conchas, que reduziu a aglomeração de partículas de cimento nas misturas. Além disso, a substituição do cimento por pó de conchas reduziu a demanda de água

nas combinações frescas, mantendo a fluidez e trabalhabilidade aceitáveis. Tayeh *et al.* (2020) atribuíram o aumento na trabalhabilidade à hidratação mais lenta do pó de conchas em comparação com as amostras compostas apenas por cimento.

A incorporação do pó de conchas também afeta o tempo de pega do compósito. Com base nos dados dos estudos analisados, a Figura 14 apresenta os efeitos do pó de conchas no tempo de pega.

Figura 14 - Impacto da incorporação do pó de concha no tempo de pega de misturas binárias



Fonte: Elaborado pelo autor.

El Mendili e Benzaama (2022) propuseram que a diminuição no tempo de pega inicial observada em pastas contendo pó de conchas resulta da taxa acelerada das reações de hidratação dos componentes do cimento. Segundo os autores, essa diminuição foi impulsionada pela criação de novos sítios de nucleação que contribuem para o processo geral de hidratação, conforme mencionado por Han, Lin e Wang (2022a) e Xuan *et al.* (2023) em seus estudos.

Por outro lado, outros pesquisadores observaram um aumento nos tempos de pega inicial e final. Por exemplo, Tayeh *et al.* (2020) atribuíram o aumento dos tempos de pega inicial e final em argamassas contendo pó de conchas calcinado à reação mais lenta entre o pó de conchas e a água. Complementando, Soltanzadeh *et al.* (2018) ligaram esse efeito à desaceleração do processo de hidratação resultante do menor conteúdo de cimento em misturas que incluíam pó

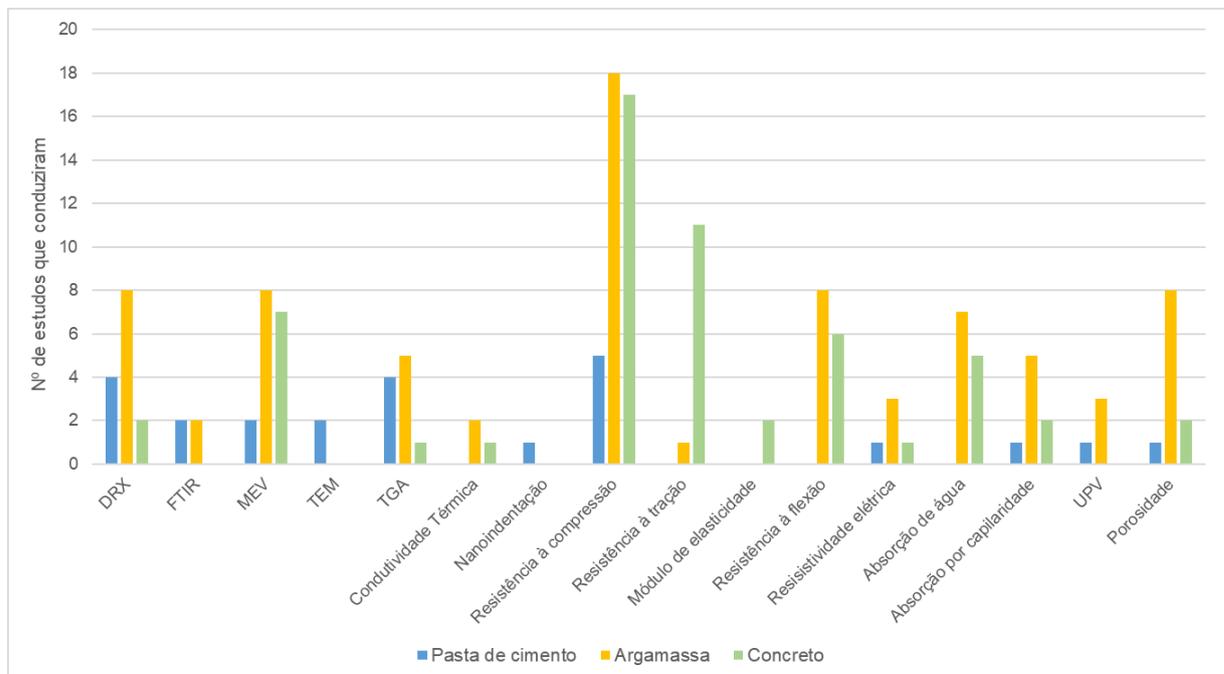
de conchas não calcinado. Esses autores sugerem ainda que as matrizes cimentícias incorporando pó de conchas oferecem vantagens para aplicações em climas quentes.

Por fim, compósitos contendo pó de conchas geralmente exibem menor densidade no estado fresco em comparação com amostras de controle, devido à menor gravidade específica do pó de conchas em relação ao cimento (Hussin; Othman; Wan Ibrahim, 2019; El Mendili; Benzaama, 2022).

2.2.4.3 Propriedades no estado endurecido

No estado endurecido, foram identificados alguns ensaios que são comuns à caracterização no estado anidro, mas que podem também auxiliar no estado endurecido para analisar microscopicamente os produtos gerados no compósito. São eles: DRX, MEV, TGA, FTIR e Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM). Além destes, foi no estado endurecido que se realizou a maior variedade de ensaios comparado com a caracterização do material e no estado fresco, como demonstrado na Figura 15.

Figura 15 - Ensaios conduzidos no estado endurecido



Fonte: Elaborado pelo autor.

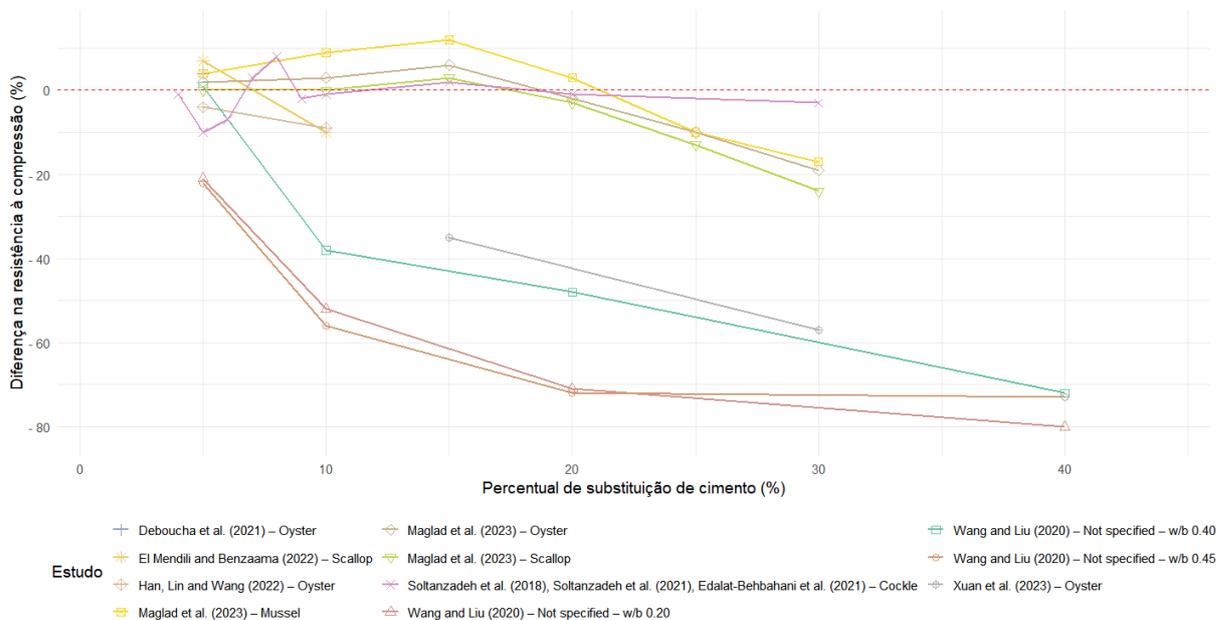
Esta maior diversidade de ensaios atesta a preocupação dos autores com o comportamento dos compósitos produzidos após o endurecimento. É neste estado que os ensaios com argamassa e

concreto mais se destacam, com 13 e 12 tipos de ensaios realizados, respectivamente. Os ensaios de análise microscópica foram os mais comuns para as pastas de cimento neste estado. Quanto aos ensaios de resistência mecânica, a resistência à compressão é a mais comum, mas também foram realizados ensaios de resistência à tração e de resistência à flexão.

Análises microscópicas realizadas por Wang, Liu e Li (2019) em pastas de cimento contendo pó de conchas não calcinado apontam a formação de maiores quantidades de fases, como etringita e carboaluminato de cálcio. À medida que a quantidade de pó de conchas aumentava, a quantidade dessas fases também crescia. Etringita e, em particular, carboaluminato de cálcio tendem a se formar próximo ou no local do próprio pó de conchas, o que ajuda a explicar por que este material contribui para melhorias na matriz de cimento hidratado. Ao atuar como sítios de nucleação, o pó de conchas promove a precipitação de produtos de hidratação, criando uma matriz cimentícia com maior coesão e integridade (Wang; Liu; Li, 2019).

As propriedades mecânicas das misturas binárias incorporando pó de conchas foram analisadas após 28 dias de cura, comparando os resultados com amostras de referência para avaliar os efeitos de níveis de substituição variáveis. A Figura 16 ilustra o impacto do pó de conchas não calcinado na resistência à compressão.

Figura 16 - Efeitos pó de conchas não calcinado na resistência à compressão de misturas binárias após 28 dias de cura



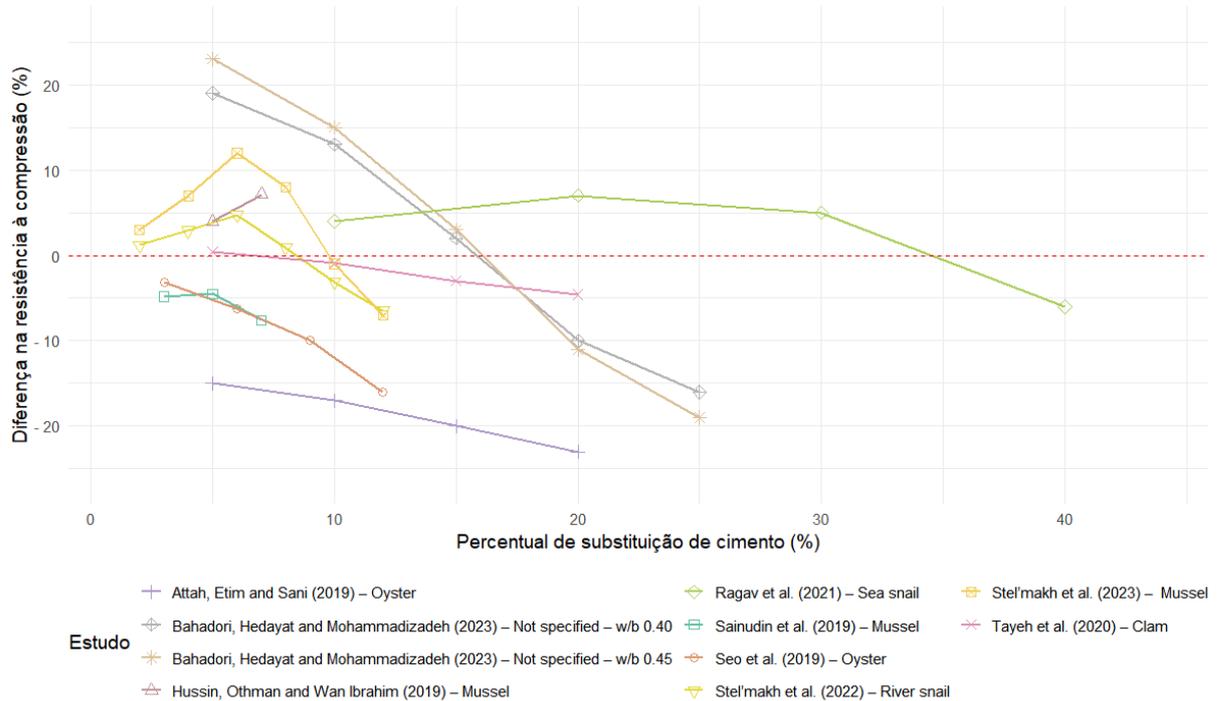
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os efeitos variam entre os estudos, com alguns indicando um aumento na resistência à compressão e outros mostrando apenas uma diminuição. Em geral, a resistência à compressão tende a diminuir à medida que o teor de pó de conchas aumenta, e a maioria das observações com ganhos de resistência ocorre entre 5 e 15% de substituição de cimento. Além disso, diferentes tipos de conchas parecem ter efeitos distintos na resistência, conforme relatado por Maglad *et al.* (2023), com conchas de vieiras, ostras e mexilhões que passaram pelo mesmo tipo de processamento.

No entanto, os resultados de diferentes estudos podem variar consideravelmente, mesmo entre os mesmos tipos de conchas. Por exemplo, podem-se observar disparidades entre as conclusões de Maglad *et al.* (2023) e Xuan *et al.* (2023) em relação ao reuso de conchas de ostras e entre Maglad *et al.* (2023) e El Mendili e Benzaama (2022) em relação às conchas de vieiras. Esta observação sugere que outras características influenciam esta propriedade, particularmente no que diz respeito à dosagem ou processamento das conchas. Uma dessas características pode ser a área de superfície específica do pó de conchas, por exemplo. No entanto, não há dados suficientes entre esses estudos para tirar conclusões adicionais.

Constatações semelhantes são relatadas em estudos incorporando pó de conchas calcinado, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Efeitos pó de conchas calcinado na resistência à compressão de misturas binárias após 28 dias de cura



Fonte: Elaborado pelo autor.

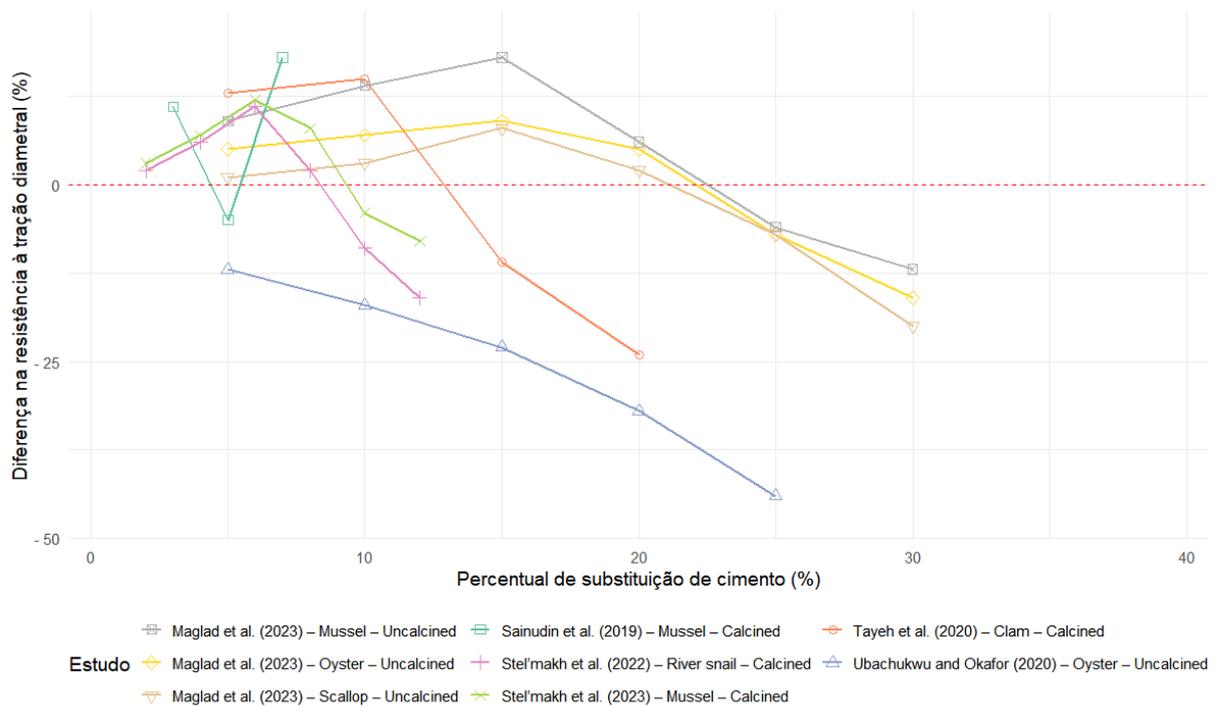
Assim como os estudos com pó de conchas não calcinado, os autores que utilizaram pó de conchas calcinado relataram resultados variados. Melhorias na resistência à compressão foram observadas em níveis de substituição de cimento entre 3% e 15%, embora Ragav *et al.* (2021) tenham relatado melhorias em níveis de até 30%. No entanto, as perdas de resistência não foram tão severas quanto as observadas em experimentos com pó não calcinado, e ganhos superiores a 15% foram observados em alguns estudos.

No estudo de Stel'makh *et al.* (2023), os ganhos de resistência à compressão observados com diferentes teores de pó de concha de mexilhão calcinado foram atribuídos à finura das partículas, que favoreceram a formação adicional de zonas de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal responsável pela resistência mecânica do compósito. Por outro lado, no estudo de Attah, Etim e Sani (2019), utilizando pó de concha de caracol marinho calcinado, os autores destacaram que a cal presente no pó não contribuiu para o aumento da resistência do concreto, uma vez que os produtos da reação pozolânica já contêm cal em sua composição, não havendo, portanto, efeito positivo adicional. Diante disso, observa-se que o pó de conchas calcinado atua predominantemente por meio do efeito *filler*, não apresentando atividade pozolânica significativa a ponto de melhorar a resistência mecânica.

Considerando os dados, alguns estudos até apresentam níveis ótimos de substituição de cimento para ganhos mais notáveis em resistência à compressão. Por exemplo, Maglad *et al.* (2023) encontraram um nível de substituição ótimo de 15% usando pó não calcinado, enquanto Stel'makh *et al.* (2022, 2023) e Ragav *et al.* (2021) identificaram um nível de 6% e 20% de pó calcinado como ideal, respectivamente. Nesses casos, os efeitos dos processos de nucleação e dissolução na hidratação do cimento, conforme descrito por Xuan *et al.* (2023), são observáveis: até determinados níveis de substituição, o processo de nucleação melhora a formação de produtos de hidratação e, além desses níveis, o efeito de diluição pode interferir no processo de hidratação devido à redução da quantidade de cimento disponível.

A mesma análise foi realizada nos dados de resistência à tração por compressão diametral dos compósitos usando misturas binárias. A Figura 18 ilustra como a adição de pó tanto calcinado quanto não calcinado influencia essa propriedade.

Figura 18 - Efeitos pó de conchas calcinado na resistência à tração diametral de misturas binárias após 28 dias de cura



Fonte: Elaborado pelo autor.

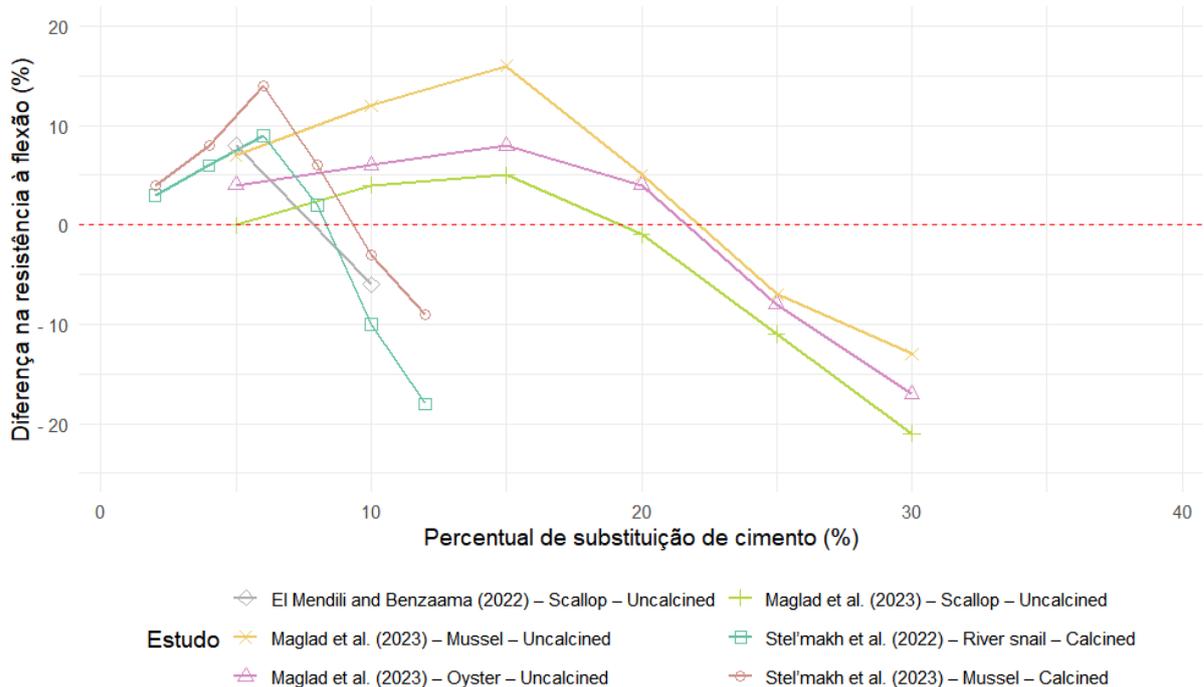
Os resultados indicam que a resistência à tração por compressão diametral aumentou na maioria dos estudos que incorporaram pó de conchas. Este aumento foi mais frequentemente observado em níveis de substituição entre 3 e 15% e, às vezes, até 20%. No entanto, além desses níveis, a

resistência à tração por compressão diametral começou a diminuir. Notavelmente, no estudo de Ubachukwu e Okafor (2020), a adição de pó de conchas diminuiu consistentemente a resistência à tração por compressão diametral em todos os níveis de substituição.

Tayeh *et al.* (2020) atribuíram o aumento na resistência à tração à natureza fibrosa do cimento de conchas e suas capacidades de ligação aprimoradas com os agregados. Além disso, o pó de conchas funciona como material de preenchimento, melhorando a ligação entre as partículas de concreto. No entanto, os autores afirmam que níveis mais altos de substituição interrompem a superfície de ligação entre a pasta de cimento e os agregados (Tayeh *et al.*, 2020).

A Figura 19 ilustra como a resistência à flexão dos compósitos de pó de conchas se assemelha ao padrão observado na resistência à tração por compressão diametral.

Figura 19 - Efeitos pó de conchas calcinado na resistência à flexão de misturas binárias após 28 dias de cura



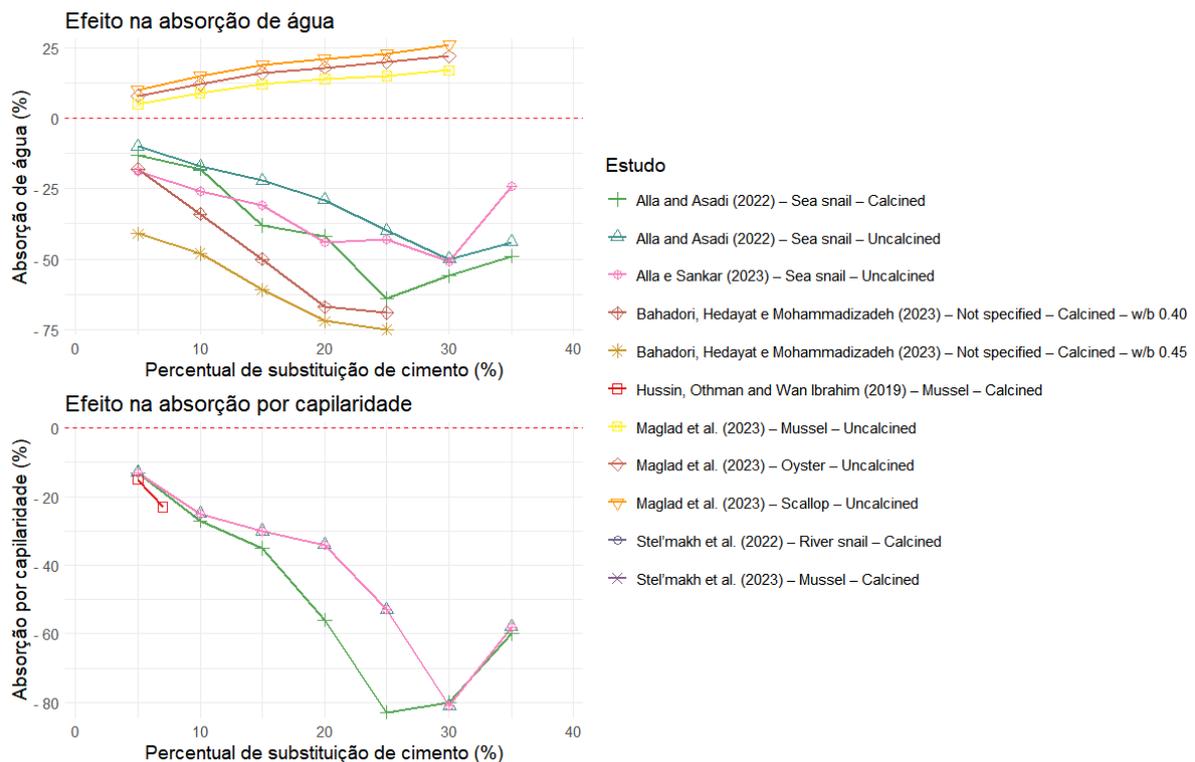
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados indicam que o efeito do pó de conchas na resistência à flexão dos compósitos varia dependendo do nível de substituição de cimento, levando potencialmente a um aumento ou diminuição da resistência. Os níveis ótimos de substituição para aumentar a resistência alinham-se com as faixas identificadas para outras resistências, especificamente entre 5% e 15%.

O módulo de elasticidade é uma propriedade do material que indica como ele se deforma quando submetido a estresse dentro de seus limites elásticos (Sun; Fanourakis, 2022). Esta propriedade influencia o projeto de estruturas de concreto, pois está diretamente associada à redução do comprimento dos elementos de concreto quando submetidos a estresse de compressão e efeitos de retração (Alsalman *et al.*, 2017). Ao avaliar o módulo de elasticidade do concreto produzido com misturas binárias contendo pó de conchas calcinado, Stel'makh *et al.* (2022, 2023) observaram um aumento nesta propriedade até 8% de substituição de cimento. No entanto, após este nível, foi observada uma diminuição no módulo de elasticidade em comparação com as amostras de referência.

A Figura 20 ilustra a absorção de água e a absorção capilar dos compósitos com misturas binárias de pó de conchas e cimento em termos de aumento ou diminuição dessas propriedades.

Figura 20 - Efeitos pó de conchas calcinado na absorção de água por imersão e por capilaridade de misturas binárias após 28 dias de cura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados indicam que a absorção de água e a absorção por capilaridade tendem a diminuir à medida que a substituição do cimento por pó de conchas aumenta, especialmente em níveis de até 20-30%. No entanto, há exceções notáveis nos dados que mostram um aumento na absorção de água, particularmente em amostras com pó de conchas não calcinado. A redução dessas

propriedades pode indicar que o compósito é mais resistente à degradação por umidade, contribuindo para sua durabilidade.

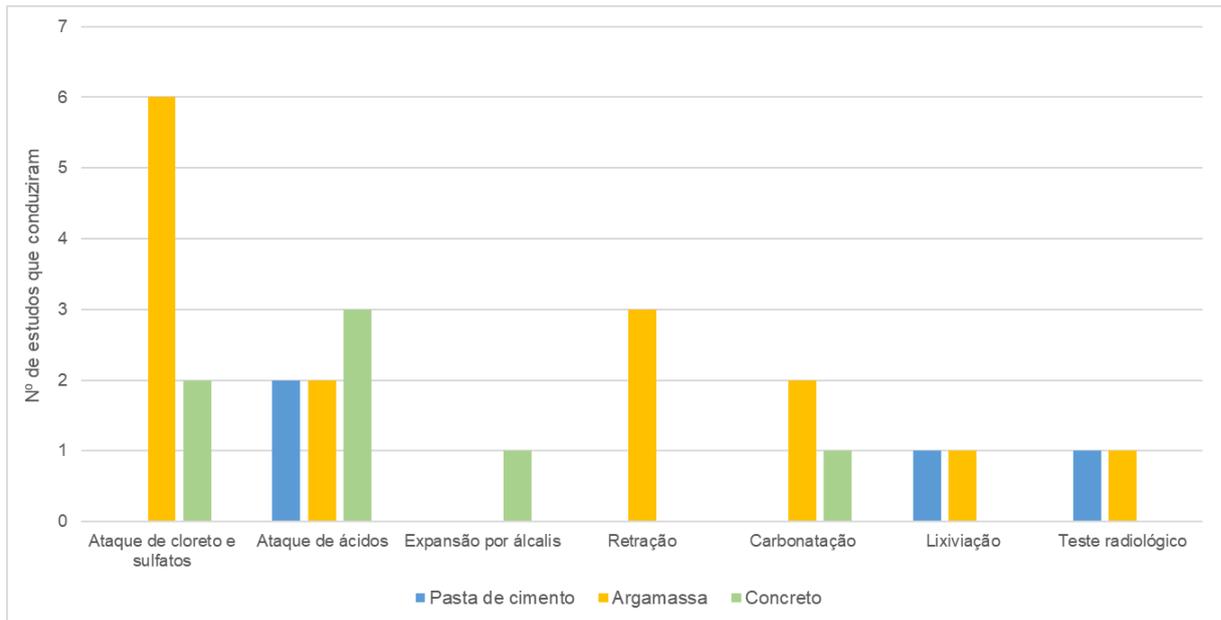
No estudo conduzido por Hussin, Othman e Wan Ibrahim (2019), a diminuição na absorção capilar das amostras de concreto foi atribuída ao preenchimento de poros na matriz cimentícia pelo pó de conchas e ao aumento do volume de depósitos de CaCO_3 , conforme evidenciado pelas imagens de MEV.

Dois ensaios menos comuns que têm sido realizados em compósitos no estado endurecido são o ensaio de resistividade elétrica e o ensaio de velocidade de propagação de impulsos ultrassônicos (UPV). O primeiro é utilizado para avaliar a capacidade resistiva do concreto, especialmente contra a corrosão do aço, enquanto o segundo utiliza a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para avaliar a qualidade do compósito cimentício formado. Outro ensaio menos comum é o ensaio de nanoindentação, que é um método de caracterização dos materiais que permite medir as propriedades mecânicas em escalas nanométricas.

2.2.4.4 Durabilidade dos compósitos

Ensaio para avaliar a durabilidade dos compósitos com pó de conchas ainda não são tão comuns quanto os testes realizados para caracterizar e avaliar as propriedades mecânicas em seus estados fresco e endurecido. A avaliação da durabilidade dos compósitos aborda com maior frequência sua resistência a agentes agressivos, como sulfatos, ácidos e álcalis (Figura 21).

Figura 21 - Ensaios de aspectos da durabilidade dos compósitos



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 1 fornece dados sobre a perda de resistência à compressão em compósitos feitos de misturas binárias após imersão em soluções de sulfato. O percentual de perda é calculado com base nas amostras de referência.

Tabela 1 - Perda de resistência à compressão em compósitos cimentícios causada por ataque de sulfato

Estudo	Percentuais de substituição do cimento	Tempo de cura	Concentração de sulfato	Perda na resistência à compressão
Attah, Etim e Sani (2019)	5	28 dias	5% H ₂ SO ₄	-11%
	10			-3%
	15			5%
	20			6%
Attah, Etim e Sani (2019)	5	28 dias	7.5% H ₂ SO ₄	-7%
	10			-6%
	15			-3%
	20			1%
Attah, Etim e Sani (2019)	5	28 dias	10% H ₂ SO ₄	-2%
	10			-2%
	15			-2%
	20			1%
Tayer <i>et al.</i> (2020)	10	90 dias	5% MgSO ₄	-36%
	20			6%
	30			48%
	40			59%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Substituições de cimento com pó de conchas marinhas na faixa de 5–10% mostraram menores perdas de resistência do que as amostras de referência após exposição a soluções com diferentes concentrações de sulfato. No entanto, substituições superiores a 10% comprometeram a resistência dos compósitos. Portanto, o pó de conchas marinhas pode mitigar as perdas de resistência devido ao ataque de sulfato em níveis de substituição abaixo de 10%, mas aumenta essas perdas em níveis mais altos.

Attah, Etim e Sani (2019), juntamente com Tayer *et al.* (2020), explicaram que a imersão em soluções ácidas desencadeou uma reação entre o ácido e os produtos de hidratação alcalinos do cimento, como o hidróxido de cálcio. Essa reação leva à formação de compostos como gesso e etringita, que são conhecidos por causar expansão interna, fissuração e uma subsequente redução na resistência mecânica. Vale ressaltar que ambos os estudos empregaram pó de conchas marinhas calcinado.

Pesquisas adicionais são necessárias para explorar a resistência a sulfatos e ácidos de compósitos incorporando pó de conchas marinhas não calcinado para determinar se seu comportamento difere. A adição de pó de conchas calcinado também mostrou efeitos positivos na redução da retração autógena em argamassas cimentícias. Seo *et al.* (2019) observaram que a retração autógena de espécimes com 9% de substituição de cimento por pó de conchas de ostra calcinado foi 25% menor do que a do espécime de controle. Esse efeito pode ser benéfico para mitigar fissuras induzidas por retração em compósitos cimentícios. Outro aspecto importante a considerar é o processo de carbonatação.

No estudo de Xuan *et al.* (2023), o pó de conchas de ostra não calcinado aumentou a porosidade inicial do compósito, elevando o coeficiente de difusão de CO₂ e intensificando o processo de carbonatação. Além disso, o pó de conchas aumentou a afinidade pelo CO₂, reduzindo a energia interfacial necessária para a precipitação dos produtos de carbonatação, segundo os autores. Por outro lado, Hussin, Othman e Wan Ibrahim (2019) observaram o comportamento oposto em amostras de concreto contendo pó de conchas de mexilhão calcinado. Com 5% e 7% de cimento substituídos por pó calcinado, as amostras tiveram menor penetração de carbonatação do que o concreto sem adição de pó de conchas. Esse comportamento foi atribuído à maior quantidade de cal livre presente no pó calcinado, que, durante a carbonatação, preencheu os poros no concreto, limitando a penetração de CO₂.

Por fim, Ragav *et al.* (2021) observaram que o uso de pó de conchas calcinado com níveis de substituição de até 30% do cimento em concreto armado reduziu a taxa de corrosão das armaduras em ambientes marinhos, aumentando a durabilidade das estruturas de concreto armado expostas a esses ambientes.

2.2.5 Emissões de carbono

A análise das emissões de carbono equivalente por m³ de compósito indicou uma redução considerável em comparação com as amostras feitas apenas com cimento. Han, Lin e Wang (2022a, 2022b) conduziram dois estudos sobre misturas binárias e ternárias incorporando pó de conchas de ostra não calcinado. Na produção de argamassa, a substituição de 30% do cimento por pó de conchas resultou em uma redução de 30% nas emissões de carbono por m³. Essa redução foi comparável à observada em misturas de cimento binárias com 30% de escória de alto-forno e misturas ternárias com 10% de pó de conchas e 20% de escória (ou vice-versa) (Han; Lin; Wang, 2022a). Para pastas de cimento, os pesquisadores relataram reduções de 5% e 11% nas emissões quando 5% e 10% do cimento foram substituídos por pó de conchas, respectivamente (Han; Lin; Wang, 2022b).

Em contraste, Liao *et al.* (2022) investigaram o uso de pó de conchas calcinado a 950 °C para produção de argamassa e observaram que as emissões de carbono foram semelhantes às da argamassa convencional, resultando em reduções de apenas 1% a 2% para substituições de cimento variando de 5% a 10%. Análises adicionais de Liao *et al.* (2023) indicaram que temperaturas de calcinação variando de 800 °C a 1100 °C ainda produziram emissões mais baixas do que as amostras de controle. Ambos os estudos analisaram misturas ternárias de cimento, metacaulim e pó de conchas, usando amostras de referência compostas apenas por cimento e metacaulim, mantendo o conteúdo de metacaulim constante em todas as misturas relatadas.

No entanto, o cenário muda ao analisar as emissões por MPa de resistência à compressão. Han, Lin e Wang (2022b) observaram taxas semelhantes de emissões por MPa entre a amostra de controle e misturas binárias de pasta de cimento com 5% e 10% de pó de conchas não calcinado, bem como emissões mais altas em amostras com 30% de substituição para produção de argamassa (Han; Lin; Wang, 2022a). O aumento observado nas emissões por MPa está relacionado à redução da resistência, que se torna substancial em níveis mais altos de

substituição de cimento, destacando a importância de equilibrar os benefícios ambientais com o desempenho mecânico. Por outro lado, no estudo de Liao *et al.* (2022) sobre pó de conchas calcinado, as emissões por MPa para argamassa permaneceram ligeiramente mais baixas do que as das amostras de controle.

Esses resultados enfatizam que incorporar pó de conchas, calcinado ou não, em misturas binárias e ternárias, reduz as emissões de CO₂ em compósitos cimentícios. Esse comportamento é esperado devido ao alto fator de emissão associado ao cimento Portland e à redução em seu conteúdo nas misturas. No entanto, embora níveis mais altos de substituição de cimento por pó de conchas possam levar a menores emissões, é importante considerar o impacto na resistência mecânica. Níveis elevados de substituição podem comprometer substancialmente essa propriedade, aumentando as emissões por MPa de resistência à compressão do compósito em comparação com os feitos apenas com cimento Portland.

Dois artigos selecionados para a síntese realizaram uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para avaliar o impacto ambiental de misturas cimentícias que substituem parcialmente o cimento por pó de conchas. Ambos usaram pó de conchas não calcinado nos experimentos. Soltanzadeh *et al.* (2021) usaram ACV para comparar o impacto ambiental de argamassas com diferentes proporções de cimento Portland substituídas por pó de conchas (misturas binárias) e pozolana natural (misturas ternárias). Seguindo as normas ISO 14040 e 14044, a ACV foi conduzida avaliando seis categorias, incluindo Potencial de Aquecimento Global (GWP) e Potencial de Depleção Abiótica (ADP), considerando as etapas desde a extração das matérias-primas até a argamassa pronta para uso. Os resultados indicaram que a substituição parcial de OPC por pó de conchas reduz o GWP e o ADP, alcançando reduções de até 12% em misturas com conchas e pozolana. Dessa forma, os autores concluíram que o uso de conchas pode ajudar a minimizar o impacto ambiental do compósito. No entanto, o impacto na camada de ozônio aumentou ligeiramente em composições ternárias, exigindo uma avaliação equilibrada entre sustentabilidade e propriedades do material.

El Mendili e Benzaama (2022) analisaram concreto com até 10% de substituição de cimento por conchas de vieira, avaliando o impacto ambiental usando ACV com base na ISO 14040 com suporte dos softwares SimaPro e Pleiades. O estudo revelou que a substituição de 10% do cimento reduz impactos ambientais específicos, como mudanças climáticas e eutrofização marinha, em até 40%. Ao simular o ciclo de vida de um edifício construído com este concreto,

as fases de construção e renovação provaram ser as mais impactantes, com o aquecimento sendo a maior fonte de emissões. A conclusão destaca o potencial das conchas de vieira para melhorar a sustentabilidade dos materiais cimentícios, mas recomenda equilibrar isso com a resistência estrutural e durabilidade.

2.3 Conclusões da revisão da literatura

Esta revisão sistemática da literatura analisou 44 artigos sobre o uso de conchas marinhas como substituto parcial do cimento para produzir diferentes compósitos cimentícios. Com base na análise de procedimentos de beneficiamento, propriedades físico-químicas do pó de conchas, proporções de mistura, testes de laboratório e impactos nas propriedades obtidas, foram tiradas as seguintes conclusões:

- A pesquisa sobre o uso de conchas marinhas como aditivo mineral tem se expandido nos últimos anos. Isso inclui experimentos com misturas binárias de cimento e pó de conchas, bem como combinações ternárias ou mais complexas com outros SCMs e aditivos. A maioria dos experimentos focou na argamassa como o principal material para teste, seguido por concreto e pastas de cimento;
- A composição química das conchas marinhas varia por espécie e região, levando a disparidades nos valores relatados, particularmente para o teor de CaO. Essas discrepâncias são ainda influenciadas por diferenças nas abordagens de relato entre os estudos. Da mesma forma, variações nas propriedades físicas do pó de conchas, como gravidade específica e área de superfície, podem ser atribuídas à diversidade dos métodos de processamento das conchas. Geralmente, o pó de conchas demonstra menor gravidade específica e maior área de superfície específica do que o cimento, o que influencia seu comportamento nos compósitos cimentícios;
- O cimento Portland comum (OPC) foi o tipo de cimento mais comumente utilizado nos experimentos, com relações água/aglomerante variando tipicamente de 0,40 a 0,50. Os níveis de substituição de cimento por pó de conchas variaram predominantemente de 5% a 30%, guiados por pesquisas anteriores e práticas estabelecidas para outros MCS;

- As propriedades mecânicas dos compósitos incorporando pó de conchas variam entre os estudos, principalmente dependendo do tipo de concha e do método de processamento utilizado. Efeitos positivos na resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade foram consistentemente relatados em níveis de substituição entre 5% e 15%. Esta faixa de substituição está alinhada com a usada para aditivos minerais inertes, como o *filler* calcário. No entanto, a adição de pó de concha também resultou na redução da resistência mecânica e de propriedades relacionadas à durabilidade, conforme observado em alguns estudos. Esse efeito é principalmente atribuído às modificações no processo de hidratação do cimento, como o efeito de diluição;
- Os benefícios ambientais do uso de pó de conchas como substituto parcial do cimento são evidentes na redução das emissões de carbono dos compósitos cimentícios, independentemente de o pó ser calcinado ou não. Do ponto de vista ambiental, o pó de conchas não calcinado é mais sustentável devido às suas menores necessidades de energia de processamento. Contudo, níveis elevados de substituição podem impactar negativamente as emissões por MPa de resistência à compressão, principalmente devido às reduções de resistência. Portanto, os níveis de substituição ótimos que equilibram os benefícios ambientais com o desempenho mecânico tipicamente variam entre 5% e 15%.

As conclusões extraídas da revisão da literatura fundamentaram o delineamento da fase experimental desta pesquisa, a qual compreendeu a produção do *filler* à base de conchas de sururu e a investigação de compósitos cimentícios com sua incorporação. Os direcionamentos envolveram desde as etapas de beneficiamento das conchas, considerando as limitações operacionais dos equipamentos disponíveis, até a definição das dosagens de substituição e a seleção dos ensaios para avaliação das propriedades dos compósitos.

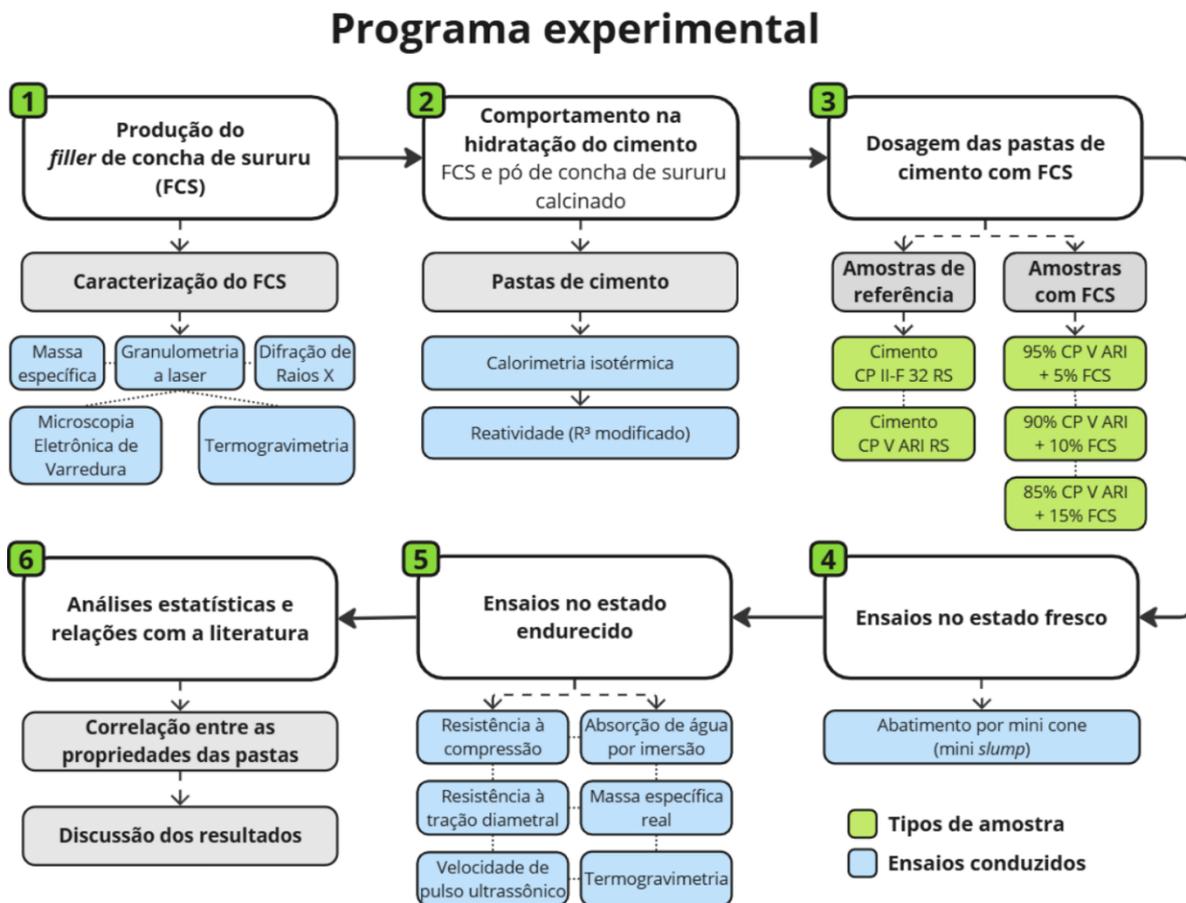
Com base nas evidências da literatura, optou-se pela utilização do pó de concha de sururu não calcinado, uma vez que este apresentou menores emissões de carbono durante o processamento, além de propriedades mecânicas comparáveis às do pó calcinado em determinadas situações. Além disso, a investigação foi limitada aos teores de substituição entre 5% e 15%, devido às perdas significativas nas propriedades mecânicas observadas em teores superiores. Os procedimentos metodológicos adotados são descritos no capítulo seguinte.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa é classificada como aplicada quanto à sua natureza, quantitativa quanto à abordagem, exploratória e explicativa em relação aos seus objetivos, e experimental em termos de métodos, conforme a classificação proposta por Gil (2002).

A Figura 22 resume o processo metodológico da pesquisa e os subcapítulos a seguir descrevem os materiais utilizados e os métodos empregados.

Figura 22 - Resumo do programa experimental da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados no programa experimental incluem o cimento empregado tanto na amostra de referência quanto nas misturas com o *filler* experimental, além de um cimento composto com adição de material carbonático regulamentado no Brasil, utilizado como

referência para comparação. Durante a preparação das misturas, utilizou-se água proveniente do Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Escola Politécnica de Pernambuco, fornecida pela empresa de abastecimento estadual Compesa.

3.1.1 Aglomerantes

O compósito cimentício contendo o *filler* experimental foi produzido utilizando o cimento Portland CP V ARI RS (Cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos), escolhido por apresentar baixo teor de adições (0% a 10% de material carbonático), conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018). Essa composição faz com que o CP V ARI seja o cimento comercial que mais se assemelha ao OPC amplamente utilizado na literatura, além de possuir menor quantidade de adições e maior teor de clínquer em comparação com outros cimentos disponíveis no mercado.

Para fins de comparação, também foram produzidos compósitos com cimento composto contendo adição de material carbonático regulamentado no Brasil, o CP II-F 32 RS (Cimento Portland composto com *filler* calcário resistente a sulfatos, classe de resistência 32 MPa). Ambos os cimentos utilizados foram fabricados pela empresa Cimento Nacional. A Tabela 2 apresenta os limites de composição dos cimentos utilizados, conforme estabelecido pela NBR 16.697 (ABNT, 2018). Os laudos dos ensaios nos cimentos fornecidos pela fabricante se encontram disponíveis nos Anexos A (CP II-F) e B (CP V ARI).

Tabela 2 - Limites de composição dos cimentos utilizados nos experimentos

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto - forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F	32	RS	75–89 %	0	0	11–25 %
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	ARI		90–100 %	0	0	0–10 %

Fonte: Adaptado de ABNT (2018).

3.1.2 Filler experimental

O *filler* experimental de concha de sururu foi produzido a partir de conchas de sururu coletadas nos depósitos ao ar livre da Ilha de Deus, em Recife-PE. Esta pesquisa limitou-se somente ao uso da concha de sururu, devido a seu alto volume de produção na comunidade comparado a concha de outros bivalves, como o marisco.

A composição química das conchas de sururu foi determinada previamente por Cardoso *et al.* (2024), a qual se encontra descrita na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química das conchas de sururu da Ilha de Deus

Óxido	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	SrO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P.F.*
Porcentagem (%)	49,52	0,24	0,43	0,12	0,07	0,44	0,25	0,06	0,02	0,46	48,34

* P.F. = Perda ao fogo. Fonte: Adaptado de Cardoso *et al.* (2024).

3.2 Beneficiamento das conchas para produção do FCS

O beneficiamento das conchas seguiu as etapas descritas na literatura (Capítulo 2), adaptadas às limitações de equipamentos e materiais disponíveis, além de considerações baseadas em experiências anteriores de estudos locais (Cardoso, 2019; Pedrosa Júnior, 2022; Vasconcelos, 2022; Sá, 2024).

Após a coleta, as conchas foram submetidas a uma lavagem em água corrente para remoção de matéria orgânica e outros resíduos. Em seguida, foram secas em estufa a 105 ± 5 °C por 24 horas para eliminação da umidade residual.

A trituração foi realizada em porções de 1 kg de concha em um moinho de bolas cilíndrico (30 cm x 26 cm, volume de 15,9 l), operando a uma velocidade de 50 rotações por minuto. Para a moagem, utilizou-se esferas de porcelana de três diâmetros distintos: 3,32 kg de esferas de 35 mm, 2,16 kg de esferas de 20 mm e 3,12 kg de esferas de 13 mm. Optou-se por esta composição de esferas por ela ser utilizada com frequência na trituração de materiais no Laboratório Integrado de Materiais, Estruturas e Construção Civil – LIMEC da Universidade Federal de Pernambuco (Fernandes, 2023), onde se realizou a trituração.

O tempo de moagem necessário para obtenção do material passante na peneira de abertura de 75 μm (n.º 200) foi determinado por meio de tentativas consecutivas. Dessa forma, o tempo de moagem foi estabelecido em 8 horas, permitindo um rendimento aproximado de 75% de partículas dentro da faixa granulométrica desejada.

Após a etapa de peneiramento na peneira n.º 200, o material obtido foi o *filler* de concha de sururu (FCS), utilizado na formulação do cimento composto experimental. O fluxograma da Figura 23 apresenta um resumo das etapas de beneficiamento das conchas. Além do FCS utilizado nas misturas (não calcinado), também foi produzido pó de concha de sururu calcinado para ensaios específicos, com o objetivo de avaliar as diferenças entre os dois materiais em termos de reatividade e comportamento na hidratação do cimento. Neste caso, o pó de concha de sururu foi calcinado a 700 °C durante 1 hora, e peneirado em seguida.

Figura 23 - Etapas de beneficiamento das conchas de sururu para produção do FCS



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Preparação das amostras

Para os experimentos, foram produzidas 5 famílias de pastas de cimento: as de referência com 100% de CP II-F 32 RS e 100% CP V ARI RS, e as com os teores de substituição parcial (em massa) do CP V ARI RS por FCS em três níveis, 5%, 10% e 15%. Estes níveis foram selecionados com base nos relatos da literatura abordados no Capítulo 2. A Tabela 4 resume os tipos de amostra, sua composição e nomenclatura durante o programa experimental. Vale salientar que todas as dosagens foram feitas com teor de água/aglomerante fixo em 0,40.

Tabela 4 - Descrição das misturas realizadas para os ensaios

Mistura	Nomenclatura	CP II-F 32 RS (%)	CP V ARI RS (%)	FCS (%)	Relação água/aglomerante
1	CP II-F	100	-	0	
2	CP V ARI	-	100	0	
3	5% FCS	-	95	5	0,40
4	10% FCS	-	90	10	
5	15% FCS	-	85	15	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os ensaios, produziu-se corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm de altura e 5 de diâmetro de base para cada mistura. A moldagem ocorreu no Laboratório de Materiais de Construção da POLI/UPE, baseando-se nos procedimentos recomendados pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Os materiais foram misturados em uma cuba de aço inoxidável de um misturador mecânico, seguindo a seguinte sequência: 1 minuto de mistura em velocidade baixa (140 rpm), 30 segundos em velocidade alta (285 rpm), desligamento do misturador e limpeza das paredes da cuba e pá com espátula durante 30 segundos, repouso por 60 segundos e mistura em velocidade alta por 60 segundos. Após a mistura, as pastas foram colocadas nos moldes metálicos de paredes revestidas por desmoldante, sendo colocadas em 4 partes aproximadamente iguais, intercaladas por 30 golpes de soquete cada. Após a moldagem, as amostras passaram por cura ao ar durante 24 horas, e depois foram desmoldadas e colocadas em cura por tanque de água saturada de cal. A Figura 24 retrata os procedimentos da moldagem.

Figura 24 - Registros fotográficos do procedimento de moldagem dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Ensaios conduzidos

O *filler* de concha de sururu (FCS) foi submetido a ensaios de caracterização para determinação de suas propriedades físicas, mineralógicas, térmicas e estruturais, além de ser comparado com o pó de conchas calcinado. Já as pastas cimentícias contendo FCS foram avaliadas quanto às propriedades físico-mecânicas dos compósitos produzidos.

3.4.1 Caracterização do FCS

A caracterização do *filler* experimental foi realizada por meio dos ensaios listados na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaios conduzidos para caracterização do FCS

Ensaios	Objetivo	Local de execução
Determinação da massa específica pela NBR 16605 (ABNT, 2017)	Determinar a massa específica	Laboratório de Materiais de Construção (LMC) – POLI/UPE
Granulometria a laser	Determinar a distribuição do tamanho das partículas e quantificar a área de superfície específica	Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) - UFPE
Difração de Raios X (DRX)	Determinar as fases mineralógicas	Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) - UFPE
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	Caracterizar a morfologia das partículas	Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste - CETENE
Análise termogravimétrica	Determinar as perdas de massa do material com o aumento gradual de temperatura	Departamento de Gestão da Construção da Colorado State University (CSU) – Estados Unidos

Fonte: Elaborado pelo autor.

A determinação da massa específica do FCS foi feita a partir do método descrito pela NBR 16605 (ABNT, 2017), utilizando 60 g de material e querosene como líquido.

A distribuição granulométrica foi determinada com um granulômetro a laser Malvern Mastersizer 2000, cujo intervalo de detecção varia de 10 nm a 2000 µm. A análise foi realizada a seco, utilizando o acessório Scirocco, com três leituras para obtenção da média. A área de superfície específica foi calculada a partir da massa específica e do diâmetro médio ponderado da superfície, conforme a Equação 1.

$$\text{Área de superfície específica} = \frac{6}{\rho \times D [3,2]} \quad (1)$$

Onde: ρ é a massa específica e D [3,2] o diâmetro médio ponderado da superfície, ambos determinados no ensaio.

As análises de DRX foram realizadas pelo método do pó no equipamento Bruker D2 PHASER, operando com voltagem de 30 kV e corrente de 10 mA ($P = 300$ W), radiação $\text{Cu-K}\alpha = 1,54060$ Å e usando detector Bruker-AXS-Lynxeye. A faixa de varredura (2θ) foi de 5° a 70° , com passo do goniômetro de $0,02019^\circ$ e rotação constante da amostra de 10 rpm. A abertura da fenda primária foi de 0,4 mm, a fenda utilizada foi de 3 mm e o tempo de contagem por passo de 1,0 segundo.

O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) combinado com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) foi realizado com o equipamento MIRA da TESCAN (4ª geração), com uma fonte de emissão de elétrons da FEG *Schottky*. Foram utilizados como detectores os elétrons secundários em uma atmosfera de alto vácuo, e uma fita de carbono foi empregada como meio condutor. Antes do ensaio, a amostra de FCS foi preparada pela técnica de metalização (*sputtering*) com pó de ouro durante 10 minutos, formando uma camada de deposição de 15 nm.

A análise termogravimétrica (TGA) do FCS e do pó de concha de sururu calcinado foi realizada com um analisador Q500 (TA Instruments), sob atmosfera de nitrogênio, aquecido de 50 a 900 °C a uma taxa de 20 °C/min. Amostras de aproximadamente 10 mg de cada material foram analisadas.

3.4.2 Calorimetria isotérmica

Para avaliar como o FCS e do pó calcinado interagem na hidratação do cimento, conduziu-se o ensaio de calorimetria isotérmica em pastas cimentícias com substituição do cimento Portland comum (OPC) nos teores de 5%, 10%, 15% e 20% (em massa). O teor a/c adotado foi de 0,40. O ensaio foi realizado com um calorímetro isotérmico TAM Air (TA Instruments) no Departamento de Gestão da Construção da CSU (Fort Collins, Colorado, EUA). As amostras foram misturadas manualmente por 4 minutos, colocadas em ampolas de vidro seladas e inseridas na câmara do calorímetro mantida a $23 \pm 0,05$ °C por 10 dias.

3.4.3 Reatividade pelo teste modificado de R³

A reatividade do FCS e do pó calcinado foi avaliada pelo teste modificado de R³ (do inglês *Rapid, Relevant, and Reliable*), conforme descrito por Shakouri *et al.* (2023). Inicialmente, uma parte do pó de concha (calcinado e não calcinado) foi misturada com três partes de Ca(OH)₂ de grau reagente (em massa). Essa mistura foi combinada com uma solução de 0,5 M KOH na proporção líquido-sólido de 0,9 (em massa). Após mistura manual por 4 minutos, a pasta foi transferida para uma ampola de vidro selada e armazenada em um calorímetro isotérmico TAM Air (TA Instruments) por 10 dias a 50 ± 0,05 °C para medição da liberação de calor.

Após esse período, foi realizada uma nova análise termogravimétrica (TGA) utilizando um equipamento Q500 (TA Instruments) em amostras de aproximadamente 20 mg da pasta. O ensaio foi conduzido de 23 °C até 500 °C sob atmosfera de nitrogênio, com taxa de aquecimento de 20 °C/min. A quantidade de hidróxido de cálcio consumido foi determinada pela perda de massa entre 350 e 500 °C, usando o método tangencial. Os dados foram analisados no software TRIOS® (TA Instruments).

3.5 Ensaio conduzidos nas pastas de cimento

Os ensaios conduzidos nas pastas nos estados fresco e endurecido são descritos no Quadro 4.

Quadro 4 - Ensaio conduzidos nas pastas de cimento

Estado	Ensaio	Método	Tempo de cura	Nº de amostras
Fresco	Abatimento por mini cone	Kantro (1980)	Estado plástico	5 (1 por teor)
Endurecido	Resistência à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)	1, 7 e 28 dias	45 (3 por teor e por tempo de cura)
	Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2011)	28 dias	10 (2 por teor)
	Absorção de água por imersão	NBR 9778 (ABNT, 2005)	28 dias	5 (1 por teor)
	Velocidade de propagação de onda ultrassônica	NBR 8802 (ABNT, 2013)	28 dias	5 (1 por teor)
	Análise termogravimétrica	-	28 dias	5 (1 por teor)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.1 Abatimento por mini cone

No estado fresco, realizou-se o ensaio de abatimento com mini cone para analisar a consistências das pastas. O ensaio ocorreu no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) da UFPE, conforme o procedimento descrito por Kantro (1980). A mistura dos materiais foi realizada em um béquer por meio de um agitador de hélice IKA RW 20 digital com velocidade de rotação constante de 1.600 rpm. O procedimento foi realizado com 200 g de aglomerante e 80 g de água na seguinte sequência: mistura manual com espátula por 1 minuto, mistura no agitador elétrico por 2 minutos, mistura manual por 15 segundos, colocação da pasta dentro do mini cone suportado pela placa de vidro seguida de 10 batidas no topo do cone, e levantamento do mini cone para medida de três diâmetros da pasta espalhada. As leituras são referentes aos diâmetros imediatamente após o procedimento de mistura.

3.5.2 Resistência à compressão e à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à compressão foi conduzido no laboratório LIMEC-UFPE utilizando a máquina servo controlada Shimadzu modelo AGS_X de 300 kN, a uma velocidade de deformação axial de 0,25 MPa/s (Figura 25). Foram ensaiadas 3 amostras de cada família para 1, 7 e 28 dias de cura. Antes do ensaio, as amostras passaram por capeamento mecanizado do topo e base.

Figura 25 - Equipamento para realização dos ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi conduzido no mesmo equipamento a uma velocidade de 0,05 MPa/s. Foram utilizadas 2 amostras de cada família com 28 dias de cura para o ensaio. Para suporte dos corpos de prova durante o ensaio, utilizou-se duas tiras de madeira em conformidade com as dimensões recomendadas pela NBR 7222 (ABNT, 2011), sendo substituídas a cada corpo de prova ensaiado. As resistências à tração foram obtidas por meio da fórmula descrita na Equação 2, conforme orienta a NBR 7222.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d l} \quad (2)$$

Onde: $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa; F é a força máxima obtida, em newtons (N); d é o diâmetro do corpo de prova, em mm; e l é o comprimento do corpo de prova, em mm.

3.5.3 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado no laboratório LMC da POLI/UPE. Após 28 dias de cura, os corpos de prova foram secos a 105 ± 5 °C por 72 horas para medir a massa seca. Em seguida, foram colocados em tanque de água por 72 horas para atingir a condição saturada e aferir a nova massa. Ainda saturados, sua massa foi medida com balança hidrostática enquanto imersos, no LIMEC-UFPE, determinando a massa saturada imersa. A partir destes dados, calculou-se a absorção conforme a Equação 3 e a massa específica real das amostras conforme a Equação 4.

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

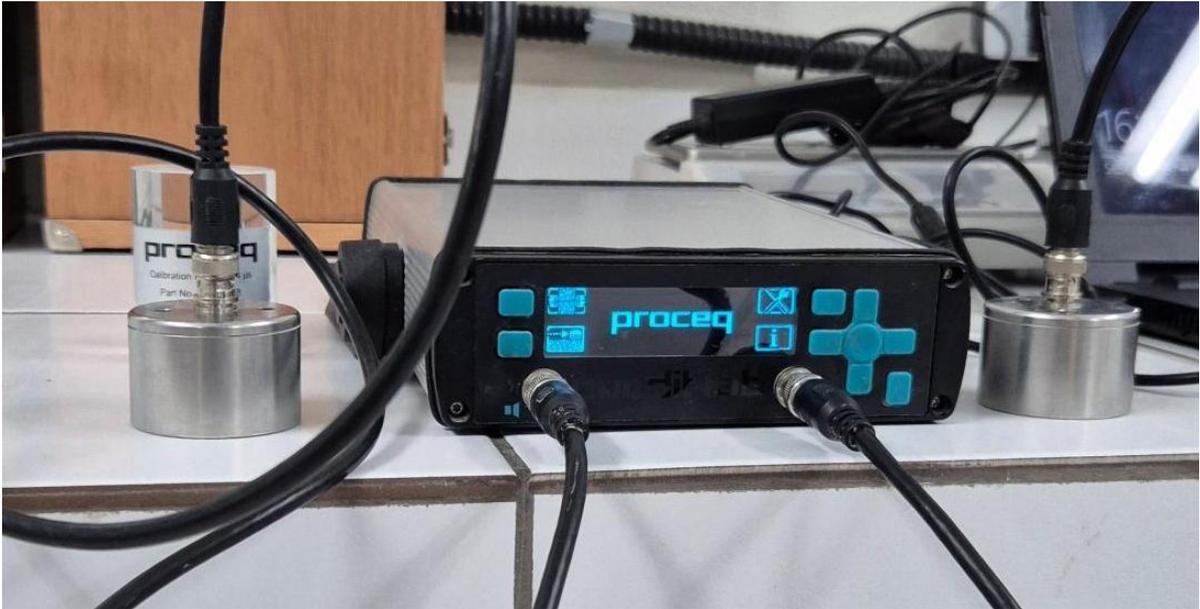
$$\text{Massa específica real} = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (4)$$

Onde: m_{sat} é a massa da amostra saturada; m_s é a massa após secagem em estufa; e m_i é a massa da amostra saturada imersa em água.

3.5.4 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

A velocidade de propagação de onda ultrassônica (UPV) é um parâmetro bastante correlacionado a algumas propriedades dos compósitos cimentícios, como resistência à compressão e parâmetros relacionados à durabilidade, como porosidade e permeabilidade (Lafhaj *et al.*, 2006; Ridengaoqier *et al.*, 2021). Neste estudo, realizou-se o ensaio de UPV das amostras com 28 dias de cura para verificar indiretamente a porosidade dos corpos de prova nesta idade. Também se verificou a correlação entre o UPV e outras propriedades das amostras. O ensaio foi realizado no LabTag (UFPE) com as amostras secas em estufa por 48 horas. Utilizou-se o equipamento Proceq, modelo Pundit Lab, com transmissão do pulso ultrassônico na frequência 54 kHz e largura de 9,3 μ s (Figura 26). A onda foi transmitida longitudinalmente nas amostras, descrito como transmissão direta na NBR 8802 (ABNT, 2013). Nas interfaces entre os transdutores e o corpo de prova, utilizou-se gel para retirar ar e melhorar a precisão da emissão e detecção da onda ultrassônica.

Figura 26 - Equipamento para o ensaio de UPV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram realizadas três leituras para cada corpo de prova, calculando-se o tempo de propagação da onda entre o transdutor-emissor e o transdutor receptor. Com o tempo da propagação da onda e os comprimentos dos corpos de prova aferidos, calculou-se a velocidade de propagação da onda, em metros por segundo.

3.5.5 Análise termogravimétrica das pastas

As curvas de Análise Termogravimétrica e Termogravimétrica (ATD-TG) foram obtidas simultaneamente utilizando o equipamento Shimadzu DTG – 60H (Figura 27). As medidas foram obtidas com aproximadamente 40 mg das amostras trituradas manualmente em pistilo e almofariz após os 28 dias de cura. O ensaio foi realizado em atmosfera de nitrogênio (N₂) com fluxo constante de 50 ml/min, utilizando uma taxa de aquecimento de 15 °C/min até a temperatura máxima de 1050 °C. A alumina calcinada foi utilizada como amostra de referência.

Figura 27 - Equipamento usado para a análise termogravimétrica das pastas



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Correlação entre as propriedades

Com os ensaios realizados, foi executado o teste de correlação para avaliar a relação entre as propriedades obtidas. As análises foram feitas no software OriginPro 2025, versão 10.2.0.188.

O teste de correlação de Pearson foi utilizado por ser o mais comum, onde pode ser verificado o coeficiente de correlação (r) entre os pares de variáveis (propriedades). Os valores foram apresentados entre 1 e -1, onde quanto mais próximo do 1 (positivo ou negativo), maior a correlação e quanto mais próximo de 0, menor a correlação entre as variáveis (Vilela; Mascia, 2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados do programa experimental, incluindo os ensaios de caracterização do FCS e os ensaios com pastas de referência e com teores de FCS. Ao final, discute-se a correlação entre as propriedades e os resultados como um todo.

4.1 Caracterização do FCS

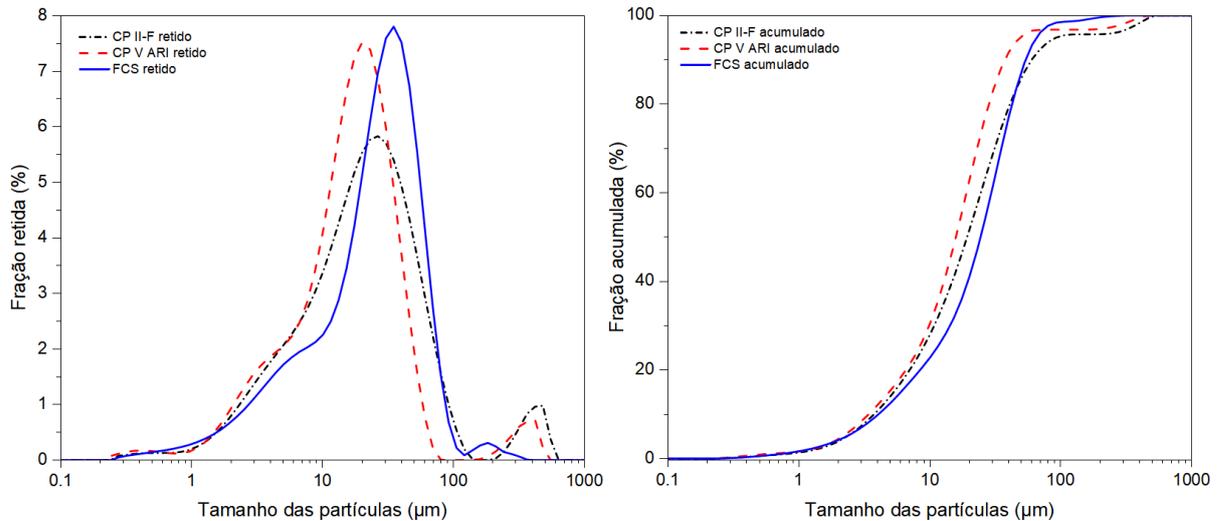
Nas subseções seguintes, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados nos ensaios com o FCS.

4.1.1 Massa específica e tamanho das partículas

Pelo método de La Chatelier descrito na NBR 16605 (ABNT, 2017), determinou-se que a massa específica do FCS é $2,61 \text{ g/cm}^3$. Esse valor é consistente com outros experimentos envolvendo conchas marinhas, onde o maior valor registrado foi de $2,86 \text{ g/cm}^3$ no estudo de Maglad *et al.* (2023) com pó de concha de mexilhão, e o menor valor registrado foi de $2,08 \text{ g/cm}^3$ no estudo de Umoh *et al.* (2013) com concha de caracol marinho.

A partir do ensaio de granulometria a laser, foi possível determinar a distribuição granulométrica das partículas dos cimentos utilizados e do FCS. As curvas de distribuição são apresentadas na Figura 28, enquanto a Tabela 6 apresenta os diâmetros notáveis e da área de superfície específica dos materiais. Os diâmetros notáveis fornecem uma visão detalhada da distribuição granulométrica dos materiais, sendo o D10 o diâmetro abaixo do qual 10% das partículas estão presentes, o D50 (diâmetro médio) correspondente a 50%, e o D90 representando 90%.

Figura 28 - Curvas de distribuição granulométrica dos materiais empregados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Diâmetros notáveis das partículas e área de superfície específica

Material	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Área de superfície específica (cm ² /g)
CP II-F	4,93	25,29	78,64	5710
CP V ARI	4,48	20,73	49,06	6620
FCS	5,33	32,04	70,65	5340

Fonte: Elaborado pelo autor.

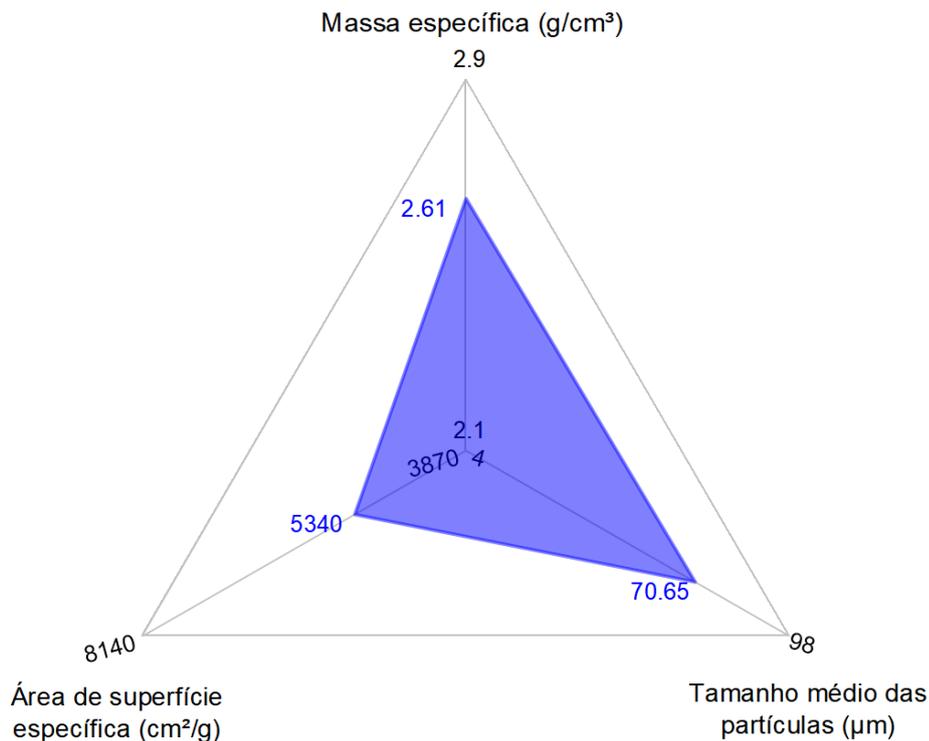
Com base nestas características das partículas, é possível ver que o CP II-F apresentou os maiores valores de D10, D50 e D90 (4,93 µm, 25,29 µm e 78,64 µm, respectivamente), indicando uma distribuição granulométrica composta por partículas maiores em comparação aos outros materiais.

Por sua vez, o CP V ARI apresentou os menores valores de D10, D50 e D90 (4,48 µm, 20,73 µm e 49,06 µm, respectivamente), evidenciando uma granulometria mais fina. Isso é confirmado por sua maior área de superfície específica (6620 cm²/g), que favorece maior reatividade química devido ao aumento da área de contato entre as partículas e os agentes químicos presentes na mistura. Estas características condizem com as propriedades esperadas para o CP V ARI, cuja formulação é voltada para o desenvolvimento de altas resistências iniciais em um curto período de cura. No entanto, a maior área de superfície específica também contribui para uma maior demanda de água, o que impacta a trabalhabilidade do compósito produzido com este cimento.

O FCS exibiu características granulométricas intermediárias em relação aos dois cimentos. Seus valores de D10, D50 e D90 (5,33 μm , 32,04 μm e 70,65 μm , respectivamente) indicam partículas ligeiramente maiores que as do CP V ARI, mas mais finas que as do CP II-F. A área de superfície específica do FCS (5340 cm^2/g), por sua vez, chega a ser menor que a do CP II-F. Ao formular misturas binárias do cimento CP V ARI com o FCS, a área de superfície específica do aglomerante tende a diminuir, impactando na trabalhabilidade do compósito.

A Figura 29 ilustra graficamente onde se encontra o FCS em relação aos outros pós de concha relatados na literatura, conforme apresentado no Capítulo 2. Os eixos que vão do centro às arestas do triângulo representam a escala de cada característica, com os valores mínimos e máximos reportados. Para a área de superfície específica, utilizou-se aquela determinada pelo método Blaine.

Figura 29 - Propriedades físicas do FCS em relação às relatadas na literatura



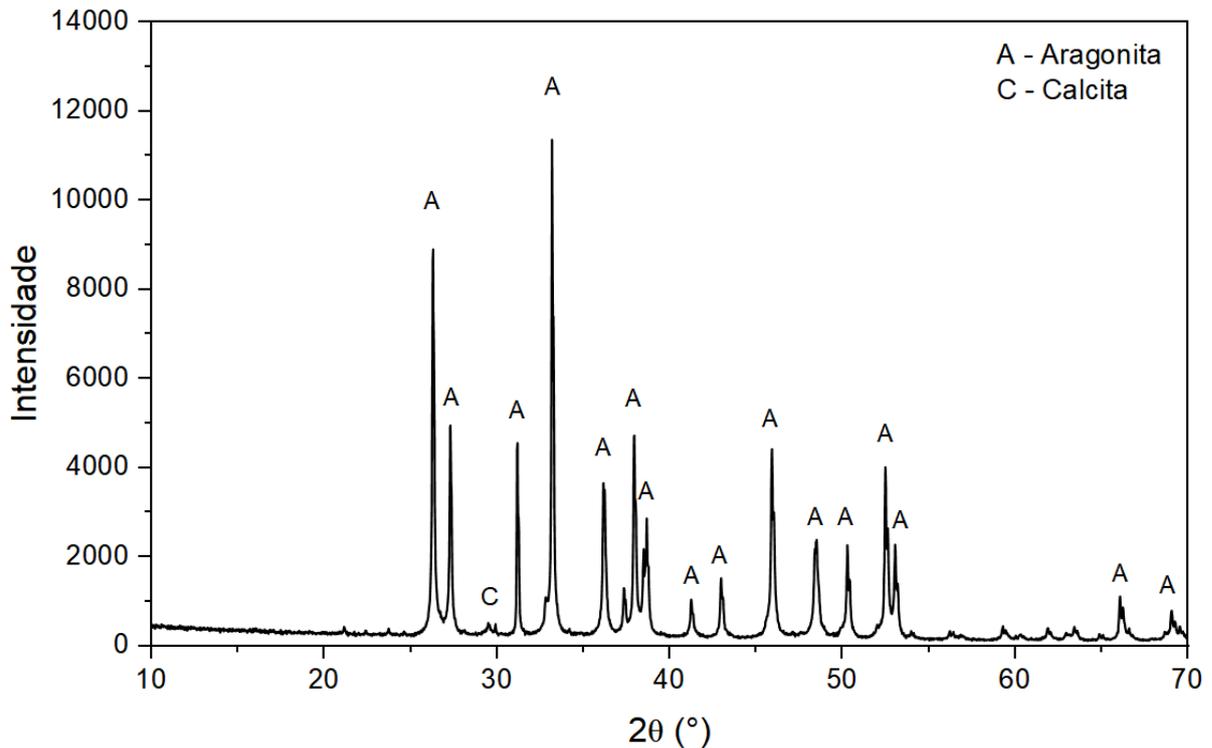
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como evidenciado, as propriedades físicas do FCS se encontram entre as relatadas na literatura, com a massa específica e dimensão média das partículas um pouco maiores que a média e a área de superfície específica um pouco abaixo.

4.1.2 Análise mineralógica e morfológica do FCS

Os resultados da análise de DRX do FCS se encontram no gráfico da Figura 30.

Figura 30 - Difratoograma do FCS

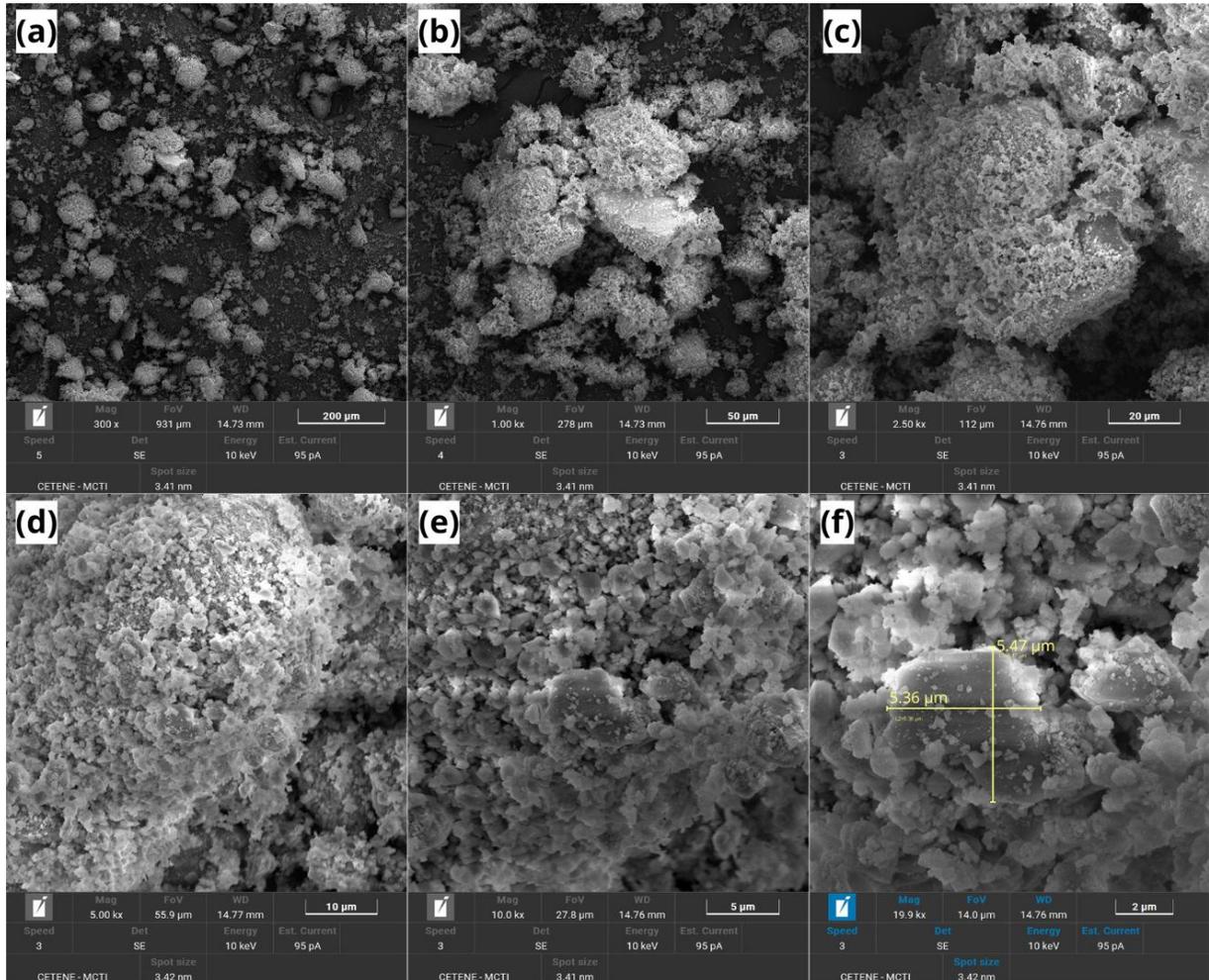


Fonte: Elaborado pelo autor.

O difratograma confirma que a estrutura mineralógica do pó de concha de sururu é composta majoritariamente pela fase aragonita do CaCO_3 , assim como visto nas conchas marinhas de outras espécies de moluscos bivalves (Alla; Sankar, 2023; Hay; Peng; Celik, 2023; Wang; Liu, 2020; Wang; Liu; Li, 2019). Além disso, os picos acentuados e a falta da presença de halos no difratograma confirmam que o FCS possui mineralogia cristalina (Medeiros *et al.*, 2017), reforçando a tendência de baixa reatividade em misturas cimentícias.

Em relação à morfologia, a Figura 31 apresenta as imagens obtidas por meio de microscopia de varredura eletrônica em diferentes escalas.

Figura 31 - Microestrutura do FCS em diferentes ampliações de MEV

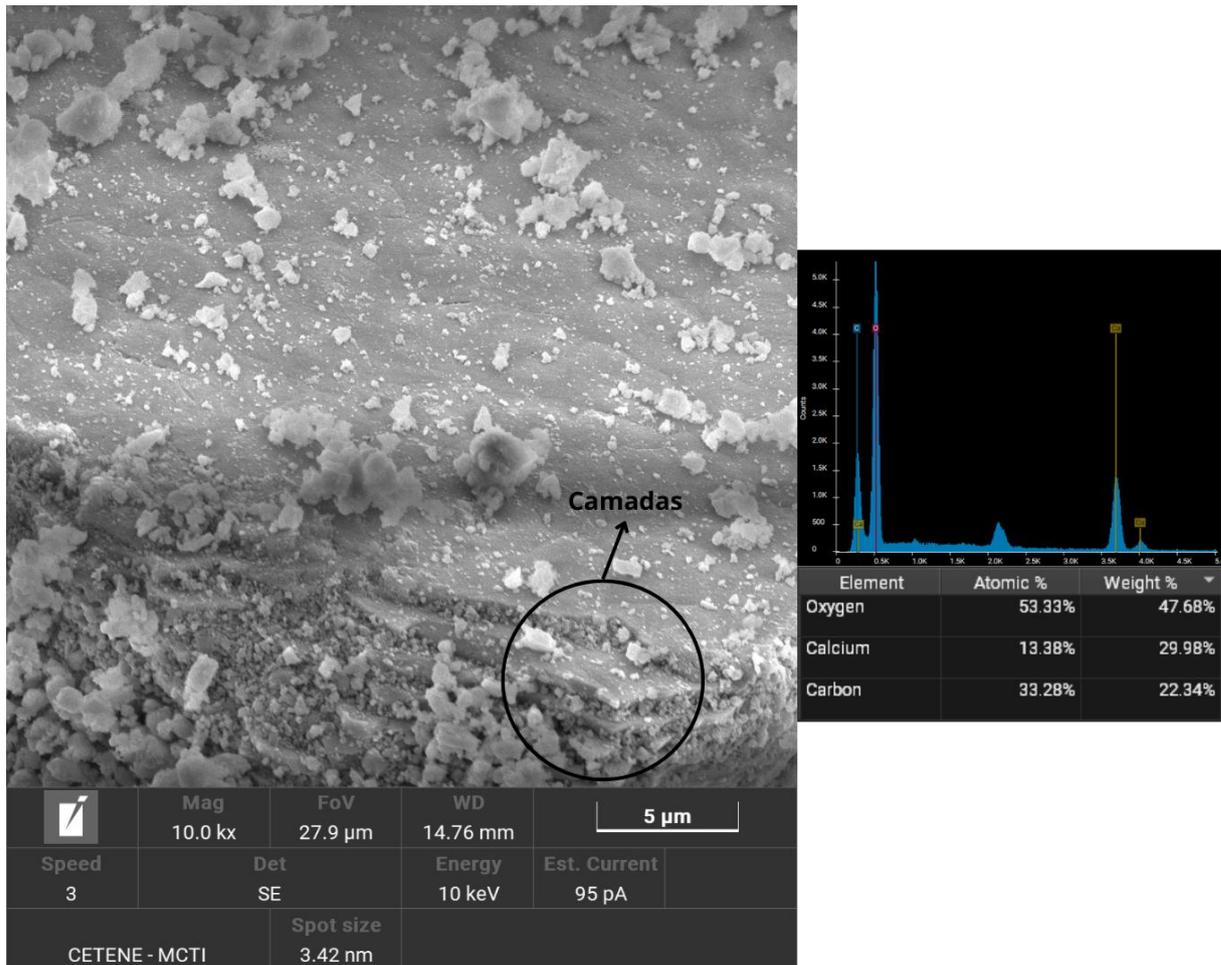


(a): Zoom de 300x; (b): Zoom de 1.000x; (c) Zoom de 2.500x; (d): Zoom de 5.000x; (e) Zoom de 10.000x; (f) Zoom de 19.900x. Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio das imagens, observa-se que as partículas de FCS apresentam uma morfologia irregular. O *filler* experimental exibe partículas em forma de flocos, semelhantes às de pó de concha de caracol marinho dos experimentos de Ragav *et al.* (2021), mas com algumas superfícies visualmente mais lisas do que as partículas de pó de concha observadas por Wang, Liu e Li (2019). A presença dessas superfícies mais lisas resulta em uma diminuição da área de superfície específica do material, justificando o valor intermediário dessa propriedade em relação aos valores reportados na literatura.

Na Figura 32 se encontram os resultados da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da amostra de FCS.

Figura 32 - Espectroscopia por energia dispersiva do FCS



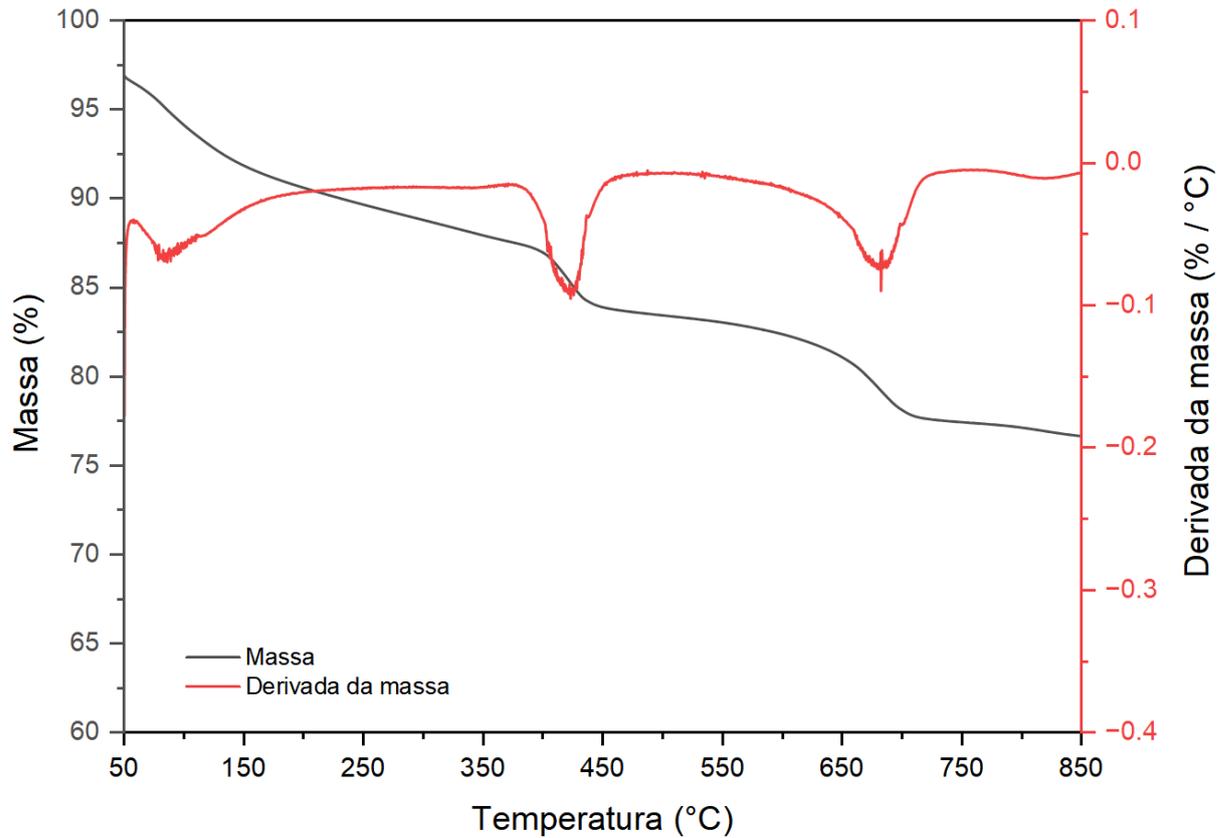
Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise por EDS confirma a predominância dos elementos O, C e Ca no FCS, evidenciando sua composição majoritariamente de CaCO_3 . Além disso, na região analisada, observa-se uma partícula maior do pó de concha com uma estrutura em camadas, sugerindo que, durante a trituração, as partículas menores se desprendem dessas camadas superficiais, resultando no formato característico em flocos.

4.1.3 Análise termogravimétrica do pó de concha de sururu

A partir do ensaio de TGA foi possível determinar a curva termogravimétrica e a curva derivada para o pó de conchas não calcinadas, como apresenta a Figura 33.

Figura 33 - Análise termogravimétrica do FCS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a curva derivada, fica evidenciado três picos de perda de massa que podem ser associados a processos conhecidos na literatura, conforme sumarizam Deboucha *et al.* (2017). O primeiro, em cerca de 86 °C, pode ser associado à perda da água livre e/ou intramelar do material, que pode ocorrer entre 25 e 400 °C.

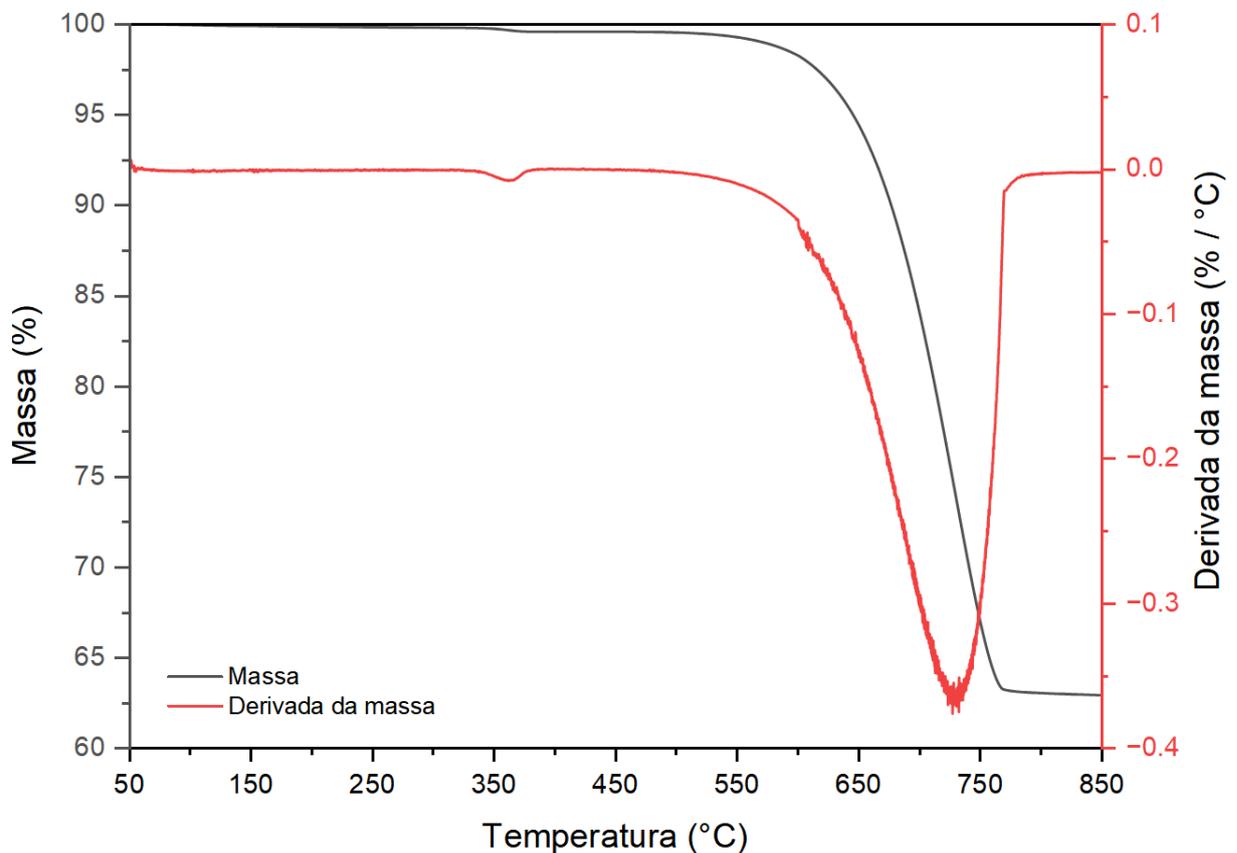
O segundo pico de perda de massa, observado por volta dos 430 °C, está relacionado à possível decomposição da quitina, um biopolímero comumente presente em conchas de moluscos e em crustáceos. Segundo Karthick Rajan *et al.* (2024), as temperaturas máximas para a degradação da quitina e da quitosana (substância derivada da quitina) em diferentes conchas de moluscos variam entre 380 °C e 444 °C, faixa na qual se encontra o segundo pico observado no FCS. Isso reforça a presença de quitina na concha de sururu, cuja queima também contribui para a elevada perda ao fogo registrada no material.

O terceiro pico de perda de massa ocorre por volta de 682 °C, tipicamente associado ao processo de descarbonatação e liberação de CO₂, que se dá entre 600 e 1100 °C (Deboucha *et al.*, 2017).

As faixas de perda de massa encontradas se assemelham às observadas no pó de concha não calcinado do estudo de Wang, Liu e Li (2019).

Em comparação, a Figura 34 apresenta as curvas para o pó calcinado da concha de sururu. O pico mais notável é observado a cerca de 723 °C, semelhantemente ao pico em 740 °C do pó da concha de ostra estudado por Seo *et al.* (2019). Os outros picos observados no TGA do FCS não se repetem nessa ocasião, uma vez que o pó já passou pelo processo de perda de água intramelar e queima da quitina durante sua calcinação.

Figura 34 - Análise termogravimétrica do pó de concha de sururu calcinado



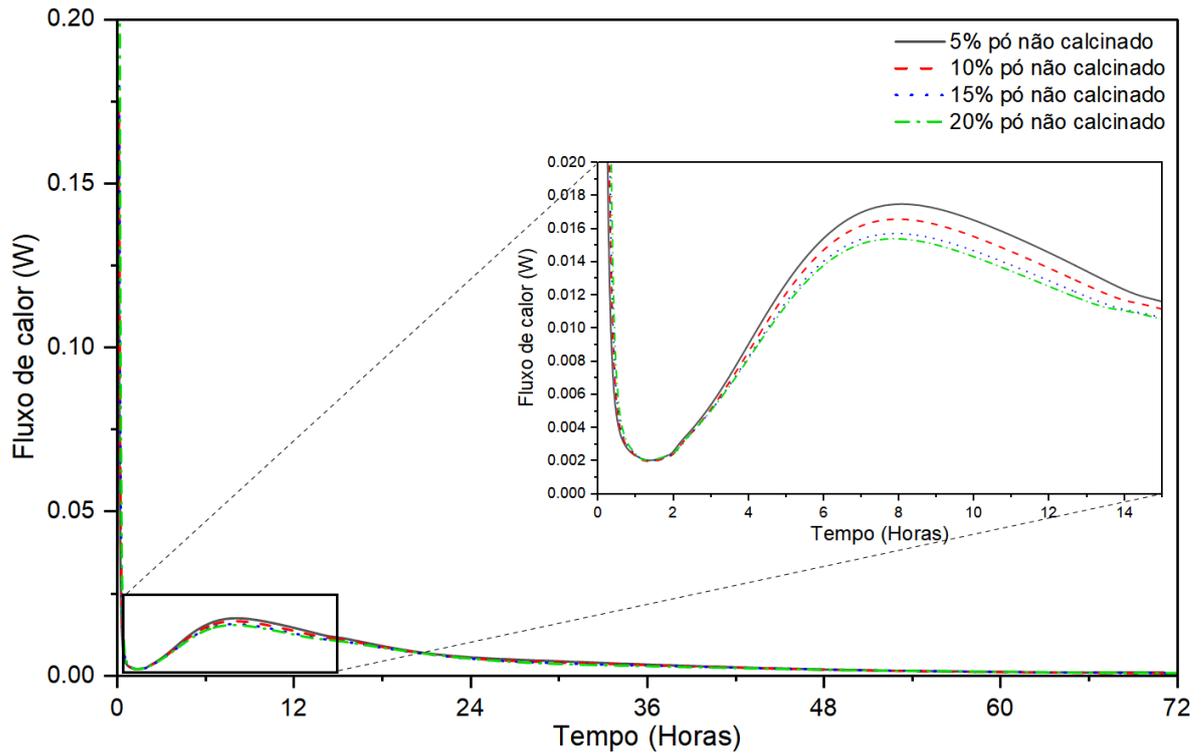
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Calor de hidratação das pastas com pó de concha de sururu

Para os resultados aqui apresentados, considerou-se a taxa de fluxo de calor e o calor total de hidratação com base no peso total do aglutinante misturado (OPC mais pó de concha).

O gráfico da Figura 35 apresenta a evolução do fluxo de calor na pasta de cimento com os diferentes percentuais de FCS. Como demonstrado, o aumento no teor de concha não calcinada tende a reduzir o pico de fluxo de calor característico do período aceleratório, que ocorreu por volta das 8h de hidratação para todas as misturas.

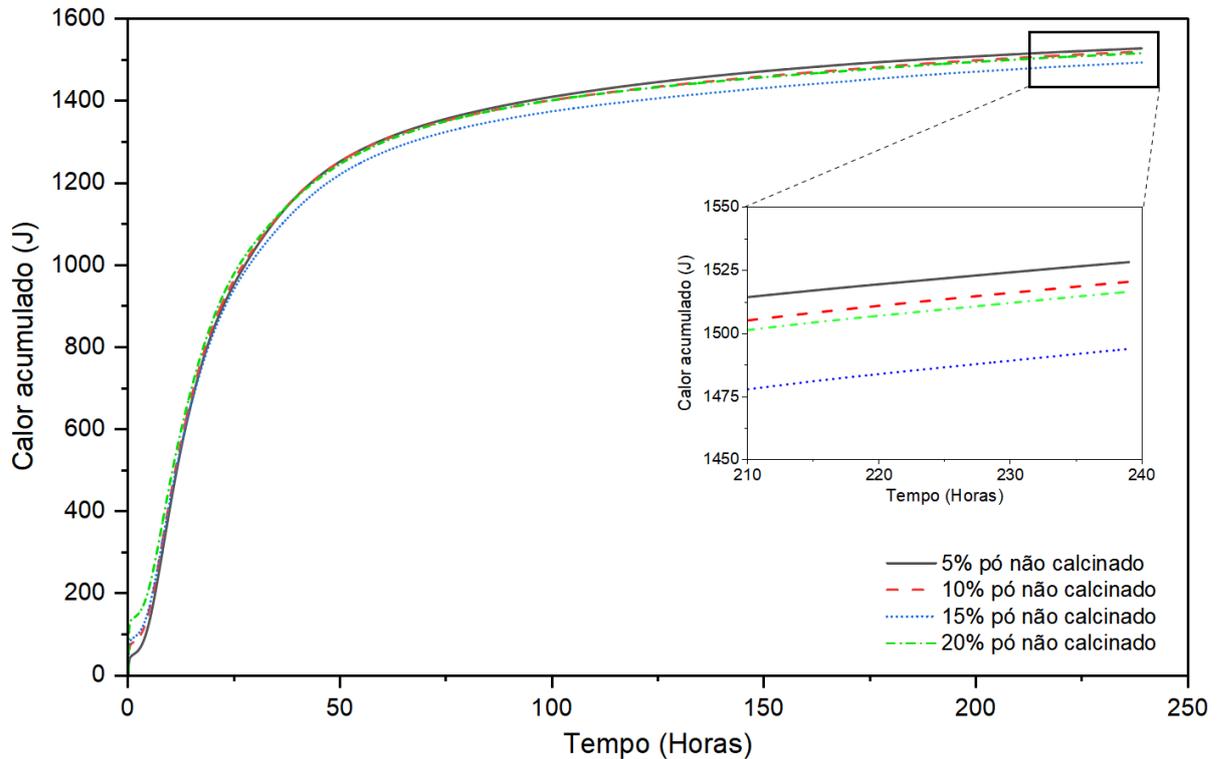
Figura 35 - Fluxo de calor de hidratação das pastas com pó de concha não calcinado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na reação inicial, observou-se que, quanto maior o teor de FCS na mistura, maior o fluxo de calor. Até o teor de 15%, as diferenças de fluxo de calor foram pequenas. Já no teor de 20%, foi observado até três vezes mais fluxo de calor quando comparado com a mistura de 5%. A Figura 36 apresenta o calor total acumulado das misturas de OPC e FCS, onde é possível verificar a diminuição do calor de hidratação à medida que mais pó é introduzido.

Figura 36 - Calor de hidratação acumulado das pastas com FCS

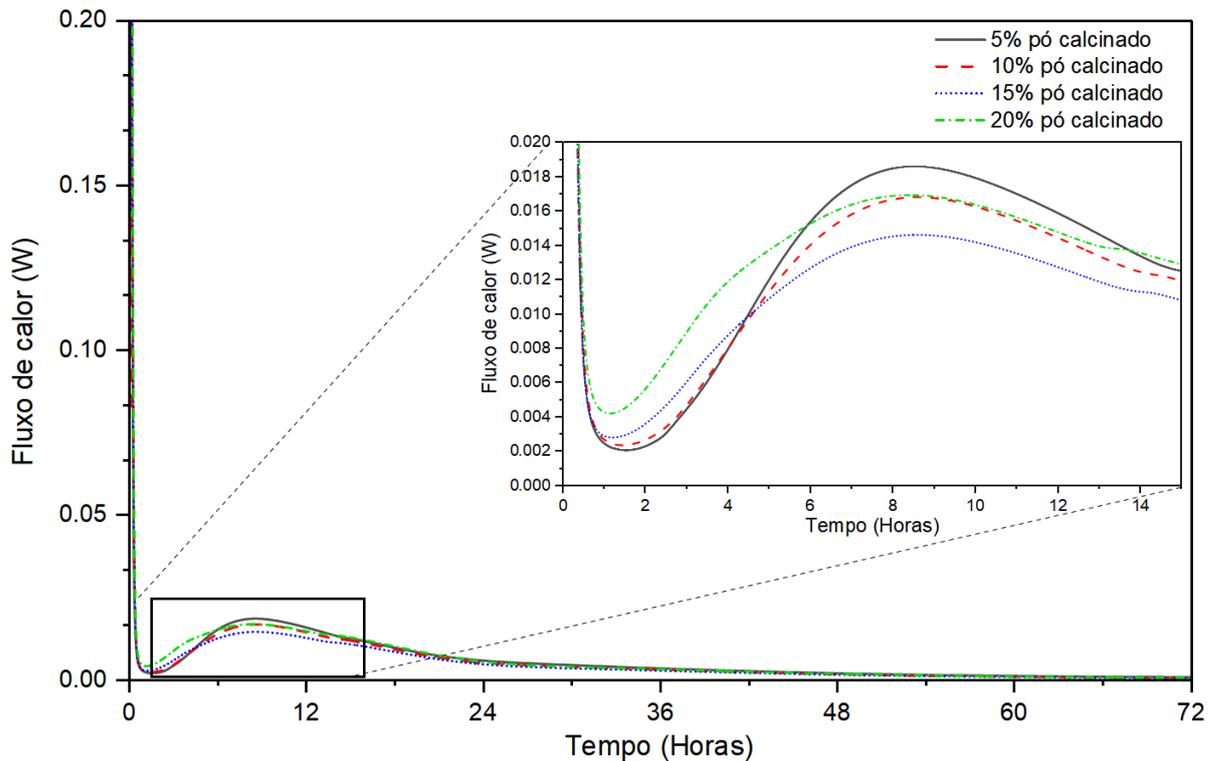


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em comparação com os estudos analisados na RSL do Capítulo 2, os resultados são semelhantes aos relatados por Wang e Lui (2020), que utilizaram conchas marinhas não calcinadas (espécie não especificada) como *filler* em misturas de cimento. Os autores demonstraram a redução no calor de hidratação relacionada ao aumento do teor de conchas, que foi atribuído à redução da quantidade de cimento disponível e aumento do teor *a/c* efetivo nas pastas.

A Figura 37 traz os resultados do calor de hidratação das pastas com o pó da concha de sururu calcinada, evidenciando as diferenças no processo de hidratação em relação ao FCS.

Figura 37 - Evolução do calor de hidratação das pastas com o pó de concha calcinado



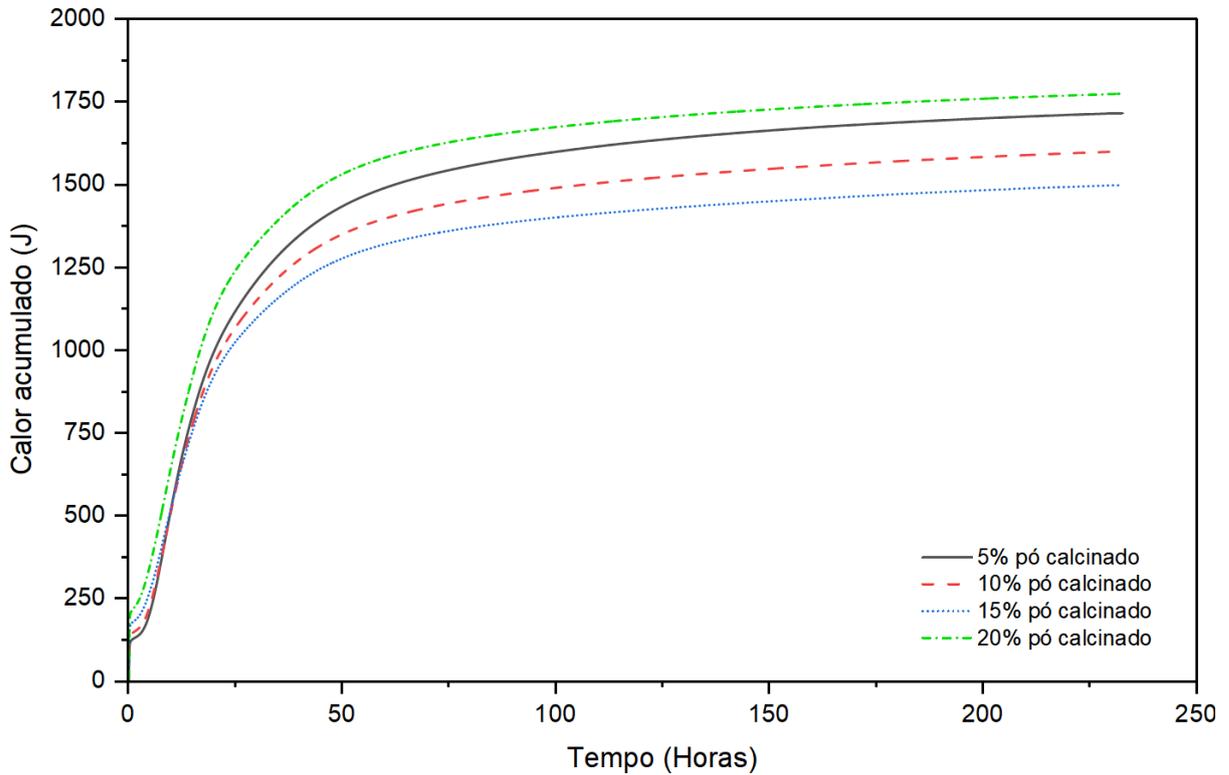
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como nas pastas com FCS, as misturas com o pó de concha calcinado apresentaram um aumento no fluxo de calor na reação inicial com o aumento no teor de substituição. No entanto, os valores observados foram maiores, com até 0,51 W para as conchas calcinadas e 0,32 W para o FCS no teor de 20% de substituição. Isso ocorre devido à dissolução do CaO gerado na calcinação e a formação de Ca(OH)_2 , que libera mais calor que o CaCO_3 da concha não calcinada (Seo *et al.*, 2019).

No período indutório, o aumento no teor de substituição aumentou o fluxo de calor. No período aceleratório, houve aceleração nas reações e menores picos de hidratação nas pastas com mais conchas. O teor de 15% resultou em um pico menor, enquanto os teores de 10% e 20% tiveram picos semelhantes. O teor de 5% apresentou o maior pico.

A Figura 38 apresenta os valores de calor de hidratação acumulados para as pastas com pó de concha calcinado. Observou-se um maior desenvolvimento de calor de hidratação na pasta com 20% de substituição, possivelmente devido à liberação de calor pela hidratação do CaO da concha calcinada na reação inicial.

Figura 38 - Calor de hidratação acumulado das pastas com o pó de concha calcinado

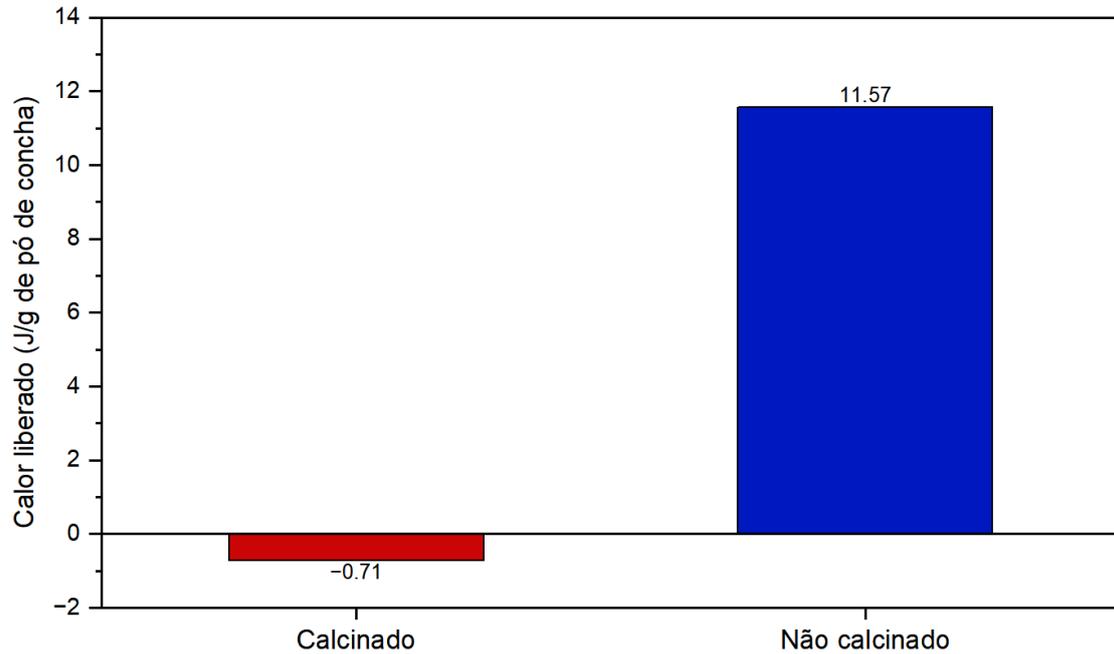


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Reatividade do pó da concha de sururu

Com o ensaio de R³ modificado, determinou-se a liberação de calor de hidratação associado ao consumo do hidróxido de cálcio da mistura preparada, que pode ser comparada a outros materiais cimentícios suplementares para verificar o grau de reatividade do pó de concha de sururu. A Figura 39 apresenta os valores do calor liberado por grama de pó, tanto calcinado como não calcinado.

Figura 39 - Valores de liberação de calor obtidos no teste R³ modificado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como é possível verificar, ambos os pós apresentaram baixo fluxo de calor liberado, diferentemente do que se espera de materiais com reatividade relevante para a matriz cimentícia. Tomando como referência a cinza volante utilizada no experimento de Shakouri *et al.* (2023), o calor liberado foi de 285,97 J/g MCS, enquanto outros MCS produzidos com cinzas de aterros sanitários apresentaram valores de 113,92 a 359,22 J/g MCS. Portanto, tanto o FCS quanto o pó de concha de sururu calcinado podem ser considerados materiais inertes.

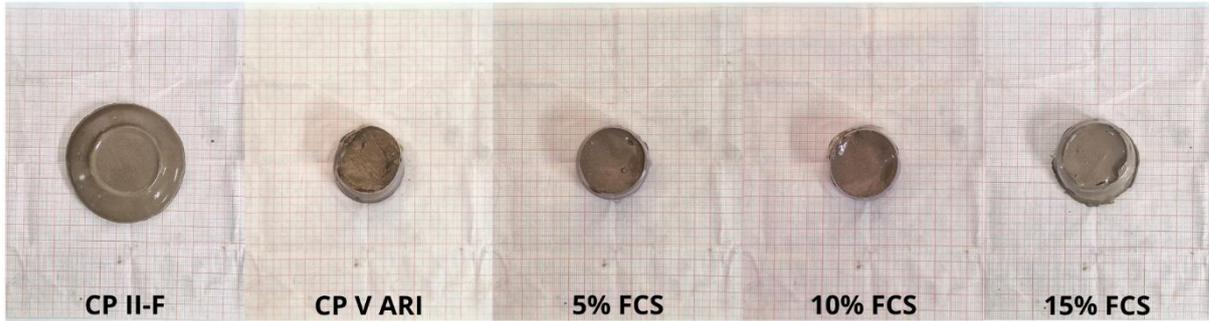
4.4 Propriedades mecânicas das pastas contendo FCS

Nos tópicos a seguir, são apresentados os resultados dos ensaios para avaliação das propriedades físico-mecânicas das pastas de cimento com diferentes teores do *filler* experimental.

4.4.1 Consistência

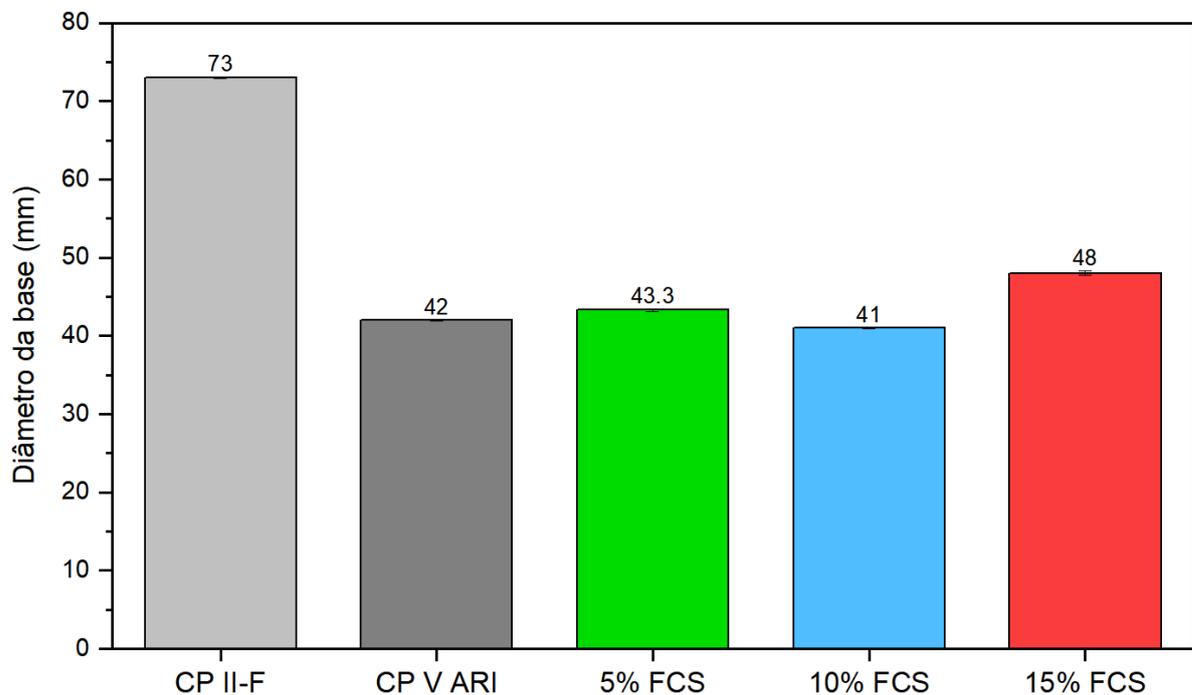
A partir da condução do ensaio de abatimento com mini cone, determinou-se a consistência das pastas por meio do diâmetro médio da base. Os registros fotográficos do abatimento de cada pasta são apresentados na Figura 40, enquanto os valores médios do diâmetro das bases são apresentados na Figura 41.

Figura 40 - Registros fotográficos do abatimento das pastas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 - Consistência das pastas pelo ensaio de abatimento por mini cone



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados do ensaio de consistência mostram que as pastas com CP II-F apresentaram o maior diâmetro médio de abatimento no mini cone (73 mm), evidenciando uma fluidez superior em relação às outras misturas. Em parte, esse comportamento pode ser atribuído à menor área de superfície específica do CP II-F (5710 cm²/g), o que reduz a demanda de água necessária para revestir as partículas e melhora a trabalhabilidade da pasta. Além disso, o *filler* calcário presente no CP II-F não possui propriedades cimentícias ou pozolânicas, promovendo um efeito de diluição que resulta em maior disponibilidade de água na mistura (Wang *et al.*, 2018). Esse efeito também contribui para reduzir a aglomeração das partículas de cimento, favorecendo a dispersão e aumentando a fluidez da pasta (Han; Lin; Wang, 2022b).

Por outro lado, as pastas produzidas com o cimento CP V ARI apresentaram menor diâmetro médio (42 mm), indicando maior viscosidade. Este resultado está alinhado com o fato de o CP V ARI possuir uma área de superfície específica mais elevada (6620 cm²/g), aumentando a demanda por água devido à maior interação das partículas cimentícias com o meio aquoso.

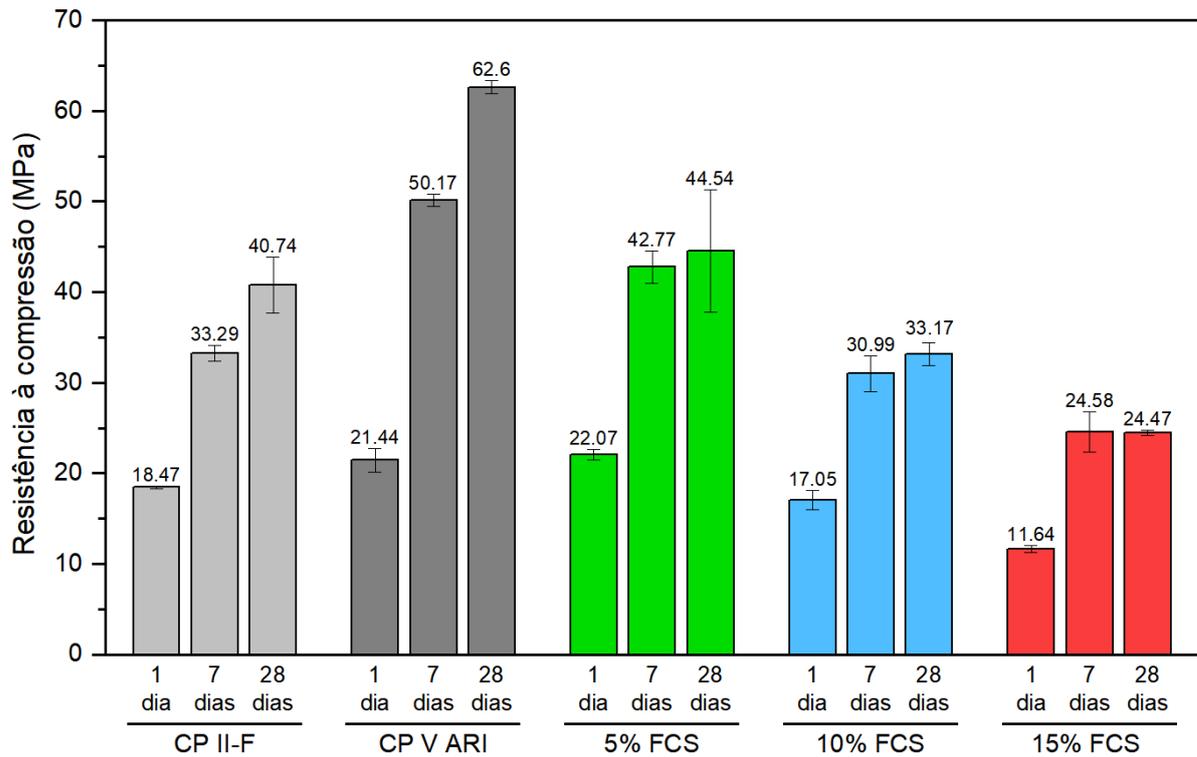
Nas pastas com substituições parciais de cimento por FCS, a área de superfície específica do FCS (5340 cm²/g) teve um papel relevante. As substituições apresentaram uma tendência de aumento na consistência das pastas, com exceção da dosagem de 10% de FCS, que apresentou o menor diâmetro médio (41 mm).

Em contraste, para as dosagens de 5% e 15% de FCS, os diâmetros médios de 43,3 mm e 48 mm, respectivamente, sugerem que a adição de FCS contribuiu para maior fluidez. Este comportamento está ligado a diminuição da área de superfície específica do aglomerante, uma vez que a do FCS é menor que a do cimento CP V ARI puro. Além disso, assim como o *filler* calcário promove o efeito de diluição na hidratação do CP II-F, o aumento da fluidez proporcionado pelo FCS reforça esse efeito nas pastas que contêm o *filler* experimental, visto que ambos os materiais são inertes. Ainda assim, a fluidez não foi tão expressiva quanto a observada para o CP II-F, possivelmente devido à maior área de superfície específica do CP V ARI, que aumenta a demanda por água na mistura.

4.4.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi conduzido após 1, 7 e 28 dias de cura, permitindo analisar a evolução desta propriedade mecânica para as diferentes composições estudadas. A Figura 42 apresenta os resultados médios obtidos, baseados nos ensaios realizados com três corpos de prova para cada dosagem e idade de cura.

Figura 42 - Resistência à compressão em diferentes idades de cura



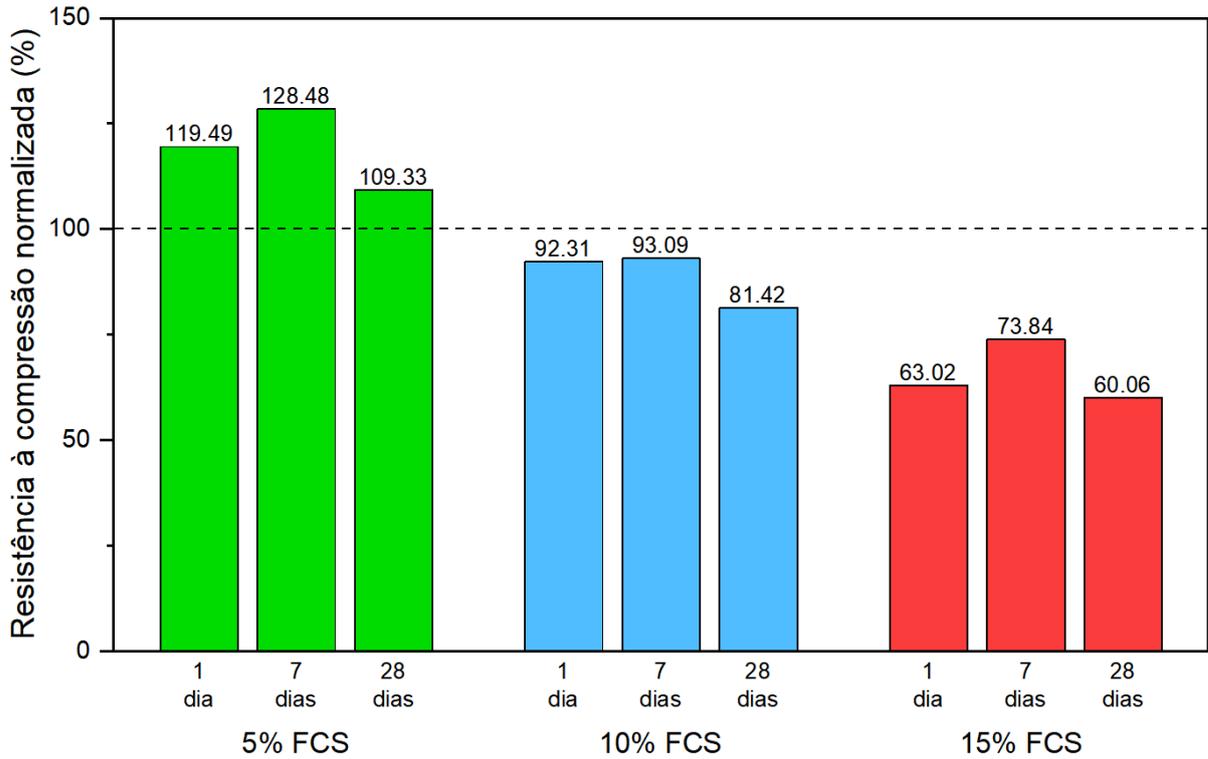
Fonte: Elaborado pelo autor.

De uma forma geral, as amostras de CP V ARI puro exibiram as maiores resistências à compressão. Esse comportamento condiz com sua finalidade, que é desenvolver resistências mais altas, principalmente nas idades iniciais.

As amostras com FCS desenvolveram uma resistência à compressão menor que as com CP V ARI puro. Como relatado na literatura, isso se deve principalmente ao menor teor de cimento nas misturas e, conseqüentemente, menor reatividade (comprovado pelos ensaios de calorimetria e reatividade) e menor contribuição para o desenvolvimento da resistência (Han *et al.*, 2022). No entanto, ao comparar as amostras com FCS com aquelas compostas por CP II-F, observa-se que a substituição de 5% de FCS proporcionou valores de resistência superiores.

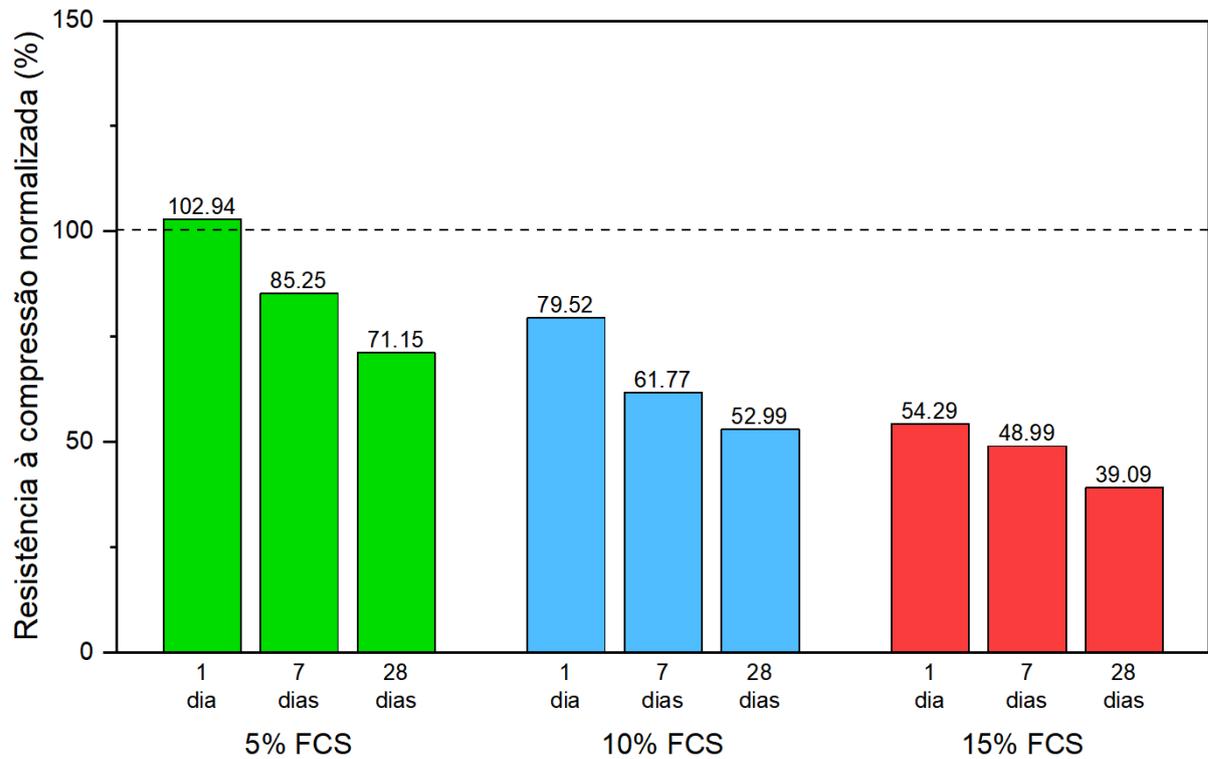
Para uma comparação mais detalhada, os valores médios de resistência à compressão das amostras com FCS foram normalizados em relação aos valores médios obtidos pelas amostras de CP II-F (Figura 43) e de CP V ARI (Figura 44) em todas as idades de cura analisadas.

Figura 43 - Resistência à compressão normalizada das pastas com FCS em relação ao CP II-F



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Resistência à compressão normalizada das pastas com FCS em relação ao CP V ARI



Fonte: Elaborado pelo autor.

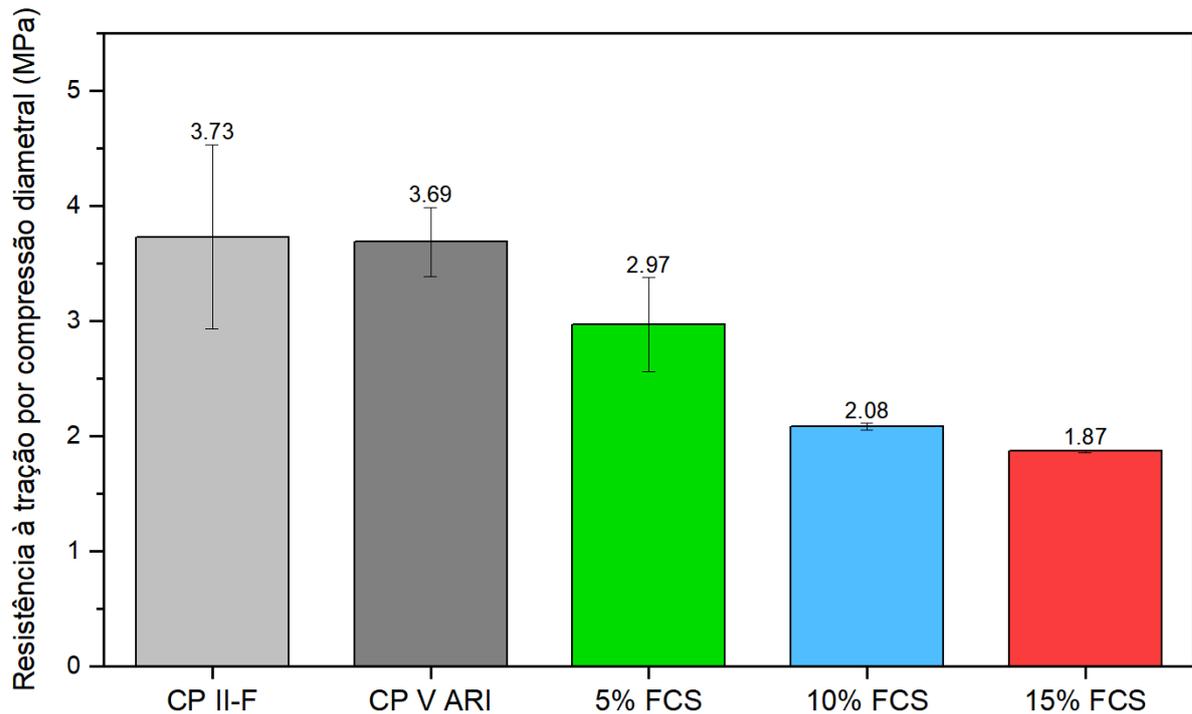
Embora as misturas com FCS apresentem menor resistência à compressão comparado ao CP V ARI puro, sua resistência em relação ao CP II-F é um aspecto relevante a ser considerado, dado que ambos são cimentos com adição de material carbonático. A mistura com 5% de FCS demonstrou resistência 9,3% maior à do CP II-F aos 28 dias, sugerindo que o *filler* de concha de sururu pode ser uma alternativa ao *filler* carbonático convencional nesse teor. Já para os teores de 10% e 15% de FCS, a resistência foi 18,6% e 30% menor.

Contudo, ao comparar os cimentos compostos com FCS às classes de resistência aos 28 dias estabelecidas pela norma brasileira para cimento Portland, a NBR 16.697 (ABNT, 2018), observa-se que cada teor de FCS investigado se enquadraria em uma categoria específica. A mistura com 5% de FCS atingiu 44,54 MPa, correspondendo à classe de resistência 40 MPa, enquanto a com 10% de FCS alcançou 33,17 MPa, enquadrando-se na classe 32 MPa, a mesma do CP II-F utilizado nestes experimentos. Já a mistura com 15% de FCS apresentou 24,47 MPa, ficando muito próxima da classe 25 MPa. Esses resultados indicam que, apesar da redução progressiva da resistência com o aumento do teor de substituição, os compósitos com FCS ainda atendem aos limites normativos de resistência, reforçando seu potencial como alternativa ao *filler* carbonático convencional.

4.4.3 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração das pastas foi determinada por compressão diametral aos 28 dias de cura, complementando a análise das propriedades mecânicas. Os resultados das médias das amostras estão representados graficamente na Figura 45.

Figura 45 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cura



Fonte: Elaborado pelo autor.

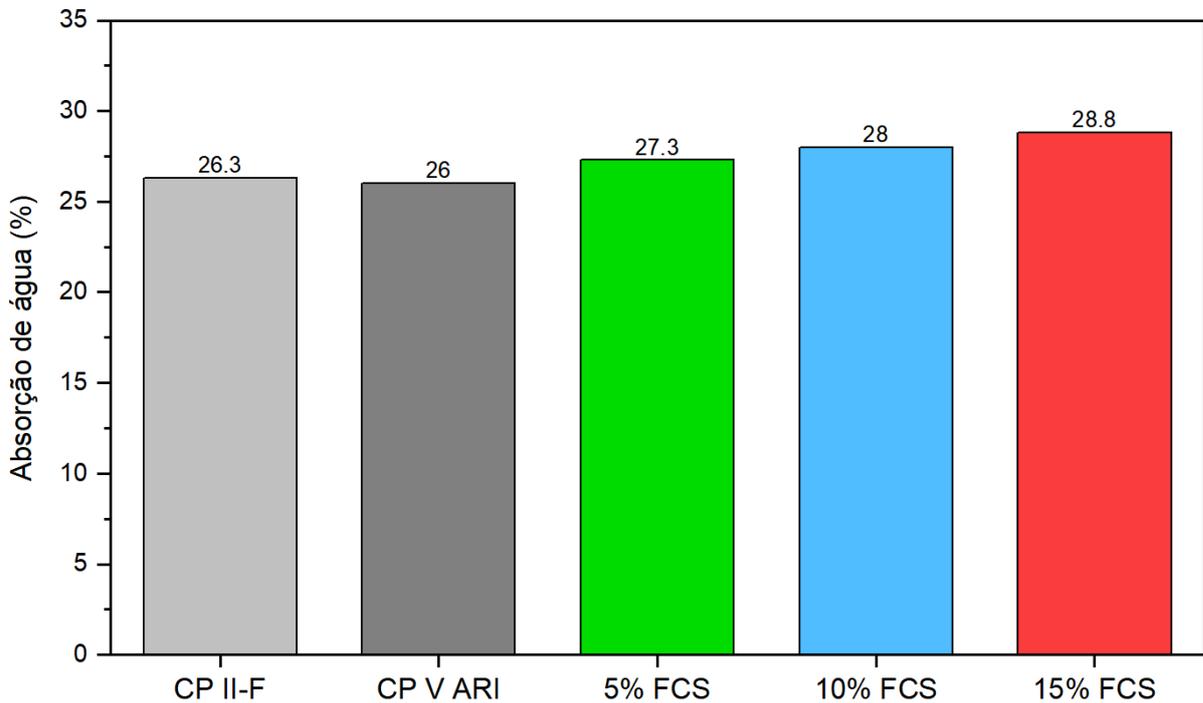
Os resultados da resistência à tração seguem alguns padrões similares aos observados na resistência à compressão. As amostras com FCS apresentaram menor resistência à tração em comparação às de CP V ARI puro e CP II-F, com uma redução progressiva à medida que o teor de FCS aumentou. Nota-se ainda uma queda acentuada na resistência das amostras com 10% de substituição, seguida de uma redução mais amena nas com 15% de FCS. Ao comparar as amostras de referência, o CP II-F demonstrou uma resistência ligeiramente superior à do CP V ARI, porém com um erro-padrão significativamente maior.

Assim como na resistência à compressão, a diminuição da resistência à tração diametral pode ser atribuída à menor quantidade de cimento na mistura e, conseqüentemente, à redução dos produtos de hidratação responsáveis pela resistência do compósito.

4.4.4 Absorção de água

O teste de absorção de água por imersão foi realizado para determinar o teor de absorção de água das amostras após 28 dias de cura. Os resultados se encontram graficamente ilustrados na Figura 46.

Figura 46 - Absorção de água por imersão aos 28 dias de cura



Fonte: Elaborado pelo autor.

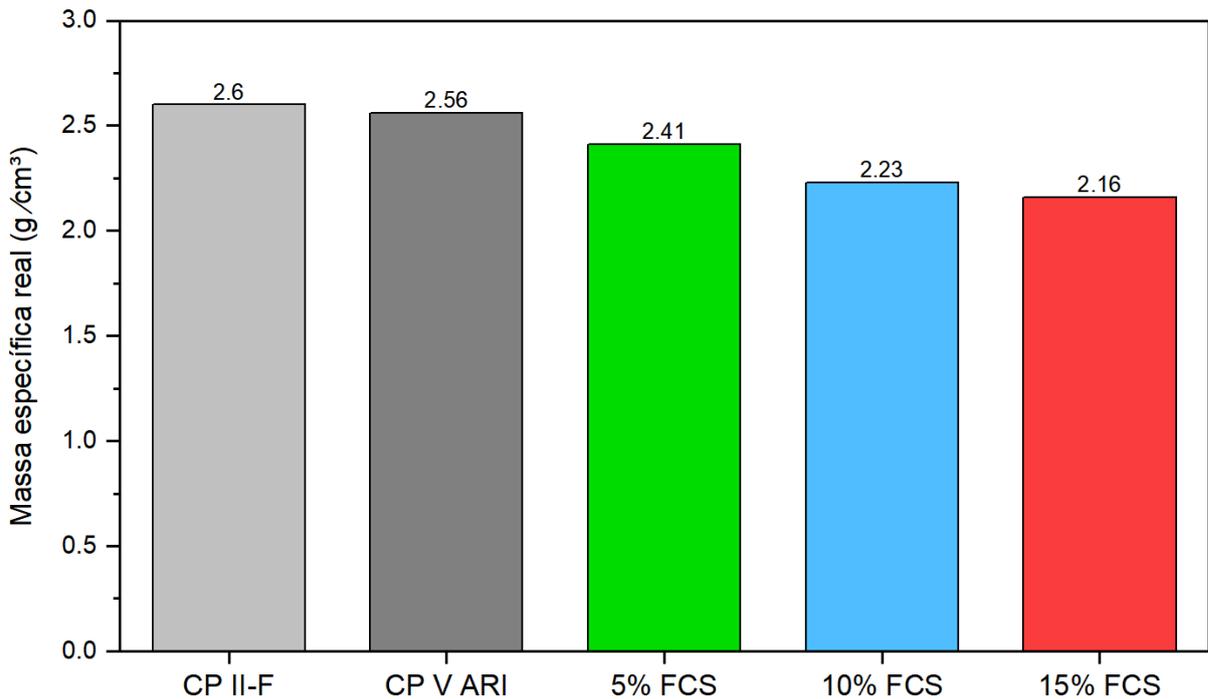
Os resultados indicam uma tendência de aumento na absorção de água com o acréscimo de FCS, sendo essa absorção superior à das amostras de referência. Esse comportamento sugere que as misturas com FCS possuem um maior volume de vazios, uma vez que a absorção de água está diretamente relacionada à quantidade de poros permeáveis preenchidos durante a imersão. Por outro lado, as amostras de referência apresentaram os menores valores de absorção, indicando uma microestrutura mais compacta.

Esses resultados corroboram com os resultados da resistência mecânica. Uma microestrutura mais porosa tende a apresentar menor resistência em comparação a uma matriz mais densa (Hou *et al.*, 2019). Apesar de a resistência à compressão das amostras com CP II-F ter sido inferior à das com 5% de FCS aos 28 dias, é provável que o CP II-F tenha gerado maior quantidade de produtos de hidratação, contribuindo para uma matriz cimentícia mais preenchida e compacta.

4.4.5 Massa específica real

Com base nas massas dos corpos de prova em diferentes condições de saturação, também foi possível determinar a massa específica real, cujos valores estão apresentados na Figura 47.

Figura 47 - Massa específica real dos corpos de prova aos 28 dias de cura



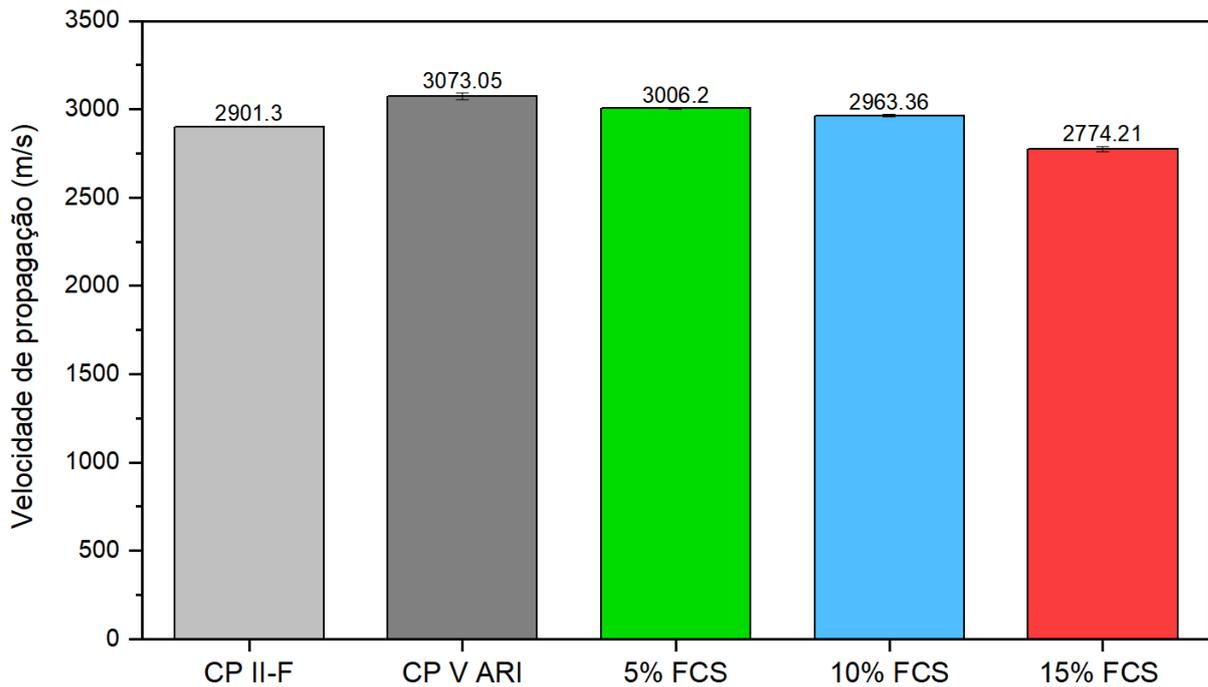
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados indicam que a incorporação de FCS reduz a massa específica real das pastas, definida como a razão entre a massa seca do corpo de prova e seu volume desconsiderando os poros permeáveis (ABNT, 2005). Esta propriedade diminuiu progressivamente com o aumento do teor de FCS. Este comportamento não só é atribuído ao aumento dos poros permeáveis, evidenciado pela maior absorção de água, mas também está relacionado à menor massa específica do FCS em comparação ao cimento tradicional, resultando em amostras mais leves. O mesmo padrão foi observado nos experimentos com outras conchas marinhas na literatura, como mencionado no Capítulo 2.

4.4.6 Velocidade de propagação de onda ultrassônica (UPV)

A Figura 48 apresenta as médias das velocidades de propagação da onda ultrassônica nas amostras com 28 dias de cura .

Figura 48 - Velocidades de propagação da onda ultrassônica aos 28 dias de cura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de UPV indicam diferenças na coesão da matriz cimentícia entre as amostras. O CP V ARI apresentou a maior velocidade de propagação (3073,05 m/s), sugerindo uma estrutura mais densa e coesa, seguida pela mistura com 5% de FCS (3006,2 m/s), que manteve uma velocidade semelhante. As amostras com CP II-F (2901,3 m/s) e 10% de FCS (2963,36 m/s) tiveram valores ligeiramente menores, sugerindo uma estrutura menos compacta. A amostra com 15% de FCS apresentou a menor velocidade de propagação (2774,21 m/s), corroborando os resultados de absorção de água, que indicaram maior volume de vazios nessas misturas.

Entretanto, os resultados de UPV não seguem a mesma tendência observada nos ensaios de resistência à compressão e absorção de água. Apesar de haver uma correlação de geral entre a redução da velocidade e o aumento do volume de vazios, as diferenças entre algumas amostras podem indicar que a propagação da onda ultrassônica é influenciada não apenas pela densidade da matriz, mas também possivelmente pela distribuição e interconectividade dos poros. A amostra com 5% de FCS, por exemplo, apresentou velocidade de propagação superior à do CP II-F, apesar de sua maior absorção de água, o que pode indicar uma melhor organização interna da microestrutura, reduzindo a dispersão da onda.

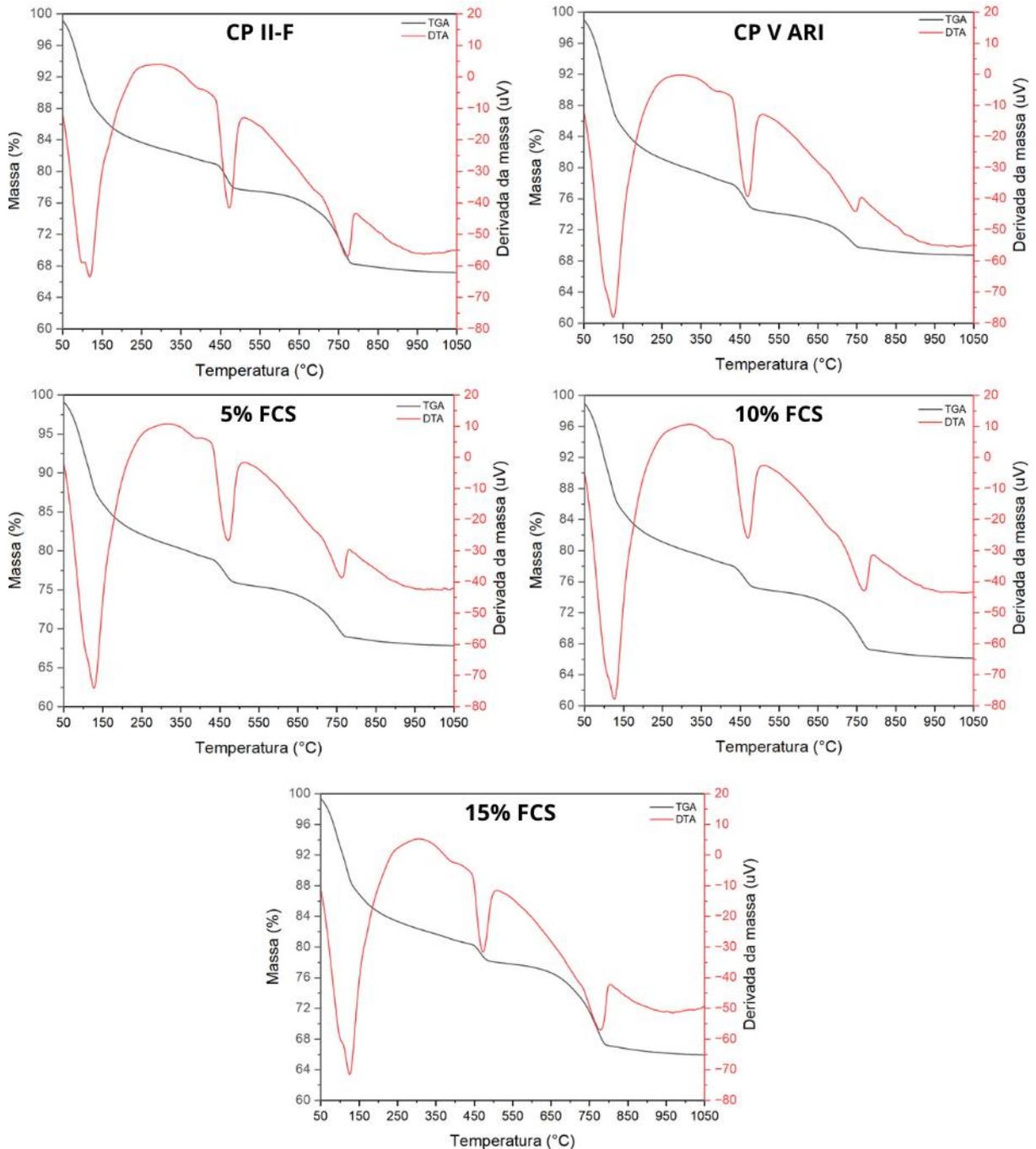
É importante destacar que o ensaio de absorção de água por imersão considera apenas os poros permeáveis, enquanto a propagação da onda ultrassônica, realizada pelo método direto neste estudo, é influenciada por toda a microestrutura da matriz cimentícia, incluindo poros não permeáveis. Dessa forma, a UPV sugere que a amostra de CP II-F pode apresentar uma porosidade ligeiramente maior ou menos organizada do que as amostras com 5% e 10% de FCS, já que sua velocidade de propagação foi inferior a essas misturas, apesar de sua menor absorção de água.

4.4.7 Análise termogravimétrica das pastas

A análise termogravimétrica é uma das técnicas mais utilizadas para avaliar o grau de reação dos cimentos Portland. A perda de massa das amostras com o aumento da temperatura, geralmente entre 105 °C e 1000 °C, permite avaliar a quantidade de água quimicamente combinada associada produtos formados na hidratação do cimento, e assim, estimar indiretamente a quantidade gerada (Scrivener *et al.*, 2015).

As curvas da perda de massa e da derivada da perda de massa de cada pasta estão ilustradas nos gráficos da Figura 49.

Figura 49 - Curvas de perda de massa e derivada da perda de massa das pastas em função da temperatura



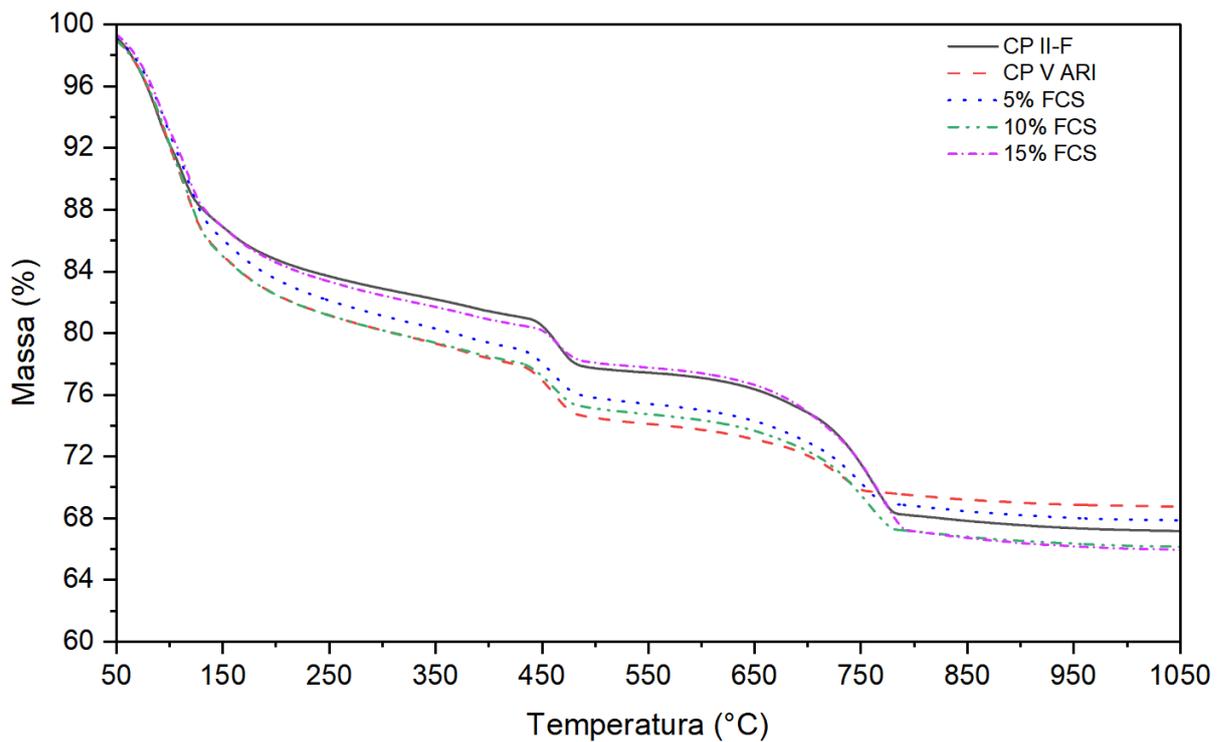
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das curvas, é possível identificar três perdas de massa principais ao longo do aumento de temperatura em todas as pastas. A primeira ocorre entre 100 °C e 150 °C e está tipicamente ligada à perda de água da etringita e silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), enquanto a segunda, por volta de 450 °C, é associada a perda de água do hidróxido de cálcio (ou portlandita) (El-Jazairi; Illston, 1980; Scrivener *et al.*, 2015).

A terceira perda de massa, entre 700 °C e 800 °C, está associada ao processo de descarbonatação do carbonato de cálcio, resultando na liberação de CO₂ (Scrivener *et al.*, 2015). É importante ressaltar que, conforme verificado na TGA dos pós de concha de sururu, o FCS também passa por descarbonatação com liberação de CO₂ nesta faixa de temperatura, afetando a curva das pastas. Uma queda considerável da massa nesta faixa de temperatura também é observada na pasta contendo CP II-F, a qual possui *filler* calcário. Na pasta de CP V ARI puro, verifica-se que a queda na massa é menor nessa faixa de temperatura, sendo mais associada à descarbonatação da portlandita.

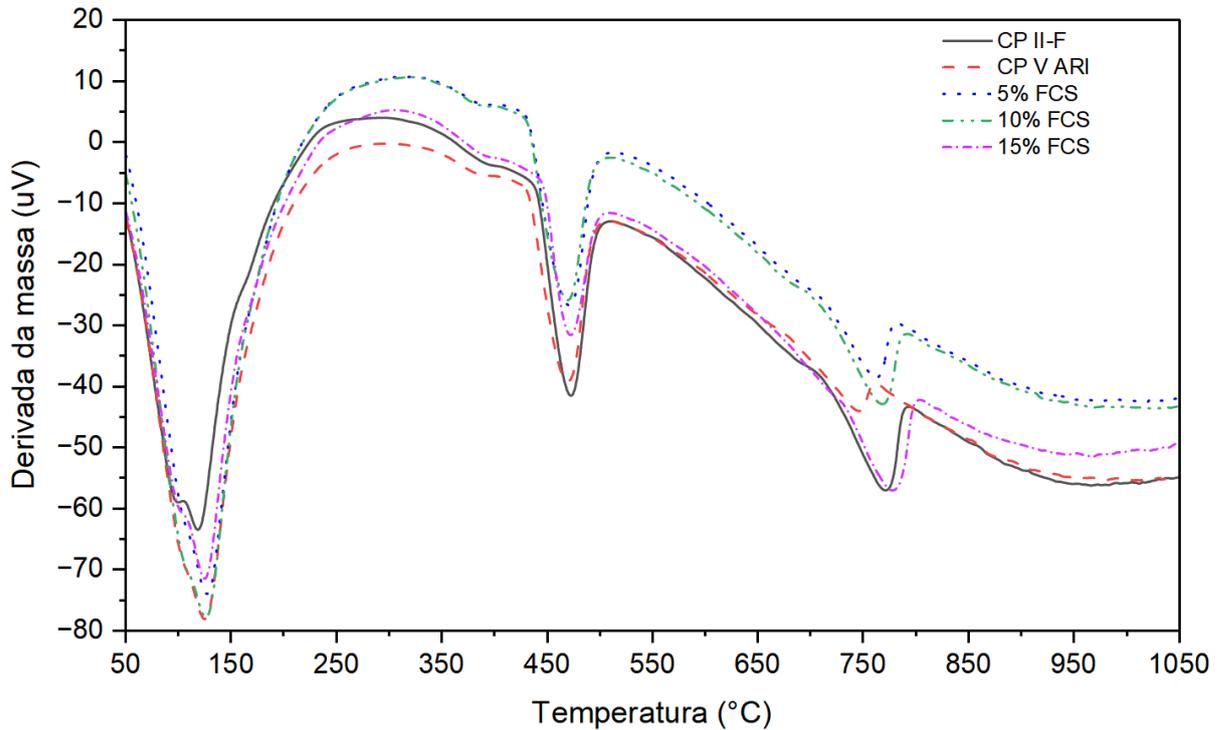
Para uma comparação mais detalhada, as curvas foram compiladas em um só gráfico de TG (Figura 50) e da derivada da massa (Figura 51).

Figura 50 - Curvas combinadas da redução de massa em função da temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 - Curvas combinadas da derivada da massa em função da temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta perspectiva, as diferenças nas quantidades de produtos hidratados entre as pastas ficam evidentes. No primeiro pico (C-S-H e etringita), as maiores perdas de massa ocorreram nas pastas de CP V ARI puro e com 10% de FCS, seguido por 5% e 15% de FCS, e CP II-F puro. Esta maior perda de massa está associada à maior quantidade desses produtos. Assim, a TG evidencia o efeito de nucleação do FCS na hidratação do cimento, proporcionando locais para a geração e precipitação dos produtos da hidratação. Essa observação é corroborada pelos estudos de Xuan *et al.* (2023) e Han, Lin e Wang (2022a).

No segundo pico (portlandita), a perda de massa foi mais intensa nas pastas de cimento puro (CP II-F e CP V ARI) comparado às com adição de FCS. Este comportamento pode estar associado a dois fatores: uma menor geração de portlandita nas misturas com FCS devido à menor quantidade de cimento, e um consumo de hidróxido de cálcio por parte do FCS, indicando uma reação de reatividade. Como os ensaios de calorimetria e R³ confirmaram a baixa reatividade do pó de conchas de sururu (inclusive pelo consumo de hidróxido de cálcio), confirma-se que o fator principal neste caso é a menor geração deste produto devido à menor quantidade de cimento nas misturas com FCS (Wang; Liu, 2020).

No terceiro pico, que caracteriza a descarbonatação da portlandita e do material carbonático, fica evidente a maior perda de massa nas misturas com FCS e com o cimento CP II-F puro, as quais possuem maior teor de CaCO_3 que gera o CO_2 no processo. A amostra com CP V ARI puro apresentou a menor perda de massa nessa faixa, atribuída à queima da portlandita.

De uma forma geral, os resultados indicam que as pastas com FCS apresentaram uma formação de C-S-H e etringita em maiores quantidades que as amostras com CP II-F puro. No entanto, o CP II-F desenvolve maiores quantidades de hidróxido de cálcio que as misturas com FCS. O C-S-H é o principal produto da hidratação do cimento associado à resistência mecânica, principalmente da resistência à compressão.

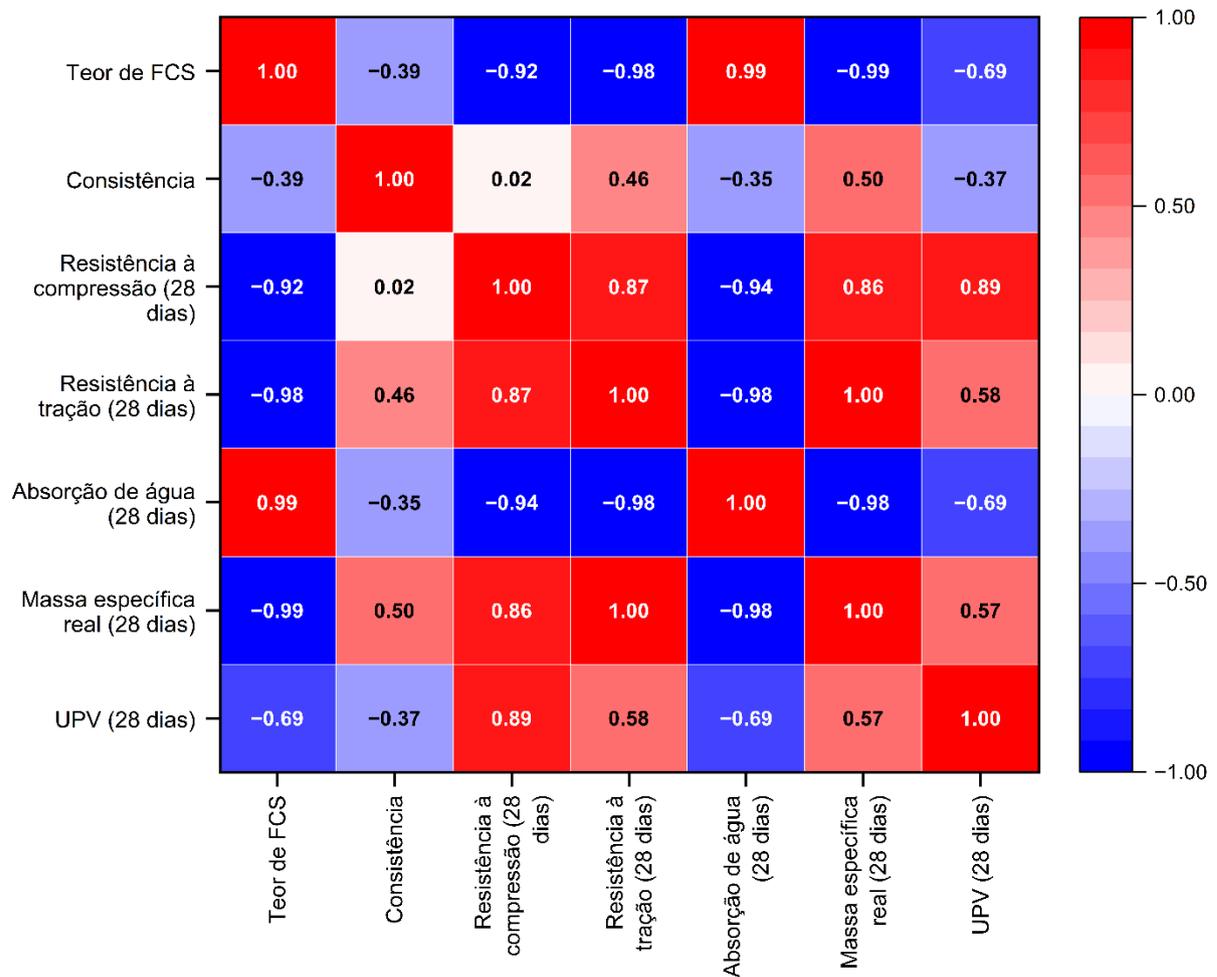
A portlandita, no entanto, possui um maior módulo de Young e maior resistência à tração que o C-S-H, conforme evidenciado por Liang (2020). Dessa forma, a TGA corrobora com os resultados obtidos com relação às resistências mecânicas das pastas. Algumas misturas com FCS apresentam resistência à compressão ligeiramente superior ou próxima à do cimento Portland II-F (CP II-F), devido à maior formação de produtos de C-S-H e etringita. Enquanto isso, o CP II-F demonstra maior resistência à tração por compressão diametral, até mesmo em comparação com o CP V ARI, por causa da maior geração de portlandita durante a hidratação.

A menor quantidade de portlandita nas misturas com FCS pode estar relacionada à maior absorção de água observada nesses materiais, pois a portlandita pode contribuir para um maior preenchimento da matriz cimentícia (Wang *et al.*, 2024). Além disso, como a portlandita tem um módulo de elasticidade superior ao do C-S-H (Liang, 2020), essa diferença na formação de produtos hidratados também pode ter influenciado os resultados da UPV, que dependem da coesão da matriz cimentícia.

4.5 Correlação entre as propriedades

Após determinar as propriedades das pastas, foi realizado o teste de correlação de Pearson entre o teor de FCS nas misturas e estas propriedades. A Figura 52 apresenta a matriz contendo os coeficientes de correlação entre as variáveis analisadas, destacando seu grau de correlação (forte, médio ou fraco) e sentido (positiva ou negativa).

Figura 52 - Gráfico de correlação entre o teor de FCS e as propriedades físico-mecânicas das pastas



Fonte: Elaborado pelo autor.

O teor de FCS apresentou uma correlação negativa forte com a resistência à compressão (-0,92) e com a resistência à tração por compressão diametral (-0,98), indicando que o aumento do FCS nas misturas resultou em uma redução nessas propriedades mecânicas. Esse comportamento já havia sido observado nos ensaios individuais e pode estar relacionado à menor quantidade de cimento disponível na hidratação e à menor formação de portlandita, conforme identificado nas curvas de TGA.

Por outro lado, a absorção de água apresentou uma correlação positiva elevada com o teor de FCS (+0,99) e negativa com a resistência à compressão (-0,94). Isso sugere que a incorporação do FCS aumentou a porosidade acessível ao transporte de fluidos, corroborando com as análises discutidas anteriormente sobre a estrutura dos poros das misturas. Essa maior absorção pode estar ligada à menor formação de portlandita, reduzindo o preenchimento da matriz cimentícia e aumentando o volume de poros.

A UPV também apresentou uma correlação positiva forte com a resistência à compressão (+0,89) e mediana com a resistência à tração por compressão diametral (+0,58), o que confirma que matrizes mais densas e coesas favorecem a transmissão da onda. No entanto, a correlação entre UPV e absorção de água foi negativa (-0,69), indicando que pastas mais porosas tendem a reduzir a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Essa relação reforça a hipótese levantada de que a UPV considera não apenas os poros permeáveis medidos no ensaio de absorção de água, mas também os poros não permeáveis que afetam a propagação da onda.

Por fim, a massa específica real apresentou forte correlação com as resistências mecânicas, especificamente com a resistência à tração (+1,00) e à compressão (+0,86), além de uma correlação mediana com a UPV (+0,57). Esse comportamento confirma que misturas com maior densidade tendem a apresentar melhores propriedades mecânicas e maior velocidade de propagação da onda ultrassônica, como verificado nos ensaios.

Essas observações reforçam as tendências já identificadas nos ensaios de resistência mecânica, absorção de água, UPV e TGA, demonstrando como as diferentes propriedades das misturas estão interligadas.

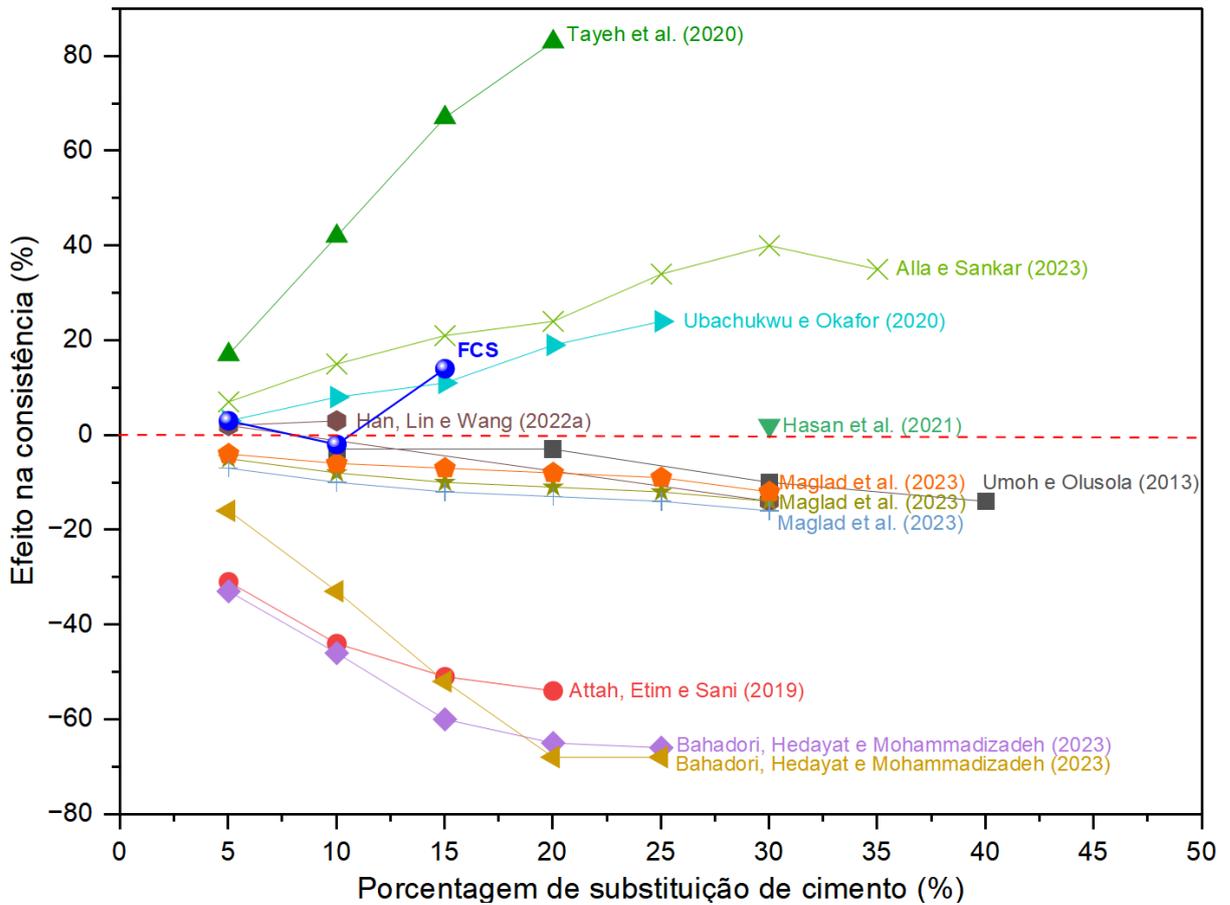
4.6 Discussões

Para comparar os resultados obtidos com aqueles reportados na literatura, as propriedades das pastas de cimento com FCS foram inseridas nos gráficos de efeito da incorporação do pó de conchas, apresentados na síntese da literatura no Capítulo 2. Esse procedimento permitiu avaliar o impacto do FCS nas propriedades do compósito em relação a estudos anteriores.

Os valores de cada propriedade foram normalizados em relação à amostra de referência (CP V ARI puro) e expressos em percentual, indicando a variação da propriedade em função do teor de substituição. Nos gráficos, a linha vermelha em 0% representa um efeito nulo, enquanto valores abaixo e acima dela indicam, respectivamente, redução e aumento da propriedade analisada.

A Figura 53 apresenta o gráfico do efeito na consistência e trabalhabilidade dos compósitos.

Figura 53 - Efeito da incorporação do FCS na consistência das pastas em comparação com dados da literatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

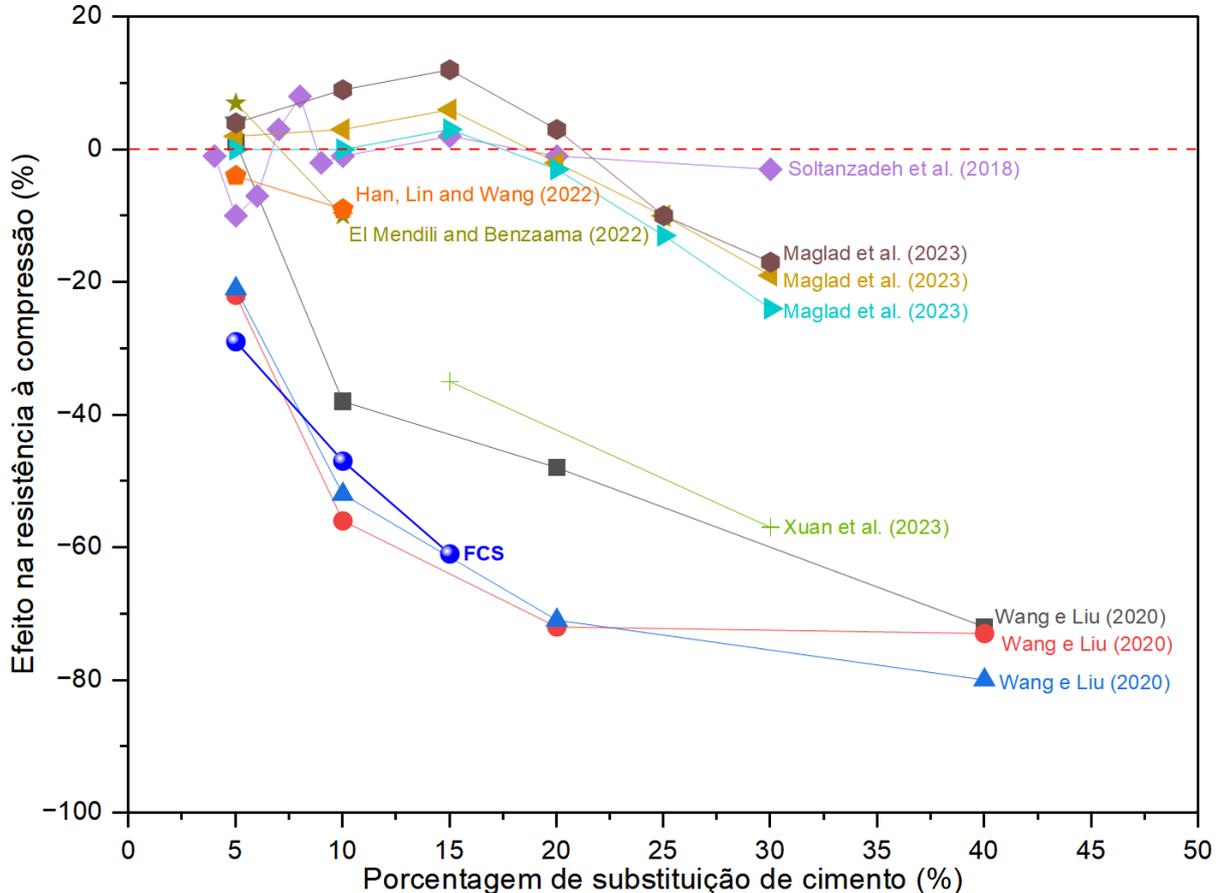
Dessa forma, observa-se que o comportamento da consistência nas pastas com FCS apresenta um padrão diferente em relação aos demais estudos encontrados na literatura. Inicialmente, a substituição de 5% do cimento pelo FCS resulta em um aumento na consistência, enquanto a incorporação de 10% provoca uma redução. No entanto, com 15% de FCS, a consistência volta a aumentar. Esse comportamento não linear difere dos padrões mais regulares observados em outros experimentos, nos quais a tendência foi mais linear. Apesar dessa variação, de modo geral, a adição de FCS promove um aumento na consistência das pastas, se assemelhando ao comportamento reportado por Ubachukwu e Okafor (2020) e Alla e Sankar (2023) para pós de conchas de ostras e caracóis marinhos não calcinados, respectivamente, e por Tayeh *et al.* (2020) ao investigar pó calcinado de concha de mariscos.

Os resultados do presente estudo indicaram que a fluidez da pasta cimentícia com 10% de FCS foi inferior à de 5% e 15%, um comportamento que pode estar relacionado ao aumento crítico na densidade de empacotamento da matriz e à redução da área de superfície específica total do

aglomerante. O estudo de Barsi *et al.* (2020) fornece suporte para essa interpretação, pois demonstrou que a incorporação de *fillers* de dolomita e calcário melhora a densidade de empacotamento, mas a fluidez pode ser reduzida dependendo da relação entre área de superfície específica e quantidade de água disponível. Em seu experimento, os autores observaram que, em certos teores de substituição, o aumento da densidade de empacotamento e da área de superfície específica resultou em um *Water Film Thickness* (WFT) reduzido, impactando negativamente a fluidez. De forma semelhante, no presente estudo, o teor de 10% FCS pode ter resultado em um estado intermediário onde o empacotamento e a distribuição de partículas reduziram a fluidez da pasta. Em 15% FCS, um novo rearranjo das partículas pode ter diminuído esse efeito, restabelecendo a fluidez.

Os efeitos da substituição do cimento pelo FCS na resistência à compressão das pastas produzidas são relacionados à literatura na Figura 54, especificamente para pós de concha não calcinados em tempo de cura de 28 dias.

Figura 54 - Efeito da incorporação do FCS na resistência à compressão das pastas aos 28 dias em comparação com dados da literatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

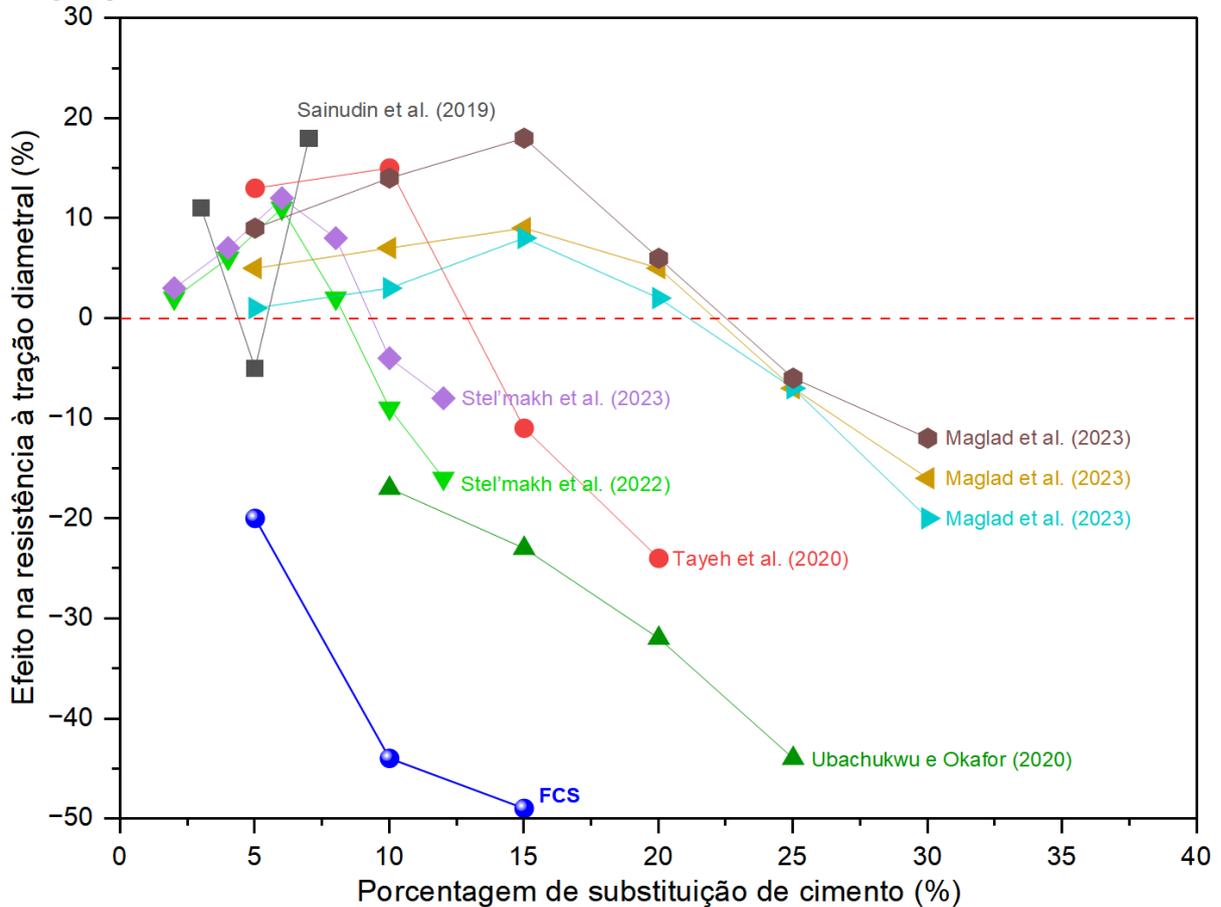
A influência do teor de FCS na resistência a compressão se assemelha à observada na maioria dos estudos com pó de concha não calcinado, com uma queda na resistência à medida que mais pó é introduzido. Os resultados obtidos para a resistência a compressão das misturas com FCS apresentam um comportamento semelhante ao reportado por Wang e Liu (2020), que também avaliaram a incorporação de pó de conchas não calcinadas em compósitos cimentícios com diferentes relações a/c (0,40, 0,45 e 0,50). Conforme descrito pelos autores, houve uma tendência geral de redução da resistência com o aumento do teor de substituição, apesar de a mistura com 5% de pó de concha e uma relação água/cimento de 0,40 tenha apresentado resistência comparável à do cimento puro. Eles ainda sugerem que o desempenho mecânico das misturas cimentícias pode ser otimizado por meio de um ajuste sinérgico entre o teor de substituição e o conteúdo de água (Wang; Liu, 2020).

A razão apontada por Wang e Liu (2020) para esse comportamento foi a de que o pó de conchas melhora a dispersão e compactação das partículas na matriz cimentícia em teores reduzidos, beneficiando a microestrutura. No entanto, à medida que a substituição do cimento aumenta, o teor efetivo de água/cimento cresce, reduzindo a formação de produtos de hidratação e impactando negativamente a resistência. A análise termogravimétrica realizada pelos autores confirmou essa tendência, mostrando uma diminuição dos produtos de hidratação (C-S-H, etringita e hidróxido de cálcio) com o aumento do pó de conchas.

Dessa forma, os resultados desse estudo reforçam a importância do controle da relação água/cimento ao utilizar FCS. No presente trabalho, observou-se um comportamento semelhante, com o FCS melhorando a consistência das misturas no estado fresco e permitindo a hidratação do cimento em teores reduzidos. Porém, substituições mais elevadas intensificaram o efeito de diluição do clínquer, prejudicando a resistência final do compósito. Este mesmo efeito é observado nos outros estudos do gráfico, alguns a partir de 5% e outros após 15% de substituição.

A Figura 55 compara com a literatura os efeitos da incorporação do FCS na resistência à tração diametral do compósito produzido.

Figura 55 - Efeito da incorporação do FCS na resistência à tração diametral das pastas aos 28 dias em comparação com dados da literatura

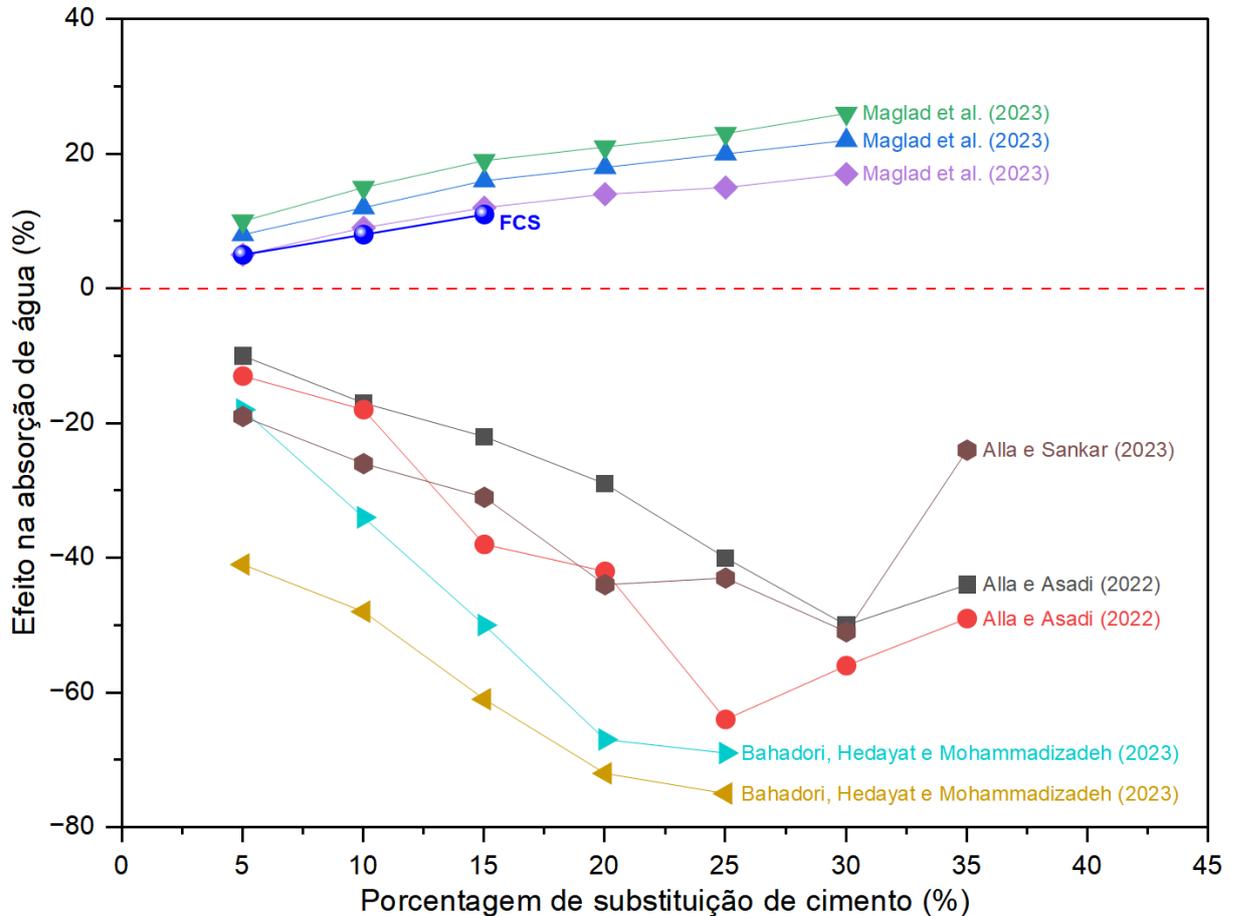


Fonte: Elaborado pelo autor.

O impacto do FCS na resistência à tração diametral foi mais expressivo em comparação com outros pós investigados na literatura. Assim como no estudo de Ubachukwu e Okafor (2020) com pó de concha de ostra não calcinado, nenhum teor resultou em aumento da resistência à tração diametral. Nos demais estudos, no entanto, os maiores ganhos nessa propriedade foram observados para teores entre 5% e 15%. Ubachukwu e Okafor (2020) sugerem que a redução no desenvolvimento da resistência à tração ocorreu devido à menor quantidade de cimento na mistura, assim como ocorreu nas pastas de FCS.

Em relação ao impacto na absorção de água, a Figura 56 compara a influência do teor de substituição do FCS com o observado em outros pós.

Figura 56 - Efeito da incorporação do FCS na absorção de água aos 28 dias em comparação com dados da literatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os estudos da literatura, a influência da substituição parcial do cimento por FCS na absorção de água foi semelhante à encontrada no estudo de Maglad *et al.* (2023), que investigou o pó não calcinado das conchas de ostras, vieiras e mexilhões. Assim como observado pelos autores, a absorção de água do compósito aumentou à medida que mais pó de concha foi incorporado. No entanto, é possível notar uma semelhança maior no comportamento do FCS com o pó de concha de mexilhão (linha roxa com losangos), que apresentou os menores aumentos de absorção entre os pós analisados.

Maglad *et al.* (2023) atribuíram o aumento da absorção de água à morfologia aragonítica do pó das conchas. Em teores menores, essa absorção é levemente maior comparado as amostras de referência. No entanto, em teores mais elevados, o desenvolvimento de mais vazios devido à incorporação do pó levou a um aumento na absorção. Esse comportamento pode explicar a tendência observada nas pastas com FCS, destacando a importância da microestrutura das partículas na modificação das propriedades do compósito.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo investigar as propriedades de compósitos cimentícios utilizando um cimento composto com a adição de *filler* de concha de sururu (FCS), proveniente do resíduo da pesca de moluscos bivalves na Ilha de Deus, Recife-PE. As características desses compósitos foram comparadas às do cimento Portland composto com adição de *filler* calcário, já regulamentado e disponível no mercado brasileiro.

A partir dos resultados obtidos no programa experimental desta pesquisa, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- O FCS apresenta características físico-químicas semelhante a outras conchas marinhas já estudadas para uso como adição mineral em cimentos compostos. Apesar da semelhança química com a rocha calcária, o FCS possui mineralogia predominantemente composta por aragonita, um polimorfo do carbonato de cálcio menos estável que a calcita presente no calcário;
- Tanto o FCS quanto o *filler* calcário atuam como materiais inertes nas matrizes cimentícias, auxiliando na nucleação dos produtos de hidratação e na dispersão das partículas de cimento. No entanto, a análise termogravimétrica mostrou que o cimento experimental com FCS favoreceu maior formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e etringita, enquanto o CP II-F promoveu maior geração de hidróxido de cálcio (portlandita);
- O cimento composto com FCS apresentou aumento na consistência em relação ao CP V ARI, devido à menor área de superfície específica e à dispersão das partículas de cimento. No entanto, sua consistência foi inferior à do CP II-F, que possui uma área de superfície ainda menor;
- A resistência à compressão das misturas com FCS foi similar ou ligeiramente superior à do CP II-F, possivelmente devido à maior formação de C-S-H e etringita. Já a resistência à tração por compressão diametral foi menor nas misturas com FCS, possivelmente devido à menor quantidade de portlandita, que possui maior rigidez e resistência à tração. Ainda assim, cada cimento composto com teor de FCS investigado apresentou uma resistência mecânica superior ou próxima das exigidas nas classes de

resistência à compressão aos 28 dias: o cimento com 5% de FCS na classe 42 MPa, o com 10% na classe 32 MPa (a mesma do CP II-F utilizado nos experimentos) e o com 15% muito próximo ao exigido para a classe 25 MPa;

- A absorção de água foi superior nas misturas contendo FCS em comparação ao CP II-F puro, indicando uma maior porosidade susceptível ao transporte de fluidos. Essa porosidade pode estar associada à menor geração de portlandita evidenciada pela TGA das pastas, resultando em uma matriz menos compacta. No entanto, a análise da UPV revelou que, além dos poros permeáveis medidos no ensaio de absorção, a estrutura interna da matriz (incluindo poros não permeáveis) das pastas com 5% e 10% de FCS indicou uma distribuição de vazios mais homogênea do que a do CP II-F.
- A substituição do calcário tradicional pelo FCS como alternativa de *filler* demonstrou viabilidade técnica em termos das propriedades mecânicas, possibilitando a formulação de um novo tipo de CP II-F. Esta abordagem está alinhada com estratégias sustentáveis visando a redução das emissões associadas ao uso do cimento Portland. Dentre os teores de FCS para a composição do novo cimento CP II-F, recomenda-se o de 5% para o CP II-F classe 42 MPa e o de 10% para o CP II-F classe 32 MPa, considerando suas propriedades físico-mecânicas;
- Pesquisas demonstraram que o uso de pó de conchas marinhas contribui para a redução das emissões de CO₂, particularmente quando não calcinado, como ocorre no caso do FCS. Além disso, a substituição do *filler* calcário convencional pelo FCS pode reduzir a extração de rocha calcária e agregar valor à resíduos marinhos, promovendo uma alternativa mais sustentável para a indústria cimenteira local.

6 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Com base nas conclusões obtidas na revisão sistemática da literatura e no programa experimental desta pesquisa, recomenda-se a realização de novos estudos que aprofundem as investigações sobre o pó de concha de sururu e fortaleçam sua viabilidade como insumo na construção civil. As principais recomendações são apresentadas a seguir:

- O reaproveitamento das conchas de sururu oriundas da pesca em comunidades como a da Ilha de Deus contribui não apenas para a redução das emissões de carbono, mas também para a destinação ambientalmente adequada desse resíduo, promovendo melhorias na qualidade de vida das populações afetadas pela disposição inadequada. Para ampliar o incentivo ao uso da concha de sururu como matéria-prima na produção de cimento, recomenda-se a realização de estudos de viabilidade econômica dessa estratégia;
- Embora alguns estudos indiquem a redução nas emissões de carbono com o reaproveitamento de conchas marinhas como aditivo mineral, recomenda-se uma avaliação mais aprofundada da viabilidade ambiental do cimento composto com FCS, de forma a melhor compreender os impactos associados ao seu ciclo de vida;
- As partículas do FCS apresentaram dimensões superiores às do cimento utilizado nas misturas analisadas, o que limita seu potencial de empacotamento, idealmente favorecido por partículas mais finas. Além disso, o ensaio de TGA no pó não calcinado indicou a presença de quitina na composição da concha de sururu, cuja degradação ocorre em temperaturas próximas a 430 °C, contribuindo para maior perda ao fogo e podendo influenciar o desempenho dos compósitos. Assim, recomenda-se a investigação de métodos alternativos de beneficiamento, como a trituração em meio aquoso, variações no tempo de moagem, peneiragem com diferentes aberturas e a queima em temperaturas intermediárias para eliminação da quitina, visando a melhoria das características do *filler*;
- Esta pesquisa restringiu-se à avaliação das propriedades físico-mecânicas de pastas cimentícias contendo o FCS, não abrangendo ensaios relacionados à durabilidade dos compósitos. Para garantir a viabilidade técnica do novo *filler* em aplicações de longo

prazo, sugere-se a realização de estudos específicos sobre a durabilidade dos materiais produzidos;

- Recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas que explorem diferentes relações água/cimento e o uso de misturas ternárias, com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre os efeitos do FCS e expandir seu potencial de aplicação. Uma alternativa promissora a ser investigada é a formulação de cimentos do tipo LC3 (*Limestone Calcined Clay Cement*), produzidos a partir de argila calcinada, calcário, clínquer e gesso, e reconhecidos por suas menores emissões de carbono em comparação ao cimento Portland convencional. Considerando que o LC3 utiliza calcário em sua composição, a substituição desse componente pelo pó de concha de sururu pode tornar esse tipo de cimento ainda mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- AIC. American Concrete Institute. **AIC 318-19**: Building Code Requirements for Structural Concrete. 19. ed. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.
- ALLA, S.; ASADI, S. S. Experimental investigation and microstructural behavior of uncalcined and calcined snail shell powder cement mortar. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 7, n. 1, p. 42, 2022.
- ALLA, S.; SANKAR, A. S. Experimental Investigation of Snail Shell-based Cement Mortar: Mechanical Strength, Durability and Microstructure. **U. Porto Journal of Engineering**, v. 9, n. 4, p. 51-70, 2023.
- ALSALMAN, A.; DANG, C. N.; PRINZ, G. S.; HALE, W. M. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 918-928, 2017.
- ATTAH, I. C.; ETIM, R. K.; SANI, J. E. Response of oyster shell ash blended cement concrete in sulphuric acid environment. **Civil and environmental research**, v. 11, n. 4, p. 62-74, 2019.
- BAHADORI, H. R.; HEDAYAT, A. A.; KARBAKSH, A.; MOHAMMADIZADEH, M. Effects of Seashell and Lumashell powders on the elevated temperature compressive strength and durability of shell-based concretes. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 8, n. 7, p. 199, 2023.

BARSI, A. D. S.; MARCHETTI, G.; TREZZA, M. A.; IRASSAR, E. F. Carbonate rocks as fillers in blended cements: Physical and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118697, 2020.

BEZERRA, J. M. V. O processo de urbanização e adensamento populacional no Recife-PE e o direito à moradia na Ilha de Deus. **Revista Brasileira de Estudos Organizacionais**, v. 9, n. 2, p. 351 - 368, 2022.

BOUASRIA, M.; BENZAAMA, M. H.; PRALONG, V.; EL MENDILI, Y. Mechanical and hygrothermal performance of fly-ash and seashells concrete: In situ experimental study and smart hygrothermal modeling for Normandy climate conditions. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 22, n. 2, p. 100, 2022.

BOUASRIA, M.; KHADRAOUI, F.; BENZAAMA, M. H.; TOUATI, K.; CHATEIGNER, D.; GASCOIN, S.; EL MENDILI, Y. Partial substitution of cement by the association of Ferronickel slags and *Crepidula fornicata* shells. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101587, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. **A saúde das pescadoras artesanais: atividades de pesca: rios, lagos e lagoas**. Brasília, 2018.

BUNYAMIN, B.; MUKHLIS, A. Utilization of oyster shells as a substitute part of cement and fine aggregate in the compressive strength of concrete. **Aceh International Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 3, p. 150-156, 2020.

CARDOSO, A. S. **Avaliação do comportamento físico e mecânico de compósitos cimentícios produzidos com conchas de sururu**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2019.

CARDOSO, A. S.; KOHLMAN RABBANI, E. R.; SILVA, A. L.; SÁ, M. K. C. R. D.; MONTEIRO, E. B.; SHAKOURI, M. Evaluating Sururu shell waste (*Mytella falcata*) as an eco-friendly recycled aggregate in mortar production. **Frontiers in Built Environment**, v. 10, p. 1381169, 2024. DOI: 10.3389/fbuil.2024.1381169.

CARSON, M. Acting locally to mitigate globally: climate action in the Anthropocene. **Journal of Environmental Studies and Sciences**, v. 5, n. 1, p. 58-60, 2015.

COURARD, L.; DEGÉE, H.; DARIMONT, A. Effects of the presence of free lime nodules into concrete: Experimentation and modelling. **Cement and concrete research**, v. 64, p. 73-88, 2014.

DEBOUCHA W.; LEKLOU N.; KHELIDJ, A.; OUDJIT, M. N. Hydration development of mineral additives blended cement using thermogravimetric analysis (TGA): Methodology of calculating the degree of hydration. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 687-701, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.132>.

DEBOUCHA, W.; SEBAIBI, N.; EL MENDILI, Y.; FABIEN, A.; ALENGARAM, U. J.; LEKLOU, N.; GASCOIN, S. Reactivity effect of calcium carbonate on the formation of

carboaluminate phases in ground granulated blast furnace slag blended cements. **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 6504, 2021.

EDALAT-BEHBAHANI, A.; SOLTANZADEH, F.; EMAM-JOMEH, M.; SOLTANZADEH, Z. Sustainable approaches for developing concrete and mortar using waste seashell. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 25, n. 10, p. 1874-1893, 2021.

EL BIRIANE, M., BARBACHI, M. State-of-the-art review on recycled mussel shell waste in concrete and mortar. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 6, n. 29, 2021.

EL-JAZAIRI, B.; ILLSTON, J. M. The hydration of cement paste using the semi-isothermal method of derivative thermogravimetry. **Cement and Concrete Research**, v. 10, n. 3, p. 361-366, 1980.

EL MENDILI, Y.; BENZAAMA, M. Investigation of Mechanical and Thermal Performance of Concrete with Scallop Shells as Partial Cement Replacement: Alternative Binder and Life Cycle Assessment. **CivilEng**, v. 3, n. 3, p. 760-778, 2022.

EN. Europäische Norm. **EN 206:13**: Concrete - Specification, performance, production and conformity. 2. ed. Bruxelles: European Committee for Standardization, 2013.

EZ-ZAKI, H.; DIOURI, A.; KAMALI-BERNARD, S.; SASSI, O. Composite cement mortars based on marine sediments and oyster shell powder. **Materiales de construcción**, v. 66, n. 321, p. e080-e080, 2016.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balanço das emissões e da captura de CO₂ em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, p. 135-162, 2018.

FERNANDES, I. V. **Avaliação da pozolanicidade do lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes da indústria têxtil para uso como material cimentício suplementar**. 2022. Dissertação (Mestrado em engenharia civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

FILONCHYK, M.; PETERSON, M. P.; ZHANG, L.; HURYNOVICH, V.; HE, Y. Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. **Science of The Total Environment**, p. 173359, 2024.

FODE, T. A.; JANDE, Y. A. C.; KIVEVELE, T. Effects of different supplementary cementitious materials on durability and mechanical properties of cement composite—Comprehensive review. **Heliyon**, 2023.

FU, X; LI, Y.; LIN, C.; MENG, Y.; YUE, Q.; LIU, H. Strength, durability and appearance of low-carbon fair-faced concrete containing multiple mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 392, p. 131838, 2023.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GUO, Y.; LUO, L.; LIU, T.; HAO, L.; LI, Y.; LIU, P.; ZHU, T. A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry. **Journal of Environmental Sciences**, v. 136, p. 682-697, 2024.

HAMADA, H. M.; ABED, F.; TAYEH, B.; AL JAWAHERY, M. S.; MAJDI, A.; YOUSIF, S. T. Effect of recycled seashells on concrete properties: A comprehensive review of the recent studies. **Construction and Building Materials**, v. 376, p. 131036, 2023.

HAN, Y.; LIN, R.; WANG, X. Performance of sustainable concrete made from waste oyster shell powder and blast furnace slag. **Journal of Building Engineering**, v. 47, p. 103918, 2022a.

HAN, Y.; LIN, R.; WANG, X. Sustainable mixtures using waste oyster shell powder and slag instead of cement: Performance and multi-objective optimization design. **Construction and Building Materials**, v. 348, p. 128642, 2022b.

HART, A. Mini-review of waste shell-derived materials' applications. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 5, p. 514-527, 2020.

HASAN, K.; YAHAYA, F. M.; KARIM, A.; OTHMAN, R. Investigation on the properties of mortar containing palm oil fuel ash and seashell powder as partial cement replacement. **Construction**, v. 1, n. 2, p. 50-61, 2021.

HAY, R.; PENG, B.; CELIK, K. *Filler* effects of CaCO₃ polymorphs derived from limestone and seashell on hydration and carbonation of reactive magnesium oxide (MgO) cement (RMC). **Cement and Concrete Research**, v. 164, p. 107040, 2023.

HOU, D.; LI, D.; HUA, P.; JIANG, J.; ZHANG, G. Statistical modelling of compressive strength controlled by porosity and pore size distribution for cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 96, p. 11-20, 2019.

HUSSIN, M. H.; OTHMAN, N. H.; WAN IBRAHIM, M. H. Carbonation of concrete containing mussel (*Perna viridis*) shell ash. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 17, n. 5, p. 904-928, 2019.

IEA. International Energy Agency. **Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. Paris: IEA, 2018.

JOHN, V. M.; DAMINELI, B. L.; QUATTRONE, M.; PILEGGI, R. G. *Fillers* in cementitious materials—Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 65-78, 2018.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 257-273, 2019.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. **Cement, Concrete, and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KARTHICK RAJAN, D.; MOHAN, K.; RAJARAJESWARAN, J.; DIVYA, D.; KUMAR, R.; KANDASAMY, S.; RAMU GANESAN, A. β -Chitin and chitosan from waste shells of edible mollusks as a functional ingredient. **Food Frontiers**, v. 5, n. 1, p. 46-72, 2024.

LAFHAJ, Z.; GOUEYGOU, M.; DJERBI, A.; KACZMAREK, M. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. **Cement and Concrete research**, v. 36, n. 4, p. 625-633, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.009>.

LIANG, Y. Mechanical and fracture properties of calcium silicate hydrate and calcium hydroxide composite from reactive molecular dynamics simulations. **Chemical Physics Letters**, v. 761, p. 138117, 2020.

LIAO, Y.; WANG, X.; WANG, L.; YIN, Z.; DA, B.; CHEN, D. Effect of waste oyster shell powder content on properties of cement-metakaolin mortar. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e01088, 2022.

LIAO, Y.; LI, W.; DA, B.; MENG, Y.; CHEN, D. Research on properties of waste oyster shell mortar: The effect of calcination temperature of oyster shell powder. **Case Studies in Construction Materials**, p. e02639, 2023.

LIU, S.; WANG, Y.; LIU, B.; ZOU, Z.; TENG, Y.; JI, Y.; ZHANG, Y. Sustainable utilization of waste oyster shell powders with different fineness levels in a ternary supplementary cementitious material system. **Sustainability**, v. 14, n. 10, p. 5981, 2022a.

LIU, S.; ZHANG, Y.; LIU, B.; ZOU, Z.; LIU, Q.; TENG, Y.; ZHANG, L. V. Sustainable Use of Waste Oyster Shell Powders in a Ternary Supplementary Cementitious Material System for Green Concrete. **Materials**, v. 15, n. 14, p. 4886, 2022b.

MAGLAD, A. M.; MYDIN, M. A. O.; DATTA, S. D.; TAYEH, B. A. Assessing the mechanical, durability, thermal and microstructural properties of sea shell ash based lightweight foamed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 402, p. 133018, 2023.

MANTELLATO, S.; PALACIOS, M.; FLATT, R. J. Reliable specific surface area measurements on anhydrous cements. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 286-291, 2015.

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 2, p. 1-9, 2017.

MIRA, P.; PAPADAKIS, V. G.; TSIMAS, S. Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete. **Cement and concrete research**, v. 32, n. 5, p. 683-689, 2002.

MO, K. H.; ALENGARAM, U. J.; JUMAAT, M. Z.; LEE, S. C.; GOH, W. I.; YUEN, C. W. Recycling of seashell waste in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 751-764, 2018.

MONISHA, R.; BALASUBRAMANIAN, M. Characterization Study On Recycled Oceanic Waste In Hybrid Cement Amalgams. **Journal of Engineering Research (kuwait)**, v. 9, 2022.

MORAES, F. M.; MARQUES, G. V. G. Planejamento Urbano e Participação Popular: A experiência do Plano de Ação Integrada de Investimentos para a ZEIS Ilha de Deus, Recife-Pernambuco. *In: ENCONTRO NACIONAL DA REDE OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES*, 2017, Rio Grande do Norte. **Anais [...]**, Natal: Regimes Urbanos e Governança Metropolitana, 2017.

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

ONU. Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015.

PAIVA, T. M. N. **Estudo de remoção de corantes aniônicos em conchas de moluscos bivalves**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

PALANIAPPAN, K. K.; KOMARASAMY, C.; MURUGAN, S. Utilization of Cuttlebone as *Filler* in Hydrophobic Foam Mortar: A Technical and Economical Feasibility Study. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 8, p. 04022191, 2022.

PECEÑO, B.; HURTADO-BERMUDEZ, S.; ALONSO-FARIÑAS, B.; VILLA-ALFAGEME, M.; MÁZ, J. L.; LEIVA, C. Recycling Bio-Based Wastes into Road-Base Binder: Mechanical, Leaching, and Radiological Implications. **Applied Sciences**, v. 13, n. 3, p. 1644, 2023.

PEDROSA JUNIOR, M. C. **Utilização de resíduo de concha de sururu da comunidade pesqueira Ilha de Deus em substituição parcial à areia na fabricação de peças de piso Intertravado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2022.

PERNAMBUCO. **Decreto nº 52.458, de 16 de março de 2022**. Institui o Plano de Descarbonização de Pernambuco e o Comitê Estadual Pernambuco Carbono Neutro (CEPEN). Diário Oficial do Estado de Pernambuco, Recife, PE, 17 mar. 2022.

PERNAMBUCO. **Lei nº 14.090, de 17 de junho de 2010**. Institui a Política Estadual de Enfrentamento às Mudanças Climáticas de Pernambuco, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado de Pernambuco, Recife, PE, 18 jun. 2010.

PUNTHAMA, C.; SUPAKATA, N.; KANOKKANTAPONG, V. Characteristics of Concrete Bricks After Partially Substituting Portland Cement Type 1 with Cement and Seashell Waste and Partially Substituting Sand with Glass Waste. **EnvironmentAsia**, v. 12, n. 1, 2019.

RABELO, J. B. Habitação e sustentabilidade em áreas de fragilidade ambiental. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 6, n. 5, 2010.

- RAGAV, M.; KARTHICK, S.; PARK, T.; LEE, H. S. Assessment of corrosion performance of steel rebar in snail shell ash blended cements under marine environments. **Materials**, v. 14, n. 23, p. 7286, 2021.
- RIDENGAOQIER, E; HATANAKA, S.; PALAMY, P.; KURITA, S. Experimental study on the porosity evaluation of pervious concrete by using ultrasonic wave testing on surfaces. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 123959, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123959.
- RODRÍGUEZ-GALÁN, M.; ALONSO-FARIÑAS, B.; BAENA-MORENO, F. M.; LEIVA, C.; NAVARRETE, B.; VILCHES, L. F. Synthetic slag production method based on a solid waste mix vitrification for the manufacturing of slag-cement. **Materials**, v. 12, n. 2, p. 208, 2019.
- RUSLAN, H. N.; MUTHUSAMY, K.; MOHSIN, S. M. S.; JOSE, R.; OMAR, R. Oyster shell waste as a concrete ingredient: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 48, p. 713-719, 2022.
- SÁ, M. K. C. R. G. **Durabilidade de pavimentos intertravados de concreto, utilizando casca de sururu como agregado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2024.
- SAINUDIN, M. S.; OTHMAN, N. H.; SOFFIAN, W. A.; MOHAMMAD, W.; IBRAHIM, M. H. W.; MUTHUSAMY, K. Properties of concrete containing mussel (*Perna viridis*) shell ash as partial cement replacement. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 11, n. 9, p. 154-163, 2019.
- SANGEETHA, P.; SHANMUGAPRIYA, M.; SARAVANAN, K. S.; PRABHAKARAN, P.; SHASHANKAR, V. Mechanical properties of concrete with seashell waste as partial replacement of cement and aggregate. **Materials Today: Proceedings**, v. 61, p. 320-326, 2022.
- SCRIVENER, K. L.; LOTHENBACH, B.; DE BELIE, N.; GRUYAERT, E.; SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R.; VOLLPRACHT, A. TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs: State of the art on methods to determine degree of reaction of SCMs. **Materials and Structures**, v. 48, p. 835-862, 2015
- SEO, J. H.; PARK, S. M.; YANG, B. J.; JANG, J. G. Calcined oyster shell powder as an expansive additive in cement mortar. **Materials**, v. 12, n. 8, p. 1322, 2019.
- SHAKOURI, M.; TEYMOURI, M.; VADDEY, N. P.; ZHANG, C.; KSAIBATI, K.; KUINKEL, M. S.; LIU, P. Enhancing physiochemical properties and reactivity of landfilled fly ash through thermo-mechanical beneficiation. **Cement and Concrete Composites**, v. 144, p. 105310, 2023.
- SHETTY, P. P.; RAO, A. U.; PAI, B. H. V.; KAMATH, M. V. Performance of high-strength concrete with the effects of seashell powder as binder replacement and waste glass powder as fine aggregate. **Journal of Composites Science**, v. 7, n. 3, p. 92, 2023.

SILVA, A. L.; KOHLMAN RABBANI, E. R.; SHAKOURI, M. Seashell Powder as a Sustainable Alternative in Cement-Based Materials: A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v. 17, n. 2, p. 592, 2025a. DOI: 10.3390/su17020592.

SILVA, A. L.; KOHLMAN RABBANI, E. R.; SHAKOURI, M. Protocol of the article "Seashell powder as a sustainable alternative in cement-based materials: a systematic literature review". **protocols.io**, 2025b. DOI: 10.3390/su17020592. DOI: 10.17504/protocols.io.n2bvj99d5lk5/v1.

SILVA, A. L.; SILVA, S. R.; LAFAYETTE, K. P. V. Análise espaço-temporal da deposição do resíduo da pesca de moluscos bivalves na Ilha de Deus, Recife - PE. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 28, p. e84281, 2024. DOI: 10.5902/2236499484281.

SNELLINGS, R.; SURANENI, P.; SKIBSTED, J. Future and emerging supplementary cementitious materials. **Cement and concrete research**, v. 171, p. 107199, 2023.

SOLTANZADEH, F.; BEHBAHANI, A. E.; PEREIRA, E. N.; TEIXEIRA, C. A. A life-cycle approach to integrate environmental and mechanical properties of blended cements containing seashell powder. **Sustainability**, v. 13, n. 23, p. 13120, 2021.

STEL'MAKH, S. A.; SHCHERBAN', E. M.; BESKOPYLNY, A. N.; MAILYAN, L. R.; MESKHI, B.; BESKOPYLNY, N.; KOTENKO, M. Nanomodified concrete with enhanced characteristics based on river snail shell powder. **Applied Sciences**, v. 12, n. 15, p. 7839, 2022.

STEL'MAKH, S. A.; SHCHERBAN', E. M.; BESKOPYLNY, A. N.; MAILYAN, L. R.; MESKHI, B.; TASHPULATOV, S. S.; CHERNIL'NIK, A.; SHCHERBAN', N.; TYUTINA, A. Composition, technological, and microstructural aspects of concrete modified with finely ground mussel shell powder. **Materials**, v. 16, n. 82, 2023.

SOLTANZADEH, F.; EMAM-JOMEH, M.; EDALAT-BEHBAHANI, A.; SOLTANZADEH, Z. Development and characterization of blended cements containing seashell powder. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 292-304, 2018.

SUN, R. W.; FANOURAKIS, G. C. An assessment of factors affecting the elastic modulus of concrete. **Structural Concrete**, v. 23, n. 1, p. 593-603, 2022.

TAYEH, B. A.; HASANIYAH, M. W.; ZEYAD, A. M.; AWAD, M. M.; ALASKAR, A.; MOHAMED, A. M.; ALYOUSEF, R. Durability and mechanical properties of seashell partially-replaced cement. **Journal of Building Engineering**, v. 31, p. 101328, 2020.

TAYEH, B. A.; HASANIYAH, M. W.; ZEYAD, A. M.; YUSUF, M. O. Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117723, 2019.

TOKESHI, M.; OTA, N.; KAWAI, T. A comparative study of morphometry in shell-bearing molluscs. **Journal of Zoology**, v. 251, n. 1, p. 31-38, 2000.

TOPIĆ POPOVIĆ, N.; LORENCIN, V.; STRUNJAK-PEROVIĆ, I.; ČOŽ-RAKOVAC, R. Shell waste management and utilization: Mitigating organic pollution and enhancing sustainability. **Applied Sciences**, v. 13, n. 1, p. 623, 2023.

UBACHUKWU, O. A.; OKAFOR, F. O. Towards green concrete: Response of oyster shell powder-cement concrete to splitting tensile load. **Nigerian Journal of Technology**, v. 39, n. 2, p. 363-368, 2020.

UNEP. United Nations Environment Programme. **2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Nairobi, 2020.

VASCONCELOS, C. V. S. A. **Avaliação do comportamento mecânico de blocos de pavimentos intertravados produzidos com resíduos de concha de sururu**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2022.

VILELA, R.; MASCIA, N. T. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira de Pinustaeda provenientes de placas de cross laminated timber. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 89-110, 2021. DOI: 10.1590/s1678-86212021000400560.

WANG, J.; DING, S.; DU, F.; TANG, J.; LIAO, J.; DENG, L.; LIU, J. Interaction between calcium hydroxide and calcium-alumino-silicate-hydrate on micromechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 449, p. 138321, 2024.

WANG, J.; LIU, E. Upcycling waste seashells with cement: Rheology and early-age properties of Portland cement paste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104680, 2020.

WANG, J.; LIU, E.; LI, L. Characterization on the recycling of waste seashells with Portland cement towards sustainable cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 235-252, 2019.

WANG, D.; SHI, C.; FARZADNIA, N.; SHI, Z.; JIA, H.; OU, Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 659-672, 2018.

XIAO, Y.; WATSON, M. Guidance on conducting a systematic literature review. **Journal of planning education and research**, v. 39, n. 1, p. 93-112, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0739456X17723971>.

XUAN, M.; CHO, H.; WANG, X. Performance improvement of waste oyster-shell powder-cement binary system via carbonation curing. **Journal of Building Engineering**, v. 70, p. 106336, 2023.

APÊNDICE A – PROTOCOLO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

 protocols.io Part of **SPRINGER NATURE**

Jan 14, 2025

 Protocol of the article "Seashell powder as a sustainable alternative in cement-based materials: a systematic literature review"

DOI

dx.doi.org/10.17504/protocols.io.n2bvj99d5lk5/v1

Alison Lopes da Silva¹, Emilia Rahnemay Kohlman Rabbani¹, Mahmoud Shakouri²

¹University of Pernambuco; ²Colorado State University

Systematic Review



Alison Lopes da Silva

University of Pernambuco

OPEN  ACCESS



DOI: dx.doi.org/10.17504/protocols.io.n2bvj99d5lk5/v1

Protocol Citation: Alison Lopes da Silva, Emilia Rahnemay Kohlman Rabbani, Mahmoud Shakouri 2025. Protocol of the article "Seashell powder as a sustainable alternative in cement-based materials: a systematic literature review". protocols.io <https://dx.doi.org/10.17504/protocols.io.n2bvj99d5lk5/v1>

License: This is an open access protocol distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited

Protocol status: Working
This protocol was used to
conduct the search and
selection of articles for the
systematic review of the
paper titled "Seashell Powder
as a Sustainable Alternative
in Cement-Based Materials: A
Systematic Literature
Review."

Created: December 13, 2024

Last Modified: January 14, 2025

Protocol Integer ID: 115439

Keywords: Systematic review, seashells, cementitious materials, cement replacement

Funders Acknowledgements:

**Coordenação de
Aperfeiçoamento de Pessoal
de Nível Superior – Brasil
(CAPES)**

Grant ID: 001

**Polytechnic School of the
University of Pernambuco
(POLI/UPE)**

Grant ID: Plan for the
Application of State
Government Resources for
Postgraduate Studies 2024

**Academic Enhancement
Program (PFA) of the
University of Pernambuco
(UPE)**

Grant ID: Extension Program
PG24-DESS@POLI 2024,
public notice 01/2024

**Academic Enhancement
Program (Programa de
Fortalecimento Acadêmico -
PFA) of University of
Pernambuco (UPE) through
PROPEGI**

Grant ID: Group Safe and
Sustainable Development -
DESS, Project No. P00980,
Faixa C, public notice "Apoio
à Pesquisa (APQ) – 2024

Disclaimer

DISCLAIMER – FOR INFORMATIONAL PURPOSES ONLY; USE AT YOUR OWN RISK

The protocol content here is for informational purposes only and does not constitute legal, medical, clinical, or safety advice, or otherwise; content added to [protocols.io](https://www.protocols.io) is not peer reviewed and may not have undergone a formal approval of any kind. Information presented in this protocol should not substitute for independent professional judgment, advice, diagnosis, or treatment. Any action you take or refrain from taking using or relying upon the information presented here is strictly at your own risk. You agree that neither the Company nor any of the authors, contributors, administrators, or anyone else associated with [protocols.io](https://www.protocols.io), can be held responsible for your use of the information contained in or linked to this protocol or any of our Sites/Apps and Services.

Abstract

This protocol is part of a systematic literature review aimed at critically analyzing and synthesizing the current body of knowledge on the reuse of seashells as a partial replacement for cement in the production of cementitious composites. The review emphasizes the characteristics of the shells examined, the processing methods utilized, the dosage levels implemented, and the laboratory tests conducted.

Although previous literature reviews on this subject exist, we have identified a need for a systematic review that provides a structured and comprehensive synthesis of studies. This approach allowed the extraction and organization of reported data, clarifying the effects of shell incorporation on these materials and understanding the potential of seashells as sustainable construction materials.

Defining the terms of interest and guiding questions for the review

1 Defining the terms of interest using the acronym PICo (Population, Interest, Context)

A	B	C
Criteria	Description	Synonyms
Population	Seashells	Seashell waste; Mollusk seashell; Seashell powder
Interest	Application in cementitious composites	Cement paste; Mortar; Concrete
Context	Replacing cement	Cement replacement; As binder

2 Preparing the generic string with the relevant terms of interest

(seashell OR seashell waste OR mollusk shell OR seashell powder OR seashell ash) AND (cementitious composites OR cement paste OR mortar OR concrete) AND (cement replacement OR replacing cement OR binder replacement OR as binder)

3 Defining the guiding questions for the review

1. What processing procedures have been applied in studies utilizing seashells as partial replacements for cement in cementitious composites?
2. What are the physical and chemical properties of the seashell powder used in these replacements?
3. What are the most commonly used substitution levels and types of cement?
4. How does the addition of shell powder impact the properties of the produced composite?

Defining the databases for the search and the adapted strings

4 Selection based on data collection

Databases with collections focused on building and construction:

- **Engineering Village** - <https://www.engineeringvillage.com/home.url?redir=t>
- **American Society of Civil Engineers** - <https://www.asce.org/>

Databases with comprehensive collections:

- **Science Direct** - <http://www.sciencedirect.com>
- **Web of Science** - <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>
- **Scopus** - <https://www.scopus.com/home.uri>
- **Google Scholar** - <https://scholar.google.com.br/>

5 Modifying the generic string to fit the structure of each database search engine

A	B
Database	Adapted string
Science Direct	(Seashell waste OR seashell powder OR mollusk shell) AND (Cementitious composites OR cement paste OR mortar OR concrete) AND (Replacing cement OR cement replacement)
Web of Science	ALL=(((seashell) OR (shell waste) OR (mollusk shell) OR (seashell powder) OR (seashell ash)) AND ((cementitious composites) OR (cement paste) OR (mortar) OR (concrete)) AND ((cement replacement) OR (replacing cement) OR (binder replacement) OR (as binder)))
Scopus	(seashell OR "seashell waste" OR "mollusk shell" OR "seashell powder") AND ("cementitious composites" OR "cement paste" OR mortar OR concrete) AND ("cement replacement" OR "replacing cement" OR "binder replacement" OR "as binder")
Engineering Village	((Seashell OR shell waste OR seashell powder) AND (Cementitious composites OR cement paste OR mortar OR concrete) AND (Replacing cement OR cement replacement))
American Society of Civil Engineers	(Seashell OR shell waste OR seashell powder OR mollusk shell) AND (Cementitious composites OR cement paste OR mortar OR concrete) AND (Replacing cement OR cement replacement OR binder replacement OR as binder)
Google Scholar	(seashell OR seashell waste OR mollusk shell OR seashell powder OR seashell ash) AND (cementitious composites OR cement paste OR mortar OR concrete) AND (cement replacement OR replacing cement OR binder replacement OR as binder)

Defining the selection criteria for research papers

6 Criteria for including files for evaluation:

IC1: The study presents the search terms in the title, abstract, and keywords.

IC2: The study was published between 2013 and 2023.

IC3: The study is classified as a primary study (not purely a review).

IC4: The study was published as a scientific article in a journal.

Criteria for excluding files during selection:

EC1: Duplicate study between databases.

EC2: The study was published before 2013.

EC3: The study is not classified as primary research but as a literature review.

EC4: The study was published in conference proceedings, books, or other non-journal publications.

EC5: Access to the full study is unavailable or only accessible for a fee.

EC6: The study does not address the use of seashells in any cementitious composite as a total or partial substitute for cement*.

**This review did not include studies investigating geopolymers, alkali-activated mixtures, and replacing limestone in cement production.*

Quality requirements:

1. The methodology described in the study is inconsistent or incomplete.
2. The characterization of the seashell is inconsistent (basic characterization data is missing).

7 Quality assessment checklist

The following checklist was used to evaluate the quality criteria of the articles, where mandatory items must be present, considering the nature of the studies. The additional items, marked as "extra" will serve as parameters to assess the level of detail, robustness, and overall study quality.

QA1: Does the study's methodology provide at least basic information regarding the following dosage details?

- Proportion of the mix (mandatory)
- Materials used in the mix (mandatory)
- Type of cement (mandatory)
- Quantities of each material per mix (extra)
- Detailed specifications of the materials (extra)

QA2: Is the seashell characterized at least in basic terms in the study, including the following items?

- Chemical composition with key elements (mandatory)
- Physical properties such as shape, specific gravity, surface area, etc. (mandatory)
- Description of the origin location (extra)
- Microstructural analysis (extra)

Article acquisition and selection

- 8 Conducting searches in databases by utilizing modified search strings and implementing inclusion criteria as limiting factors.
- 9 Downloading the data acquired from the search in both .bib and .ris formats, complete with associated metadata.
- 10 Uploading .bib and .ris files to the Rayyan platform (<https://www.rayyan.ai/>) for selection based on exclusion criteria.

- 11 Identifying duplicate files and performing an initial screening by reviewing the title, abstract, and keywords to apply the exclusion criteria.
- 12 Verification of full-text availability for the files selected during the initial screening, followed by an in-depth selection based on the content analysis of the articles to determine eligibility according to the exclusion criteria.
- 13 Conducting the quality assessment of the articles approved during the in-depth content analysis to ensure compliance with quality criteria.
- 14 Searching for articles within the references of the selected articles to broaden the results, with the identified articles undergoing the same selection process as outlined in steps 9 to 13.
- 15 Definition of the selected articles for data synthesis and addressing the proposed questions.

Data extraction and literature synthesis

- 16 Extraction of qualitative and quantitative data for grouping and reporting through descriptive statistics.
- 17 Extracted data storage in Excel tables and analyzed using R Studio software.
- 18 Addressing the proposed questions based on the analyses.
- 19 Reporting the results following the PRISMA statement recommendations (<https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-checklist>).

Protocol references

Page M J, McKenzie J E, Bossuyt P M, Boutron I, Hoffmann T C, Mulrow C D et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews *BMJ* 2021; 372 :n71 doi:10.1136/bmj.n71

ANEXO A – CERTIFICADO DE ENSAIOS NO CIMENTO CP II-F 32

Certificado de ensaios em cimento

CP II-F-32

Cimento Portland Composto com Filer

Janeiro 2025

ABNT NBR 16697

Fábrica

Pitimbu | PB



www.cimentonacional.com.br

Aracá • Carapicuíba • Marabá • Pindamonhangaba • São Paulo • São José do Rio Preto

Identificação

Responsável Técnico: Alexssander da Silva Prata | CRQ: 19200421 - 1ª RegiãoEndereço: Rodovia PB 044, km 18,5 | 58.324-000 | Fazenda CCP | Pitimbu | PBMarca e embalagem comercializada: MULTIMAX | Granel, big-bag e ensacado

Ensaio Químicos

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	DESV.PAD.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NBR NM 15	%	0,37	3,71	≤ 7,5
Perda ao Fogo - PF	ABNT NBR NM 18	%	0,79	11,30	≤ 12,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NBR 14656	%	0,29	2,66	não aplicável
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NBR 14656	%	0,10	2,64	≤ 4,5
Óxido de Sódio - Na ₂ O	ABNT NBR 14656	%	0,01	0,05	não aplicável
Óxido de Potássio - K ₂ O	ABNT NBR 14656	%	0,02	1,14	não aplicável
Equivalente Alcalino - Na ₂ O _{eq}	Na ₂ O + 0,658*K ₂ O	%	0,02	0,80	não aplicável

Ensaio Físicos

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	DESV.PAD.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Área Específica (Blaine)	ABNT NBR 16372	cm ² /g	126	4.040	não aplicável
Massa Específica	ABNT NBR 16605	g/cm ³	0,00	2,99	não aplicável
Finura pela peneira 75 µm	ABNT NBR 11579	%	0,37	1,71	≤ 12,0
Finura pela peneira 45 µm	ABNT NBR 9202/85	%	1,41	12,26	não aplicável
Água de consistência da pasta	ABNT NBR 16606	%	0,2	27,9	não aplicável
Início de pega	ABNT NBR 16607	min	6	185	≥ 60
Fim de pega	ABNT NBR 16607	min	6	245	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582	mm			≤ 5

Ensaio Mecânicos

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	DESV.PAD.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resist. à Compressão - 1 Dia	ABNT NBR 7215	MPa	0,6	13,8	não aplicável
Resist. à Compressão - 3 Dias	ABNT NBR 7215	MPa	0,4	23,6	≥ 10,0
Resist. à Compressão - 7 Dias	ABNT NBR 7215	MPa	0,7	29,6	≥ 20,0
Resist. à Compressão - 28 Dias	ABNT NBR 7215	MPa	0,5	33,7	≥ 32,0

Observações

Ensaio aos 28 dias não concluído em função da idade de ruptura ser maior que a presente data.

Atualização: terça-feira, 11 de fevereiro de 2025

Tiago Andrade Couto
Gerente Técnico de Desenvolvimento de Produto

ANEXO B – CERTIFICADO DE ENSAIOS NO CIMENTO CP V ARI RS MAX

Certificado de ensaios em cimento

CP V-ARI RS MAX

Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

Dezembro 2024

ABNT NBR 16697

Fábrica

Pitimbu | PB

[Lacimentonacional](#)
[cimentonacional](#)
www.cimentonacional.com.br

Aracás • Carapicuíba • Matãozinho • Pitimbu • Santa Luzia • São Lázaro

Identificação

Responsável Técnico: Alexssander da Silva Prata | CRQ: 19200421 - 1ª Região
 Endereço: Rodovia PB 044, km 18,5 | 58.324-000 | Fazenda CCP | Pitimbu | PB
 Marca e embalagem comercializada: MAX PERFORMANCE | Granel, big-bag e ensacado



Ensaio Químicos

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	DESV.PAD.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NBR NM 15	%	1,57	6,61	não aplicável
Perda ao Fogo - PF	ABNT NBR NM 18	%	0,49	5,45	≤ 6,5
Oxido de Magnésio - MgO	ABNT NBR 14656	%	0,13	1,99	não aplicável
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NBR 14656	%	0,09	4,28	≤ 4,5
Oxido de Sódio - Na ₂ O	ABNT NBR 14656	%	0,00	0,04	não aplicável
Oxido de Potássio - K ₂ O	ABNT NBR 14656	%	0,06	1,12	não aplicável
Equivalente Alcalino - Na ₂ O _{eq}	Na ₂ O + 0,658*K ₂ O	%	0,04	0,78	não aplicável

Ensaio Físicos

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	DESV.PAD.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Área Específica (Blaine)	ABNT NBR 16372	cm ² /g	65	4.376	não aplicável
Massa Específica	ABNT NBR 16605	g/cm ³	0,00	3,02	não aplicável
Finura pela peneira 75 µm	ABNT NBR 11579	%	0,02	0,03	≤ 6,0
Finura pela peneira 45 µm	ABNT NBR 9202/85	%	0,22	1,18	não aplicável
Água de consistência da pasta	ABNT NBR 16606	%	0,1	31,5	não aplicável
Início de pega	ABNT NBR 16607	min	7	199	≥ 60
Fim de pega	ABNT NBR 16607	min	104	213	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582	mm		0,3	≤ 5

Ensaio Mecânicos

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	DESV.PAD.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resist. à Compressão - 1 Dia	ABNT NBR 7215	MPa	0,5	21,3	≥ 14,0
Resist. à Compressão - 3 Dias	ABNT NBR 7215	MPa	0,9	34,1	≥ 24,0
Resist. à Compressão - 7 Dias	ABNT NBR 7215	MPa	0,8	40,2	≥ 34,0
Resist. à Compressão - 28 Dias	ABNT NBR 7215	MPa	0,7	47,6	não aplicável

Observações

Atualização: segunda-feira, 3 de fevereiro de 2025

Tiago Andrade Couto
 Gerente Técnico de Desenvolvimento de Produto