



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE – NÚCLEO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MARCO ANTÔNIO ASSIS DE OLIVEIRA

**USO DE DIATOMITA BRUTA COMO POZOLANA PARA PRODUÇÃO DE
*LIMESTONE CALCINED CLAY CEMENT (LC³)***

Caruaru

2024

MARCO ANTÔNIO ASSIS DE OLIVEIRA

**USO DE DIATOMITA BRUTA COMO POZOLANA PARA PRODUÇÃO DE
*LIMESTONE CALCINED CLAY CEMENT (LC³)***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Érika Pinto Marinho.

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega.

Caruaru
2024

MARCO ANTÔNIO ASSIS DE OLIVEIRA

**USO DE DIATOMITA BRUTA COMO POZOLANA PARA PRODUÇÃO DE
*LIMESTONE CALCINED CLAY CEMENT (LC³)***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Estruturas e materiais.

Aprovada em: 16/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Érika Pinto Marinho (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Profa. Dra. Maria Victória Leal de Almeida Nascimento (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Júlio César de Oliveira Freitas (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

À minha avó de coração, Aldenir Afonso (in memoriam), a quem devo toda a minha formação não só acadêmica, mas como da vida, e que me ensinou que não precisamos de laços de sangue para vivermos o amor da família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ser minha força maior e por me guiar sempre para o melhor caminho, objetivando o que é melhor para a minha vida. Nos momentos de aflição, pude encontrar coragem para continuar, e nos momentos de glória, agradecer por tanto.

Aos meus maiores tesouros, Aldenir Afonso (*in memoriam*), Dinha, Dita e Neida (*in memoriam*), devo toda minha vida e tudo que consegui conquistar até hoje, por estarem sempre presentes, demonstrando o real significado do amor.

Aos meus pais, Jones e Dilânia, por sempre me mostrarem o caminho da verdade, proporcionando-me carinho, amor e proteção.

Às minhas grandes orientadoras, Dr.^a Ana Cecília e Dr.^a Érika, que levarei para o resto da vida, sempre me ajudando e orientando durante a minha jornada acadêmica e profissional, principalmente no meu período sanduíche no exterior.

À Universidade Federal de Pernambuco, campus Caruaru, pela oportunidade que me foi dada de realizar meu sonho de estudar nessa instituição e agregar valores e conhecimentos. Bem como ao corpo docente do PPGECA, por proporcionar formação científica e caráter profissional, em nome do secretário Marcelo, que sempre viabilizou as melhores soluções para as demandas que surgiram.

À Marina Gadelha pelo amor, apoio e compreensão em todos os momentos.

Às empresas parceiras que doaram as matérias-primas: Intercement (clínquer), engenheiro Thyago Germano (gesso beta), Metacaulim Brasil (metacaulim), Mineração Paulista (filler calcário), a BASF (superplastificante) e Cimenteira Elo, em nome do amigo Luciano Tertius que não mediu esforços em colaborar no fornecimento de materiais que foram necessários à pesquisa (diatomita).

Ao Laboratório de Química da UFPE/CAA e seus membros, técnicos Henrique Lira, Wagner, Amanda e Claudete, pela realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Construção Civil – LCC e aos técnicos Everton e Rafael pelo auxílio na realização dos ensaios.

Ao grupo de pesquisa da professora Dr.^a Nathalia Bezerra de Lima e Heliana que auxiliaram na realização dos ensaios junto ao Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM).

Aos laboratórios Labcim (Laboratório de Cimentos) da UFRN e Laboratório de Tomografia Computadorizada da UFPE, também pela realização de ensaios.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos que permitiu o desenvolvimento da pesquisa.

Às minhas companheiras e companheiros de pesquisas e estudos, Maryane Cordeiro e Gabryelle Bezerra, Edmilson Roque e Marcos David que compartilharam comigo das mesmas aflições e glórias do percurso acadêmico.

E, por último, mas não menos importante, a todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para minha trajetória acadêmica e minha formação pessoal e profissional.

RESUMO

O *limestone calcined clay cement* (LC³) possui propriedades que refletem em um menor impacto frente ao cimento Portland tradicional e tem as argilas calcinadas, incluindo o metacaulim, como uma das suas matérias-primas. No entanto, as altas temperaturas de calcinação das argilas implicam em gastos energéticos e liberação de gases de efeito estufa. Nesse cenário emergem as pozolanas naturais que não necessitam de calcinação, incluindo redução de custos, redução na evolução de calor, diminuição da permeabilidade, bem como o aumento da resistência química; atuando, ainda, como agente modificador das suas propriedades. Este trabalho teve como objetivo estudar o efeito do percentual de substituição do metacaulim por diatomita nas propriedades mecânicas e permeabilidade na produção de cimentos LC³. Foi utilizada diatomita bruta a fim de minimizar gastos energéticos e emissões no processo. O estudo realizou uma análise da diatomita, destacando sua disponibilidade e custo competitivo em comparação com outras pozolanas. A pesquisa explorou não apenas a viabilidade técnica da diatomita em cimentos LC³, mas também o impacto de diferentes proporções na hidratação e propriedades mecânicas das pastas cimentícias. Os materiais foram caracterizados por difração de raios-X e tomografia computadorizada. Os resultados indicaram que a substituição de metacaulim por diatomita bruta mostrou-se promissora nos teores de até 75% de substituição, com ressalvas impactos em termos de redução de calor de hidratação, diminuição da resistência à compressão e da permeabilidade. Embora os resultados imediatos tenham mostrado que a diatomita bruta não superou a performance das misturas apenas com metacaulim nos estágios iniciais, as misturas com diatomita demonstraram uma tendência crescente em resistência em idades mais avançadas. Este achado sugere o potencial latente da diatomita em melhorar propriedades de cimento a longo prazo, um aspecto crítico para materiais de construção sustentáveis. Além disso, o estudo ressaltou a necessidade de compreender melhor o grau de pureza da diatomita, uma vez que esse fator influenciará no desempenho quando incorporado ao sistema LC³.

Palavras-chave: Pozolanas Naturais; Cimentos Verdes; Matérias-primas Alternativas; Metacaulim; Gasto Energético.

ABSTRACT

Limestone calcined clay cement (LC³) has properties that result in a lower environmental impact compared to traditional Portland cement, with calcined clays, including metakaolin, as one of its raw materials. However, the high calcination temperatures of clays lead to energy consumption and the release of greenhouse gases. In this context, natural pozzolans that do not require calcination emerge as an alternative, offering cost reduction, decreased heat evolution, reduced permeability, and increased chemical resistance, also acting as a modifier of their properties. This study aimed to investigate the effect of replacing metakaolin with diatomite on the mechanical properties and permeability in the production of LC³ cements. Raw diatomite was used to minimize energy consumption and emissions in the process. The study included an analysis of diatomite, highlighting its availability and competitive cost compared to other pozzolans. The research explored not only the technical feasibility of diatomite in LC³ cements but also the impact of different proportions on hydration and the mechanical properties of cementitious pastes. The materials were characterized by X-ray diffraction and computed tomography. The results indicated that replacing metakaolin with raw diatomite was promising at substitution levels up to 75%, with noted impacts on reducing heat of hydration, compressive strength, and permeability. Although the immediate results showed that raw diatomite did not outperform metakaolin-only mixtures in the early stages, the diatomite mixtures demonstrated a growing strength trend at later ages. This finding suggests the latent potential of diatomite to improve cement properties in the long term, a critical aspect for sustainable building materials. Additionally, the study emphasized the need to better understand the purity of diatomite, as this factor will influence performance when incorporated into the LC³ system.

Keywords: Natural Pozzolans; Green Cements; Alternative Raw Materials; Metakaolin; Energy Consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do manejo de CO ₂ para produção de materiais cimentícios.	20
Figura 2 – Influência potencial da produção de LC ³ em termos de consumo de energia.	26
Figura 3 – Trabalhos publicados nos últimos anos com a temática de redução de CO ₂ em produção de cimento (Scopus).	27
Figura 4 – Organograma da metodologia experimental.	30
Figura 5 – CPI elaborado em laboratório.	31
Figura 6 – Moinho de bolas de alta energia PM 100 – RETSCH.	32
Figura 7 – Fíler calcário.	33
Figura 8 – Metacaulim do Brasil S.A. Ultra-HP.	34
Figura 9 – Diatomita bruta.	35
Figura 10 – Frasco de Le Chatelier.	36
Figura 11 – Equipamento utilizado para o Método Blaine.	37
Figura 12 – Método de Chapelle Modificado.	39
Figura 13 – Distribuição do tamanho das partículas das matérias primas.	44
Figura 14 – DRX do clínquer.	47
Figura 15 – DRX do gesso.	48
Figura 16 – DRX do filer calcário.	49
Figura 18 – DRX da diatomita.	51
Figura 19 – Abertura blaine (D) com melhores valores de superplastificante (PCE) versus percentual de substituição de MK por diatomita nas pastas de cimento LC ³	52
Figura 20 – (a) LC ³ -50-0; (b) LC ³ -50-25; (c) LC ³ -50-50; (d) LC ³ -50-75; (e) LC ³ -50-100.	53
Figura 21 – (a) CPI; (b) LC ³ -50-0; (c) LC ³ -50-25; (d) LC ³ -50-50; (e) LC ³ -50-75; (f) LC ³ -50- 100.	53
Figura 22 – Variação da resistência à compressão do LC ³ com o tempo.	54
Figura 23 – Interior dos espécimes pós-ensaio de resistência mecânica (a) LC ³ -50-0; (b) LC ³ - 50-50; (c) LC ³ -50-75.	55
Figura 24 – Difratoograma das amostras a) 7 dias e b) 28 dias.	56
Figura 26 – Tomografia computadorizada de Raios- X aos 28 dias.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporções de misturas dos cimentos estudados.	40
Tabela 2 – Caracterização física das matérias-primas.	43
Tabela 3 – Composição química das matérias-primas.	45

LISTA DE SIGLAS

AFm	Monosulfato
AFt	Etringita
AS ₂	Metacaulim
C ₂ S	Belita
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Alita
C-A-S-H	Silicoaluminatos de cálcio hidratados
COP 21	Conferência Mundial das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratados
DI	Diatomita
GEE	Gases de Efeito Estufa
GPC	General Purpose Cement
Hc	Hemicarboaluminato
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LC ³	Limestone Calcined Clay Cement
Mc	Monocarboaluminato
MCS	Materiais cimentícios suplementares
OPC	Ordinary Portland Cement

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	18
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Emissões de CO₂ e Sustentabilidade na Indústria Cimenteira	19
2.2	Cimentos verdes e LC³	20
2.2.1	<i>Matérias-primas Utilizadas no LC³</i>	22
2.2.1.1	<i>Metacaulim</i>	22
2.2.1.2	<i>Fíler Calcário</i>	23
2.2.2	<i>Produção e Impacto Ambiental</i>	24
2.3	Desafios da Calcinação	25
2.4	Pozolanas Naturais: Uma Alternativa Sustentável	27
2.5	Diatomita	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Materiais Utilizados	31
3.1.1	<i>Cimento Portland</i>	31
3.1.2	<i>Gesso</i>	32
3.1.3	<i>Superplastificante</i>	32
3.1.4	<i>Fíler Calcário</i>	33
3.1.5	<i>Metacaulim</i>	33
3.1.6	<i>Diatomita</i>	34
3.1.7	<i>Água</i>	35
3.2	Caracterização das Matérias-primas Utilizadas	35
3.2.1	<i>Granulometria</i>	35
3.2.2	<i>Massa Específica</i>	36
3.2.3	<i>Área Superficial Específica – Método Blaine</i>	36
3.2.4	<i>Fluorescência de Raio-X</i>	37
3.2.5	<i>Difração de Raio-X</i>	37
3.2.6	<i>Perda ao Fogo</i>	38
3.2.7	<i>Atividade Pozolânica – Método de Chapelle Modificado</i>	38
3.3	Preparação do Cimento e das Misturas	39

3.3.1	<i>Produção do CPI.....</i>	39
3.3.2	<i>Preparação das Misturas</i>	39
3.4	<i>Análises no Estado Fresco</i>	41
3.4.1	<i>Mini-Slump.....</i>	41
3.5	<i>Análises no Estado Endurecido</i>	41
3.5.1	<i>Resistência à compressão.....</i>	41
3.5.2	<i>Análise Térmica</i>	41
3.5.3	<i>Análise e distribuição dos poros por meio da Tomografia 3D Computacional</i>	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	Caracterização dos materiais	43
4.1.1	<i>Composição das matérias-primas.....</i>	43
4.2	Caracterização do estado fresco	51
4.2.1	<i>Mini-slump e demanda de teor de superplastificante pelo LC³ com diatomita</i>	51
4.3	Caracterização do estado endurecido	53
4.3.1	<i>Análise de Resistência Compressiva.....</i>	53
4.3.2	<i>Difração de Raio-X</i>	55
4.3.3	<i>Análise térmica.....</i>	57
4.3.4	<i>Tomografia 3D Computacional.....</i>	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A preocupação em reduzir as emissões de CO₂ no planeta tem levado as indústrias cimenteiras a buscarem novas tecnologias a fim de desenvolver novos materiais como é o caso dos cimentos verdes, incluindo a redução do fator clínquer (BARBALHO; SILVA; RÊGO, 2020; SCRIVENER, 2014). Além disso, outras ações também são vieses importantes para a pegada sustentável dos materiais cimentícios, como melhorar a eficiência energética de fornos e pré-calcinadores, utilização de matérias-primas alternativas, novos clínquer alternativos, aprimoramento da eficiência de moagem, captura e armazenamento de carbono (AL-FADALA *et al.*, 2017; DHANDAPANI *et al.*, 2021; HOSSAIN *et al.*, 2021; MEJÍA; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; MONTES, 2016).

Nesse cenário, surge o cimento de calcário e argila calcinada (LC³) (DHANDAPANI *et al.*, 2020; HOU *et al.*, 2021; SCRIVENER *et al.*, 2018; YU *et al.*, 2021) que usa a sinergia entre argilas calcinadas (como metacaulim (ANTONI *et al.*, 2012a; CARDINAUD *et al.*, 2021)) e filer calcário para reduzir o fator de clínquer em até 50% (BARBALHO; SILVA; RÊGO, 2020; SCRIVENER *et al.*, 2018). De acordo com Scrivener (2014) o sistema LC³ pode ser difundido em escala global, tendo em vista que não se limita ao uso de materiais mais escassos e restrito a algumas localidades como cinzas volantes e escórias, pois as argilas são amplamente disponíveis (MARTIRENA; ALUJAS, 2020) em diversas regiões do planeta, como países com maiores demandas por cimento como Índia e Brasil (BARBALHO; SILVA; RÊGO, 2020; BISHNOI *et al.*, 2014; SCRIVENER, 2014; SNELLINGS; SALZE; SCRIVENER, 2014). Além disso, por se tratar de uma proposta inovadora no Brasil, desafios e oportunidades permeiam o LC³, incluindo o uso de matérias-primas locais, bem como os desafios tecnológicos inerentes às diferentes aplicações industriais.

O sistema mais aceito atualmente é o chamado LC³-50 que implica 50% de clínquer + 5% de gesso + 30% de argila calcinada + 15% de calcário. Os produtos de hidratação usuais do cimento Portland composto de clínquer e gesso (à temperatura ambiente) incluem hidrato de silicato de cálcio (C-S-H), Portlandita (CH), etringita e monossulfato. A capacidade de redução do teor de clínquer em 50% em LC³ é compensada pela formação de novos produtos de hidratação resultantes da ação sinérgica da argila calcinada com o filer calcário, nomeadamente mono e hemicarboaluminatos e C-S-H secundário da ação secundária da Portlandita com sílico-aluminatos amorfos (Al₂Si₂O₇) de argila calcinada como pozolana, resultando em C-(A)-S-H e hidratos de aluminato (AVET; BOEHM-COURJAULT; SCRIVENER, 2019a; AVET;

SCRIVENER, 2018; KRISHNAN *et al.*, 2018; ZUNINO; SCRIVENER, 2021). Essa propriedade pode garantir o preenchimento dos poros presentes na mistura e consequentemente favorecer a melhoria das propriedades da pasta de cimento, como resistência e durabilidade (SCRIVENER *et al.*, 2018a).

No entanto, o uso de metacaulim implica custos extras de energia e emissões de CO₂ devido ao tratamento térmico geralmente entre 600°C e 900°C necessário para desidroxilar a estrutura cristalina da caulinita para gerar metacaulim (ANTONI *et al.*, 2012; FERNANDEZ; MARTIRENA; SCRIVENER, 2011; SABIR; WILD; BAI, 2001). Portanto, o uso de pozolanas naturais alternativas, como a diatomita, é um caminho promissor, não sendo necessárias argilas calcinadas reativas em sistemas LC³ (LV; JIANG; LIANG, 2022; MACEDO *et al.*, 2020). Com a esperada redução na disponibilidade das pozolanas usualmente utilizadas ao longo do tempo, o estudo de pozolanas alternativas é requerido (TURANLI; UZAL; BEKTAS, 2005).

As pozolanas naturais possuem composição química rica em cátions base Si, Al, Fe, Ca, Mg, K e Na. Geralmente possuem um teor dominante de sílica, e a partir deste valor e do teor de Na₂O + K₂O, são classificados como: riolíticos, com teores superiores a 77% de SiO₂, dacíticos (63-77% SiO₂), andesítico (57-63% SiO₂), basalto-andesítico (52-57% SiO₂) e basáltico (45-52% SiO₂) (NANZYU; DAHLGREN; SHOJI, 1993; ROBAYO-SALAZAR; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, 2018; SHOJI; DAHLGREN; NANZYU, 1993). A perda por ignição (LOI), que representa a massa de umidade e material volátil presente em uma amostra, é geralmente baixa, mas pode atingir valores superiores a 10% em peso quando as pozolanas naturais (PNs) ou *natural pozzolans* (NPs) contêm algum zeólito ou minerais do tipo argila (BRUNETTO *et al.*, 2006; UZAL *et al.*, 2010).

De maneira geral, a composição mineralógica (fase cristalina) das NPs pode ser entendida associando-se sua composição química e a interação desses elementos durante o processo de intemperismo, que ocorre a partir de diversos fatores naturais, catalisadores de reações como temperatura, pressão e tempo (ROBAYO-SALAZAR; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, 2018).

A diatomita ou terra diatomácea destaca-se como uma das principais substâncias pozolânicas naturais, ou seja, carregam um componente mineral ativo – a opala – para uma reação pozolânica (FRAGOULIS *et al.*, 2005; MAINA; MBARAWA, 2011). Diferentemente de outras pozolanas naturais, formadas a partir de rochas e minerais vulcânicos, caracterizam-se por materiais de origem biogênica, compostos por conchas de algas microscópicas ou frústulas de esponjas, cuja estrutura é a sílica amorfa hidratada (AVRAMENKO *et al.*, 2015; SARIDEMIR; YILDIRIM, 2022). Eles também incluem pequenas quantidades de substâncias

inorgânicas, como alumina, ferro e metais alcalinos. Dependendo do grau de pureza, dado pelo percentual das frústulas, podem ser misturados diretamente ao cimento, substituindo uma porção do clínquer Portland, ou adicionados após tratamento térmico (KASTIS *et al.*, 2006).

A atividade pozolânica da diatomita pode ser aumentada através de tratamentos térmicos e por moagem. A diatomita que possui superfície específica reduzida apresenta baixa atividade pozolânica, mesmo quando constituída por alto níveis de sílica amorfa e alumina. Santos & Cordeiro (2021) observaram que com maior tempo de moagem consegue-se produzir partículas ultrafinas que contribuem para a resistência à compressão em idades posteriores de argamassas.

Ainda não há aplicações de diatomita em LC³, mas pode ser uma boa proposta tendo em vista os resultados aceitáveis com materiais cimentícios apresentados em (MACEDO *et al.*, 2020; MOTA DOS SANTOS; CORDEIRO, 2021), pois a diatomita se comportou como um agente importante na melhoria das propriedades de pastas cimentícias, argamassas e concreto. O efeito da adição de diatomita como pozolana alternativa foi avaliado por comparação com metacaulim em Santos *et al.* (2015), alterando drasticamente a microestrutura e as propriedades mecânicas de pastas geopoliméricas, em que a adição de diatomita em pastas à base de metacaulim levou a uma melhora significativa nas propriedades mecânicas das pastas curadas, aumentando a resistência à compressão em até 67%, devido à área de superfície e à inércia química da diatomita.

A pozolanicidade da diatomita avaliada em Montanheiro *et al.* (2002) atingiu os critérios normativos brasileiros, configurando-se como uma pozolana alternativa promissora para regiões que são desprovidas de argilas caulínicas. Macedo *et al.* (2020) constataram que a adição de até 10% de diatomita em concreto aumentou sua resistência à compressão devido ao teor de sílica da diatomita e reduziu ligeiramente a porosidade.

Li *et al.* (2019) utilizaram uma diatomita *in natura* ultrafina (D₅₀ de 6,8 µm) para dispensar seu tratamento térmico, obtendo aumentos significativos na resistência à compressão das argamassas ao substituir o cimento pela diatomita em até 30% (em massa). Neste estudo, a diatomita utilizada apresentou altos teores de SiO₂ (85,6%) e material amorfo (83%), além de alta superfície específica (27.800 m²/kg) que proporcionou otimização das propriedades pozolânicas. A melhoria das resistências mecânicas em idades posteriores de argamassas produzidas pela substituição do cimento por altos níveis de diatomita (*in natura*, até 40% em massa) também foi relatada em Ahmadi *et al.* (2018), bem como redução da absorção de água.

Paiva *et al.* (2017) verificaram o desempenho tanto do metacaulim (MK) quanto da diatomita na substituição do cimento no concreto e constataram que o uso de um agente redutor de água (superplastificante) para ajustar a trabalhabilidade ao invés da água, promove uma

melhora tanto na microestrutura quanto nas características do estado endurecido, como porosidade e resistência mecânica. Segundo eles, o uso desse aditivo promove a dispersão de aglomerados de partículas e também a dispersão de partículas de cimento e pozolanas. Essa dispersão aumenta a reatividade das pozolanas de modo que as partículas dispersas e mais finas são mais reativas. Portanto, o presente estudo propõe a utilização de um superplastificante do tipo éter policarboxilato (PCE), visto que pesquisas anteriores com LC³ já foram utilizadas com este tipo de aditivo (AVET; LI; SCRIVENER, 2018; AVET; SCRIVENER, 2018).

Embora tenham sido publicadas pesquisas com substituição parcial e/ou total do cimento por diatomita (MONTANEIRO *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2019; MACEDO, 2022; SANTOS, 2021; SANTOS *et al.*, 2015), esta pesquisa propôs a substituição parcial e total do metacaulim por diatomita em sistemas ternários atuando sinergicamente com o fíler calcário. Sendo assim, neste estudo, a influência do uso da diatomita como pozolana natural, em substituição parcial ou total do metacaulim (0, 25, 50, 75 e 100%) para a fabricação de LC³-50 (50% clínquer e argila calcinada /calcário proporção 2:1). A diatomita bruta (encontrada na natureza) foi classificada na peneira #400. O teste de Chapelle Modificado foi realizado para verificar sua atividade pozolânica. Experimentos de resistência à compressão foram realizados e avaliados por meio de reações do clínquer, cinética de hidratação e desenvolvimento microestrutural de sistemas LC³ com diatomita bruta em comparação com OPC.

1.1 Justificativa

A pesquisa fundamenta-se na necessidade de explorar alternativas sustentáveis e eficientes na construção civil, visando mitigar os impactos ambientais associados à produção de cimento (OYAWA; LECT; KENYATTA, 2004). Neste contexto, a incorporação da diatomita surge como uma solução promissora, dada a sua capacidade de atuar como uma pozolana eficaz, contribuindo para a redução do consumo energético na produção de cimento (ERGÜN, 2011).

A relevância desta pesquisa é ainda mais evidenciada quando se considera o potencial da diatomita bruta em reduzir significativamente as emissões de CO₂, um dos principais gases de efeito estufa, contribuindo assim para a dinâmica das mudanças climáticas. Este aspecto é crucial, considerando o papel proeminente da indústria cimenteira como uma das maiores emissoras de CO₂. A diatomita, ao substituir parcialmente a argila calcinada, permite uma produção de cimento mais limpa e ecologicamente responsável.

Além disso, a diatomita destaca-se pela sua ampla aplicabilidade em diferentes contextos da construção civil, oferecendo versatilidade e adaptabilidade, características essenciais para atender às diversas demandas e especificações do setor. Esta ampla aplicabilidade potencializa o seu impacto positivo, permitindo uma implementação extensiva e diversificada.

Comparativamente a outras pozolanas, como o metacaulim, a diatomita oferece vantagens econômicas e ambientais consideráveis (Li *et al.*, 2020). O metacaulim, obtido através da calcinação de argilas cauliníticas a temperaturas entre 500 °C e 900 °C, apresenta um processo de produção energeticamente intensivo. A diatomita, por outro lado, requer processos menos intensivos em termos energéticos, reforçando o seu perfil como uma alternativa mais sustentável e economicamente viável.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Produção de cimento LC³ a partir de clínquer com 0, 25, 50, 75 e 100% de substituição de metacaulim por diatomita, com razão metacaulim/diatomita: calcário 2:1, sem a utilização de tratamentos térmicos, mecânicos ou químicos com a diatomita.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as características físicas e atividade pozolânica da diatomita bruta;
- Estudar o efeito do percentual de substituição do metacaulim por diatomita nas propriedades mecânicas e porosidade por Tomografia 3D dos sistemas ternários;
- Analisar os mecanismos envolvidos na formação dos sistemas ternários por difratograma e Tomografia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Emissões de CO₂ e Sustentabilidade na Indústria Cimenteira

A indústria cimenteira é uma das maiores emissoras de CO₂ no mundo, contribuindo significativamente para as mudanças climáticas globais (VAN OSS; PADOVANI, 2002). A produção de cimento é intensiva em energia, principalmente devido à calcinação do calcário, que libera CO₂ no processo (HABERT; ROUSSEL, 2009). Além disso, a queima de combustíveis fósseis nos fornos de cimento também contribui para as emissões (FLOWER; SANJAYAN, 2017). Dada a crescente demanda por cimento, especialmente em países em desenvolvimento, é imperativo buscar alternativas mais sustentáveis (MILLER; HORVATH; MONTEIRO, 2018).

De acordo com Huo *et al.* (2022) emissão de CO₂ pela indústria cimenteira tem implicações profundas no meio ambiente e na saúde pública. Estas emissões são uma das principais causas do efeito estufa, que leva ao aquecimento global e às mudanças climáticas. Conforme apontado pelo IPCC (2018) O aumento das temperaturas globais resulta em eventos climáticos extremos, como secas, inundações e tempestades mais intensas, que têm consequências devastadoras para comunidades, ecossistemas e economias.

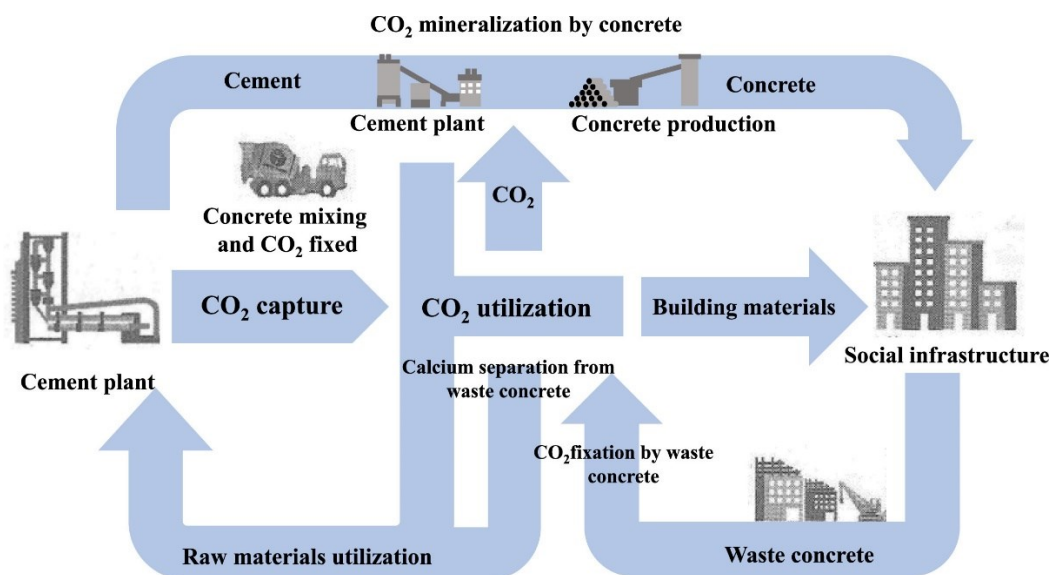
Além disso, de acordo com Lee & Sarran (2022) a emissão de CO₂ e outros poluentes na atmosfera pode resultar em problemas de qualidade do ar, levando a problemas respiratórios e outras doenças relacionadas. Em áreas próximas a fábricas de cimento, a poluição do ar pode ser particularmente intensa, afetando a saúde e o bem-estar das comunidades locais (NAZIR *et al.*, 2023).

A acidificação dos oceanos é outra consequência direta. À medida que mais CO₂ é absorvido pelos oceanos, eles se tornam mais ácidos, afetando a vida marinha, especialmente organismos que dependem de carbonato de cálcio para suas conchas e esqueletos, como corais e moluscos (FRIDAY; CLIMATE, 2012).

Dada a magnitude desses impactos, há um crescente reconhecimento da necessidade de reduzir as emissões de CO₂ da indústria cimenteira. Isso tem levado a inovações em tecnologias de produção de cimento, bem como a adoção de práticas mais sustentáveis em toda a cadeia de valor do cimento (BERTSIMAS, 2023). Dutta e Maity (2015) viram que a energia representa entre 25 a 35% do consumo direto total na fabricação de cimento. Esta proporção significativa motiva a busca constante por abordagens tecnológicas mais eficazes em termos de consumo energético, visando otimizar a rentabilidade e fortalecer a posição competitiva da indústria cimenteira.

No âmbito da pesquisa sobre os impactos ambientais na indústria cimenteira e ressaltado por Guo *et al.* (2023), observa-se a significativa experiência acumulada pelo Japão em relação à recuperação de recursos. Destaca-se a reciclagem de carbono como tecnologia-chave para atingir a neutralidade de carbono, assim como a utilização de materiais brutos nas plantas de cimento, conforme representado na Figura 1.

Figura 1- Esquema do manejo de CO₂ para produção de materiais cimentícios.



Fonte: Guo *et al.* (2023).

Nesse contexto, o LC³ tem ganhado destaque como uma alternativa sustentável na produção de cimento no Brasil e no mundo (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

2.2 Cimentos verdes e LC³

A partir de Wen *et al.* (2023) tem-se que a concepção de cimentos verdes surgiu em resposta à imperativa necessidade de desenvolver alternativas ecologicamente sustentáveis ao cimento Portland tradicional. A produção de cimento é identificada como uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono, e, portanto, a busca por soluções mais ambientalmente legais tornou-se uma prioridade crucial para a indústria do cimento (ZHANG *et al.*, 2021b).

No caso de misturas simples constituídas apenas por cimento e água, o processo de hidratação é um fenômeno químico complexo, envolvendo diversos processos cinéticos interdependentes. Estes incluem a dissolução de partículas de cimento anidro, a difusão de espécies iônicas na microestrutura e a precipitação de vários produtos de hidratação, cada um

governado por um mecanismo distinto. Ao introduzir adições minerais, como calcário, quartzo e pozolanas, a complexidade aumenta, devido às interações químicas entre cimento, água, adições e aditivos, resultando em graus significativos de liberdade (HOSSAIN *et al.*, 2021; LAPEYRE; KUMAR, 2018; QUEIROZ, 2022).

As pozolanas, como material de silicato ou aluminossilicato, reagem com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 ou CH), resultando na precipitação adicional de C–S–H, aumentando assim seu conteúdo no sistema. Estas adições não apenas possuem efeito pozolânico, mas também exibem um efeito de preenchimento que acelera a cinética de hidratação do cimento, especialmente nas primeiras 5 horas de hidratação (QUEIROZ, 2022; JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019; LAPEYRE; KUMAR, 2018; WEN; CHEN; MENG, 2015).

A interação sinérgica entre calcário e metacaulim revela uma reatividade mais rápida quando acoplados do que em misturas binárias (calcário/cimento Portland e metacaulim/cimento Portland). Esta sinergia entre carbonato de cálcio e alumina do metacaulim estabiliza a etringita e forma quantidades significativas de hemicarboaluminato, e em menor medida, monocarboaluminato, a partir do primeiro dia. Este fenômeno, observado em misturas contendo argila calcinada e calcário (ANTONI *et al.*, 2012; KRISHNAN; EMMANUEL; BISHNOI, 2019a), destaca o papel fundamental do calcário na estabilização da etringita.

Durante a hidratação do cimento Portland comum, a reação dos íons sulfato com o C_3A forma a etringita, a qual, quando completamente consumida, combina-se com a fase C_3A para formar o monossulfato. Contudo, em sistemas LC^3 , mesmo com quantidades substanciais de alumina, a etringita não se transforma completamente em monossulfato na ausência de calcário, mantendo picos de etringita visíveis após 90 dias. A presença de calcário é crucial para estabilizar a etringita (ADU-AMANKWAH *et al.*, 2017; AVET; BOEHM-COURJAULT; SCRIVENER, 2019; KRISHNAN; EMMANUEL; BISHNOI, 2019a; SHARMA *et al.*, 2021), e o teor inicial de sulfato é mais relevante para o teor de etringita do que o teor de caulinita calcinada (AVET; SCRIVENER, 2018).

Além das reações normais do cimento Portland, no sistema LC^3 , três reações principais se destacam: a reação pozolânica clássica do metacaulim com a portlandita, contribuindo para a resistência pelo preenchimento do espaço; a reação entre a alumina no C_3A , calcário e portlandita, formando monocarboaluminato e hemicarboaluminato em vez de monossulfoaluminato, liberando mais sulfatos para formar etringita; e a observação de maiores quantidades de hemicarboaluminato e monocarboaluminato, influenciadas pelo conteúdo de metacaulim e sulfato, durante um terceiro pico de hidratação entre 48 e 72 horas (AVET; SCRIVENER, 2020b; SHARMA *et al.*, 2021).

O LC³ é caracterizado pela sinergia entre argilas calcinadas e fíler calcário, reduzindo significativamente a necessidade de clínquer na mistura, o que se traduz em menores emissões de CO₂ por tonelada de cimento produzida (TURNER; COLLINS, 2013). Além disso, o LC³ demonstrou ser uma alternativa viável ao cimento Portland em diversas aplicações, promovendo a sustentabilidade na indústria cimenteira mundial.

2.2.1 Matérias-primas Utilizadas no LC³

A produção sustentável de cimento tem sido uma prioridade na indústria da construção civil, dada a necessidade de reduzir o impacto ambiental associado à produção tradicional de cimento Portland. Neste contexto, o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) como substitutos parciais do cimento Portland tem emergido como uma abordagem promissora (SCRIVENER *et al.*, 2019a). No entanto, é importante notar que muitos desses MCS, como a escória de alto forno granulada e as cinzas volantes de carvão, são limitados em sua disponibilidade, representando apenas cerca de 20% da produção total de cimento. Além disso, sua distribuição geográfica é desigual, estando frequentemente vinculados a regiões específicas ou polos industriais.

O LC³, por outro lado, incorpora matérias-primas já utilizadas em cimentos industriais, mas de uma maneira inovadora. Ao combinar múltiplas adições no sistema, o LC³ potencializa suas propriedades, permitindo uma substituição mais significativa do cimento tradicional. Entre essas adições, destacam-se as pozolanas, que podem ser obtidas através da calcinação da argila, resultando na formação do metacaulim, e o calcário, que não só atua como um agente de preenchimento, mas também contribui quimicamente para a hidratação do cimento. Esta abordagem integrada oferece uma solução mais sustentável e eficiente para a produção de cimento, alinhando-se com as demandas contemporâneas de sustentabilidade e inovação na indústria da construção civil.

2.2.1.1 Metacaulim

As argilas calcinadas são derivadas do processo de calcinação de argilas naturais, principalmente a caulinita. A calcinação é um tratamento térmico que envolve o aquecimento da argila a temperaturas entre 500°C e 900°C, resultando na remoção de água e na transformação da estrutura cristalina da argila. Esse processo aumenta a reatividade pozolânica da argila, tornando-a adequada para uso em aplicações de cimento (BISHNOI, 2020). As argilas calcinadas, particularmente o metacaulim, têm emergido como materiais cimentícios suplementares de destaque na indústria da construção civil. Sua incorporação como substitutos

parciais do cimento Portland tradicional é vista como uma estratégia eficaz para mitigar o impacto ambiental associado à produção de cimento. De acordo com um estudo de Ducloué *et al.* (2017), o metacaulim é amplamente utilizado como matéria-prima industrial, com aplicações na produção de cerâmicas, geopolímeros e na substituição parcial do cimento Portland

O metacaulim é uma forma específica de argila calcinada derivada da calcinação da caulinita. Possui uma estrutura amorfa e é conhecido por sua alta reatividade pozolânica. Quando usado em concretos e argamassas, pode melhorar a resistência, durabilidade e reduzir a permeabilidade do material (PEREIRA; COSTA, 2022). A produção de metacaulim requer menos energia em comparação com a produção de cimento Portland, resultando em menores emissões de CO₂. Além disso, a utilização de metacaulim em concretos pode reduzir a quantidade de cimento necessário, oferecendo benefícios econômicos e ambientais (RUIZ-SANTAQUITERIA *et al.*, 2013).

2.2.1.2 Fíler Calcário

O fíler calcário é um material proveniente da rocha calcária finamente moída. Quando incorporado ao cimento Portland, ele resulta em uma melhor trabalhabilidade, pois suas partículas se fixam entre os grãos dos demais materiais da mistura, preenchendo os vazios e tornando o sistema mais homogêneo (MELO, 2005; NADELMAN; KURTIS, 2017). Este efeito é reconhecido na literatura, com estudos indicando que as partículas de fíler calcário, ao se fixarem entre os grãos dos demais materiais do concreto, preenchem os vazios do sistema, tornando-o mais homogêneo e, portanto, mais trabalhável (SOUZA; DAL MOLIN, 2002).

A adição de fíler calcário tem efeitos tanto químicos quanto físicos durante a hidratação do cimento. Quimicamente, contribui para a formação de carboaluminatos, influenciando a pega e a resistência. Esta reação é responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica. Fisicamente, o fíler calcário atua preenchendo os poros, acelerando a hidratação e proporcionando um ganho de resistência nas idades iniciais (MOREIRA; HENRIQUE, 2020; NGUYEN; AFROZ; CASTEL, 2020).

A *Cement Sustainability Initiative* (CSI) prevê que o calcário pode constituir cerca de 18% dos materiais cimentícios até 2050, em relação ao nível de contribuição atual de 8% (IEA; WBCSD, 2018). O calcário é uma matéria-prima tradicional na fabricação de cimento e está amplamente disponível em grandes quantidades. Seu uso traz benefícios como dispensar calcinação, boa moagem, transporte reduzido e a possibilidade de utilizar calcário de baixo grau (DHANDAPANI *et al.*, 2021).

Diversos fatores influenciam o comportamento do filer calcário em sistemas cimentícios. Estes incluem o tamanho das partículas de calcário, a dosagem, a adição de gesso, as características dos MCS, reatividade e conteúdo de aluminatos reativos, e a temperatura e tempo de cura (DHANDAPANI *et al.*, 2020). Além disso, estudos indicam que o calcário não adequado para a produção do clínquer, como fileres com alta quantidade de dolomita ou quartzo, também pode ser usado em LC³ (KRISHNAN; BISHNOI, 2018; SOROKA; SETTER, 1977).

2.2.2 Produção e Impacto Ambiental

Estudos têm demonstrado que o LC³ pode reduzir as emissões de CO₂ em até 40% em comparação com o cimento Portland convencional (IMBABI; CARRIGAN; MCKENNA, 2012). Além do LC³, outras pesquisas brasileiras têm explorado a utilização de resíduos industriais como materiais suplementares na produção de cimento. Por exemplo, o uso de cinzas de biomassa e resíduos da agroindústria tem mostrado potencial para reduzir as emissões de dióxido de carbono e melhorar a eficiência da produção de cimento (MARINKOVIĆ *et al.*, 2010). Essas abordagens estão alinhadas com a busca por soluções sustentáveis que promovam a transição para uma economia de baixo carbono no Brasil, estudos têm explorado suas propriedades, benefícios e impactos na qualidade do cimento, destacando sua contribuição para a melhoria da trabalhabilidade e resistência do concreto (BOLOGNINI, H.; MARTÍNEZ1; RINCÓN, 2015)..

A ideia subjacente aos cimentos verdes não é uma novidade recente, Imbabi *et al.* (2012) resumiu os substitutos de resíduos que estavam sendo utilizados há mais de uma década para reduzir a pegada de carbono de uma variedade de cimentos à base de Portland, nos quais era explorados diferentes composições e aditivos com o intuito de aprimorar as propriedades e a sustentabilidade do cimento. Os cimentos verdes são projetados com o objetivo de substancialmente mitigar as emissões de carbono, reduzir o consumo energético durante a fase de produção e minimizar a exploração de recursos naturais não renováveis (HABERT, 2014).

O LC³ destaca-se como uma das inovações mais promissoras no espectro dos cimentos verdes. Esta modalidade de cimento conjuga argilas calcinadas e filer calcário, conferindo uma alternativa ecologicamente sustentável ao cimento Portland tradicional. Destaca-se pela sua capacidade de redução da quantidade de clínquer requerida na composição. Através da sinergia entre o filer calcário e as argilas calcinadas, não somente melhora as propriedades do cimento, mas também atenua o seu impacto ambiental (MARTIRENA; ALUJAS, 2020b; SCRIVENER *et al.*, 2018; SHARMA *et al.*, 2021).

Embora ofereça inúmeros benefícios, a sua produção enfrenta desafios, notadamente no que concerne à energia consumida na calcinação das argilas e à disponibilidade de matérias-primas, as quais podem constituir uma preocupação em determinadas regiões (GUNJAL; KONDRAIVENDHAN, 2022; SCRIVENER *et al.*, 2019).

Além de outras alternativas de cimento verde disponíveis no mercado, como os cimentos geopoliméricos (GONÇALVES, 2016; SINGH; KUMAR; RAI, 2019) e os cimentos à base de cinzas volantes (PADEVĚT; BITTNAR, 2012), destaca-se a singular combinação de sustentabilidade e desempenho encontrada em um determinado cimento. Sua competitividade, em termos de resistência e durabilidade em comparação com o cimento Portland tradicional, o torna uma alternativa viável para uma variedade de aplicações.

No contexto econômico, essa opção de cimento pode oferecer custos de produção inferiores, especialmente em regiões com fácil acesso a matérias-primas. Essa característica pode torná-lo atraente para os fabricantes de cimento. No recente estudo de Kanagaraj *et al.*, (2023) é dada uma ênfase especial ao caráter econômico dos sistemas compostos de cimento, destacando que, em meio à crescente demanda por materiais cimentícios, o LC³ emerge não apenas como uma alternativa sustentável, mas também economicamente viável. A análise demonstra que o sistema LC³ é mais eficaz em termos de custo em comparação com os concretos à base de GPC e OPC. Esta pesquisa sublinha a importância do LC³ não apenas do ponto de vista ambiental, mas também como uma solução econômica promissora para a indústria da construção civil.

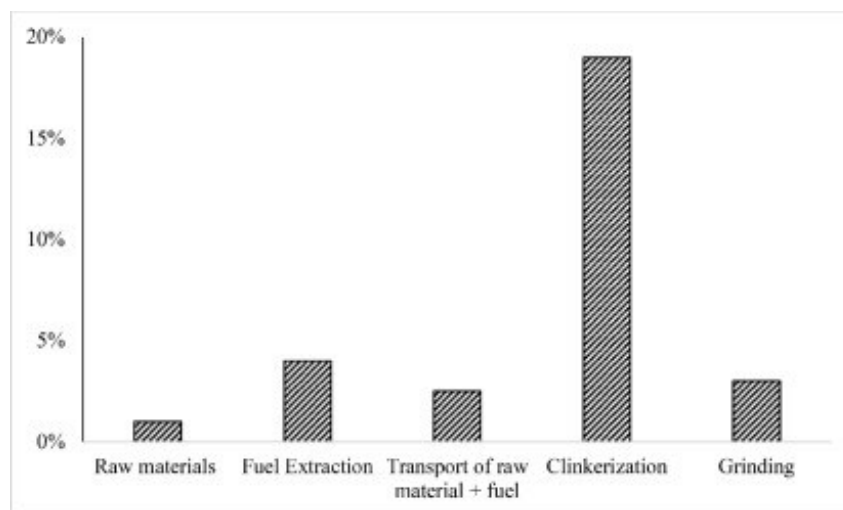
Essa inovação representa uma promissora alternativa na esfera dos cimentos verdes, devido à sua combinação de sustentabilidade e desempenho, e tem o potencial de revolucionar a indústria do cimento, contribuindo substancialmente para um futuro mais sustentável.

2.3 Desafios da Calcinação

A produção de cimento representa um dos principais desafios ambientais, contribuindo substancialmente para a emissão global de dióxido de carbono. Em busca de soluções que reduzam a pegada de carbono, pesquisas têm explorado a substituição parcial do cimento por pozolanas naturais e subprodutos (ALQAHTANI *et al.*, 2021; DOUGHMI; BABA; NOUNAH, 2023). Os resultados dessas investigações têm revelado promissores avanços em termos de aspectos mecânicos e ambientais na utilização de pozolanas naturais como alternativa ao cimento tradicional (TEIXEIRA *et al.*, 2019). A incorporação de pozolanas em parte do cimento tem demonstrado melhorias significativas na durabilidade e nas propriedades mecânicas dos materiais (SOBOLEV *et al.*, 2018).

A Figura 2 apresenta uma avaliação da expectativa de desempenho das misturas LC³ no consumo de energia em um exemplo piloto feito por Raj (2023). Os resultados sugerem que à medida que a quantidade de matérias-primas a serem transportadas aumenta, também cresce a demanda de energia associada ao transporte e à extração de matérias-primas.

Figura 2 – Influência potencial da produção de LC³ em termos de consumo de energia.



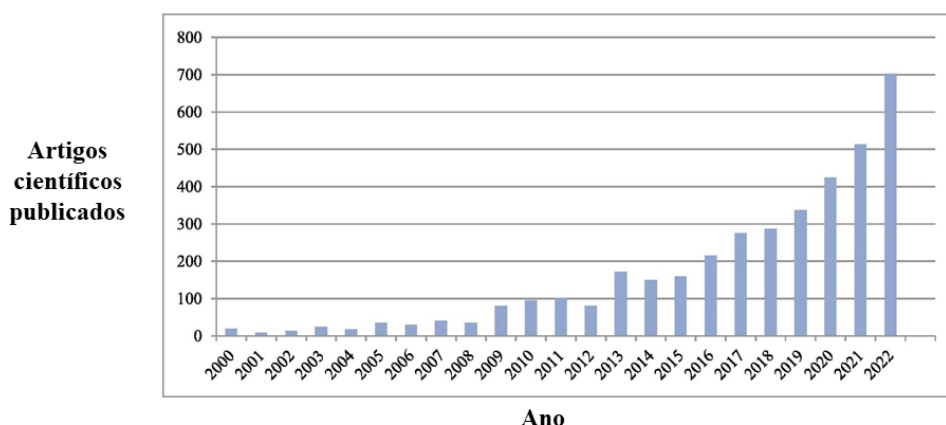
Fonte: RAJ (2023).

De acordo com Fapohunda *et al.* (2017) a incorporação de aditivos minerais, substituindo parte do cimento, apresenta-se como uma medida capaz de mitigar, em certa medida, esses desafios ambientais, visto que o procedimento de fabricação de cimento demanda uma considerável quantidade de energia.

A indústria do cimento desempenha um papel de destaque no desenvolvimento econômico dos países; entretanto, ela também se destaca como uma das principais fontes de poluição ambiental e consome quantidades consideráveis de energia (MARQUES; NEVES-SILVA, 2015; ZHANG *et al.*, 2021a). Especificamente, a produção de cimento é responsável por emissões substanciais de dióxido de carbono (CO₂), conferindo-lhe um papel significativo no contexto do aquecimento global (WEN; CHEN; MENG, 2015). Como resposta a essa questão, tem-se verificado um aumento na busca por soluções que visam tornar a indústria do cimento mais sustentável e ecologicamente responsável. Essa crescente preocupação ambiental tem impulsionado um incremento significativo na pesquisa e na condução de estudos voltados para mitigar os impactos negativos da indústria cimenteira no meio ambiente (DOUGHMI; BABA; NOUNAH, 2023).

Na Figura 3 foi ilustrado o aumento constante no número de publicações científicas ao longo dos últimos 22 anos (2000–2022) abordando a temática da redução das emissões de CO₂ na produção de cimento, com base em dados do banco de dados Scopus. Tal representação gráfica evidencia a importância crescente atribuída ao estudo dessa temática, demonstrando o interesse e a relevância do tópico na comunidade científica e na sociedade como um todo.

Figura 3 – Trabalhos publicados nos últimos anos com a temática de redução de CO₂ em produção de cimento (Scopus).



Fonte: Doughmi; Baba; Nounah (2023). Adaptador pelo autor (2024).

Em um cenário global que reconhece cada vez mais a urgência da sustentabilidade ambiental, compreender e abordar os desafios associados à produção de cimento, em particular a redução das emissões de CO₂, torna-se fundamental. A busca por alternativas e inovações que possam reduzir o impacto ambiental da indústria do cimento representa um passo importante em direção a um futuro mais ecologicamente responsável e sustentável.

2.4 Pozolanas Naturais: Uma Alternativa Sustentável

As pozolanas naturais são intrinsecamente caracterizadas por propriedades que se tornam relevantes na indústria de materiais cimentícios. Além de sua capacidade de evitar a calcinação, esses materiais possuem o potencial de reduzir a liberação de calor durante o processo de hidratação, bem como de diminuir a permeabilidade e aprimorar a resistência química dos materiais cimentícios (ZAMPIERI, 1989).

Pozolanas Naturais (PNs) são materiais de origem vulcânica e sedimentar que desempenham um papel crucial na indústria de materiais de construção. Esses materiais são divididos em duas categorias principais: materiais piroclásticos inalterados e materiais piroclásticos diageneticamente alterados. Os materiais piroclásticos inalterados, como pedrapomes, perlita e cinzas vulcânicas, são produtos da atividade vulcânica e mantêm sua

composição original. Por outro lado, materiais piroclásticos diageneticamente alterados incluem zeólitas, que passaram por modificações geológicas ao longo do tempo (KASANIYA; THOMAS; MOFFATT, 2021; MUKHOPADHYAY; SARASWATULA; LIU, 2023).

Além dessas categorias, existem materiais de origem sedimentar que também são considerados pozolanas naturais. Entre eles, destacam-se as argilas e xistos naturalmente calcinados, que adquirem propriedades pozolânicas quando submetidos a altas temperaturas (PEREZ-DIAZ *et al.*, 2023). Diatomitas, sedimentos compostos por diatomáceas fossilizadas, também se enquadram nessa categoria. A diatomita é apreciada pela sua estrutura altamente porosa e grande área superficial, o que a torna um componente promissor em materiais cimentícios (GENCEL *et al.*, 2016).

Por outro lado, o metacaulim e as argilas calcinadas são exemplares de materiais pozolânicos manufaturados. Ambos são argilas e xistos naturais que passaram por um processo de ativação térmica. O metacaulim é produzido pela calcinação da caulinita, uma argila natural, em temperaturas controladas. As argilas calcinadas, por sua vez, resultam da calcinação de argilas comuns (SNELLINGS; MERTENS; ELSSEN, 2012). É importante distinguir entre PNs e pozolanas manufaturadas. O metacaulim e as argilas calcinadas são exemplos de argilas e xistos naturais que foram ativados termicamente, sendo considerados materiais pozolânicos manufaturados. Enquanto isso, as PNs, devido à sua origem geológica, são materiais naturalmente presentes no ambiente e não passam por tratamentos térmicos significativos (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019).

De acordo com o *American Concrete Institute - ACI* (2012) a variedade de PNs e materiais pozolânicos manufaturados oferece opções diversas para a formulação de materiais cimentícios. Sua capacidade de reagir com os produtos da hidratação do cimento e melhorar as propriedades desses materiais os torna elementos valiosos na busca por soluções sustentáveis na construção civil. A compreensão aprofundada desses materiais e suas aplicações é fundamental para o avanço contínuo na indústria de materiais de construção (MOTA DOS SANTOS, 2021).

As PNs são materiais intrinsecamente heterogêneos, predominantemente compostos por vidro de aluminossilicato. No entanto, sua composição pode variar consideravelmente com base nas condições de formação geológica e nas alterações subsequentes. Isso resulta em uma ampla variedade de fases cristalinas, que diferem das cinzas volantes comumente utilizadas em materiais cimentícios. A diversidade dessas fases cristalinas é influenciada por fatores como mineralogia, finura das pozolanas, reatividade, nível de substituição e reatividade agregada (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019).

2.5 Diatomita

A diatomita, um material sedimentar composto por diatomáceas fossilizadas, é caracterizada por sua estrutura altamente porosa e elevada área superficial específica. Essas características a tornam um candidato de interesse para a aplicação em materiais cimentícios. A diatomita é reconhecida por sua disponibilidade abundante e custos competitivos em comparação com outras pozolanas, como o metacaulim (OUYANG *et al.*, 2023).

A partir de Kastis *et al.* (2006), relataram que diatomita tem sido objeto de estudo em diversas aplicações relacionadas a materiais cimentícios devido às suas propriedades pozolânicas. Sua capacidade de atuar como modificador das características dos materiais, incluindo aumento da resistência mecânica e durabilidade, tem sido documentada na literatura científica.

Lee *et al.* (2023) afirmaram que o estudo e a pesquisa envolvendo a aplicação da diatomita bruta têm sido temas de investigação significativos na área de materiais de construção. No entanto, em contraste com a ampla gama de pesquisas dedicadas a esse material, uma área que tem recebido menos atenção é a utilização de resíduos de diatomita como uma alternativa parcial ao cimento, em que a utilização da diatomita está ganhando cada vez mais atenção do ponto de vista econômico, ambiental e técnico.

Além disso, trabalhos como o de Kastis *et al.* (2006) analisaram as propriedades e a hidratação de cimentos mistos que incorporam diatomita calcária. Demonstraram que a diatomita, com seu teor ativo de sílica, atua como material pozolânico natural, promovendo maior formação de produtos hidratados, especialmente em estágios posteriores. Essas constatações sugerem um potencial promissor para a diatomita como componente cimentício.

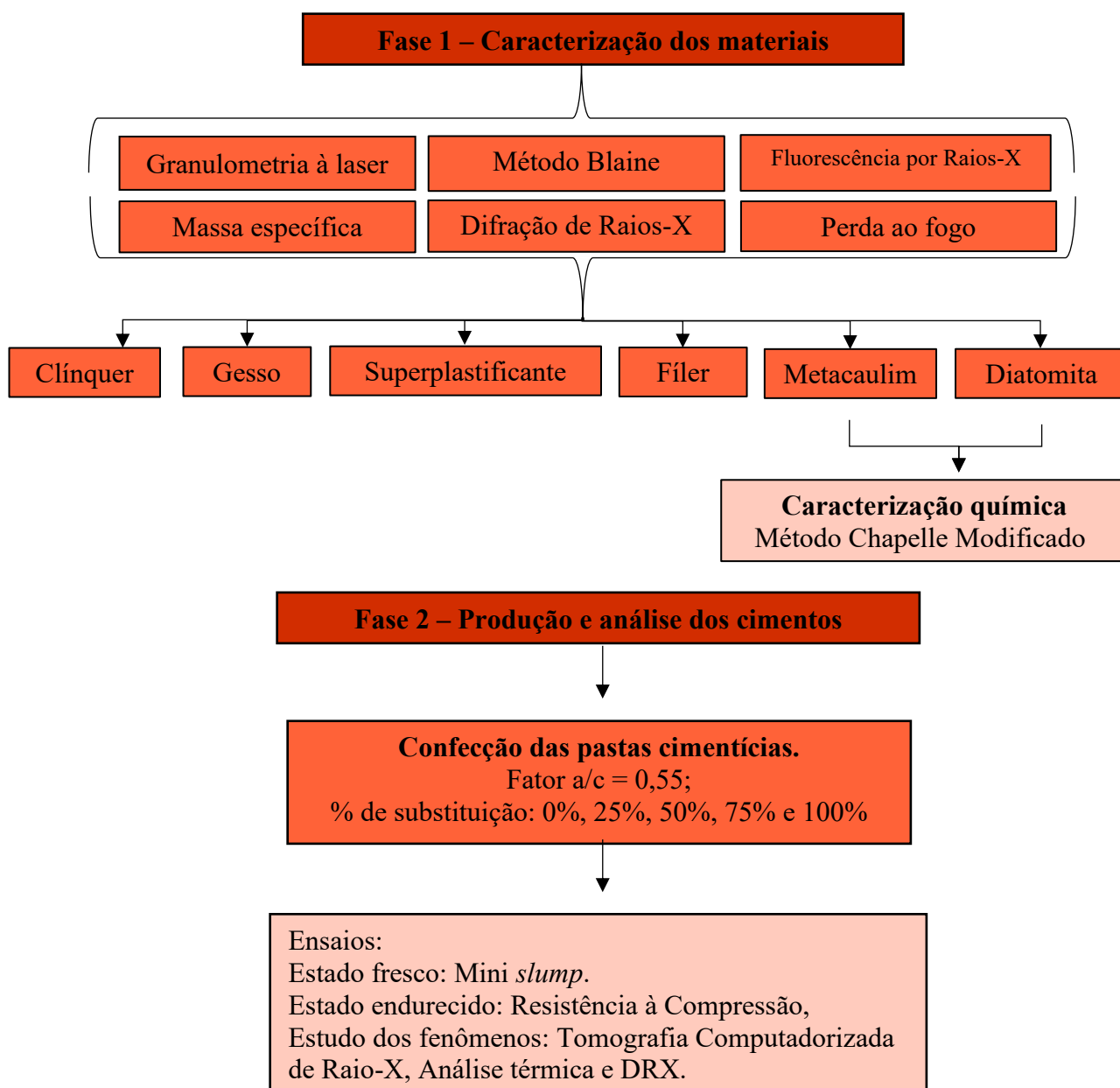
Estudos também abordaram o impacto da diatomita na fluidez e na porosidade da pasta de cimento, como observado por (HASANZADEH; SUN, 2018). Essas análises indicam que a influência da diatomita nas propriedades mecânicas do concreto é sensível a fatores como teor, processo de produção e técnica de mistura.

Contudo, ainda de acordo com (OUYANG *et al.*, 2023), mesmo com o vasto conhecimento acumulado sobre a diatomita em materiais cimentícios, persiste uma lacuna na compreensão de seu papel na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e nos efeitos subsequentes na microestrutura e no desenvolvimento de resistência da pasta de cimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental adotado nesta pesquisa como mostrado na Figura 4. Conforme apresentado no organograma, as fases contemplaram: 1) a caracterização da matéria prima e a 2) a produção e análise dos cimentos.

Figura 4 – Organograma da metodologia experimental.



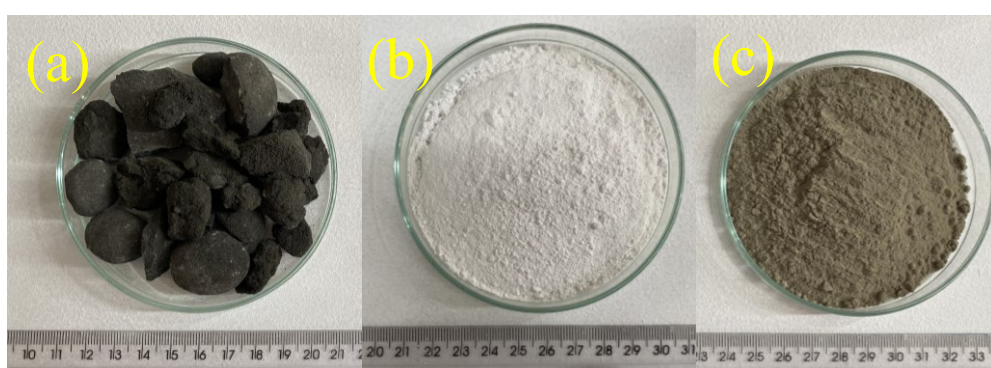
Fonte: Autor (2024).

3.1 Materiais Utilizados

3.1.1 Cimento Portland

A produção de CPI (95% clínquer com 3% SO_3) (AVET; SCRIVENER, 2018; BRIKI *et al.*, 2021; SCRIVENER *et al.*, 2018) foi confeccionada em laboratório, usando o clínquer (a) originalmente em pelotas moído juntamente com o gesso tipo beta (b) afim de obter o cimento CPI (c), observados na Figura 5.

Figura 5 – CPI elaborado em laboratório.

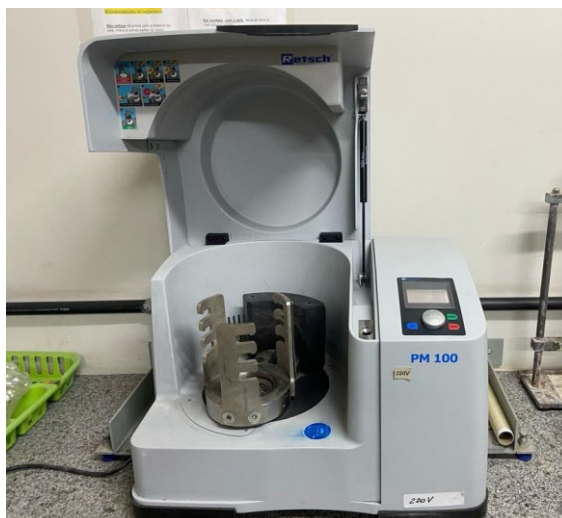


Fonte: Autor (2024).

Método de tentativa e erro, no cliço de moagem, até obter o CPI de área específica superficial, através do Método Blaine NBR 16372:2015 (ABNT, 2015), correspondente a $4000 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{g}$ (ALLALOU; KHERIBET; BENMOUNAH, 2019). O clínquer (CK) foi fornecido por uma cimenteira brasileira com um ano de idade e um β -gesso comercialmente disponível de Araripe – PE (G , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

O procedimento experimental foi realizado utilizando um moinho de bolas de alta energia PM 100 – RETSCH, 500 rpm, 12 bolas de 20 mm (6 minutos), conforme a Figura 6. Todo esse ensaio foi feito no Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) Campus Agreste.

Figura 6 – Moinho de bolas de alta energia PM 100 – RETSCH.



Fonte: Autor (2024).

3.1.2 Gesso

O gesso utilizado no sistema do LC³ foi o gesso-beta, amplamente empregado na construção civil e adquirido em uma loja de materiais de construção. Sua área superficial específica foi calculada em 6.984,43 cm²/g para garantir uma utilização otimizada no sistema.

3.1.3 Superplastificante

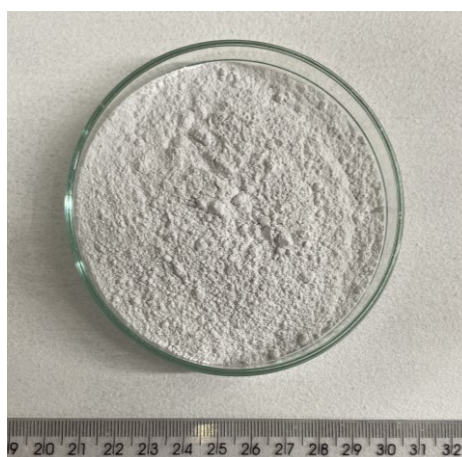
Foi usado o MasterGlenium 51 fornecido pela BASF, superplastificante à base de éter policarboxilato (PCE), disponível como solução comercial (gravidade específica 1,067–1,107, teor de sólidos ativos por peso 28,5%–31,5%, viscosidade inferior a 150 e pH de 5–7) na preparação de pastas de cimento para garantir a fluidez semelhante das pastas. Este tipo é o mais consolidado encontrado na literatura para aplicação em cimentos LC³.

O aditivo foi utilizado na produção das pastas de LC³ para dar trabalhabilidade ao sistema, pois devido a quantidade de materiais suplementares, a demanda de água é maior que em um CPI. São mais compatíveis com cimentos que contém argila calcinada e calcário em sua composição (AKHLAGHI *et al.*, 2017; AVET; SCRIVENER, 2020b; NAIR *et al.*, 2020; ZARIBAF; UZAL; KURTIS, 2015).

3.1.4 Fíler Calcário

O filer calcário, ilustrado na Figura 7, é um material amplamente reconhecido e utilizado na indústria cimenteira. Para os propósitos deste estudo, ele foi empregado em sua forma natural, sem passar por tratamentos específicos que alterassem suas características físico-químicas em ambiente laboratorial.

Figura 7 – Fíler calcário.



Fonte: Autor (2024).

Esse material que foi fornecido pela Mineração Paulista, apresenta uma granulometria que se estende até 0,075 mm, sendo integralmente passante na peneira N° 200. A integração do filer calcário na produção de cimentos não é apenas uma prática comum, mas também um tópico de interesse acadêmico.

3.1.5 Metacaulim

Foi utilizado o metacaulim, também disponível comercialmente, da Metacaulim do Brasil S.A. Foi escolhido o Ultra-HP (MK) de cor cinza, como a Figura 8, passante na peneira de n°400, $\leq 38 \mu\text{m}$, com finura Blaine de 483,39 m^2/kg , relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ de 0,4708 e relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 0,6265), utilizado em ligantes LC³.

Figura 8 – Metacaulim do Brasil S.A. Ultra-HP.



Fonte: Autor (2024).

Devido à inviabilidade de calcinar argila natural para uso como pozolana, escolheu-se o metacaulim, um produto com padrões de qualidade industrial, como uma alternativa viável para substituir a argila calcinada.

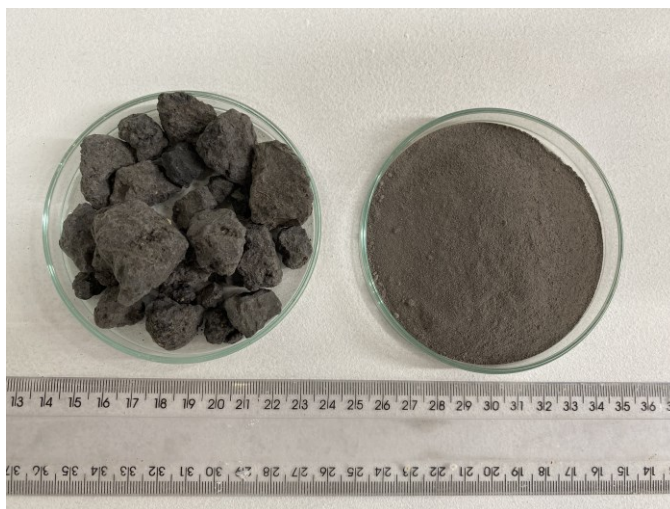
3.1.6 Diatomita

A utilização da diatomita foi feita na sua forma bruta ou *in natura*, da região de Currais Novos – RN, cedida pela Elo Cimenteira. O intuito principal é que a diatomita não fosse submetida a nenhum tipo de tratamento, como é comumente feito nas indústrias cimenteiras. De acordo com França & Luz (2002) a diatomita é submetida à três etapas para sua obtenção, são eles: lavra, beneficiamento e calcinação.

Após a coleta, a diatomita foi transportada para o laboratório, secada em estufa a 100 °C por 24 horas, e posteriormente as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos com 8 bolas de 20 mm de diâmetro, agitada em moinho para reduzir o tamanho de suas partículas, e posteriormente peneiradas em malhas de 0,038 mm (nº 400). Este procedimento foi feito também para o teste Chapelle modificado – ABNT NBR 15895.

Foi apresentado na Figura 9, a diatomita bruta em pelotas e em pó, e também calcinada à 900°C, o processo de calcinação foi feito apenas para informações, sendo submetida ao teste do IAP – Índice de Atividade Pozolânica e compará-lo ao da diatomita bruta e do metacaulim. As diferenças de cor são evidentes, refletindo a pureza do material, já que a cor cinza remete à presença de matéria orgânica.

Figura 9 – Diatomita bruta.



Fonte: Autor (2024).

3.1.7 Água

Foi utilizada água destilada, pH=7, produzida no laboratório de química da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) Campus Agreste, para produção das pastas cimentícias.

3.2 Caracterização das Matérias-primas Utilizadas

3.2.1 Granulometria

A análise granulométrica permite compreender os materiais com base no tamanho e distribuição de suas partículas. Para determinar essa distribuição, utilizou-se a técnica de difração a laser na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em Natal – RN. Esta técnica avalia a alteração angular na luminosidade dispersa quando um raio laser incide sobre uma amostra, seja ela dispersa em meio úmido ou seco. A partir da intensidade dessa dispersão, é possível calcular o tamanho das partículas responsáveis pelo padrão observado. As curvas resultantes dessa análise, além de indicar os parâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} , também revelam o diâmetro médio (DM) das partículas. Esta avaliação foi conduzida no Laboratório de Cimentos (LabCim) da UFRN, utilizando um granulômetro a laser CILAS 1090, que opera na faixa de 0,10 μm a 500,00 μm .

3.2.2 Massa Específica

A determinação da massa específica foi realizada conforme estabelecido pela NBR 16605:2017 (ABNT, 2017) utilizando o frasco de Le Chatelier. Esse procedimento envolve a medição do volume de um reagente, neste caso, querosene, que é deslocado quando o material é submerso. O querosene é escolhido por sua propriedade de não reagir quimicamente com o material em teste. O ensaio foi conduzido no Laboratório de Construção Civil da UFPE, localizado no Campus Agreste. Um dos frascos utilizados é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Frasco de Le Chatelier.



Fonte: Autor (2024).

Para a realização do teste, aproximadamente 60 g do material são introduzidos no frasco, que já contém querosene até a marca de 0 cm³. A introdução do material provoca um deslocamento do líquido, geralmente entre 18 cm³ e 24 cm³. Após um período de repouso de cerca de 30 minutos, realiza-se a leitura do volume deslocado. A massa específica é então calculada usando a fórmula: $\rho = m/v$, onde ρ representa a massa específica (g/cm³), m é a massa seca do material (g) e v é o volume deslocado pelo material (cm³).

3.2.3 Área Superficial Específica – Método Blaine

O método de Blaine, também conhecido como método de permeabilidade ao ar, foi empregado para determinar a área específica. Conforme estipulado pela ABNT NBR 16372:2015, este método avalia o intervalo necessário para que uma quantidade definida de ar

passa por uma amostra compactada. Há uma relação proporcional entre este tempo e a área superficial do material, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Equipamento utilizado para o Método Blaine.



Fonte: Autor (2024).

A análise foi realizada no Laboratório de Construção Civil da UFPE/CAA, utilizando o permeabilímetro. Este instrumento, amplamente adotado pela indústria cimenteira conforme a NBR 16372:2015 e em estudos como Bernal *et al.* (2021); Marangu (2020) e Pillai *et al.* (2019), mediu o tempo que o ar levou para atravessar a camada compactada da amostra, fornecendo a medida da área específica.

3.2.4 Fluorescência de Raio-X

A composição química dos materiais finos foi determinada por meio da técnica de Fluorescência de Raios-X, utilizando a dispersão de energia como método. Este procedimento foi conduzido no Laboratório de Química da UFPE/CAA. As amostras foram analisadas na forma de pó prensado em um espectrômetro da Rigaku, modelo Primini.

3.2.5 Difração de Raio-X

A técnica de Difração de Raios-X (DRX) é fundamental para obter informações qualitativas sobre as fases cristalinas presentes em um material. Além disso, ela é uma

ferramenta valiosa para avaliar a amorficidade dos materiais, que está intrinsecamente ligada à sua pozolanicidade (ALBERS *et al.*, 2002). Durante a pesquisa, essa análise foi conduzida em duas etapas distintas. Inicialmente, a composição dos materiais anidros foi determinada no laboratório de química da UFPE/CAA. Posteriormente, os produtos de hidratação das pastas de cimento foram analisados no INTM/UFPE, campus Recife.

Uma maior presença de picos nos difratogramas indica uma amostra mais cristalina (SILVA, 2020). Para a análise, as amostras foram previamente classificadas na malha 200. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raio-X modelo CRD-6000 da Rigaku. As condições operacionais incluíram uma radiação $\text{CuK}\alpha$ (30kV/30mA), com leituras de 2θ variando de 5° a 70° , e um passo de $0,01^\circ$ a cada 0,5 segundos.

3.2.6 Perda ao Fogo

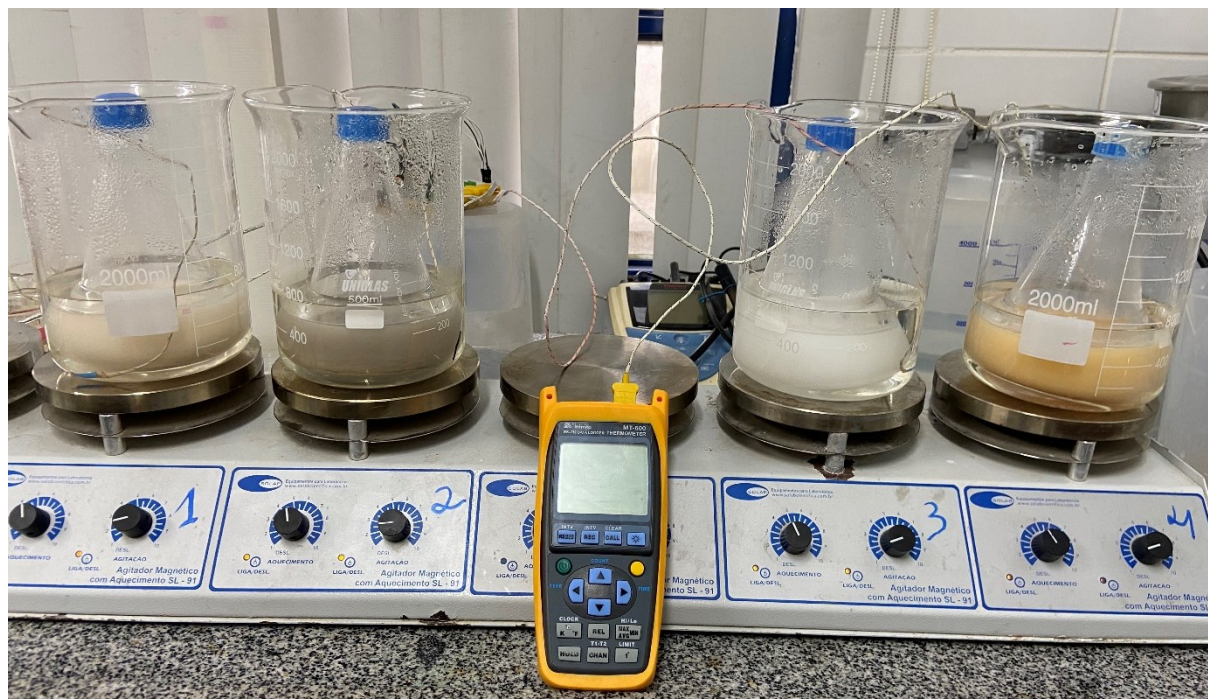
Adicionalmente, o ensaio de perda ao fogo foi realizado conforme as diretrizes da NBR NM 18 (ABNT, 2012). Neste teste, amostras pesando $1,000 \text{ g} \pm 0,001$ foram colocadas em cadinhos de porcelana e submetidas a uma temperatura de 950°C por 50 minutos em uma mufla elétrica, a fim de complementar os dados obtidos pela fluorescência de Raios-X.

3.2.7 Atividade Pozolânica – Método de Chapelle Modificado

A técnica do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) é essencial para avaliar a reatividade de materiais como o metacaulim (GAVA, 1999). O ensaio de Chapelle Modificado, conforme estabelecido pela NBR 15895:2010 (ABNT, 2010), foi empregado para medir o IAP do metacaulim e diatomita. Este ensaio avalia a reatividade do material determinando o teor de hidróxido de cálcio após submetê-lo a um banho térmico a uma temperatura específica. O resultado é expresso em termos de miligramas (mg) de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por grama (g) do material. A análise foi conduzida no Laboratório de Química da UFPE, Campus Agreste.

Para a diatomita, um procedimento específico, como informado no tópico 3.1.3 desse trabalho, foi seguido antes de realizar o teste Chapelle modificado, também estabelecido pela norma, como mostrado na Figura 12

Figura 12 – Método de Chapelle Modificado.



Fonte: Autor (2024).

3.3 Preparação do Cimento e das Misturas

3.3.1 Produção do CPI

O CPI (95% de clínquer mais 5% de gesso) (AVET; SCRIVENER, 2018; BRIKI *et al.*, 2021) foi primeiro produzido e depois misturado com metacaulim ou diatomita, 3% de gesso extra e filer calcário para produzir as misturas LC³. O procedimento foi relatado anteriormente.

3.3.2 Preparação das Misturas

O CPI foi posteriormente misturado com metacaulim e diatomita para preparar as misturas LC³. Um misturador rotativo tridimensional foi usado para homogeneizar os pós e garantir o envolvimento de todos os materiais. A rotação foi fixada em 60 rpm por 3 minutos.

A porcentagem de substituição de diatomita por argila calcinada nas misturas é apresentada na Tabela 1, onde o LC³-50-100, por exemplo, equivale à substituição total da metacaulim (MK). Assim, gerando um LC³ totalmente formulado com diatomita bruta (DI) combinada com uma quantidade fixa de calcário. A relação a/b também foi um valor fixo de 0,55 para garantir que haveria a quantidade de água necessária para a reação e a área adequada para o desenvolvimento dos produtos de hidratação LC³.

Tabela 1 – Proporções de misturas dos cimentos estudados.

Misturas	CPI		Gesso Extra		MK		DI		LF		a/c*
	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	
LC ³ -50-0	53.35	800.25	3	45	29.1	436.5	-	-	14.55	218.25	0.55
LC ³ -50-25	53.35	800.25	3	45	21.825	327.375	7.275	109.125	14.55	218.25	0.55
LC ³ -50-50	53.35	800.25	3	45	14.55	218.250	14.55	218.25	14.55	218.25	0.55
LC ³ -50-75	53.35	800.25	3	45	7.275	109.125	21.825	327.375	14.55	218.25	0.55
LC ³ -50-100	53.35	800.25	3	45	-	-	29.1	436.5	14.55	218.25	0.55

Fonte: Autor (2024).

*a/c = relação água/cimento

(MK): Metacaulim; (DI): Diatomita; (LF): *Limestone Filler*.

3.4 Análises no Estado Fresco

3.4.1 *Mini-Slump*

Para as misturas, foi utilizado um Blender Waring 8010ES a 12.000 rpm por 2 minutos, com água e PCE inicialmente com 0,9% para auxiliar na trabalhabilidade, considerando que essa propriedade foi reduzida devido à alta porosidade da diatomita, implicando em uma maior absorção de água. Todas as pastas LC³ foram ajustadas por meio de conteúdos de PCE, através do teste *mini-slump* de acordo com a DIN EN 1015-3Z (SPOSITO *et al.*, 2021) para obter diâmetros de pasta semelhantes sem substituir o metacaulim. Imediatamente após a mistura, foi realizado um *mini-slump test* e em seguida os corpos de prova foram moldados. Seu percentual foi determinado a partir da pasta de referência (CPI), com limite de espalhamento ± 1 cm.

3.5 Análises no Estado Endurecido

3.5.1 Resistência à compressão

Os testes de resistência à compressão foram realizados para diferentes idades: 7, 28 e 56 de hidratação para o sistema LC³. As amostras foram colocadas em cilindros de cloreto de polivinila ($\Phi 17\text{mm} \times 50\text{ mm}$) NBR 9831:2020 (ABNT, 2020); BRIKI *et al.*, 2021a; HUANG *et al.*, 2021) em uma mesa de fluxo de moldagem com três camadas vibradas individualmente cinco vezes.

As amostras foram secas ao ar em uma atmosfera de laboratório por 2 h para remover a água da superfície imediatamente antes do teste para remover a água da superfície. Os testes de resistência à compressão foram realizados usando uma máquina universal de ensaios mecânicos (Shimadzu, UH-FX-1000kN a 400 N/s).

Após a realização dos ensaios de compressão aos 28 dias, foram retiradas amostras (cerca de 2g) das misturas. Para cessar o processo de hidratação, essas amostras foram imersas em isopropanol. Uma semana depois, foram retiradas, moídas manualmente até atingir uma granulometria menor ou igual a 75 μm e, em seguida, analisadas por Difração de Raios-X (DRX), aos 7 e 28 dias e termogravimetria, aos 7 dias. Essas análises foram focadas nas amostras que apresentaram os melhores desempenhos de resistência. Para cada período avaliado, seis amostras foram submetidas ao teste de resistência.

3.5.2 Análise Térmica

A análise termogravimétrica é uma técnica que avalia as mudanças de massa em relação à temperatura. No INTM/UFPE, foi empregada uma termobalança Netzsch, modelo TASC 414/4, juntamente com uma termobalança STA409EP para realizar tal análise. Os critérios

adotados para o ensaio seguiram as diretrizes estabelecidas por Antoni *et al.* (2012), aplicando uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, variando de 30 °C a 900 °C, sob um fluxo de N₂ de 30 ml/min. As amostras de cimento, após 28 dias, foram submetidas a esta técnica com o objetivo de identificar hidratos amorfos.

3.5.3 Análise e distribuição dos poros por meio da Tomografia 3D Computacional

A análise da porosidade e da distribuição dos poros foi realizada por meio da microtomografia de raios-X aos 28 dias nas amostras do sistema LC³ que apresentaram um desempenho mecânico superior à amostra de LC³ de referência. A análise de Tomografia 3D proporciona uma visão da distribuição de poros, permitindo uma avaliação mais precisa das implicações dessas características na resistência e na integridade estrutural das amostras (CHANDRAPPA; BILIGIRI; ASCE, 2018; XU *et al.*, 2023).

Este procedimento foi conduzido no Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X (LTC-RX), vinculado ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE). Para a análise, foi utilizado o equipamento de microtomografia NIKON XT H 225 ST, configurado com uma energia de feixe de 120 kV, corrente de 125 µA, resolução de pixel de 15 µm, tempo de integração de 500 ms e um passo angular de 0.12°. Adicionalmente, um filtro de alumínio foi empregado para reduzir fótons de baixa intensidade e, assim, atenuar possíveis artefatos associados ao endurecimento do feixe. A partir dos dados coletados, o software de visualização 3D permitirá determinar o volume de espaços vazios e o volume total, compreendendo vazios e matriz, proporcionando uma representação em camadas do material em estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Composição das matérias-primas.

Na Tabela 2, são apresentados os resultados de distribuição granulométrica, massa específica e índice de atividade pozolânica das matérias-primas.

Tabela 2 – Caracterização física das matérias-primas.

		CPI	G	MK	DI	LF
Massa específica (g/cm ³)		3,18	2,65	2,69	2,46	2,75
Área superficial – Blaine (cm ² /g)		3963,37	6984,43	4833,90	9173,60	3391,57
Distribuição granulométrica (µm)	D ₁₀	0,96	1,36	1,04	0,76	1,12
	D ₅₀	30,02	22,74	11,74	14,96	26,55
	D ₉₀	222,95	119,49	31,92	37,57	85,36
	D _M	71,62	43,85	14,57	17,49	35,20
IAP		-	-	504,23	577,52	-

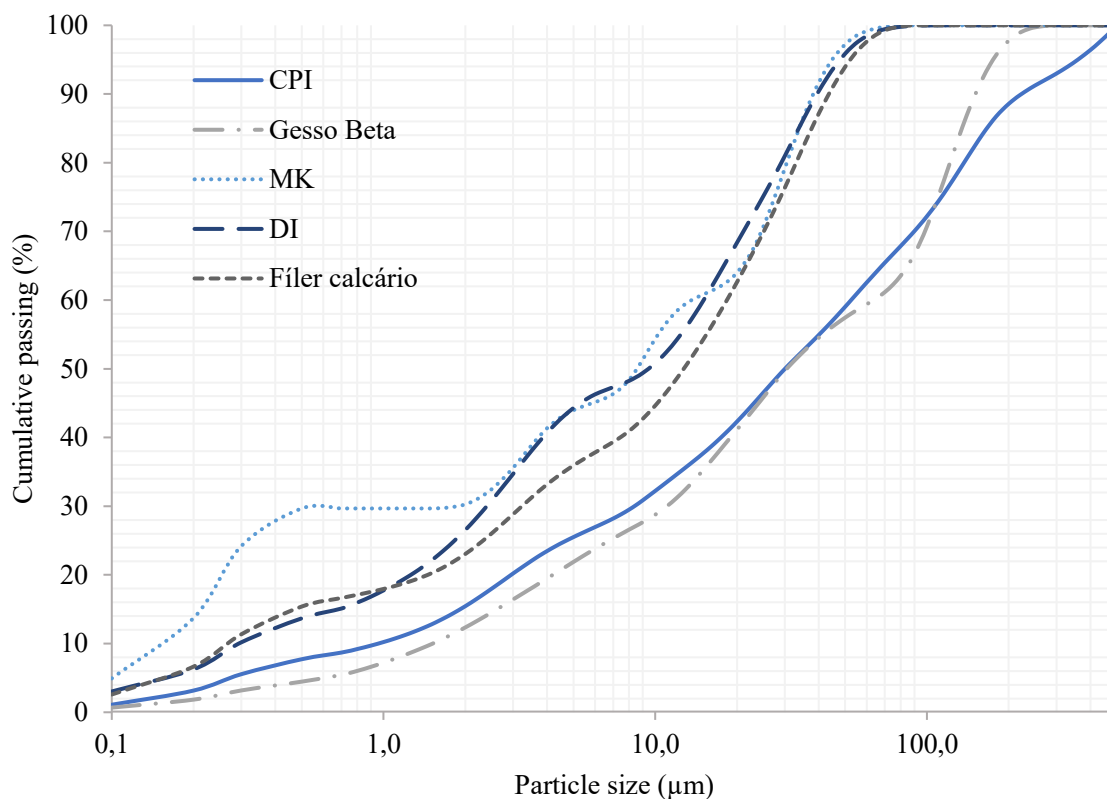
Fonte: Autor (2024).

A massa específica da diatomita é semelhante à do metacaulim. O Índice de Atividade Pozolânica (IAP) da diatomita é superior ao do metacaulim, o que se espera que confira a este material um melhor desempenho, resultando em um aumento na qualidade e quantidade dos hidratos, bem como na resistência à compressão das pastas.

Além disso, a superfície específica da diatomita é muito maior (duas vezes) do que o metacaulim utilizado, o que pode conferir maior atividade pozolânica. É importante destacar que a alta superfície específica da pozolana pode aumentar a demanda por água e, em geral, influenciar negativamente a reologia das misturas de cimento, conforme esperado (CORDEIRO; TAVARES; FILHO, 2016; MOTA DOS SANTOS, 2021; MUZENDA *et al.*, 2020; SALEH; KEMAL; RAMYAR, 2015). Assim, aumentar a superfície específica, com o objetivo de melhorar a pozolanidade da diatomita, pode ter efeitos adversos nas propriedades das misturas no estado fresco. Também é digno de nota a influência da morfologia e textura das partículas e da densidade da pozolana na reologia das misturas (JIANG *et al.*, 2020; MOTA DOS SANTOS, 2021; SALEH; KEMAL; RAMYAR, 2015).

A partir da Figura 13, foi mostrado as curvas granulométricas dos materiais, a distribuição acumulada do tamanho das partículas dos pós determinada por difração a laser.

Figura 13 – Distribuição do tamanho das partículas das matérias primas.



Fonte: Autor (2024).

Adicionalmente, foi possível observar que a moagem ainda não foi eficaz em promover uma redução progressiva no tamanho das partículas da diatomita ao ponto de ser mais fina que o metacaulim, já que o MK se comportou como o material mais fino no sistema. Além disso, foi possível observar que o CPI apresentou uma composição granulométrica com partículas maiores do que as outras matérias-primas.

Vale ressaltar que o CPI foi produzido no laboratório. Como a moagem é um fator chave para a reatividade do cimento, mesmo que o CPI produzido neste trabalho tenha alcançado um valor de Blaine próximo ao de trabalhos publicados anteriormente e da indústria, ele não atinge uma finura como as usadas nos trabalhos LC³. Portanto, isso pode influenciar o empacotamento do sistema e o desempenho mecânico, bem como outras propriedades. Assim, essa influência deve ser considerada tanto no estado fresco quanto no endurecido das misturas. Observa-se que apenas um estudo brasileiro com LC³ também produziu CPI laboratorial (MOREIRA; HENRIQUE, 2020), mas não apresentou uma distribuição granulométrica deste material, assim como os parâmetros de moagem utilizados também foram diferentes dos adotados neste trabalho.

Por outro lado, a diatomita exibiu a menor composição granulométrica em relação ao CPI, filer e gesso. O tamanho das partículas da diatomita também foi evidenciado ao analisar os parâmetros característicos (D_{10} , D_{50} e D_{90}) da diatomita (Tabela 2). Com base nesses resultados, foi possível perceber que a moagem realizada por 30 minutos não foi suficiente para obter uma pozolana com um D_{50} inferior a 10 μm . Esse valor foi adotado por vários pesquisadores, bem como discutido por Mota dos Santos & Cordeiro (2021), como o tamanho característico máximo para garantir uma atividade pozolânica adequada e um efeito de preenchimento mais eficaz para materiais pozolânicos (CALLIGARIS *et al.*, 2015; CORDEIRO; TAVARES; FILHO, 2016; FITOS *et al.*, 2015; SOURI *et al.*, 2015).

Como pode ser visto na Tabela 2, a diatomita tinha uma gravidade específica de 2,4631 g/cm^3 e área específica superficial de 9.173,60 cm^2/g . Embora o conteúdo de SiO_2 seja maior em comparação com os outros componentes (48,33%), seguido por Al_2O_3 (24,61%), a alta quantidade de matéria orgânica (18,18%) na diatomita é predominante, o que pode comprometer o desempenho mecânico, já que sua atividade pozolânica será afetada.

4.1.2 Fluorescência de Raios-X

Na Tabela 3, é apresentada a composição química da matéria prima obtida por Fluorescência de Raios-X (FRX). Em uma análise comparativa, a composição química dos óxidos revelou-se consistente com as matérias-primas internacionais frequentemente empregadas em LC³ (KRISHNAN; EMMANUEL; BISHNOI, 2019; LIN; HAN; WANG, 2021; QINFEI *et al.*, 2019).

Tabela 3 – Composição química das matérias-primas.

Composto	Quantidade (%)					
	CK	CPI	G	MK	DI	LF
CaO	67,64	66,34	41,67	0,15	0,98	56,15
SiO ₂	15,40	13,66	0,32	63,65	48,33	3,41
Al ₂ O ₃	4,56	3,96	0,11	29,97	24,61	0,55
Fe ₂ O ₃	4,44	3,94	-	2,27	5,55	0,35
MgO	0,19	0,18	-	0,13	0,55	3,07
K ₂ O	0,61	0,52	0,05	0,48	1,40	0,10
SO ₃	2,46	8,63	49,73	-	0,13	0,03

TiO ₂	-	-	-	1,75	-	-
P ₂ O ₅	0,20	0,23	-	-	-	0,04
Cl	0,02	0,02	-	-	0,26	0,01
SrO	0,35	0,35	0,10	-	-	0,34
Outros	0,06	-	-	0,09	-	-
LOI	4,07	2,17	8,02	1,51	18,18	35,94

* LOI=Perda ao Fogo (*Loss on ignition*)

Fonte: Autor (2024).

A análise química da diatomita bruta ou *in natura* revela sua composição predominante, conforme mostrado na Tabela 3. Observa-se que, quimicamente, o material é majoritariamente composto pelos óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, assim como acontece em Souza *et al.* (2003), e juntos somam aproximadamente 80% de sua constituição. A perda ao fogo, registrada em 18,18%, é elevada, possivelmente devido à presença de impurezas na amostra, como matéria orgânica, dada a sua coloração acinzentada, argilominerais e hidróxidos. Além disso, os níveis dos óxidos alcalinos (K₂O) e alcalinos terrosos (MgO e CaO) são notavelmente baixos. Estas características e proporções são consistentes com as propriedades típicas de materiais diatomáceos, conforme discutido em estudos, embora que a diatomita do presente trabalho, apresente uma quantidade considerável de perda ao fogo, o que irá comprometer seu desempenho a partir das análises que serão realizadas.

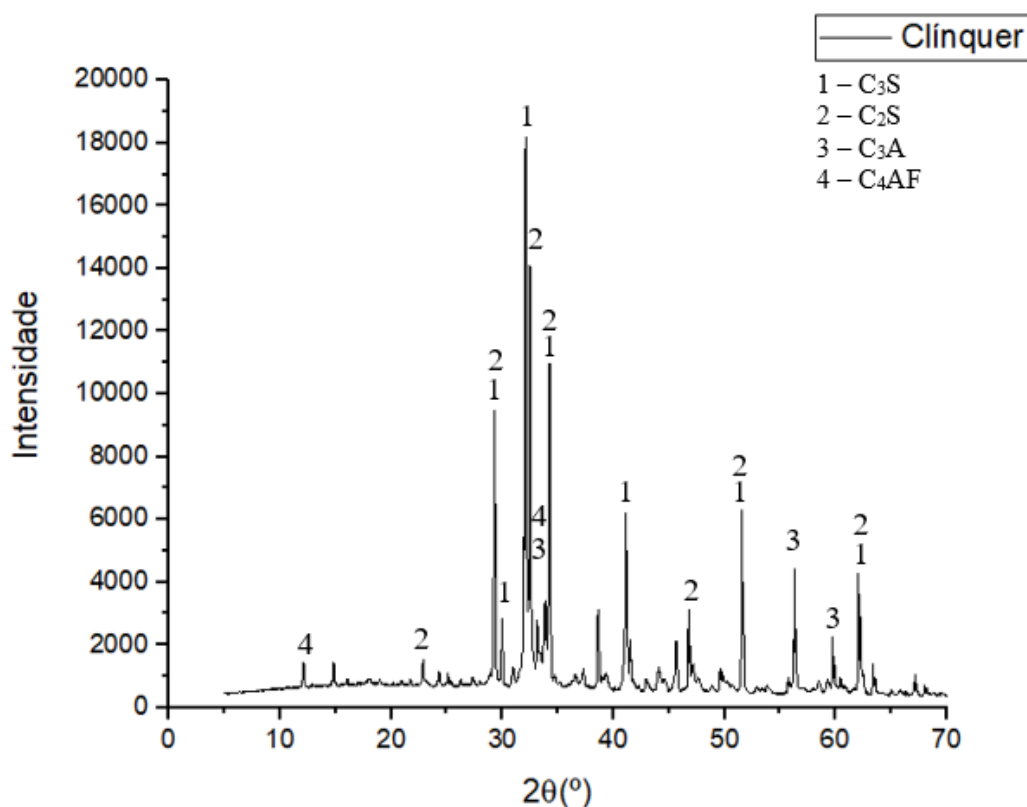
O valor de perda ao fogo é superior ao frequentemente citado na literatura para diatomita *in natura*, que geralmente excede 8%. Estes dados indicam a alta contaminação da diatomita analisada. Isso leva a conclusão que a perda ao fogo sugere que a diatomita *in natura* estudada, necessitaria de algum tratamento para que haja um aprimoramento das suas propriedades. Por se tratar de uma matéria-prima natural, há essa variação a partir da sua jazida, pois em Santos (2021) a diatomita pôde ser empregada sem tratamentos térmicos adicionais, potencialmente reduzindo custos e impactos ambientais na sua produção.

4.1.3 Difração de Raios-X

O ensaio de difração de raios-X (DRX) foi conduzido com o objetivo de examinar qualitativamente as fases cristalinas existentes e auxiliar na determinação da amorficidade dos materiais.

A representação gráfica da análise de difração de raios-X do clínquer Portland é mostrada na Figura 14. Esta metodologia evidencia, de forma predominante, a presença de fases cristalinas, destacando-se os picos correspondentes aos silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), componentes fundamentais para conferir resistência ao cimento, bem como as fases C_3A e C_4AF (STUTZMAN; STRUBLE, 2015). Não foram detectados picos que pudessem indicar contaminação ou heterogeneidade no clínquer em análise.

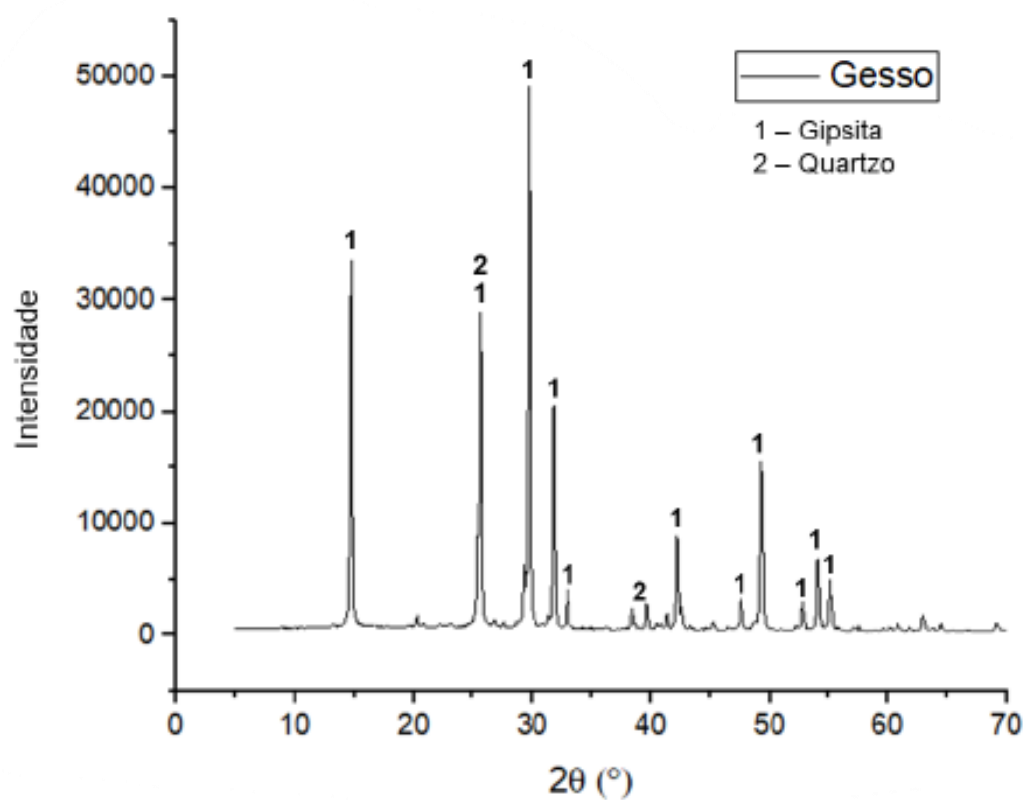
Figura 14 – DRX do clínquer.



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 15 foi mostrado o difratograma do gesso utilizado. A gipsita $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ tem um papel fundamental nos sistemas cimentícios, prevenindo a configuração imediata do material, um aspecto crucial para a integridade estrutural do cimento (KAPELUSZNA *et al.*, 2020). A análise do gesso, fornecido industrialmente, valida sua aplicabilidade em cimentos como uma fonte de sulfato, evidenciada pela predominância de gipsita nos resultados do difratograma (MOREIRA; HENRIQUE, 2020).

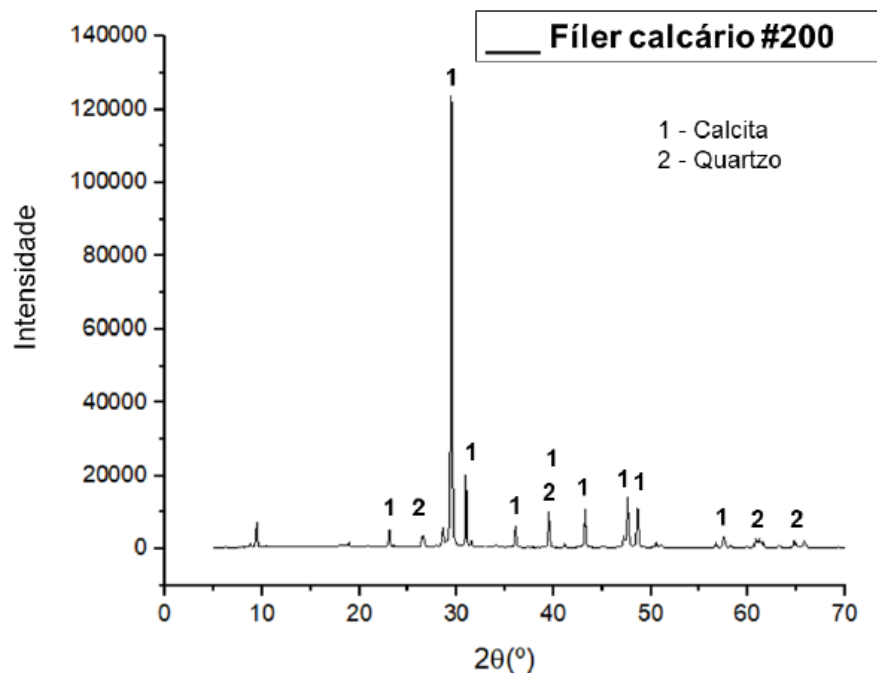
Figura 15 – DRX do gesso.



Fonte: Autor (2024).

O difratograma do filer calcário utilizado é representado no Figura 16, onde se observam distintas fases cristalinas. O carbonato de cálcio é a fase predominante, com a presença também de quartzo, ambos característicos de fileres calcários calcíticos (CARDOSO, 2020).

Figura 16 – DRX do fíler calcário.

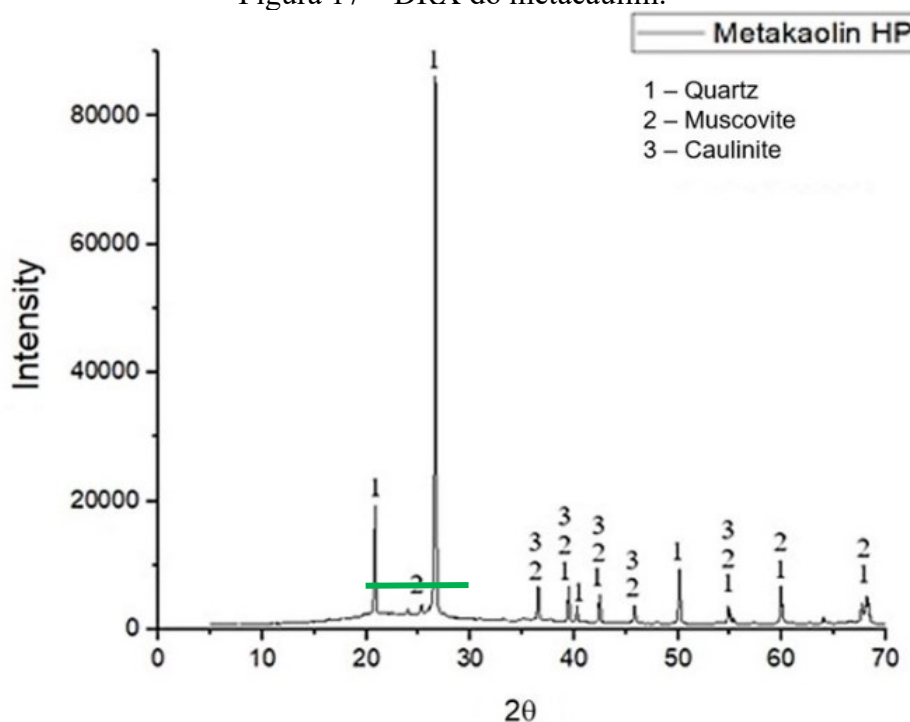


Fonte: Autor (2024).

Ao analisar o metacaulim através do Figura 17, nota-se um pico cristalino predominante de quartzo entre 25 e 30°, uma característica marcante tanto do metacaulim quanto das argilas calcinadas utilizadas no LC³ (BARBALHO; SILVA; RÊGO, 2020b; MOREIRA; HENRIQUE, 2020). Esta concentração de quartzo é significativamente superior à encontrada na diatomita.

Adicionalmente, o halo amorfo (em verde), identificado entre 20° e 30°, sugere que quanto mais amorfo o material, maior é seu potencial pozolânico. A natureza amorfa do material tem implicações diretas na sua reatividade pozolânica, influenciando a formação de compostos estáveis em reação com o cálcio hidratado na presença de água, o que é fundamental para a resistência e durabilidade (SOUZA, 2003).

Figura 17 – DRX do metacaulim.

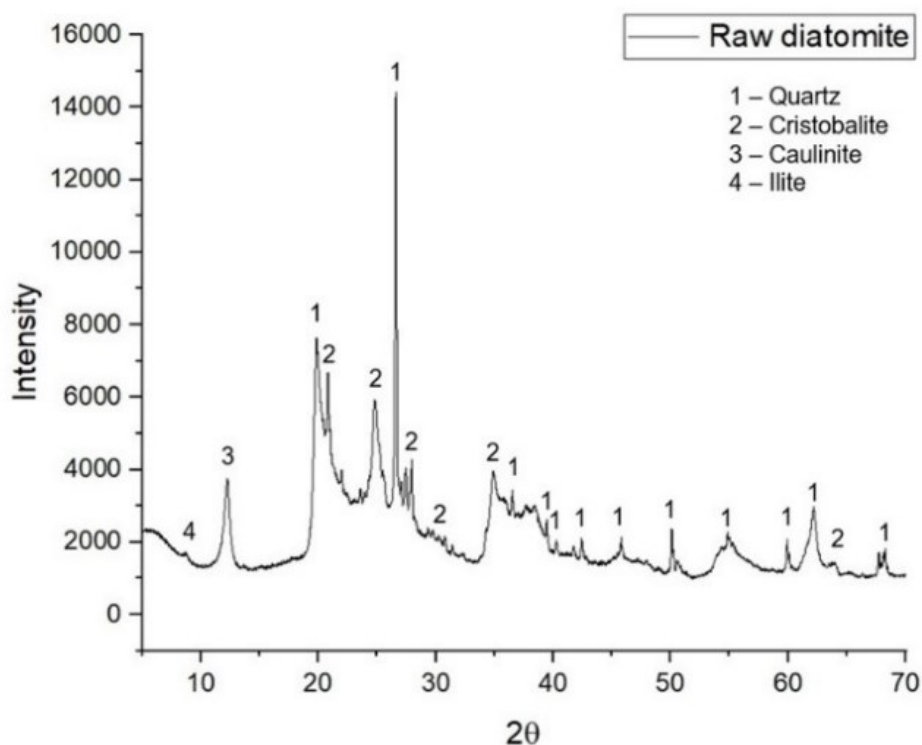


Fonte: Autor (2024).

Foi apresentado na Figura 18 o difratograma da diatomita *in natura* com seus picos cristalinos, sua configuração está semelhante ao que tem-se em Khodabakhshloo e Biswas (2023).

O quartzo (SiO_2) foi identificado por uma ampla reflexão centrada em torno de $2\theta = 20^\circ$, o que é consistente com a referência de sílica amorfa e quartzo bem cristalizado. A reflexão entre 25° a 30° enfatiza ainda mais a presença de quartzo cristalizado na diatomita bruta. A presença da caulinita foi encontrada. Componentes dessas principais associações minerais, como sílica, alumina ou óxidos de cálcio, também podem ser encontrados nos resultados de FRX, anteriormente abordadas.

Figura 18 – DRX da diatomita.



Fonte: Autor (2024).

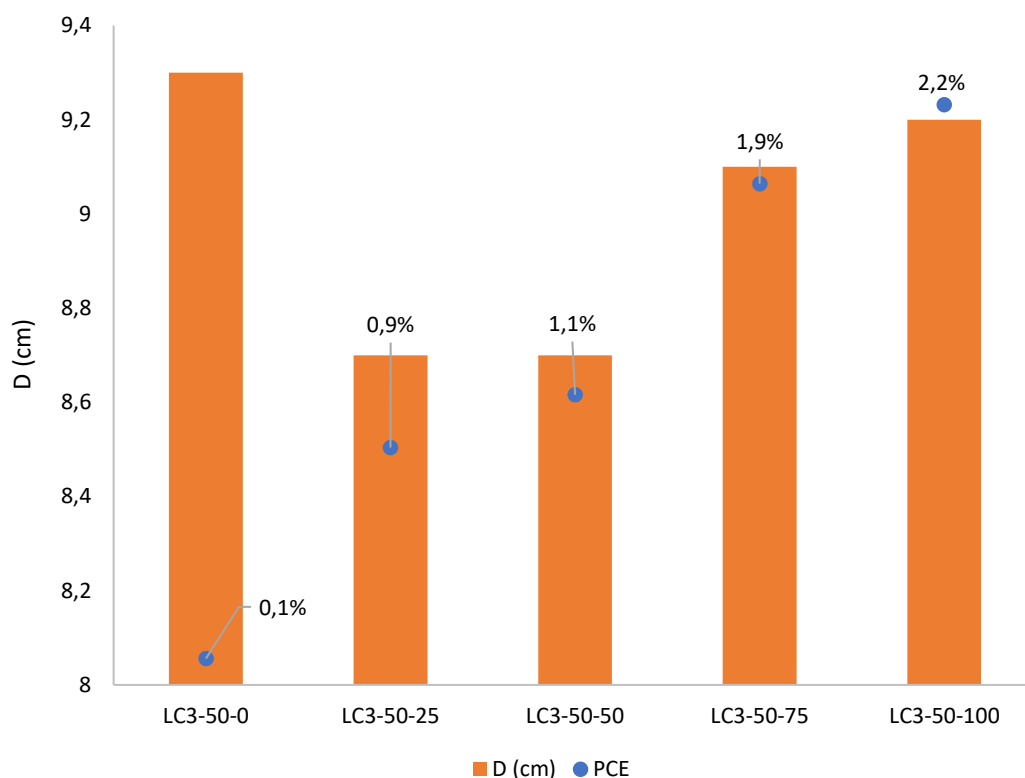
Os principais picos identificados correspondem ao quartzo e à caulinita, destacando a presença de impurezas na amostra. Isso poderá influenciar nas interferências das propriedades pozolânicas, pois fases cristalinas são menos reativas (SOUZA, 2003).

4.2 Caracterização do estado fresco

4.2.1 *Mini-slump* e demanda de teor de superplastificante pelo LC³ com diatomita

É mostrado na Figura 19, a quantidade de superplastificante (PCE) usada para cada mistura e seu respectivo diâmetro de abertura.

Figura 19 – Abertura blaine (D) com melhores valores de superplastificante (PCE) versus percentual de substituição de MK por diatomita nas pastas de cimento LC³.

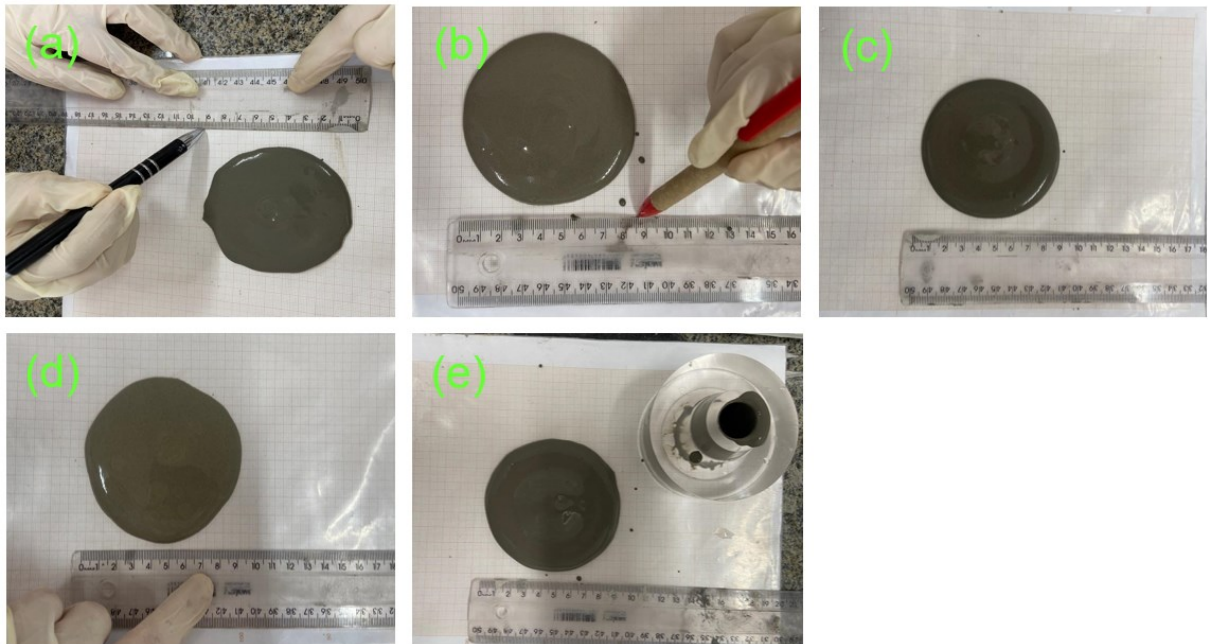


Fonte: Autor (2024).

De acordo com os resultados, nota-se o aumento gradual na quantidade de PCE utilizada, considerando que a presença de diatomita nas misturas requer maior adsorção de água, como já mencionado. A mistura LC³-50-0, onde não há incorporação de diatomita (apenas metacaulim), atingiu uma abertura de 9,2 cm, dentro da faixa usada em Santos (2021), usando apenas 0,1% de PCE. A substituição de 100% de metacaulim por diatomita na mistura LC³-50-100 requereu 2,2% de aditivo para alcançar uma abertura semelhante.

Durante a execução do ensaio *mini-slump*, a perda de trabalhabilidade das misturas foi facilmente observada com o aumento do teor de diatomita. À medida que o teor de PCE aumenta, as propriedades reológicas também são prejudicadas. Um viscosímetro rotativo de cilindro coaxial Fann 35A foi usado para encontrar os parâmetros reológicos (viscosidade plástica, limite de escoamento e resistência do gel) das misturas, de acordo com a NBR 9831:2020. No entanto, o dispositivo não pôde realizar as leituras devido à alta viscosidade da mistura em relação à relação água-cimento adotada. De acordo com a Figura 20, é mostrado o aspecto visual do ensaio *mini-slump* para cada mistura.

Figura 20 – (a) LC³-50-0; (b) LC³-50-25; (c) LC³-50-50; (d) LC³-50-75; (e) LC³-50-100.



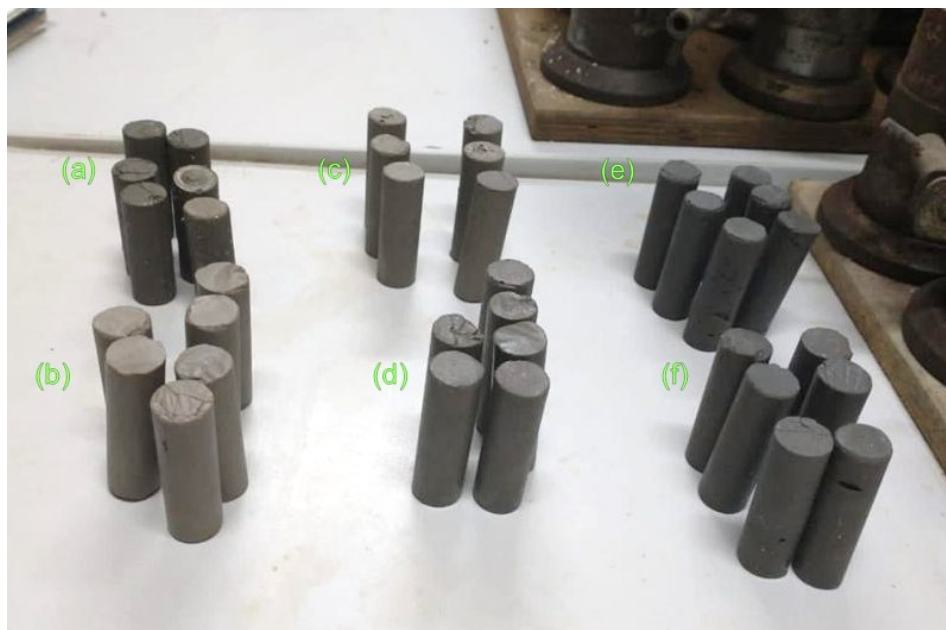
Fonte: Autor (2024).

4.3 Caracterização do estado endurecido

4.3.1 Análise de Resistência Compressiva

Após o processo de cura, as amostras, ilustradas na Figura 21, foram submetidas a ensaios para avaliar sua resistência à compressão.

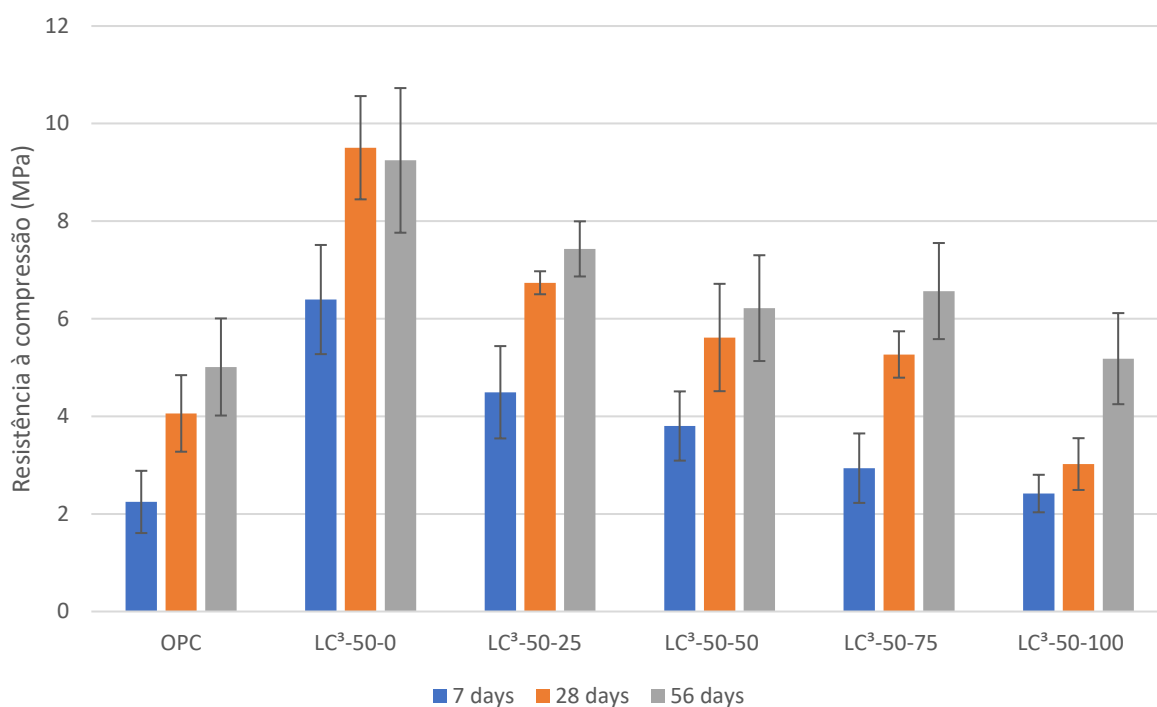
Figura 21 – (a) CPI; (b) LC³-50-0; (c) LC³-50-25; (d) LC³-50-50; (e) LC³-50-75; (f) LC³-50-100.



Fonte: Autor (2024).

Os resultados desses ensaios, realizados aos 7, 28 e 56 dias, são apresentados na Figura 22. Para uma análise mais precisa, foram escolhidos os três valores de resistência mais consistentes entre os espécimes quebrados. A média e o desvio padrão desses valores são detalhados, com as barras de erro representando o desvio padrão.

Figura 22 – Variação da resistência à compressão do LC³ com o tempo.



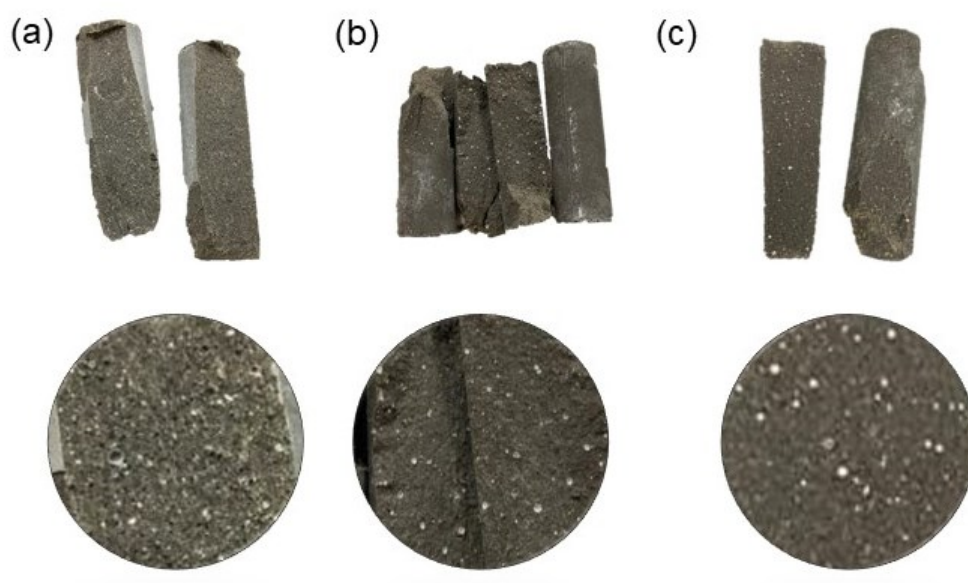
Fonte: Autor (2024).

É importante destacar que o CPI, elaborado em ambiente laboratorial, não cumpriu os critérios de resistência à compressão estabelecidos pela ABNT NBR 16697 em nenhum dos períodos analisados. Segundo esta normativa, a resistência do cimento deve ser de, no mínimo, 15 MPa aos 7 dias e 25 MPa aos 28 dias. Além disso, as amostras de CPI exibiram resistência inferior em comparação com todas as variantes de LC³, com exceção das amostras com 100% de substituição de metacaulim por diatomita aos 7 e 28 dias. Essa discrepância pode ser atribuída às condições de síntese laboratorial e ao uso de clínquer envelhecido (cerca de um ano).

Em todas as composições de cimento com diatomita, foi notado um incremento consistente na resistência ao longo do tempo, atribuído à reação gradual da pozolana natural, que se mostra mais eficaz em estágios avançados.

As composições contendo diatomita demonstraram uma resistência compressiva reduzida em todos os estágios, em comparação com o LC³-50-0, que é composto apenas por metacaulim. Esse fenômeno pode estar relacionado ao conteúdo de matéria orgânica presente, visto que o índice de LOI ultrapassou o limite de 10% definido pela NBR 12653:2014 (ABNT, 2014). A presença de clínquer envelhecido também influenciou o sistema. Na Figura 23 foi ilustrado o interior dos espécimes em diferentes composições aos 28 dias, revelando a possível influência do clínquer envelhecido e da granulometria do CPI, evidenciada pelo acúmulo de partículas de diferentes tonalidades e pela dissolução do gesso em algumas composições internas dos espécimes. A origem desse impacto nas propriedades é explorada no tópico subsequente.

Figura 23 – Interior dos espécimes pós-ensaio de resistência mecânica (a) LC³-50-0; (b) LC³-50-50; (c) LC³-50-75.



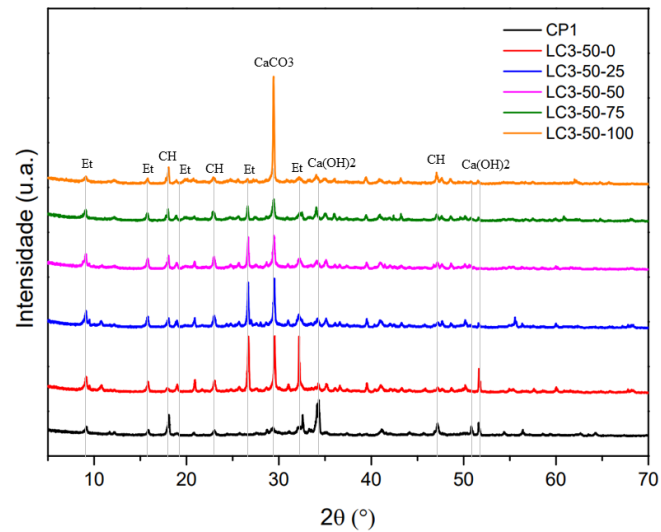
Fonte: Autor (2024).

4.3.2 Difração de Raio-X

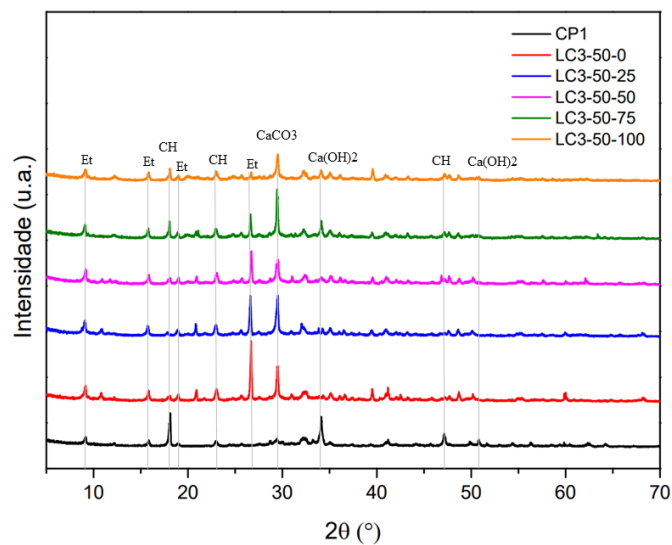
Com base nos dados adquiridos durante o teste de resistência à compressão, foram escolhidas as composições que demonstraram maior eficácia para examinar o espectro de difração de raios X após 7 e 28 dias. Os gráficos de difração das amostras estão ilustrados na Figura 24.

Figura 24 – Difratoograma das amostras a) 7 dias e b) 28 dias.

a)



b)



Et-Etringita; CH-Portlandita; CaCO_3 -Calcita.

Fonte: Autor (2024).

De maneira geral, os padrões de difração dos sistemas cimentícios exibiram semelhanças com outras pesquisas sobre LC^3 (ANTONI *et al.*, 2012; KRISHNAN; BISHNOI, 2018; VIZCAÍNO ANDRÉS *et al.*, 2015) e com diatomita (HE *et al.*, 2023; KASTIS *et al.*, 2006). O mesmo fenômeno foi observado no CPI, onde é comum identificar um pico distintivo em torno de 18° , associado à portlandita, conforme descrito por outros pesquisadores (MARAGHECHI *et al.*, 2018; NGUYEN; AFROZ; CASTEL, 2020; RODRIGUEZ; TOBON,

2020), mesmo considerando o fenômeno de envelhecimento do clínquer utilizado e a presença de produtos previamente hidratados.

Os resultados obtidos por meio da análise de DRX revelam que os principais produtos de hidratação presentes em todas as pastas de cimento consistem em hidróxido de cálcio (CH) (MALACARNE, 2019), acompanhado por uma quantidade reduzida de etringita. Nas amostras que incorporam LC³ e diatomita, nota-se também a presença de calcita, um dos principais constituintes da diatomita.

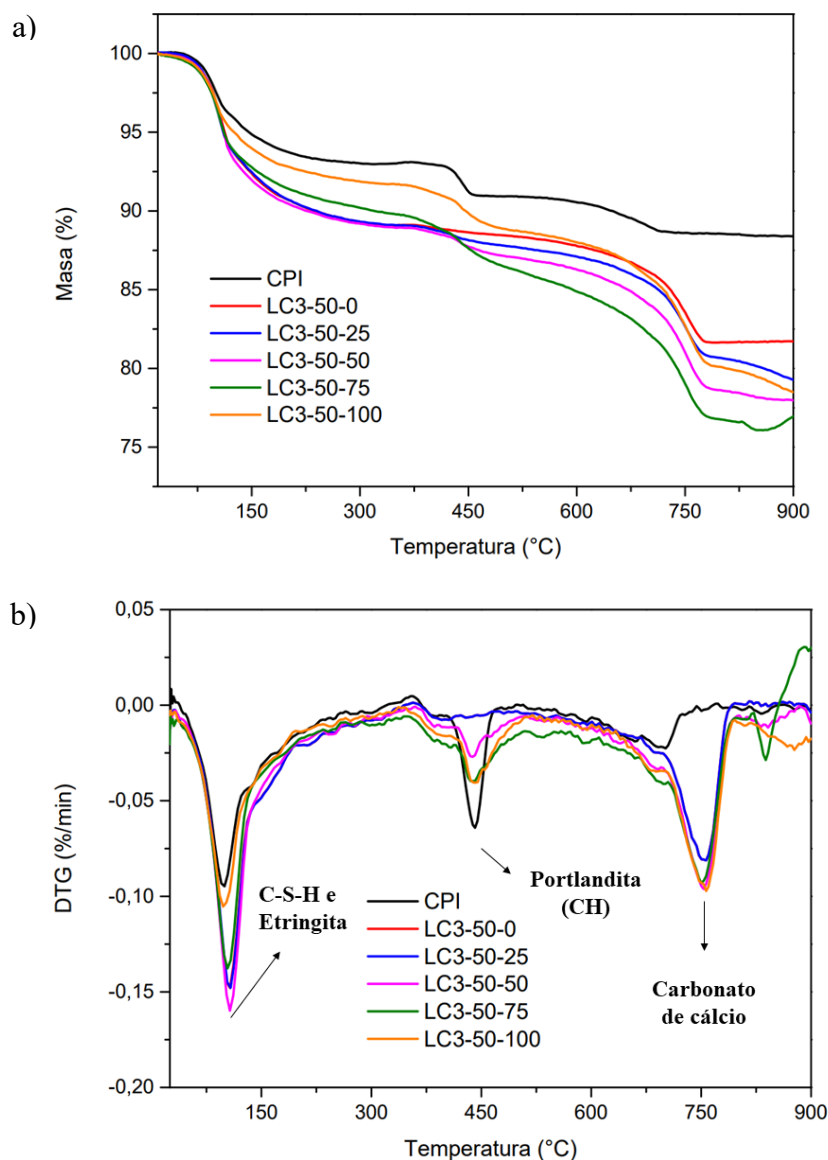
À medida que o tempo de hidratação avança, observa-se que a incorporação de diatomita influencia na redução do grau de hidratação, resultando em uma diminuição na geração de calcita (CaCO₃) em algumas idades. Além disso, o efeito pozolânico da diatomita contribui para a diminuição do teor de CaCO₃.

Ao longo das diferentes idades de hidratação, os tipos de produtos de hidratação permanecem consistentes nas diversas pastas de cimento misturadas. No entanto, são observadas variações na intensidade dos picos de difração do CaCO₃ em diferentes estágios de hidratação.

4.3.3 Análise térmica

Na Figura 25, as curvas termogravimétricas e a DTG (derivadas da curva de TG) representam o comportamento das pastas de cimento após 28 dias, quando submetidas a uma variação de temperatura de 30° a 900°C. Este intervalo térmico revela as complexas transformações físicas e químicas dos materiais cimentícios, evidenciadas por picos mais definidos nas curvas de termogravimetria e DTG.

Figura 25 – a) TG e b) DTG das amostras.



Fonte: Autor (2024).

Pesquisas anteriores como em Ouyang *et al.* (2023) e Sabeur & Vincent (2019) identificaram três estágios principais de perda de massa na pasta de cimento com o aumento da temperatura. No presente estudo, assim como em Alarcon-Ruiz *et al.* (2005) a inicial perda de massa, ocorreu entre 100 e 200 °C, decorrente das reações de desidratação de vários hidratos (CSH, carboaluminatos, etringita, entre outros). A desidratação do CSH é o principal contribuinte para essa eliminação de água, justificando a inclusão dos distintos hidratos sob a denominação CSH. A segunda considerável redução de massa, identificada a 450–500 °C, está associada à desidroxilação da portlandita, um adicional produto resultante da hidratação. A

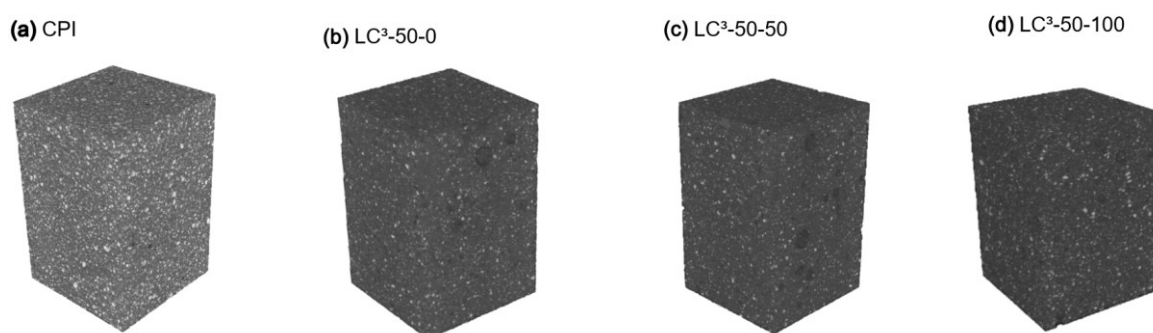
terceira diminuição de massa ocorre a 750 °C e representa a descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3) originado tanto do clínquer quanto do filer.

O CPI exibiu picos característicos relacionados ao carbonato de cálcio, semelhantes aos observados nos sistemas LC^3 , bem como nos estudos mencionados. Além desses, foram identificados picos iniciais correspondentes a fases de C-S-H/etringita. Essas características espectrais indicam uma composição que se alinha com as observações em sistemas LC^3 e estudos previamente referenciados. Essa similaridade sugere a presença de processos reativos e produtos de hidratação semelhantes, contribuindo para uma compreensão do comportamento do CPI em comparação com os demais sistemas.

4.3.4 Tomografia 3D Computacional

Para analisar os CPs aos 28 dias através da Tomografia Computacional 3D de Raio-X, selecionou-se um volume de interesse de 10x10x15 mm do centro de cada amostra. A subsequente reconstrução e processamento de imagens, conduzidos no *software ImageJ*, são ilustrados na Figura 26, onde áreas mais escuras simbolizam a presença de poros, refletindo uma menor densidade. Em contrapartida, regiões mais claras indicam uma maior densidade de partículas. A homogeneidade observada aos 28 dias, mesmo com as complicações para alcançar um CPI de laboratório com granulometria ótima, sugere que ocorreram reações de hidratação suficientes, favorecendo a uniformidade do sistema.

Figura 26 – Tomografia computadorizada de Raios- X aos 28 dias.



Fonte: Autor (2024).

Ao examinar as amostras (b) LC^3 -50-0 (sem diatomita), (c) LC^3 -50-50 (50% de substituição da argila calcinada), e (d) LC^3 -50-100 (100% de substituição da argila calcinada) através da Tomografia Computacional 3D de Raio-X, notou-se um incremento na quantidade de poros com o aumento da substituição da argila calcinada.

Este fenômeno pode ter reflexos na resistência das amostras. Essas variações podem estar vinculadas ao processo de moldagem dos corpos-de-prova, dadas as suas dimensões reduzidas e os desafios enfrentados na sedimentação da pasta, atribuídos ao rápido engrossamento das pastas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação representou um avanço significativo no entendimento da aplicação de diatomita bruta em cimentos LC³, abrindo novas perspectivas para o uso de materiais naturais em soluções de construção sustentáveis. Através de uma abordagem meticulosa, que englobou desde a caracterização dos materiais até a análise dos cimentos produzidos, sendo possível concluir que:

- a) A utilização da diatomita *in natura*, proveniente de Currais Novos – RN, sem nenhum tratamento adicional destacou a importância de explorar materiais disponíveis e acessíveis, abrindo caminho para práticas mais sustentáveis na indústria cimenteira. Este aspecto ressalta a possibilidade de reduzir a dependência de processos industriais intensivos e promover a utilização de recursos locais;
- b) Foi observado que a substituição de metacaulim por diatomita bruta nas misturas LC³ influenciou a demanda por água, destacando a complexidade da formulação de misturas cimentícias com a pozolana natural. Foi notado também que o sistema com diatomita aumenta a viscosidade do meio, o que impede uma boa trabalhabilidade, necessitando da utilização de superplastificante;
- c) Por outro lado, a pesquisa também evidenciou desafios associados ao uso da diatomita. A composição granulométrica da diatomita, a presença de matéria orgânica e sua influência nas propriedades mecânicas das misturas de cimento foram aspectos críticos observados. O estudo apontou que a diatomita apresentou uma resistência compressiva consistentemente mais baixa em todos os estágios comparativamente ao LC³-50-0, que é composto apenas por metacaulim, indicando a influência da matéria orgânica presente na diatomita e seu impacto nas propriedades mecânicas. Esses resultados sinalizam a necessidade de uma compreensão mais profunda das interações entre os componentes das misturas de cimento e a importância de continuar explorando e otimizando o uso de materiais alternativos;
- d) As características químicas e mineralógicas do CPI utilizado no LC³ possui algumas particularidades observadas, como o alto teor de SO₃, que não atendeu às normas preconizadas. Esse comportamento pode ser atribuído às condições de produção em laboratório, que carece da infraestrutura e controle de qualidade da indústria. Além disso, as características físicas diferiram das matérias-primas usadas em pesquisas internacionais sobre o LC³, mas podem ser ajustadas. A manutenção da proximidade das granulometrias, especialmente do CPI com as adições minerais, e a moagem com

critérios como o diâmetro médio a ser alcançado são consideradas importantes. A moagem, um fator crucial para a reatividade do sistema, impacta diretamente nas propriedades do cimento, tanto no estado fresco quanto endurecido;

- e) Este estudo também revelou que o comportamento da diatomita em cimentos LC³ é complexo, não se limitando apenas ao seu potencial químico e mineralógico. Fatores como a superfície específica, a estrutura de poros e o tamanho das partículas influenciam diretamente a sua atividade pozolânica. Portanto, a escolha da diatomita como substituinte ao metacaulim em cimentos LC³ requer uma avaliação cuidadosa de suas propriedades físicas, além da consideração de tratamentos como a calcinação, que podem alterar significativamente sua estrutura e interferir na sua eficácia como material pozolânico;

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estas sugestões visam ampliar o conhecimento sobre a aplicação da diatomita em cimentos LC³, explorando tanto os aspectos técnicos quanto práticos. A realização destes estudos futuros tem o potencial de impactar significativamente a indústria da construção civil, promovendo o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis e eficientes:

- a) Investigação mais aprofundada sobre os parâmetros de calcinação da diatomita, visando otimizar suas propriedades e eficácia como aditivo no LC³;
- b) Avaliação do impacto ambiental e da sustentabilidade na produção do LC³ com diatomita, com ênfase na Análise de Ciclo de Vida (ACV) e na redução da pegada de carbono;
- c) Verificar de forma mais aprofundada os mecanismos que regem a hidratação do LC³, bem como, a formação de hidratos e a microestrutura de 3 aos 91 dias;
- d) Realizar estudos detalhados sobre o impacto da diatomita na cinética de hidratação e na formação de produtos hidratados em cimentos LC³. Isso poderia incluir análises microestruturais usando técnicas avançadas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X;
- e) Investigar métodos que garantam uma curva granulométrica ideal das matérias-primas, potencializando a reatividade do sistema.

REFERÊNCIAS

- ADU-AMANKWAH, S.; ZAJAC, M.; STABLER, C.; LOTHENBACH, B.; BLACK, L. Influence of limestone on the hydration of ternary slag cements. **Cement and Concrete Research**, v. 100, n. June, p. 96–109, 2017.
- AHMADI, Z.; ESMAEILI, J.; KASAEI, J.; HAJIALIOGHLI, R. Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 16, p. 47–53, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2018.05.001>>.
- AKHLAGHI, O. .; AYTAS, T. .; TATLI, B. .; SEZER, D. .; HODAEI, A. .; FAVIER, A. .; SCRIVENER, K. .; MENCELOGLU, Y. Z. .; AKBULUT, O. Modified poly(carboxylate ether)-based superplasticizer for enhanced flowability of calcined clay-limestone-gypsum blended Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 101, p. 114–122, 2017.
- AL-FADALA, S.; CHAKKAMALAYATH, J.; AL-BAHAR, S.; AL-AIBANI, A.; AHMED, S. Significance of performance based specifications in the qualification and characterization of blended cement using volcanic ash. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 532–540, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.180>>.
- ALARCON-RUIZ, L.; PLATRET, G.; MASSIEU, E.; EHRLACHER, A. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. v. 35, p. 609–613, 2005.
- ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O.; CANDIDO, P.; CASTEJÓN, D.; CAMPOS, S. J.; LUIZ, R. W.; CARLOS, S. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X (A simple method for the characterization of clay minerals by X-ray diffraction). p. 34–37, 2002.
- ALLALOU, S.; KHERIBET, R.; BENMOUNAH, A. Case Studies in Construction Materials Effects of calcined halloysite nano-clay on the mechanical properties and microstructure of low-clinker cement mortar. **Case Studies in Construction Materials**, v. 10, p. e00213, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00213>>.
- ALQAHTANI, F. K.; RASHID, K.; ZAFAR, I.; IQBAL KHAN, M.; ABABTAIN, A. A. Production of sustainable green mortar by ultrahigh utilization of fly ash: Technical, economic and environmental assessment. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122617, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122617>>.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, A. C. 232. 1.-12. **Report on the Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete**. 12. ed. [s.l.] Farmington Hills: American Concrete Institute, 2012. 33 p.
- ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 1579–1589, 2012a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

. **NBR 15895:** Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método de Chappelle modificado. Rio de Janeiro, 2010

. **NBR NM 18:** Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017

. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

. **NBR 9831:** Cimento Portland para poços petrolíferos — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

AVET, F.; BOEHM-COURJAULT, E.; SCRIVENER, K. Investigation of C-A-S-H composition, morphology and density in Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 115, n. October 2018, p. 70–79, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.011>>.

AVET, F.; LI, X.; SCRIVENER, K. Determination of the amount of reacted metakaolin in calcined clay blends. **Cement and Concrete Research**, v. 106, n. February, p. 40–48, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.009>>.

AVET, F.; SCRIVENER, K. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 107, n. February, p. 124–135, 2018a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016>>.

AVET, F.; SCRIVENER, K. Influence of pH on the chloride binding capacity of Limestone Calcined Clay Cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 131, n. March, p. 106031, 2020a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106031>>.

AVET, F.; SCRIVENER, K. Effect of temperature on the water content of C-A-S-H in plain Portland and blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 136, n. August 2019, p. 106124, 2020b.

AVRAMENKO, A. S.; CHEREPANOVA, M. V.; PUSHKAR', V. S.; YARUSOVA, S. B. Diatom characteristics of the Far East siliceous organogenic deposits. **Russian Geology and Geophysics**, v. 56, n. 6, p. 947–958, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2015.05.010>>.

BARBALHO, E. D. A.; SILVA, E. F. Da; RÊGO, J. H. D. S. Study of the proportion of calcined clay and limestone filler in the LC3 cement at different replacement levels. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

BERNAL, I. M. R.; SHIRANI, S.; CUESTA, A.; SANTACRUZ, I.; ARANDA, M. A. G.

Phase and microstructure evolutions in LC 3 binders by multi-technique approach including synchrotron microtomography. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 124054, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124054>>.

BERTSIMAS, D. Reducing Air Pollution through Machine Learning. **S&MO**. v.1. 2023.

BISHNOI, S. **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. 1. ed. [s.l.] Springer Singapore, 2020. 859 p.

BISHNOI, S.; MAITY, S.; MALLIK, A.; JOSEPH, S.; KRISHNAN, S. Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: the Indian experience. **Indian Concrete Journal**, v. 88, p. 22–28, 2014.

BOLOGNINI, H.; MARTÍNEZ1, N.; RINCÓN, O. T. de. Chemical and physical-mechanical characterizations of cement with the addition of limestone filler in Venezuela. **Journal of the Latin-American Association of Quality Control, Pathology and Recovery of Construction**, v. 5, n. 3, p. 190–202, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.org.mx/pdf/ralconpat/v5n3/2007-6835-ralconpat-5-03-00190-en.pdf>>.

BOURCHY, AGATHE ; BARNES-DAVIN, LAURY; BESSETTE, LAETITIA ; TORRENTI, J. M. Effect of Cement Composition on Fresh State and Heat of Hydration of Portland Cement with Limestone and Slag. **ACI Materials Journal**, v. 117, p. 153–165, 2020.

BRIKI, Y.; AVET, F.; ZAJAC, M.; BOWEN, P.; BEN, M.; SCRIVENER, K. Cement and Concrete Research Understanding of the factors slowing down metakaolin reaction in limestone calcined clay cement (LC 3) at late ages. **Cement and Concrete Research**, v. 146, n. May, p. 106477, 2021a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106477>>.

BRIKI, Y.; ZAJAC, M.; BEN, M.; SCRIVENER, K. Cement and Concrete Research Factors affecting the reactivity of slag at early and late ages. **Cement and Concrete Research**, v. 150, n. September, p. 106604, 2021b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106604>>.

BRUNETTO, G.; MELO, G. W.; KAMINSKI, J.; FURLANETTO, V.; FIALHO, F. B. Avaliação do método de perda de peso por ignição na análise de matéria orgânica em solos da Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1936–1939, 2006.

CALLIGARIS, G. A.; FRANCO, M. K. K. D.; ALDRIGE, L. P.; RODRIGUES, M. S.; BERALDO, A. L.; YOKAICHIYA, F.; TURRILLAS, X.; CARDOSO, L. P. Assessing the pozzolanic activity of cements with added sugar cane straw ash by synchrotron X-ray diffraction and Rietveld analysis. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 44–50, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.103>>.

CARDINAUD, G.; ROZIÈRE, E.; MARTINAGE, O.; LOUKILI, A.; BARNES-DAVIN, L.; PARIS, M.; DENELEE, D. Calcined clay – Limestone cements: Hydration processes with high and low-grade kaolinite clays. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122271, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122271>>.

CARDOSO, T. C. **Propriedades físico-químicas, hidratação e reologia de cimentos ternários com reduzido teor de clínquer a partir de argila não calcinada e filer calcário**. 2020. Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2020. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/231558/001132033.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

CORDEIRO, G. C.; TAVARES, L. M.; FILHO, R. D. T. Cement and Concrete Research Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 269–275, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.020>>.

DHANDAPANI, Y.; SANTHANAM, M.; GETTU, R.; PILLAI, R. G. Perspectives on blended cementitious systems with calcined clay-limestone combination for sustainable low carbon cement transition. **Indian Concrete Journal**, v. 94, n. 2, p. 31–45, 2020.

DHANDAPANI, Y.; SANTHANAM, M.; KALADHARAN, G.; RAMANATHAN, S. Towards ternary binders involving limestone additions — A review. **Cement and Concrete Research**, v. 143, n. April 2020, p. 106396, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106396>>.

DOUGHMI, K.; BABA, K.; NOUNAH, A. Mechanical properties of eco-friendly cement based composite mortars plastic fiber reinforced partially replaced by natural pozzolan and marble waste. **Materials Today: Proceedings**, , 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.203>>.

DUCLOUÉ, L.; PITOIS, O.; TOCQUER, L.; GOYON, J.; OVARLEZ, G. Yielding and flow of foamed metakaolin pastes. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 513, p. 87–94, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.11.015>>.

DUTTA, BHASKAR; MAITY, S. Role of Blended Cement in Reducing Energy Consumption. *In: Calcined Clays for Sustainable Concrete*. [s.l: s.n.]p. 585.

ERDOĞAN, S. T. Effect of clinker phase distribution within cement particles on properties of a hydrating cement paste. v. 38, p. 2013, 2013.

ERGÜN, A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 806–812, 2011.

FAPOHUNDA, C.; AKINBILE, B.; SHITTU, A. Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 2, p. 675–692, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.07.004>>.

FERNANDEZ, R.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 113–122, 2011.

FITOS, M.; BADOGIANNIS, E. G.; TSIVILIS, S. G.; PERRAKI, M. Pozzolanic activity of

thermally and mechanically treated kaolins of hydrothermal origin. **Applied Clay Science**, v. 116–117, p. 182–192, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.08.028>>.

FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Greenhouse Gas Emissions Due to Concrete Manufacture. **Handbook of Low Carbon Concrete**, v. 12, n. 5, p. 1–16, 2017.

FRAGOULIS, D.; STAMATAKIS, M. G.; PAPAGEORGIOU, D.; CHANIOTAKIS, E. The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 205–209, jan. 2005.

FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. **Beneficiamento de Diatomita da Bahia**. [s.l.: s.n.]1–50 p.
FRIDAY, S.; CLIMATE, N. The Impact of Rising Ocean Carbon Levels on Fish Behavior. p. 1–7, 2012.

GAVA, P. G. **ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA**. 1999. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, 1999.

GENCEL, O.; JOSE, J.; SUTCU, M.; KOKSAL, F.; PEDRO, F.; RABANAL, Á.; MARTÍNEZ-BARRERA, G. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 732–740, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.125>>.

GONÇALVES, D. K. C. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE CIMENTOS GEOPOLIMÉRICOS COMERCIAIS**. 2016. Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AXZLFK/1/ppgconstrucaocivil_dayanakeittycarmogoncalves_dissertacaomestrado.pdf>.

GUNJAL, S. M.; KONDRAIVENDHAN, B. High temperature impact on calcined clay-limestone cement concrete (LC3). **Materials Today: Proceedings**, v. 61, p. 386–391, 1 jan. 2022.

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 (China)**, v. 136, p. 682–697, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.01.021>>.

HABERT, G. Assessing the environmental impact of conventional and ‘green’ cement production. **Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies**, p. 199–238, 1 jan. 2014.

HABERT, G.; ROUSSEL, N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 6, p. 397–402, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.001>>.

HASANZADEH, B.; SUN, Z. Impacts of Diatomaceous Earth on the Properties of Cement Pastes. **J. Build. Mater. Struct.**, v. 5, p. 197–211, 2018.

HE, Z.; WANG, B.; CHEN, W.; TAO, H. Mechanical property, volume stability and

microstructure of lightweight engineered cementitious composites (LECC) containing high-volume diatomite. **Construction and Building Materials**, v. 409, n. September, p. 133884, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133884>>.

HOSSAIN, M. U.; CAI, R.; NG, S. T.; XUAN, D.; YE, H. Sustainable natural pozzolana concrete – A comparative study on its environmental performance against concretes with other industrial by-products. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121429, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121429>>.

HOU, P.; MUZENDA, T. R.; LI, Q.; CHEN, H.; KAWASHIMA, S.; SUI, T.; YONG, H.; XIE, N.; CHENG, X. Mechanisms dominating thixotropy in limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 140, n. March 2020, p. 106316, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106316>>.

HUANG, H.; LI, X.; AVET, F.; HANPONGPUN, W.; SCRIVENER, K. Cement and Concrete Research Strength-promoting mechanism of alkanolamines on limestone-calcined clay cement and the role of sulfate. **Cement and Concrete Research**, v. 147, n. May, p. 106527, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106527>>.

HUO, D.; HUANG, X.; DOU, X.; CIAIS, P.; LI, Y.; DENG, Z.; CUI, D.; BENKHELIFA, F.; SUN, T.; ZHU, B.; ROEST, G.; GURNEY, R.; KE, P.; GUO, R.; LU, C.; LIN, X.; LOVELL, A.; DECOLA, P. L.; DAVIS, S. J.; LIU, Z. Near-real-time estimates of daily CO₂ emissions from 1500 cities worldwide. p. 1–20, [s.d.]
IEA; WBCSD. Technology Roadmap for Cement. **International Energy Agency**, p. 66, 2018.

IMBABI, M. S.; CARRIGAN, C.; MCKENNA, S. Trends and developments in green cement and concrete technology. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 1, n. 2, p. 194–216, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijse.2013.05.001>>.

JIANG, D.; LI, X.; LV, Y.; ZHOU, M.; HE, C.; JIANG, W.; LIU, Z. Utilization of limestone powder and fly ash in blended cement : Rheology , strength and hydration characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117228, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117228>>.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials : New sources , characterization , and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, n. February, p. 257–273, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>>.

KANAGARAJ, B.; ANAND, N.; SAMUVEL RAJ, R.; LUBLOY, E. Techno-socio-economic aspects of Portland cement, Geopolymer, and Limestone Calcined Clay Cement (LC3) composite systems: A-State-of-Art-Review. **Construction and Building Materials**, v. 398, n. July, 2023.

KAPELUSZNA, E.; KOTWICA, Ł.; MALATA, G.; MURZYN, P.; NOCUN-WCZELIK, W. The effect of highly reactive pozzolanic material on the early hydration of alite – C3A – gypsum synthetic cement systems. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118879, 10 ago. 2020.

KASANIYA, M.; THOMAS, M. D. A.; MOFFATT, E. G. Pozzolanic reactivity of natural pozzolans, ground glasses and coal bottom ashes and implication of their incorporation on the chloride permeability of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 139, n. October 2020, p. 106259, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106259>>.

KASTIS, D.; KAKALI, G.; TSIVILIS, S.; STAMATAKIS, M. G. Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 10, p. 1821–1826, 2006.

KHODABAKHSHLOO, N.; BISWAS, B. Adsorption of aqueous perfluorooctane sulfonate by raw and oleylamine-modified Iranian diatomite and zeolite: Material and application insight. **Applied Clay Science**, v. 244, p. 107101, 1 nov. 2023.

KRISHNAN, S.; BISHNOI, S. Understanding the hydration of dolomite in cementitious systems with reactive aluminosilicates such as calcined clay. **Cement and Concrete Research**, v. 108, p. 116–128, 2018.

KRISHNAN, S.; EMMANUEL, A. C.; BISHNOI, S. Hydration and phase assemblage of ternary cements with calcined clay and limestone. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 64–72, 2019.

KRISHNAN, S.; KANAUIA, S. K.; MITHIA, S.; BISHNOI, S. Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 265–274, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.240>>.

LAPEYRE, J.; KUMAR, A. Influence of pozzolanic additives on hydration mechanisms of tricalcium silicate. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 101, p. 3557–3574, 2018.

LEE, D.; SARRAN, C. Controlling for unmeasured confounding and spatial misalignment in long-term air pollution and health studies. n. December 1952, p. 1–22, 2022.

LEE, M. G.; HUANG, Y.; SHIH, Y. F.; WANG, W. C.; WANG, Y. C.; WANG, Y. X.; CHANG, H. W. Mechanical and thermal insulation performance of waste diatomite cement mortar. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 25, p. 4739–4748, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.246>>.

LI, J.; ZHANG, W.; LI, C.; MONTEIRO, P. J. M. Green concrete containing diatomaceous earth and limestone : Workability , mechanical properties , and life-cycle assessment *. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 662–679, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.077>>.

LI, J.; ZHANG, W.; LI, C.; MONTEIRO, P. J. M. Eco-friendly mortar with high-volume diatomite and fly ash: Performance and life-cycle assessment with regional variability. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121224, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121224>>.

LIN, R. S.; HAN, Y.; WANG, X. Y. Macro–meso–micro experimental studies of calcined clay limestone cement (LC3) paste subjected to elevated temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 116, n. November 2020, p. 103871, 2021. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103871>>.

LV, L.; LUO, S.; SAVIJA, B.; ZHANG, H.; LI, L.; UEDA, T.; XING, F. Effect of particle size distribution on the pre-hydration, hydration kinetics, and mechanical properties of calcium sulfoaluminate cement. v. 398, n. March, 2023.

LV, Z.; JIANG, A.; LIANG, B. Development of eco-efficiency concrete containing diatomite and iron ore tailings: Mechanical properties and strength prediction using deep learning. **Construction and Building Materials**, v. 327, p. 126930, abr. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822006158>>.

MACEDO, A. R. S.; SILVA, A. S.; DA LUZ, D. S.; FERREIRA, R. L. S.; LOURENÇO, C. S.; GOMES, U. U. Study of the effect of diatomite on physico-mechanical properties of concrete. **Ceramica**, v. 66, n. 377, p. 50–55, 2020.

MAINA, P.; MBARAWA, M. Enhancement of lime reactivity by addition of diatomite. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 10, p. 1910–1919, 2011. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.05.011>>.

MALACARNE, C. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos LC3 – cimentos ternários a base de argila calcinada e calcário – a partir de matérias primas do Rio Grande do Sul**. 2019. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/345958849_Desenvolvimento_e_caracterizacao_d_e_cimentos_LC3_-_cimentos_ternarios_a_base_de_argila_calcinada_e_calcario_-_a_partir_de_materias_primas_do_Rio_Grande_do_Sul_Development_and_characterisation_of_LC3_c>.

MARAGHECHI, H.; AVET, F.; WONG, H.; KAMYAB, H.; SCRIVENER, K. Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 5, p. 1–17, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1617/s11527-018-1255-3>>.

MARANGU, J. M. Physico-chemical properties of Kenyan made calcined Clay -Limestone cement (LC³). **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. e00333, 2020.

MARINKOVIĆ, S.; RADONJANIN, V.; MALEŠEV, M.; IGNJATOVIĆ, I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2255–2264, 2010.

MARQUES, M.; NEVES-SILVA, R. Decision support for energy savings and emissions trading in industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 88, p. 105–115, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.052>>.

MARTIRENA, F.; ALUJAS, A. The Dissemination of the Technology “LC3” in Latin America. Challenges and Opportunities. **RILEM Bookseries**, v. 25, p. 777–783, 2020a.

MEJÍA, J. M.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; MONTES, C. Rice husk ash and spent diatomaceous earth as a source of silica to fabricate a geopolymeric binary binder. **Journal of Cleaner Production**, v. 118, p. 133–139, 2016.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário**. 2005. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2005.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 69–76, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>>.

MONTANHEIRO, TARCÍSIO JOSÉ, YAMAMOTO JORGE KAZUO, SANT'AGOSTINO LILIA MASCARENHAS, KIHARA YUSHIRO, S. M. M. Palavras-chave : **Revista do Instituto Geológico**, v. 23, n. 2, p. 1–17, 2002.

MOREIRA, C.; HENRIQUE, J. Efeito do teor de gipsita na resistência à compressão do cimento LC³ Effect of gypsum content on the compressive strength of LC³ cement. 2020.

MOTA DOS SANTOS, A. A. **Influência da diatomita na reologia e hidratação de pastas cimentícias e nas propriedades de argamassas de alta resistência**. 2021. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2021.

MOTA DOS SANTOS, A. A.; CORDEIRO, G. C. Investigation of particle characteristics and enhancing the pozzolanic activity of diatomite by grinding. **Materials Chemistry and Physics**, v. 270, n. June, 2021.

MUKHOPADHYAY, A. K.; SARASWATULA, P.; LIU, K. W. Rapid estimation of natural pozzolan dosages for mitigating ASR using the innovative chemical screening tool (CST). **Construction and Building Materials**, v. 408, n. September, p. 133609, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133609>>.

MUZENDA, T. R.; HOU, P.; KAWASHIMA, S.; SUI, T.; CHENG, X. The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3. **Cement and Concrete Composites**, v. 107, p. 103516, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103516>>.

NADELMAN, E. I.; KURTIS, K. E. Application of Powers' model to modern portland and portland limestone cement pastes. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 100, p. 4219–4231, 2017.

NAIR, N.; MOHAMMED HANEEFA, K.; SANTHANAM, M.; GETTU, R. A study on fresh properties of limestone calcined clay blended cementitious systems. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119326, 2020.

NANZYU, M.; DAHLGREN, R.; SHOJI, S. Chapter 6 Chemical Characteristics of Volcanic Ash Soils. **Developments in Soil Science**, v. 21, n. C, p. 145–187, 1993.

NAZIR, U.; TAJ, M.; UPPAL, M.; KHALID, S. M Mitigating Climate Small - Scale Using Multi- Spectral Classifier And Deep Learning. **Conference paper at ICLR 2023**. p. 1–9, 2023.

NGUYEN, Q. D.; AFROZ, S.; CASTEL, A. Influence of Calcined Clay Reactivity on the Mechanical Properties and Chloride Diffusion Resistance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Concrete. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. Figure 1, p.

1–14, 2020.

OUYANG, X.; YU, L.; CHEN, J.; WU, K.; MA, Y.; FU, J. Roles of diatomite in hydration, microstructure and strength development of cement paste. **Materials Today Communications**, v. 37, n. October, p. 107555, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107555>>.

OYAWA, W. O.; LECT, S.; KENYATTA, J. Eco-Materials for Developing Countries Municipal Waste Ash as. **Structural Engineering Internationa**, v. 3, p. 208–212, 2004. PADEVÊT, P.; BITTNAR, P. Influence of fly ash content in cement paste on size of creep. **Procedia Engineering**, v. 48, p. 520–524, 2012.

PAIVA, H.; SILVA, A. S.; VELOSA, A.; CACHIM, P.; FERREIRA, V. M. Microstructure and hardened state properties on pozzolan-containing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 374–384, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.120>>.

PEREIRA, G. G.; COSTA, E. B. C. Efeito da substituição de cimento por misturas de calcário e metacaulim na resistência mecânica de matrizes cimentícias. **4º Congresso Luso-Brasileiro De Materiais De Construção Sustentáveis**, July, 2022.

PEREZ-DIAZ, E. D.; REYES-ARAIZA, L.; MILL, B. M.; RODRÍGUEZ-GARCIA, M. E.; LONDO, S. M. Evaluation of bamboo cortex ash as supplementary cementitious material : Comparative analysis with sugarcane bagasse ash and natural pozzolan. v. 66. December 2022, 2023.

PILLAI, R. G.; GETTU, R.; SANTHANAM, M.; RENGARAJU, S.; DHANDAPANI, Y.; RATHNARAJAN, S.; BASAVARAJ, A. S. Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 118, p. 111–119, 2019.

QINFEL, L.; HAN, W.; PENGKUN, H.; HENG, C.; YANG, W.; XIN, C. The microstructure and mechanical properties of cementitious materials comprised of limestone, calcined clay and clinker. **Ceramics - Silikaty**, v. 63, n. 4, p. 356–364, 2019.

QUEIROZ, M. G. C. LIMESTONE CALCINED CLAY CEMENT (LC3) UTILIZANDO MATÉRIAS-PRIMAS BRASILEIRAS PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DO CIMENTO. 2022. **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/49218/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Maryane%20Gislayne%20Cordeiro%20de%20Queiroz.pdf>>.

RAJ, R. S. Limestone Calcined Clay Cement (LC3): A Sustainable Solution for Mitigating. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, p. 200197, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200197>>.

ROBAYO-SALAZAR, R. A.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Natural volcanic pozzolans as an available raw material for alkali-activated materials in the foreseeable future: A review. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 109–118, 2018. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.174>>.

RODRIGUEZ, C.; TOBON, J. I. Influence of calcined clay/limestone, sulfate and clinker proportions on cement performance. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 119050, 2020.

RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; SKIBSTED, J.; PALOMO, A. Clay reactivity : Production of alkali activated cements. **Applied Clay Science**, v. 73, p. 11–16, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2012.10.012>>.

SABEUR, H.; VINCENT, J. Thermal stability and microstructural changes in 5 years aged cement paste subjected to high temperature plateaus up to 1000 ° C as studied by thermal analysis and X-ray diffraction. p. 2483–2501, 2019.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. **Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/cemconcomp>.

SALEH, R.; KEMAL, T.; RAMYAR, K. Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 89–98, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.014>>.

SANTOS, A. A. M.; CORDEIRO, G. C. Investigation of particle characteristics and enhancing the pozzolanic activity of diatomite by grinding. **Materials Chemistry and Physics**, v. 270, n. June, 2021.

SANTOS, E. A.; MELO, M. A. F.; MELO, D. M. A.; FREITAS, J. C. O.; MARTINELLI, A. E.; MELO, V. R. M.; MEDEIROS, R. L. B. A. Influência da adição de diatomita nas propriedades de pastas geopoliméricas: volume de filtrado, tempo de espessamento e resistência à compressão. **Cerâmica**, v. 61, n. 359, p. 309–316, 2015.

SARIDEMIR, M.; YILDIRIM, A. Effect of elevated temperatures on properties of high strength mortars containing ground calcined diatomite with limestone sand. **Journal of Building Engineering**, v. 56, n. May, p. 104748, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104748>>.

SCRIVENER, K.; AVET, F.; MARAGHECHI, H.; ZUNINO, F.; STON, J.; HANPONGPUN, W.; FAVIER, A. Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3). **Green Materials**, v. 7, n. 1, p. 3–14, 2019.

SCRIVENER, K. L. **SPECIAL ISSUE-Future Cements Options for the future of cement**The Indian Concrete Journal. [s.l: s.n.].

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and concrete research**, v. 114, p. 2–26, 2018.

SCRIVENER, K.; MARTIRENA, F.; BISHNOI, S.; MAITY, S. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. November 2017, p. 49–56, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>>.

SHARMA, M.; BISHNOI, S.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. **Cement and Concrete Research**, v. 149, p. 106564, 2021.

SHOJI, S.; DAHLGREN, R.; NANZYU, M. Chapter 4 Classification of Volcanic Ash Soils. **Developments in Soil Science**, v. 21, n. C, p. 73–100, 1993.

SILVA, R. F. A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. **Revista Processos Químicos**, p. 73–82, 2020.

SINGH, N. B.; KUMAR, M.; RAI, S. Geopolymer cement and concrete: Properties. **Materials Today: Proceedings**, v. 29, p. 743–748, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.513>>.

SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSSEN, J. Supplementary cementitious materials. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 74, n. B, p. 211–278, 2012.

SNELLINGS, R.; SALZE, A.; SCRIVENER, K. L. Use of X-ray diffraction to quantify amorphous supplementary cementitious materials in anhydrous and hydrated blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 64, p. 89–98, 2014.

SOBOLEV, K.; KOZHUKHOVA, M.; SIDERIS, K.; MENÉNDEZ, E.; SANTHANAM, M. **Alternative supplementary cementitious materials**. [s.l.: s.n.]v. 25233–282 p.

SOROKA, I.; SETTER, N. The effect of fillers on strength of cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 7, n. 4, p. 449–456, 1977.

SOURI, A.; KAZEMI-KAMYAB, H.; SNELLINGS, R.; NAGHIZADEH, R.; GOLESTANI-FARD, F.; SCRIVENER, K. Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated kaolins in cement. **Cement and Concrete Research**, v. 77, p. 47–59, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.017>>.

SOUZA, G. P.; FILGUEIRA, M.; ROSENTHAL, R.; HOLANDA, J. N. F. Characterization of natural diatomaceous composite material. **Cerâmica**, p. 40–43, 2003.

SOUZA, P. S. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. 2003. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2747>>.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). In: **Engenharia Civil UM**. [s.l.: s.n.]p. 45–54.

SPOSITO, R.; MAIER, M.; BEUNTNER, N.; THIENEL, K. Evaluation of zeta potential of calcined clays and time-dependent flowability of blended cements with customized polycarboxylate-based superplasticizers. **Construction and Building Materials**, v. 308, n. September, p. 125061, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125061>>.

STUTZMAN, P.; STRUBLE, L. Instructions in Using GSAS Rietveld Software for

Quantitative X-ray Diffraction Analysis of Portland Clinker and Cement. **NIST Technical Note**, p. 1–28, 2015. Disponível em: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.1884.pdf%5Cnhttp://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1884>.

TEIXEIRA, E. R.; MATEUS, R.; CAMÕES, A.; BRANCO, F. G. Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 195–207, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.173>.

TURANLI, L.; UZAL, B.; BEKTAS, F. Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1106–1111, 2005.

TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 125–130, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>.

UZAL, B.; TURANLI, L.; YÜCEL, H.; GÖNCÜOĞLU, M. C.; ÇULFAZ, A. Pozzolanic activity of clinoptilolite: A comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 3, p. 398–404, 2010.

VAN OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. Cement manufacture and the environment - Part I: Chemistry and technology. **Journal of Industrial Ecology**, v. 6, n. 1, p. 89–105, 2002.

VIZCAÍNO ANDRÉS, L. M.; ANTONI, M. G.; ALUJAS DIAZ, A.; MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F.; SCRIVENER, K. L. Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements. **Advances in Cement Research**, v. 27, n. 9, p. 546–556, 2015.

WEN, J.; WANG, B.; DAI, Z.; SHI, X.; JIN, Z.; WANG, H.; JIANG, X. Resources , Conservation & Recycling New insights into the green cement composites with low carbon footprint : The role of biochar as cement additive / alternative. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 197, n. March, p. 107081, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107081>.

WEN, Z.; CHEN, M.; MENG, F. Evaluation of energy saving potential in China's cement industry using the Asian-Pacific Integrated Model and the technology promotion policy analysis. **Energy Policy**, v. 77, p. 227–237, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.030>.

YILMAZ, B.; EDİZ, N. The use of raw and calcined diatomite in cement production. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 3, p. 202–211, 2008.

YU, J.; WU, H. L.; MISHRA, D. K.; LI, G.; LEUNG, C. K. Compressive strength and environmental impact of sustainable blended cement with high-dosage Limestone and Calcined Clay (LC2). **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123616, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123616>.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismo de ativação e reação das pozolanas de**

argilas calcinadas. 1989. Universidade de São Paulo, 1989.

ZARIBAF, B. H.; UZAL, B.; KURTIS, K. Compatibility of Superplasticizers with Limestone-Metakaolin Blended Cementitious System. **RILEM Bookseries**, v. 10, p. 427–434, 2015.

ZHANG, C. Y.; YU, B.; CHEN, J. M.; WEI, Y. M. Green transition pathways for cement industry in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 166, n. December 2020, p. 105355, 2021a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105355>>.

ZHANG, K.; SHEN, P.; YANG, L.; RAO, M.; NIE, S.; WANG, F. Development of high-ferrite cement : Toward green cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 327, n. October, p. 129487, 2021b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129487>>.

ZUNINO, F.; SCRIVENER, K. The reaction between metakaolin and limestone and its effect in porosity refinement and mechanical properties. **Cement and Concrete Research**, v. 140, p. 106307, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106307>>.