



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA,
CAMPUS CAMPINA GRANDE
GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA EM CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS

KLEDERMAN DO NASCIMENTO CAMILO

**AVALIAÇÃO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO POR RESÍDUOS DE SERRAGEM DE GRANITO E CALCÁRIO DE ALTA
DENSIDADE**

CAMPINA GRANDE – PB

2026

KLEDERMAN DO NASCIMENTO CAMILO

**AVALIAÇÃO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO POR RESÍDUOS DE SERRAGEM DE GRANITO E CALCÁRIO DE ALTA
DENSIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Tecnologia em Construção de Edifícios, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Campina Grande, como requisito à obtenção do título de Tecnólogo em Construção de Edifícios.

Orientador: Prof. Eduardo da Cruz Teixeira

CAMPINA GRANDE – PB

2026

C183a Camilo, Klederman do Nascimento

Avaliação de pastas cimentícias com substituição parcial do cimento por resíduos de serragem de granito e calcário de alta densidade / Klederman do Nascimento Camilo. - Campina Grande, 2025.

48 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Construção de Edifícios) - Instituto Federal da Paraíba, 2025.

Orientador: Prof. Eduardo da Cruz Teixeira.

1. Construção civil. 2. Pastas cimentícias - Cimento Portland
3. Resíduos industriais. 4. Produtividade. 5. Sustentabilidade na construção civil. I. Teixeira, Eduardo da Cruz. II. Título.

CDU 691

KLEDERMAN DO NASCIMENTO CAMILO

**AVALIAÇÃO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO POR RESÍDUOS DE SERRAGEM DE GRANITO E CALCÁRIO DE ALTA
DENSIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Tecnologia em Construção de Edifícios, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Campina Grande, como requisito à obtenção do título de Tecnólogo em Construção de Edifícios.

Orientador: Prof. Eduardo da Cruz Teixeira

APROVADO EM: 12 / 02 / 2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Eduardo da Cruz Teixeira

Orientador (IFPB)

Me. Victor Moisés de Araújo Medeiros

Examinador (IFPB)

Prof. Me. Kleber da Fonseca Furtado

Examinador (IFPB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha namorada Isaquely Cavalcante da Silva pela compreensão e apoio nos momentos de maior dedicação e desafio durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Eduardo da Cruz Teixeira, pela orientação e contribuição fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Elnatan Lins da Costa, pela parceria acadêmica, colaboração nas atividades de pesquisa e troca de conhecimentos que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI), pelo incentivo à pesquisa, e ao SIMPIF, pela oportunidade de divulgação científica e crescimento acadêmico.

Aos professores do curso de Tecnólogo em Construção de Edifícios, pelos conhecimentos compartilhados ao longo da graduação, que contribuíram significativamente para minha formação profissional e acadêmica.

À instituição e aos laboratórios que possibilitaram a realização dos ensaios experimentais oferecendo estrutura e suporte técnico indispensáveis à execução da pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho.

*“De um certo ponto adiante não há volta. Esse é o ponto que
deve ser alcançado.”*

Franz Kafka

RESUMO

O setor da construção civil é reconhecido pelo elevado consumo de recursos naturais e pelas emissões significativas de CO², especialmente associadas à produção do cimento Portland. Diante desse cenário, cresce o interesse por alternativas que reduzam os impactos ambientais e promovam o reaproveitamento de resíduos industriais. Entre esses resíduos destacam-se o Resíduo de Serragem de Granito (RSG) e o Resíduo de Serragem de Calcário de Alta Densidade (RSCAD), subprodutos do beneficiamento de rochas ornamentais que, quando descartados inadequadamente, contribuem para a degradação ambiental. Estudos recentes apontam que tais resíduos, quando utilizados como materiais cimentícios suplementares, podem melhorar características físicas e microestruturais das matrizes cimentícias, além de reduzir a dependência do cimento Portland.

Este trabalho investiga a viabilidade técnica e ambiental da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de serragem de granito (RSG) e de calcário de alta densidade (RSCAD) em pastas cimentícias. O estudo parte da necessidade de reduzir o impacto ambiental associado à produção de cimento, destacando o potencial de resíduos minerais como materiais cimentícios suplementares. Foram realizadas misturas binárias e ternárias substituindo-se o cimento em 5%, 10% e 15%, analisando o comportamento reológico, físico e mecânico das pastas. A metodologia envolveu ensaios normatizados de resistência à compressão, absorção de água e velocidade de propagação ultrassônica, possibilitando uma avaliação abrangente da compacidade, porosidade e integridade estrutural das amostras. Os resultados indicaram que o uso do RSCAD proporciona ganhos significativos de densificação e aumento da resistência, sobretudo no teor de 5%, enquanto o RSG apresentou desempenho inferior quando empregado isoladamente em maiores proporções, devido à sua maior rugosidade superficial e tendência ao aumento da porosidade. As misturas ternárias demonstraram comportamento equilibrado, combinando benefícios de ambos os resíduos. Conclui-se que a utilização de RSCAD e a combinação RSG + RSCAD representam alternativas viáveis e sustentáveis para reduzir o consumo de cimento e reutilizar resíduos do setor de rochas ornamentais.

Palavras chave: Cimento Portland; resíduos de rochas ornamentais; sustentabilidade.

ABSTRACT

The civil construction sector is known for its intensive consumption of natural resources and for the significant CO₂ emissions generated during Portland cement production. In this context, sustainable alternatives that reduce environmental impacts and promote the reuse of industrial residues have become increasingly important. Among these residues, Granite Sawing Residue (RSG) and High-Density Limestone Sawing Residue (RSCAD) stand out as by-products of ornamental stone processing. When improperly disposed of, they contribute to soil degradation, silting and environmental pollution. Recent studies suggest that these materials, when used as supplementary cementitious materials, can enhance the physical and microstructural characteristics of cement-based matrices while reducing the reliance on Portland cement.

This study investigates the technical and environmental feasibility of partially replacing Portland cement with granite sawdust residue (RSG) and high-density limestone sawdust residue (RSCAD) in cementitious pastes. The research addresses the need to reduce the environmental impact associated with cement production, highlighting the potential of mineral residues as supplementary cementitious materials. Binary and ternary mixtures were produced with 5%, 10%, and 15% replacement levels, and the rheological, physical, and mechanical behavior of the pastes was evaluated. The methodology consisted of standardized tests for compressive strength, water absorption, and ultrasonic pulse velocity, allowing for a comprehensive assessment of compactness, porosity, and structural integrity. The results showed that RSCAD enhances densification and increases mechanical strength, particularly at the 5% replacement level, whereas RSG demonstrated lower performance when used alone in higher proportions due to increased porosity and surface roughness. The ternary mixtures presented balanced performance, combining the advantages of both residues. It is concluded that RSCAD and the RSG + RSCAD combination are feasible and sustainable alternatives for reducing cement consumption while promoting the reuse of ornamental stone industry waste.

Keywords: Portland cement; ornamental rock residues; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema simplificado dos efeitos dos resíduos.....	27
Figura 2 - Resíduo de Serragem do Granito em seu local de descarte na fábrica	30
Figura 3 - Resíduo da Serragem do Calcário de alta densidade em seu local de descarte na fábrica	31
Figura 4 - Exemplos dos corpos de prova cilíndricos	33
Figura 5 - Exemplo do aparelho de Vicat.....	34
Figura 6 - Exemplo de um ensaio Mini slump	34
Figura 7 - Prensa hidráulica Matest aparelho usado para medir a resistência a compressão axial	35
Figura 8 - Equipamento de onda ultrassônica	36
Figura 9 - Absorção de água.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland	19
Tabela 2 - Compostos da Hidratação do Cimento Portland	21
Tabela 3 - Valores médios da composição química do cimento Portland e dos resíduos de serragem de rochas ornamentais	24
Tabela 4 - Comparação das principais características físicas, químicas e funcionais dos resíduos de serragem.....	26
Tabela 5 - Composições das misturas binárias e ternárias em substituição ao cimento.....	32
Tabela 6 - Resistência à compressão axial	38
Tabela 7 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica	40

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MCS - Materiais Cimentícios Suplementares;

RSG - Resíduos de Serragem de Granito;

RSCAD - Resíduos de Serragem de Calcário de Alta Densidade;

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

NBR - Norma Brasileira;

DRX - Difração de Raios-X;

FRX - Fluorescência de Raios-X;

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura;

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente;

DNER - Departamento Nacional De Estradas de Rondagem.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2.	OBJETIVOS.....	16
1.2.1.	Objetivo geral	16
1.2.2.	Objetivos específicos.....	16
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1.	ARGAMASSA.....	17
2.2.	CIMENTO PORTLAND	18
2.2.1.	Hidratação e Formação da microestrutura	19
2.2.2.	Impactos ambientais.....	21
2.3.	MATERIAIS CIMENTICIOS SUPLEMENTARES (MCS)	22
2.3.1.	Classificação.....	23
2.3.2.	Mecanismos de atuação dos MCS.....	23
2.4.	RESÍDUOS DE SERRAGEM DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	24
2.5.	APLICAÇÃO EM PASTAS CIMENTÍCIAS	26
2.6.	ESTUDOS RELEVANTES	27
2.7.	NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS	28
2.8.	SÍNTESE	29
3.	METODOLOGIA	30
3.1.	TIPO DE PESQUISA.....	30
3.2.	MATERIAIS UTILIZADOS	30
3.3.	PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS	31
3.4.	PREPARO DAS AMOSTRAS	31
3.5.	ENSAIOS REALIZADOS	33
3.5.1.	Ensaio em estado fresco.....	33

3.5.2.	Ensaio em estado endurecido.....	35
4.	RESULTADOS	37
4.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	37
4.2.	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL	37
4.3.	ABSORÇÃO DE ÁGUA	38
4.4.	ENSAIO DE VELOCIDADE ULTRASSÔNICA.....	39
4.5.	COMPARAÇÃO GERAL DOS RESULTADOS	40
4.6.	AVALIAÇÃO INTEGRADA DO DESEMPENHO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS.....	41
4.7.	DISCUSSÃO COM A LITERATURA.....	42
5.	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha um papel central no desenvolvimento das cidades e na melhoria da qualidade de vida da sociedade. No entanto é um dos setores que mais consome recursos naturais e gera impactos ambientais, especialmente devido ao uso intensivo de cimento Portland na produção de concretos, argamassas e pastas. De acordo com SCRIVENER, Karen; JOHN, Vanderley; GARTNER, Ellis, (2018), estima-se que a fabricação do cimento seja responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO₂ na atmosfera, contribuindo de forma expressiva para o aquecimento global, tornando urgente a busca por alternativas mais sustentáveis.

Neste cenário, a substituição parcial do cimento por materiais de origem residual tem ganhado destaque como uma estratégia para reduzir os impactos ambientais e promover uma construção mais ecológica, sem comprometer a qualidade e a durabilidade das edificações. Uma das estratégias estudadas é a substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares (MCS), oriundos de resíduos industriais ou minerais, que podem contribuir para a redução de pegada de carbono e para o reaproveitamento de rejeitos sólidos. Nesse contexto, os resíduos de granito e calcário são frequentemente descartados de forma inadequada, apresentam-se como potenciais insumos a serem incorporados em matrizes cimentícias.

Acredita-se que, com uma correta caracterização e aplicação, esses resíduos possam funcionar como substituintes parciais viáveis do cimento, promovendo benefícios técnicos e ambientais. Assim, este trabalho investiga a aplicação desses resíduos como substituintes parciais do cimento em pastas cimentícias, avaliando sua influência no comportamento físico e mecânico do material.

1.1. JUSTIFICATIVA

O setor de rochas ornamentais gera grandes volumes de resíduos sólidos, geralmente descartados de forma inadequada, contribuindo para assoreamento, contaminação do solo e impactos a saúde pública. Entre esses resíduos, destacam-se os provenientes da serragem de granito (RSG) e do calcário de alta densidade (RSCAD), que por não receberem destinação adequada, representam um problema ambiental crescente.

Frente a essa problemática, torna-se necessário investigar alternativas que promovam a valorização desses rejeitos. A incorporação de RSG e RSCAD em matrizes cimentícias pode reduzir o impacto ambiental tanto pelo reaproveitamento dos resíduos quanto pela diminuição da quantidade de cimento Portland utilizada, contribuindo para a redução das emissões de CO₂.

Do ponto de vista acadêmico, o trabalho fornece o desenvolvimento cimentício na área de materiais alternativos para a construção civil, alinhando-se as tendências globais de inovação e sustentabilidade. Já do ponto de vista prático, gera informações que podem ser utilizadas por profissionais do setor para aplicar soluções mais econômicas e ambientais responsáveis, em sintonia com os princípios da economia circular.

A escolha pela análise em pastas, em vez de concretos ou argamassas, justifica-se pelo caráter experimental do trabalho, já que as pastas permitem uma observação mais direta do comportamento da matriz cimentícia e das interações entre cimento e resíduos adicionados. Assim, torna-se possível compreender com maior clareza os efeitos da substituição parcial, antes de aplicar os resíduos em materiais de maior complexidade.

Um diferencial deste estudo está na avaliação comparativa entre misturas binárias e ternárias, envolvendo resíduos de serragem de granito e calcário de alta densidade. Enquanto a maioria das pesquisas concentra-se no uso isolado de resíduos minerais como substituintes do cimento Portland, este trabalho investiga a sinergia entre materiais de naturezas distintas, explorando o efeito combinado do resíduo silicoso (RSG) e do resíduo carbonático (RSCAD). Essa abordagem permite compreender como a interação entre partículas com diferentes composições químicas e morfologias influencia a compacidade, a porosidade e o desempenho mecânico das pastas cimentícias.

Portanto, este estudo se justifica pela sua contribuição em três dimensões principais: ambiental (redução de resíduos e emissões de CO₂), técnica (melhoria de propriedades em pastas cimentícias) e social (promoção de práticas construtivas mais sustentáveis e acessíveis).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de serragem de granito (RSG) e de calcário de alta densidade (RSCAD) em pastas cimentícias.

1.2.2. Objetivos específicos

Caracterizar fisicamente e quimicamente os resíduos de serragem de granito (RSG) e calcário de alta densidade (RSCAD);

Produzir pastas cimentícias com substituições de 5%, 10% e 15% de cimento por RSG, RSCAD e misturas ternárias;

Avaliar a resistência a compressão das misturas aos 91 dias;

Determinar a absorção de água e a porosidade aparente das pastas produzidas;

Analisar a velocidade de propagação de onda ultrassônica como parâmetro de homogeneidade e compacidade;

Comparar os desempenhos das misturas binárias e ternárias, identificando teores ótimos de substituição.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura referente aos principais temas relacionados ao objeto de estudo. Inicialmente, aborda-se de forma sintética a argamassa, com ênfase em seu principal aglomerante — o cimento Portland —, discutindo-se também os resíduos gerados pelo setor e os impactos ambientais decorrentes de sua produção. Na sequência, destaca-se práticas que promovem a redução de impactos ambientais e o uso racional de recursos naturais. Por fim, são examinadas as pesquisas voltadas à incorporação de resíduos de granito e calcário em pastas cimentícias, evidenciando seu potencial como materiais cimentícios suplementares.

2.1. ARGAMASSA

A argamassa é conhecida pela mistura composta por cimento, areia e água, em alguns casos, adições inertes e aditivos químicos.

A norma ABNT NBR 13281 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos (2001) define a argamassa como mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

A mesma norma especifica os tipos de argamassa, sendo elas:

Argamassa para assentamento

- **Argamassa para assentamento em alvenaria de vedação:** Argamassa indicada para ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função de vedação.
- **Argamassa para assentamento em alvenaria de estrutural:** Argamassa indicada para ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função estrutural.
- **Argamassa para complementação de alvenaria (encunhamento):** Argamassa indicada para fechamento de alvenaria de vedação, após a última fiada de componentes.

Argamassa para revestimento de parede e tetos

- **Argamassa para revestimento interno:** Argamassa indicada para revestimento de ambientes internos da edificação, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).
- **Argamassa para revestimento externo:** Argamassa indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos da edificação em contato com o meio externo, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).
- **Argamassa de uso geral:** Argamassa indicada para assentamento de alvenaria sem função estrutural e revestimento de paredes e tetos internos e externos.
- **Argamassa para reboco:** Argamassa indicada para cobrimento de emboço, propiciando uma superfície fina que permita receber o acabamento, também denominada massa fina.
- **Argamassa decorativa em camada fina:** Argamassa de acabamento indicada para revestimentos com fins decorativos, em camada fina.
- **Argamassa decorativa em monocamada:** Argamassa de acabamento indicada para revestimentos com fins decorativos, em camada fina.

O cimento, por constituir um dos principais componentes da argamassa, destaca-se também como um dos maiores responsáveis pelos impactos ambientais associados à construção civil.

2.2. CIMENTO PORTLAND

A norma ABNT NBR 16697 e DNER EM 036/95 estabelece o cimento Portland comum como um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos pela norma.

Na mesma norma, destaca-se que os cimentos Portland são designados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais. São identificados por suas siglas, seguidas de sua classe de resistência (25, 32, 40 ou ARI), acrescidas dos sufixos RS e BC, quando aplicáveis, conforme **Tabela 1**.

Tabela 1 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b –
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	–
	Não estrutural	CPB	–	

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: ABNT (2018)

Por se tratar de um dos principais materiais empregados na construção civil, torna-se fundamental destacar os diferentes subtipos de cimento Portland, bem como as classes de resistência a eles associadas. Nesse contexto, será abordado o processo de hidratação do cimento, por constituir um fenômeno essencial para a compreensão do seu comportamento mecânico e do desenvolvimento das propriedades físicas e químicas do material. A análise desse processo é particularmente relevante, uma vez que orienta e fundamenta as etapas experimentais e as discussões propostas neste trabalho de pesquisa.

2.2.1. Hidratação e Formação da microestrutura

O cimento Portland é um material hidráulico que adquire propriedades aglomerantes quando misturado com água. Esse processo, denominado **hidratação**, consiste em uma série de reações químicas entre os compostos do clínquer (principalmente alita – C_3S , belita – C_2S , aluminato tricálcico – C_3A e ferrita – C_4AF) e a água. Segundo MEHTA, P.; MONTEIRO

Paulo, (2014) a hidratação dos silicatos de cálcio resulta predominantemente na formação do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pela resistência mecânica, e do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que tem papel fundamental na reatividade pozolânica dos materiais adicionados.

O C_3S hidrata rapidamente formando o **silicato de cálcio hidratado (C-S-H)** e **hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2)**, gerando contribuição significativa para a resistência inicial, enquanto o C_2S reage mais lentamente, também formando C-S-H, contribuindo para resistência em idades avançadas. (TAYLOR, H., 1997). Já o C_3A reage com sulfatos presentes para formar etringita nas primeiras idades, podendo posteriormente formar monoaluminato. Enquanto a Ferrita (C_4AF) participa da formação de aluminatos e ferritas hidratados, com menor impacto na resistência mecânica. Na presença de carbonatos, como ocorre no RSCAD, esse composto favorece a formação de carboaluminatos estáveis (DILNESA Belay et al., 2011), densificando a matriz e reduzindo a porosidade capilar.

A presença de partículas finas adicionadas à pasta cimentícia atua como superfície de nucleação, acelerando a precipitação dos produtos hidratados (BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M. 2004). Dessa forma, materiais com elevada finura, como o resíduo de calcário, tendem a promover microestruturas mais compactas e homogêneas, enquanto materiais silicosos com baixa reatividade podem apenas modificar o empacotamento de partículas. Para melhor apresentação, foi elaborada a **Tabela 2**, na qual são apresentados os principais compostos formados durante a hidratação do cimento Portland.

Tabela 2 - Compostos da Hidratação do Cimento Portland

Composto	Origem da Reação	Função na Microestrutura	Impacto nas Propriedades
C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado)	Hidratação da alita (C_3S) e belita (C_2S)	Principal responsável pela resistência mecânica; reduz porosidade; aumenta densidade da matriz	Alta resistência e durabilidade
Portlandita ($Ca(OH)_2$)	Subproduto da hidratação da alita e belita	Atua como reserva alcalina; participa de reações pozolânicas; porém vulnerável a ataques químicos	Contribui para estabilidade química, mas pode reduzir durabilidade
Etringita (AFt)	Reação do aluminato tricálcico (C_3A) com sulfatos (gesso)	Garante estabilidade dimensional inicial; controla tempo de pega	Pode causar expansões se formar tardiamente
Mono-sulfoaluminato (AFm)	Transformação da etringita em presença limitada de sulfatos	Estabiliza a matriz; ocupa espaços porosos	Contribui para durabilidade moderada
Ferritas hidratadas (C_4AF)	Hidratação da ferrita tetracálcico	Formação de aluminatos e ferritas hidratados; menor impacto estrutural	Influência secundária na resistência

Fonte: O autor (2025)

Após a apresentação desse material amplamente empregado na construção civil e da explicação sobre seu funcionamento, torna-se imprescindível abordar os impactos ambientais associados à sua produção e utilização. A análise desses impactos é fundamental para a compreensão das implicações ambientais do setor da construção, bem como para a discussão de alternativas mais sustentáveis que visem à redução dos danos ao meio ambiente, alinhando o desenvolvimento tecnológico às práticas de sustentabilidade.

2.2.2. Impactos ambientais

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados na construção civil, sendo essencial para a produção de concretos, argamassas e pastas cimentícias. Entretanto, segundo SCRIVENER, Karen; JOHN, Vanderley; GARTNER, Ellis, (2018), a indústria cimentícias é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de CO_2 , principalmente devido a calcinação do calcário e ao consumo energético dos fornos rotativos. Estima-se que cada

tonelada de cimento produzida gere aproximadamente uma tonelada de CO₂, contribuindo significativamente para o aquecimento global. SCRIVENER, Karen; JOHN, Vanderley; GARTNER, Ellis, (2018).

Esse dado reforça a necessidade de alternativas que reduzam a dependência do cimento Portland, promovendo praticas mais sustentáveis. Neste sentido, o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) tem ganhado destaque. Tais materiais, geralmente oriundos de resíduos industriais ou minerais, podem melhorar propriedades físicas e mecânicas das misturas, além de contribuir para a sustentabilidade ao diminuir a exploração de recursos naturais e a emissão de poluentes.

2.3. MATERIAIS CIMENTICIOS SUPLEMENTARES (MCS)

Os **Materiais Cimentícios Suplementares (MCS)** são adições minerais utilizadas em substituição parcial ao cimento Portland ou ao concreto, com o objetivo de melhorar propriedades mecânicas, reduzir a permeabilidade e aumentar a durabilidade das estruturas. De acordo com COSTA Josiane (2021), os MCS podem apresentar comportamento cimentante ou pozolânico, participando ativamente das reações de hidratação e contribuindo para o desempenho mecânico e ambiental dos compósitos cimentícios.

A utilização de MCS tem se mostrado uma estratégia eficiente para a redução do consumo de clínquer, principal responsável pelas emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas à produção do cimento Portland. Além disso, o emprego desses materiais favorece a valorização de resíduos industriais, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade e da economia circular na construção civil.

Resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais, como os resíduos de serragem de granito e de calcário de alta densidade, vêm sendo amplamente estudados como alternativas viáveis de MCS, devido à sua composição mineralógica e à elevada finura, características que potencializam seu desempenho em matrizes cimentícias. Esses materiais apresentam composição rica em óxidos como SiO₂, CaO, Al₂O₃ e Fe₂O₃, elementos compatíveis com sistemas cimentícios, o que possibilita sua aplicação como substitutos parciais do cimento Portland. (HOU Wei et al., 2024).

2.3.1. Classificação

Segundo COSTA Josiane (2021), os MCS podem ser classificados como cimentantes — materiais que endurecem em contato com a água ou como pozolânicos, que reagem com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento para formar compostos hidratados de maior estabilidade, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essa reação contribui para o refinamento da microestrutura e para a diminuição da porosidade do concreto, resultando em maior durabilidade do material. Além disso, os MCS apresentam partículas de elevada finura, capazes de melhorar a compacidade da matriz, influenciando diretamente a permeabilidade e resistência. Entre os materiais comumente utilizados destacam-se a cinza volante, o metacaulim, a escória de alto-forno, a cinza de casca de arroz e os resíduos cerâmicos.

2.3.2. Mecanismos de atuação dos MCS

Os materiais cimentícios suplementares atuam nas matrizes cimentícias por meio de diferentes mecanismos, sendo os principais: o efeito fíler, o efeito de nucleação e, em alguns casos, as reações pozolânicas.

Mecanismo físico (efeito filler): A finura dos MCS permite o preenchimento de vazios entre as partículas de cimento, reduzindo a porosidade e aumentando a compacidade. COSTA Josiane (2021) reforça que esse efeito físico contribui para menor permeabilidade, maior resistividade elétrica e, conseqüentemente, maior durabilidade, uma vez que dificulta a entrada de agentes agressivos como água, cloretos e CO_2 .

O efeito de nucleação: Associado ao aumento dos sítios disponíveis para a precipitação dos produtos de hidratação do cimento, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), acelerando o processo de hidratação e contribuindo para o ganho de resistência mecânica, especialmente em idades iniciais.

Mecanismo químico (pozolanicidade): A reação pozolânica consiste na combinação entre sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) presentes no MCS e no hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 formado durante a hidratação do cimento. Essa reação forma compostos C-S-H adicionais, reduzindo a quantidade de Ca(OH)_2 disponível e refinando a matriz. COSTA Josiane (2021) destaca que esse mecanismo é essencial para o aumento da resistência e durabilidade do concreto, sendo comprovado por ensaios como Chapelle, termogravimetria (TGA) e DRX aplicados em MCS como metacaulim, depozo e cerâmica vermelha.

No caso dos resíduos de serragem de granito (RSG), sua atuação ocorre predominantemente como material de enchimento, devido à sua composição rica em quartzo e feldspatos, enquanto os resíduos de serragem de calcário de alta densidade (RSCAD) apresentam elevada concentração de carbonato de cálcio, favorecendo a densificação da matriz e a formação de carboaluminatos, que contribuem para o refinamento da microestrutura da pasta cimentícia. SADEK Dima. M; EL-ATTAR Mohamed. M; ALI, Haitham. A. (2016) e SILVA Achilles Dias Alves et al., (2008)

2.4. RESÍDUOS DE SERRAGEM DE ROCHAS ORNAMENTAIS

De acordo com o Art. 2º da Resolução CONAMA nº 307/2002, os resíduos da construção civil (RCC) são aqueles gerados em atividades de construção, reforma, reparo, demolição e manutenção de obras civis, bem como os provenientes da preparação e escavação de terrenos. Entre esses resíduos incluem-se materiais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solos, rochas, metais, resinas, adesivos, tintas, madeira e seus derivados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimentos asfálticos, vidros, plásticos, tubulações e fiações elétricas, entre outros. Popularmente, esses resíduos são denominados entulho, calça ou metralha.

A composição química dos resíduos de serragem de granito e de calcário de alta densidade evidencia sua compatibilidade com sistemas cimentícios, em função da presença de óxidos comumente encontrados no cimento Portland. A **Tabela 3** apresenta valores médios da literatura para a composição química desses materiais, permitindo compreender seus potenciais mecanismos de atuação quando utilizados como materiais cimentícios suplementares.

Tabela 3 - Valores médios da composição química do cimento Portland e dos resíduos de serragem de rochas ornamentais

Material	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
Cimento Portland	20,10	63,40	5,20	3,10
RSG (Resíduo de Serragem de Granito)	68,50	4,20	14,30	5,10
RSCAD (Resíduo de Serragem de Calcário de Alta Densidade)	6,40	89,10	1,20	0,80

Fonte: Adaptado de CHAJEC, Adrian (2020) e HOU Wei; ZHANG Qiao; ZHUANG Zhibin; ZHANG Yixin. (2024)

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de rochas ornamentais, como granito e calcário. O beneficiamento dessas rochas gera grandes quantidades de resíduos sólidos, especialmente na forma de pó ou de serragem fina, resultante do corte, polimento e acabamento. O descarte inadequado desse material provoca problemas ambientais como assoreamento de rios, poluição visual e contaminação do solo (GARCIA, Pedro, 2019).

Resíduo de Serragem de Granito (RSG) é rico em sílica e alumina, possui potencial pozolânico quando devidamente processado, podendo contribuir para a compactação da matriz cimentícia segundo MATOS, Ana; RAMOS Telma; SOUSA-COUTINHO J, (2014). Pesquisas recentes de JAGADESH P et al., (2024) e LI, Zhi et al., (2024) demonstram que, após moagem, o RSG pode contribuir para o refinamento de poros, atuação como filler e possível reatividade secundária.

Já o Resíduo de Serragem de Calcário de Alta Densidade (RSCAD): apresenta elevada concentração de carbonato de cálcio (CaCO_3), apresentando comportamento típico de filler calcário. Estudos como os de BOTELHO, Sasha; LEITE, Mônica; FARIAS, Uiliana; NEGAHAMA, Koji (2019) e GARCIA, Pedro (2019) demonstram melhoria significativa da compacidade redução da porosidade quando aplicado em pastas e argamassas. Sua superfície específica favorece a nucleação de hidratos, acelerando a hidratação inicial do cimento, ou seja, atuando como material de enchimento e favorecimento a redução da porosidade e da absorção de água.

Estudos recentes indicam que ambos os resíduos podem ser classificados como resíduos sólidos inertes, conforme a NBR 10004, contudo, seu reaproveitamento na construção civil representa uma alternativa ambientalmente adequada e tecnicamente promissora.

As diferenças mineralógicas e químicas entre o resíduo de serragem de granito e o resíduo de serragem de calcário de alta densidade resultam em comportamentos distintos quando incorporados às pastas cimentícias. A **Tabela 4**, apresenta uma análise comparativa entre as principais características o Resíduo de Serragem de Granito (RSG) e o Resíduo de Serragem de Calcário de Alta Densidade (RSCAD). Essa comparação visa evidenciar seus principais mecanismos de atuação e a influência esperada sobre as propriedades físicas e mecânicas das matrizes cimentícias.

Tabela 4 - Comparação das principais características físicas, químicas e funcionais dos resíduos de serragem

Propriedade	RSG – granito	RSCAD – Calcário Alta Densidade
Principais óxidos	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	CaO
Teor de SiO ₂ (%)	Elevado (≈ 65–70)	Baixo (≈ 5–10)
Teor de CaO (%)	Baixo (≈ 3–5)	Elevado (≈ 85–90)
Atividade pozolânica	Baixa a moderada	Não pozolânico
Mecanismo predominante	Efeito filer	Fíler e nucleação
Influência na resistência	Pode reduzir em altos teores	Pode aumentar em baixos teores
Influência na porosidade	Tendência ao aumento	Tendência à redução
Classificação ambiental	Resíduo inerte – Classe II B	Resíduo inerte – Classe II B
Origem	Serragem de rochas graníticas	Serragem de calcário de alta densidade

Fonte: Adaptado de SADEK Dima. M; EL-ATTAR Mohamed. M; ALI, Haitham. A. (2016), CHAJEC, Adrian (2020), HOU Wei; ZHANG Qiao; ZHUANG Zhibin; ZHANG Yixin. (2024).

2.5. APLICAÇÃO EM PASTAS CIMENTÍCIAS

O estudo de pastas cimentícias é fundamental para compreender a interação entre resíduos finos e a matriz aglomerante, uma vez que elimina a interferência de agregados e permite avaliar diretamente os efeitos na hidratação, microestrutura e propriedades mecânicas. Em sistemas contendo o RSG, autores como CHAJEC, Adrian (2020) identificou que seu desempenho é sensível a granulometria: partículas mais grossas tendem a aumentar a porosidade e reduzir a resistência, enquanto partículas ultrafinas atuam como núcleos de cristalização.

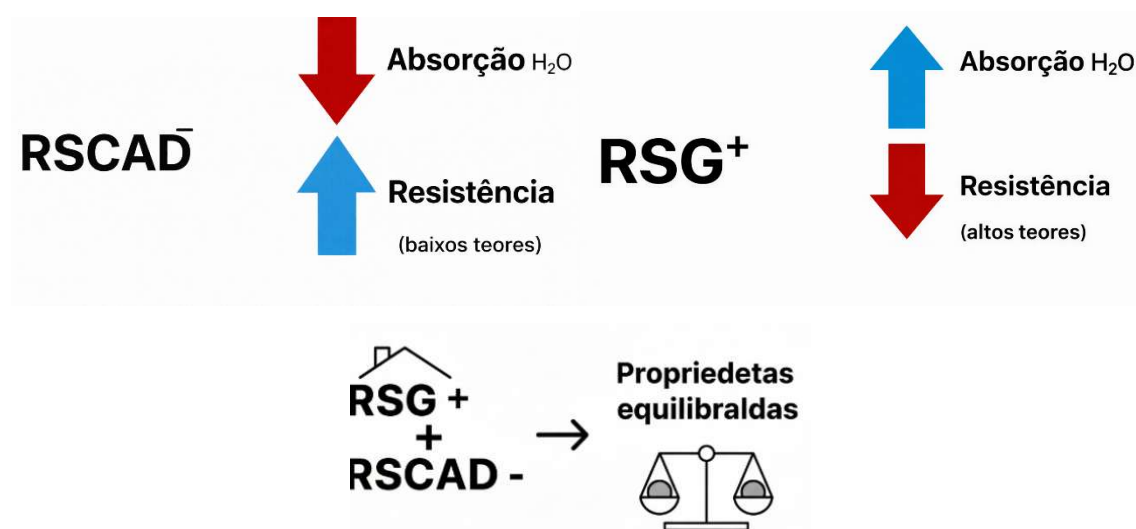
Em contrapartida, o RSCAD tem apresentado resultados positivos mesmo em granulometrias comuns, pois o carbonato de cálcio (CaCO₃) atua como catalizador para a formação de monossulfoaluminato e carboaluminatos que são fases cristalinas hidratadas que se formam durante o processo de hidratação do cimento Portland e materiais cimentícios suplementares que por sua vez acaba promovendo densificação da matriz e melhor preenchimento dos vazios.

Diversos estudos indicam que quando utilizados separadamente, esses resíduos apresentam comportamentos distintos nas propriedades mecânicas:

- O RSG pode aumentar a densidade de empacotamento da matriz, mas tende a elevar a absorção de água quando utilizado em teores elevados (CHAJEC, Adrian 2020).
- O RSCAD, por outro lado, reduz a absorção e aumenta a compacidade, apresentando ganhos de resistência a compressão em teores de substituição entre 5% e 10% (GARCIA, Pedro, 2019).

A combinação dos resíduos (misturas ternárias) tem se mostrado especialmente promissora. Pesquisas recentes evidenciam que a interação de partículas com diferentes morfologias e composições gera arranjo granulométrico mais eficiente, podendo equilibrar as propriedades, proporcionando melhor desempenho físico e mecânico, além de maior durabilidade, resultando em menor porosidade total e melhor distribuição dos hidratos. (MATOS, Ana; RAMOS Telma; SOUSA-COUTINHO J, 2014). Para melhor apresentação, foi elaborado a **Figura 1**.

Figura 1 – Esquema simplificado dos efeitos dos resíduos



Fonte: O autor (2025)

2.6. ESTUDOS RELEVANTES

Pesquisas recentes fornecem contribuições importantes sobre o desempenho de resíduos minerais finos em matrizes cimentícias, como as de CHAJEC, Adrian (2020), JAGADESH P et al., (2024), MATOS, Ana; RAMOS Telma; SOUSA-COUTINHO J (2014), apontam que a substituição parcial do cimento por resíduos de granito pode ser tecnicamente viável, principalmente quando a moagem reduz a granulometria, melhorando a durabilidade e a resistência a penetração de cloretos.

- CHAJEC, Adrian (2020): destacou que o uso de RSG em excesso pode comprometer a resistência mecânica, mas apresenta potencial quando usado em misturas combinadas.
- MATOS, Ana; RAMOS Telma; SOUSA-COUTINHO J (2014): verificaram que a incorporação de pó de granito em argamassas melhora a durabilidade frente a penetração de cloretos, embora possa reduzir a resistência em idades mais avançadas.
- JAGADESH P et al., (2024): identificaram que o pó de granito, após moagem, melhora a dureza superficial e apresenta boa estabilidade microestrutural.

No caso do calcário de alta densidade, trabalhos como os de GARCIA, Pedro (2019) e BOTELHO, Sasha et al., (2019) confirmam a melhoria da densificação e o ganho de resistência a compressão, reforçando seu potencial como MCS

- GARCIA, Pedro (2019): destacou que o resíduo de calcário de alta densidade contribui para reduzir a porosidade e a absorção de água, aumentando a densificação da matriz.
- BOTELHO, Sasha et al., (2019): confirmou o desempenho positivo do RSCAD em teores baixos, com melhoria da resistência a compressão e maior estabilidade microestrutural.

2.7. NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS

Para avaliar o comportamento das pastas cimentícias com substituição parcial do cimento por resíduos de serragem de granito (RSG) e resíduos de serragem de calcário (RSCAD), utilizaram-se normas técnicas consolidadas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), garantindo a padronização e confiabilidade dos ensaios realizados. As principais normas aplicadas foram:

- **ABNT NBR 7215:2019** – Determinação da resistência a compressão de corpos de prova cilíndricos.
- **ABNT NBR 9778:2009** – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica de concretos endurecidos. Embora a NBR 9778 seja destinada a concretos e argamassas, sua aplicação neste estudo é justificada pela avaliação comparativa da porosidade e absorção de água em pastas cimentícias, conforme adotado em estudos similares.
- **ABNT NBR 8802:2013** – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica em materiais cimentícios.

A aplicação desses ensaios permite caracterizar de forma precisa as propriedades físicas e mecânicas das misturas, possibilitando a comparação entre a pasta de referência (100% cimento Portland) e aquelas contendo diferentes teores de substituição por RSG e RSCAD.

Além disso, para a análise dos aspectos ambientais relacionados ao estudo, foram consideradas as diretrizes estabelecidas pelo **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**, conforme regulamentações publicadas em 2002, que orientam sobre o gerenciamento adequado de resíduos e os impactos ambientais associados às atividades industriais e da construção civil.

2.8. SÍNTESE

A revisão da literatura evidencia que a substituição parcial do cimento por resíduos de serragem granito e calcário de alta densidade pode ser uma estratégia viável para reduzir os impactos ambientais da construção civil, ao mesmo tempo em que mantém ou melhora determinadas propriedades das pastas cimentícias.

Em teores controlados, principalmente em até 10%, o RSCAD contribui para ganhos de resistência e redução da porosidade, enquanto o RSG atua como material de enchimento, podendo melhorar a compacidade quando combinado com outros aditivos ou resíduos. O uso conjunto desses resíduos, em misturas binárias ou ternárias, apresenta um caminho promissor para a construção sustentável, alinhando desempenho técnico, viabilidade e responsabilidade ambiental.

3. METODOLOGIA

3.1. TIPO DE PESQUISA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa experimental e aplicada, pois busca investigar, em laboratório, o desempenho de pastas cimentícias produzidas com a substituição parcial do cimento Portland por resíduos de serragem de granito (RSG) e de calcário de alta densidade (RSCAD), realizando tanto **misturas binárias** quanto **misturas ternárias**. Além disso, trata-se de uma pesquisa de caráter quantitativo, uma vez que os resultados serão obtidos por meio de ensaios normatizados e analisados a partir de parâmetros numéricos.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

- Cimento Portland: utilizado como aglomerante principal, atendendo as especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018).
- Resíduo de serragem de granito (RSG): foi obtido em uma área de descarte pertencente a uma empresa localizada na região Nordeste do Brasil, especializada em corte, polimento e comercialização de granito (**Figura 2**). O material coletado foi submetido a secagem em estufa a 105 °C, posteriormente desagregado manualmente com o uso de mão de gral e almofariz, e por fim peneirado em malha de abertura 0,075 mm (peneira de malha nº200).

Figura 2 - Resíduo de Serragem do Granito em seu local de descarte na fábrica



Fonte: O autor (2025)

- Resíduo de serragem de calcário de alta densidade (RSCAD): foi coletado também na região Nordeste do Brasil (**Figura 3**). O material foi submetido a secagem em estufa a 105°C por um período de 24 horas e, em seguida, peneirado em malha de abertura 0,075 mm (peneira de malha nº 200).

Figura 3 - Resíduo da Serragem do Calcário de alta densidade em seu local de descarte na fábrica



Fonte: O autor (2025)

- **Água potável:** utilizada para o amassamento, conforme NBR 15900 (ABNT, 2009).

3.3. PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS

Os resíduos (RSG e RSCAD) serão coletados, secos em estufa a 105 ± 5 °C até massa constante e posteriormente peneirados em malha de abertura 0,075 mm (malha nº 200), de modo a padronizar a granulometria, garantindo maior uniformidade nas misturas.

3.4. PREPARO DAS AMOSTRAS

1. **Dosagem:** foram elaboradas misturas de referência (100% cimento) e composições com substituição de 5%, 10% e 15% de cimento por RSG, RSCAD e misturas ternárias (RSG + RSCAD). Conforme apresentado na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Composições das misturas binárias e ternárias em substituição ao cimento

Traço	Cimento	RSCAD	RSG
Ref	100%	0%	0%
5RSG	95%	0%	5%
10RSG	90%	0%	10%
15RSG	85%	0%	15%
5RSCAD	95%	5%	0%
10RSCAD	90%	10%	0%
15RSCAD	85%	15%	0%
5TER	95%	2,5%	2,5%
10TER	90%	5%	5%
15TER	85%	7,5%	7,5%

Fonte: O autor (2025)

2. **Mistura dos materiais:** os resíduos e o cimento foram pesados em balança de precisão e homogeneizados a seco. Em seguida, adicionou-se a água gradualmente até obter a consistência adequada
3. **Moldagem:** corpos de prova cilíndricos (50mm x 100 mm) foram moldados em conformidade com as normas aplicáveis. (**Figura 4**)
4. **Cura:** após 24 horas de moldagem, os corpos de prova desmoldados são mantidos em câmara úmida saturada com hidróxido de cálcio até a idade de ensaio (7, 28 e 91 dias) sendo esta última adotada como referência principal para análise dos resultados.

Figura 4 - Exemplos dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: O autor (2025)

3.5. ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios realizados tiveram como objetivo avaliar o comportamento das pastas cimentícias produzidas com a substituição parcial do cimento Portland por resíduos de serragem de granito (RSG) e de calcário de alta densidade (RSCAD). As análises foram divididas em duas fases: estado fresco e estado endurecido, contemplando tanto as propriedades físicas e químicas quanto seu desempenho mecânico e microestrutural.

A avaliação do desempenho das pastas cimentícias foi realizada de forma integrada, combinando ensaios destrutivos e não destrutivos. A resistência à compressão axial foi utilizada como principal parâmetro mecânico, enquanto a absorção de água permitiu avaliar a porosidade e o potencial de durabilidade. Complementarmente, o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica foi empregado como método não destrutivo para analisar a homogeneidade interna e a compacidade da matriz cimentícia. Essa abordagem integrada possibilita uma interpretação mais completa do comportamento das pastas, relacionando propriedades físicas, mecânicas e estruturais.

3.5.1. Ensaios em estado fresco

No estado fresco, os testes buscaram compreender a trabalhabilidade e o comportamento inicial das misturas:

- **Consistência** – Aparelho de Vicat (NBR 16606:2018): determinou a quantidade de água necessária para que a pasta atingisse consistência adequada, servindo de base para os demais ensaios. (**Figura 5**).

Figura 5 - Exemplo do aparelho de Vicat



Fonte: Estagio na Obra (2013)

- **Tempo de pega** – enrijecimento (NBR 16607:2018): analisou o início e o fim do endurecimento, permitindo entender como os resíduos influenciam o tempo de cristalização da pasta.
- **Espalhamento (Mini Slump)**: avaliou a fluidez das misturas, indicando a trabalhabilidade e prevenindo problemas de segregação ou exsudação. (**Figura 6**).

Figura 6 - Exemplo de um ensaio Mini slump



Fonte: PEINADO (2015)

- **Propriedades físicas dos resíduos:** foram medidos a massa específica, massa unitária e a absorção de água (NBR 16605:2017, NBR 16972:2021 e NBR 16916:2021).
- **Atividade Pozolanica:** determinada por condutividade elétrica (método Payá modificado), verificando a reatividade dos resíduos em contato com o hidróxido de cálcio).

Foram previstos ensaios de DRX e FRX, sendo utilizados como base teórica para interpretação dos resultados experimentais. Esses ensaios foram fundamentais para compreender como os resíduos interferem nas propriedades reológicas da pasta.

3.5.2. Ensaios em estado endurecido

Após a cura das amostras, foram realizados os ensaios para avaliar a resistência, durabilidade e microestrutura:

- **Resistência a Compressão Axial (NBR 7215:2019):** principal ensaio mecânico, realizado nos corpos de prova cilíndricos, comparando as misturas com 5%, 10% e 15% de substituição em traços binários e ternários, como evidenciado na **Figura 7**.

Figura 7 - Prensa hidráulica Matest aparelho usado para medir a resistência a compressão axial



Fonte: O autor (2025)

- **Absorção de água e porosidade (NBR 9778:2009):** mediu a capacidade de absorção de água e identificou a relação entre porosidade e durabilidade.

- **Velocidade de onda ultrassônica (NBR 8802:2013):** técnica não destrutiva que verificou a homogeneidade interna e a compacidade dos corpos de prova, conforme ilustrado na **Figura 8**.

Figura 8 - Equipamento de onda ultrassônica



Fonte: Groundtest (2025)

4. RESULTADOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os resultados dos experimentos realizados com pastas cimentícias, produzidos pela substituição parcial do cimento Portland por resíduos de serragem de granito (RSG) e de calcário de alta densidade (RSCAD), organizados por misturas binárias e misturas ternárias, são apresentados e descritos neste capítulo. Os resultados foram estruturados em três tópicos: resistência a compressão axial, absorção de água e teste de velocidade ultrassônica. A análise inclui a comparação entre a pasta de referência (REF) e as misturas binárias e ternárias, com variados níveis de substituição. Os resultados apresentados referem-se à idade de 91 dias, adotada como referência para avaliação do desempenho em idades avançadas.

4.2. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de resistência a compressão, realizado aos 91 dias de cura úmida, apresentou variações significativas conforme o tipo e o teor de resíduo adicionado. As misturas contendo RSCAD mostraram melhora considerável na resistência mecânica, principalmente na substituição de 5%, que superou a mistura de referência.

Por outro lado, as misturas contendo RSG apresentaram redução na resistência, atribuída a maior porosidade e a menor densificação da matriz. As misturas ternárias, contendo ambos os resíduos, apresentaram desempenho intermediário, equilibrando a compactação proporcionada pelo calcário com a estrutura granular do granito, resultando em uma boa estabilidade mecânica, apresentado na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Resistência à compressão axial

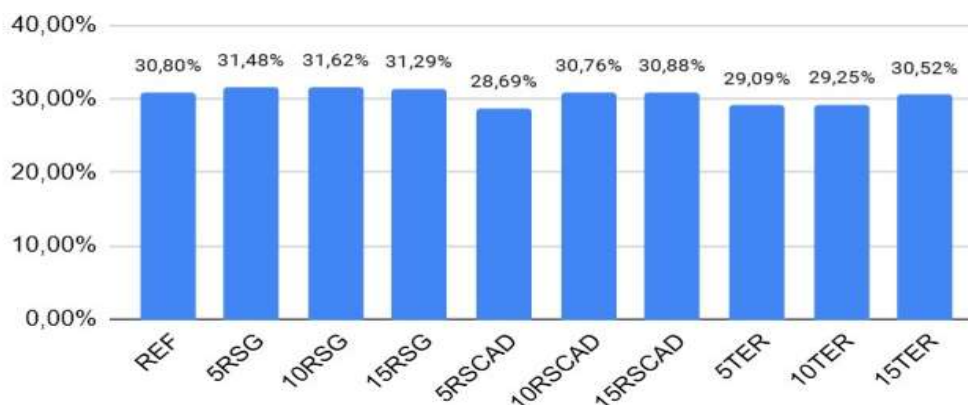
Mistura	Tipo de mistura	Teor de substituição (%)	Resistência à compressão (MPa)
REF	Referência	0	33,71
5RSG	Binária	5	32,69
10RSG	Binária	10	31,69
15RSG	Binária	15	33,03
5RSCAD	Binária	5	46,18
10RSCAD	Binária	10	36,41
15RSCAD	Binária	15	35,73
5TER	Ternária (RSG + RSCAD)	5	44,16
10TER	Ternária (RSG + RSCAD)	10	42,14
15TER	Ternária (RSG + RSCAD)	15	38,77

Fonte: O autor (2025)

Foi avaliado que o uso do granito como material cimentício suplementar acarreta na redução da Resistência a compressão em idades avançadas. De modo diferente, o calcário de alta densidade ao ser utilizado com esta finalidade implica no aumento da resistência a compressão da Mistura. Esse comportamento é consistente com as tendências apresentadas por CHAJEC, Adrian (2020), que destaca a queda do desempenho do granito em teores elevados devido a maior porosidade do sistema. Resultados semelhantes foram observados por GARCIA, Pedro (2019) e BOTELHO, Sasha et al., (2019), que identificaram melhora mecânica associada ao emprego do filler calcário, especialmente em proporções reduzidas.

4.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA

Foram ensaiados três corpos de prova de cada tipo de mistura de argamassa e analisada a absorção de água em cada um deles conforme a **Figura 9**.

Figura 9 - Absorção de água

Fonte: o autor (2025)

O ensaio de absorção, realizado conforme a **NBR 9778:2009**, indicou que o RSCAD contribuiu para a redução da absorção de água, devido a maior densificação e menor índice de vazios. Em contrapartida, o RSG em seu estado natural aumentou a absorção, comportamento explicado pela sua textura superficial mais rugosa e granulometria mais heterogênea. Essa diferença na densificação leva a distintas estruturas macroscópicas e variações da resistência mecânica, sendo o granito menos resistente que o calcário de alta densidade. Esse resultado converge com os achados de GARCIA, Pedro (2019), que atribui ao calcário a capacidade de reduzir vazios devido a sua morfologia fina. Estudos mais recentes, como os de JAGADESH P et al., (2024) e LI, Zhi et al., (2024), também apontam que partículas minerais finas favorecem a redução da absorção ao promoverem estruturas internas mais densas. Ademais, reforça-se que resíduos carbonáticos apresentam eficiência superior no controle de porosidade quando comparados a materiais predominantemente silicosos.

As misturas ternárias apresentaram absorção moderada, reforçando a ideia de que a combinação dos dois resíduos equilibra a estrutura do material e reduz o efeito negativo do RSG isolado.

4.4. ENSAIO DE VELOCIDADE ULTRASSONICA

Foram executadas três leituras por corpo de prova, avaliando o tempo que a onda ultrassônica era conduzida pelo corpo de prova, esta forma, é possível avaliar a velocidade de propagação conforme a **Tabela 7**.

Tabela 7 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica

Traço	Distância percorrida (cm)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
Ref	9,995	0,0286	3,49
5RSG	9,996	0,0306	3,27
10RSG	9,998	0,0307	3,26
15RSG	9,993	0,0297	3,36
5RSCAD	9,992	0,0262	3,81
10RSCAD	10	0,02714	3,68
15RSCAD	9,994	0,02823	3,54
5TER	10,002	0,02648	3,78
10TER	9,997	0,0265	3,77
15TER	10,001	0,02657	3,76

Fonte: O autor (2025)

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas apresentou forte correlação com os resultados da resistência a compressão. Misturas mais densas e homogêneas como as de 5% de RSCAD e as misturas ternárias exibiram velocidades superiores a 3,75 m/s, indicando alta qualidade interna. Já os traços com teor de RSG apresentaram velocidades mais baixas, entre 3,26 e 3,36 m/s, revelando a presença de vazios e menor compacidade da matriz. A correlação entre maior velocidade de propagação e melhor compactação da matriz já havia sido observada por ABAZARSA, Maryam; RAISI, Koosha; YU, Tzuyang (2024), que destacam a sensibilidade do método ultrassônico as variações internas do material. Estudos nacionais, como o de ALMEIDA Thalles et al., (2024), confirmam essa tendência e demonstram que a técnica é eficiente na estimativa indireta da resistência à compressão que a técnica é eficiente na estimativa indireta da resistência a compressão, especialmente em sistemas com baixos teores de substituição.

4.5. COMPARAÇÃO GERAL DOS RESULTADOS

De forma geral, observou-se que o comportamento das pastas cimentícias está diretamente relacionado ao tipo de resíduo empregado. O RSCAD atua como filler ativo,

promovendo preenchimento de poros e ligeira reação de carbonatação secundária, o que melhora a coesão da matriz e aumenta a resistência, já o RSG apesar de contribuir com sílica (SiO_2), apresentou comportamento inerte, atuando mais como enchimento físico do que como material reativo, o que limita o ganho de resistência em maiores teores. As misturas ternárias mostraram-se as mais equilibradas, apresentando resultados satisfatórios tanto na resistência a compressão quanto na durabilidade e homogeneidade estrutural. Essa tendência reforça que a substituição ideal se encontra em teores baixos (até 5%), especialmente quando o RSCAD é empregado isoladamente ou em conjunto com o RSG.

4.6. AVALIAÇÃO INTEGRADA DO DESEMPENHO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

A análise conjunta dos resultados de resistência à compressão, absorção de água e velocidade de propagação ultrassônica evidenciou uma forte correlação entre os parâmetros avaliados. Misturas que apresentaram maiores resistências mecânicas também exibiram menores valores de absorção de água e maiores velocidades ultrassônicas, indicando matrizes mais densas e homogêneas.

As pastas contendo RSCAD, especialmente no teor de 5%, destacaram-se por apresentar desempenho superior nos três ensaios, refletindo o efeito positivo do filler calcário. O RSCAD, por ser predominantemente carbonático e apresentar elevada finura, atua principalmente como material filler ativo, promovendo o preenchimento dos vazios capilares e aumentando a densificação da matriz cimentícia. Além disso, a presença do carbonato de cálcio favorece a formação de fases carboaluminato, resultantes da reação entre o CaCO_3 e os aluminatos do cimento, o que contribui para a estabilidade microestrutural e para o refinamento da porosidade. Esse efeito é amplamente reportado na literatura como responsável pelo ganho de resistência em baixos e médios teores de substituição por filler calcário (DILNESA Belay; LOTHENBACH Barbara; GAOUT Gwenn; RENAUDIN Guillaume; MESBAH Adel; FILINCHUK Y.; WICHSER Arian; WIELAND Erich, 2011 e GARCIA, Pedro (2019).

Em contrapartida, as misturas com RSG isolado apresentaram maior absorção de água, menores velocidades ultrassônicas e redução da resistência, indicando maior porosidade interna. Esse comportamento está associado à natureza predominantemente silicosa do RSG, que atua majoritariamente por efeito filler físico, contribuindo para o melhor empacotamento das partículas sólidas.

As misturas ternárias apresentaram comportamento equilibrado, demonstrando que a combinação dos resíduos contribui para mitigar os efeitos negativos do RSG e potencializar os

benefícios do RSCAD. O desempenho satisfatório observado para o traço 10% TER, composto pela substituição parcial do cimento por resíduos de serragem de granito (RSG) e de calcário de alta densidade (RSCAD). Estudos como os de MATOS, Ana; RAMOS Telma; SOUSA-COUTINHO J (2014) e JAGADESH P.; OYEBISI S.; HAREESH A.; SARULATHA A.; SUPIKSHAA K.; VHISHVA V. (2024) destacam que sistemas ternários, quando corretamente dosados, tendem a apresentar comportamento superior aos sistemas binários, justamente pela combinação de partículas com diferentes morfologias e composições químicas, o que favorece o empacotamento e a estabilidade da matriz cimentícia. Assim, os resultados obtidos neste estudo confirmam que o teor de 10% de substituição em misturas ternárias representa um limite tecnicamente viável, no qual ainda se observam ganhos estruturais e manutenção do desempenho mecânico.

4.7. DISCUSSÃO COM A LITERATURA

Os resultados encontrados estão de acordo com diversos estudos recentes que tratam do aproveitamento de resíduos minerais na construção civil. CHAJEC, Adrian (2020) aponta que o uso de resíduos de granito pode reduzir a resistência quanto empregados em teores elevados, devido a menor reatividade e maior absorção de água. Esses efeitos foram igualmente observados nas misturas RSG10 e RSG15 como visto anteriormente.

Por outro lado, GARCIA, Pedro (2019) e BOTELHO, Sasha et al., (2019) destacam que o uso de filler calcário melhora a compacidade das pastas, reduz a porosidade e pode até aumentar a resistência a compressão, como visto nos resultados confirmados do RSCAD neste estudo. JAGADESH P et al., (2024) e LI, Zhi et al., (2024) reforçam que a combinação de partículas finas e heterogêneas pode aprimorar a microestrutura quando equilibradas corretamente, validando o bom desempenho das misturas ternárias. Além disso, ABAZARSA, Maryam; RAISI, Koosha; YU, Tzuyang (2024) e ALMEIDA Thalles et al., (2024) demonstram que a correlação entre a velocidade de propagação ultrassônica e a resistência a compressão é direta, o que foi experimentalmente comprovado neste trabalho, reforçando a confiabilidade do método não destrutivo para avaliação da integridade das pastas.

Dessa forma os resultados obtidos alinham-se as tendências observadas na literatura nacional e internacional, confirmando que os resíduos analisados apresentam potencial técnico para o uso como materiais cimentícios suplementares.

5. CONCLUSÃO

Com base nos ensaios realizados e nas análises comparativas, conclui-se que a substituição parcial do cimento por resíduos de serragem de granito e calcário de alta densidade em pastas cimentícias apresenta viabilidade técnica e ambiental, desde que realizada em teores adequados e com controle granulométrico dos resíduos. Entre os traços analisados, o traço com 5% de substituição por RSCAD destacou-se como o melhor desempenho mecânico e físico, apresentando aumento significativo da resistência à compressão, redução da absorção de água e maiores velocidades de propagação de onda ultrassônica quando comparado à pasta de referência. Esse comportamento evidencia o efeito positivo do resíduo carbonático como filler ativo, promovendo maior densificação da matriz cimentícia, refinamento da porosidade e melhoria da homogeneidade estrutural. Dessa forma, o traço 5RSCAD pode ser considerado o teor ótimo de substituição, conciliando desempenho mecânico, durabilidade e sustentabilidade.

As misturas ternárias, em especial o traço 10% TER (RSG + RSCAD), também apresentaram desempenho satisfatório, mantendo níveis elevados de resistência mecânica e boa compacidade, conforme indicado pelos ensaios ultrassônicos e de absorção de água. Esses resultados confirmam que a combinação equilibrada de resíduos com naturezas mineralógicas distintas possibilita a atuação sinérgica dos mecanismos de empacotamento físico, nucleação e formação de fases hidratadas estáveis, configurando uma alternativa tecnicamente viável para substituições moderadas de cimento. Por outro lado, os traços contendo RSG isoladamente, especialmente em teores elevados, apresentaram redução da resistência à compressão e aumento da absorção de água, indicando que esse resíduo, quando empregado sem associação a materiais carbonáticos ou pozolânicos mais reativos, atua predominantemente como material inerte, limitando o desempenho mecânico da matriz cimentícia.

Apesar dos resultados positivos, o presente estudo apresenta limitações que devem ser consideradas. A pesquisa foi restrita à análise de pastas cimentícias, não contemplando a influência dos resíduos em sistemas mais complexos, como argamassas e concretos, nos quais a presença de agregados pode modificar o comportamento reológico, mecânico e de durabilidade.

Dessa forma, recomenda-se como continuidade deste estudo a aplicação dos resíduos de serragem de granito e de calcário de alta densidade em argamassas e concretos, avaliando parâmetros adicionais como trabalhabilidade, resistência à tração, módulo de elasticidade e durabilidade frente a agentes agressivos. Sugere-se, ainda, a realização de análises microestruturais por MEV, visando a observação da morfologia dos poros e da interface pasta-

resíduo, bem como ensaios de DRX e FRX, para identificação das fases cristalinas formadas e confirmação da participação do calcário na formação de carboaluminatos. A ampliação do escopo experimental permitirá consolidar os resultados obtidos e fortalecer a aplicabilidade prática dos resíduos estudados na construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAZARSA, Maryam; RAISI, Koosha; YU, Tzuyang. **Estimation of Compressive Strength of Portland Cement Concrete using Synthetic Aperture Radar, Ultrasonic Testing, and Rebound Hammer**. Proc. SPIE 12950, Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation XVIII, 1295006, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.3010516>>. Acesso em: 31 Outubro 2025.

ALMEIDA Thalles; JESUS Wanderson; SOUZA Ramon; SILVA Suânia; DOMINGUEZ Dany; PESSÔA José. **Influência da frequência do transdutor de onda ultrassônica na estimativa da resistência à compressão em concretos, utilizando modelo de regressão linear simples**. Anais do 65º Congresso Brasileiro de Concreto. CBC. Maceió, 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/385687231_Influencia_da_frequencia_do_transdutor_de_onda_ultrassonica_na_estimativa_da_resistencia_a_compressao_em_concretos_utilizando_modelo_de_regressao_linear_simples_Influence_of_ultrasonic_wave_transducer>. Acesso em: 31 Outubro 2025.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 10004 Resíduos sólidos – Classificação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2004. Disponível em: <<https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>>. Acesso em: 17 junho 2025.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 13281 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2009. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/36303/nbr13281-argamassa-para-assentamento-e-revestimento-de-paredes-e-tetos-requisitos>>. Acesso em: 12 Janeiro 2026.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 15900 Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2009. Disponível em: <https://freitag.com.br/storage/legislation/4/portaria_norma_473.pdf>. Acesso em: 17 Junho 2025.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 16605 Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2017. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/723746730/NBR-16605-Cimento-Portland-e-outros-materiais-em-po-Determinacao-da-massa-especifica>>. Acesso em: 16 Outubro 2025.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 16606 Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2018. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/723746723/NBR-16606-Cimento-Portland-Determinacao-da-pasta-de-consistencia-normal>>. Acesso em: 17 Junho 2025.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 16607 Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2018. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/44316/nbr16607-cimento-portland-determinacao-dos-tempos-de-pega>>. Acesso em: 19 Junho 2025.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 16697 Cimento Portland - Requisitos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2018. Disponível em: <<https://www.studocu.com/pt-br/document/centro-federal-de-educacao-tecnologica-celso-suckow-da-fonseca/mecanica-dos-materiais/nbr-16697-2018-pdf-norma/60942115>>. Acesso em: 05 Agosto 2025.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 16916 Agregado miúdo - Determinação de densidade e da absorção de água. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2021. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/45608/nbr16916-agregado-miudo-determinacao-da-densidade-e-da-absorcao-de-agua>>. Acesso em: 12 Janeiro 2026.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 16972 Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2021. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/45663/nbr16972-agregados-determinacao-da-massa-unitaria-e-do-indice-de-vazios>>. Acesso em: 28 Novembro 2025.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 7215 Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2019. Disponível em: <<https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-do-rio-de-janeiro/resistencia-dos-materiais/nbr-7215-2019-cimento-portland-determinacao-da>>.

resistencia-a-compressao-de-corpos-de-prova-cilindricos/55418371>. Acesso em: 16 Junho 2025.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 8802 Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2013. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/439846481/ABNT-NBR-8802>>. Acesso em: 02 Janeiro 2026.

ASSOCIAÇÃO B. D. N. T. ABNT NBR 9778 Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2009. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/670998794/NBR-9778-2009>>. Acesso em: 27 Junho 2025.

BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M. **Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking**. Cement and Concrete Composites, v. 26, p. 677–685, 2004. Disponível em: <https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=101098>. Acesso em: 10 Dezembro 2025.

BOTELHO, Sasha; LEITE, Mônica; FARIAS, Uiliana; NEGAHAMA, Koji. **Estudo da compacidade de misturas com resíduo de pedra Cariri**. Anais dos Seminários de Iniciação Científica. Feira de Santana: Periódicos UEFS, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.uefs.br/index.php/semic/article/view/6598>>. Acesso em: 17 Junho 2025.

CHAJEC, Adrian. **Towards the sustainable use of granite powder waste for manufacturing of cementitious composites**. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2020. p. 01005. Disponível em: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2020/18/mateconf_matbud2020_01005/mateconf_matbud2020_01005.html>. Acesso em: 14 Junho 2025.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. CONAMA, 2002. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305>. Acesso em: 05 Novembro 2025.

COSTA Josiane. **Análise da influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares em concreto**. 2021. Disponível em:

<<https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/ab4de6fa-f56a-4f86-9e5c-172b2495ba27/content>>. Acesso em: 06 Novembro 2025.

DILNESA Belay; LOTHENBACH Barbara; GAOUT Gwenn; RENAUDIN Guillaume; MESBAH Adel; FILINCHUK Y.; WICHSER Arian; WIELAND Erich. **Iron in carbonate containing AFm phases**. Vol. 41, Issue 3. Pag. 311-323. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884610002607>>. Acesso em: 05 Janeiro 2026.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rondagem. DNER-EM 036/95: **Cimento Portland - recebimento e aceitação**. 1995. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dner_em_036_95.pdf>. Acesso em: 05 Novembro 2025.

GARCIA, Pedro. **Análise da adição de resíduo de serragem da pedra Cariri como filler na produção de argamassa**. 2019. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/50371>>. Acesso em: 17 Junho 2025.

HOU Wei; ZHANG Qiao; ZHUANG Zhibin; ZHANG Yixin. (2024). **Sustainable reusing marble powder and granite powder in cement-based materials: A review**. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 12(7), 2484–2510. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c06670>>. Acesso em: 16 Agosto 2025.

JAGADESH, P.; HAREESH M.; SARULATHA A.; SUPIKSHAA K.; VHISHVA L. **Microscopic analyses and performance characteristics of granite powder blended cement**. Construction and Building Materials. v. 426, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061824011474>>. Acesso em: 26 Setembro 2025.

LI, Zhi; ZHAO Zhenhua; MA Fushan; DI Wenjin; CAO Xuanhao; HE Zhenqing; GUAN Bowen. **Feasibility study of replacing part of cement by igneous rock powder as cementitious material: based on mortar macroscopic properties and microstructure.** Front. Mater., v. 11, 2024. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2024.1413907/full>>. Acesso em 02 Agosto 2025.

MATOS, Ana; RAMOS Telma; SOUSA-COUTINHO J. **Resistência e durabilidade de argamassas incorporando pó de granito.** Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Ana-Matos-25/publication/264038645_Resistencia_e_durabilidade_de_argamassas_incorporando_po_de_granito/links/5644bfa508aef646e6cbd34b/Resistencia-e-durabilidade-de-argamassas-incorporando-po-de-granito.pdf>. Acesso em: 01 Julho 2025.

MEHTA, P.; MONTEIRO Paulo. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/674490340/Mehta-e-Monteiro-Concreto-Portugues-Completo>>. Acesso em: 17 Junho 2025.

SADEK Dima. M; EL-ATTAR Mohamed. M; ALI, Haitham. A. (2016). **Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development.** Journal of Cleaner Production, 121, 19–32. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>>. Acesso em: 16 agosto 2025.

SCRIVENER, Karen; JOHN, Vanderley; GARTNER, Ellis. **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. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884618301480>>. Acesso em: 12 Agosto 2025.

SILVA Achilles Dias Alves; FILHO, Jose Lins Rolim; SOUZA Julio Cesar; BARROS Marcio Luiz Siqueira Campos; LIRA Belarmino Barbosa. (2008). **Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri cearense na formulação de argamassa.** Estudos Geológicos, 18(1).

Disponível em:
<<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/estudosgeologicos/article/view/259755>>.
Acesso em: 17 agosto 2025.

TAYLOR, H. **Cement Chemistry**. 2nd Edition, Thomas Telford Publishing, London, 361.
1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1680/cc.25929>>. Acesso em: 05 Julho 2025.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Campina Grande - Código INEP: 25137409
	R. Tranquílino Coelho Lemos, 671, Dinamérica, CEP 58432-300, Campina Grande (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0003-37 - Telefone: (83) 2102.6200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC

Assunto:	TCC
Assinado por:	Klederman Nascimento
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Klederman do Nascimento Camilo, ALUNO (202021220028) DE TECNOLOGIA EM CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS - CAMPINA GRANDE**, em 25/02/2026 20:51:12.

Este documento foi armazenado no SUAP em 25/02/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1779584
Código de Autenticação: 0073c9e042

