



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

THIAGO LUCAS DE LIMA LINO

**POTENCIAL DAS CINZAS DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE COMO
SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NO CONCRETO**

FORTALEZA
2025

THIAGO LUCAS DE LIMA LINO

POTENCIAL DAS CINZAS DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE COMO
SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NO CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Instituto Federal do Ceará - IFCE

Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L735p Lino, Thiago Lucas de Lima.
POTENCIAL DAS CINZAS DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE COMO
SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NO CONCRETO / Thiago Lucas de
Lima Lino. - 2026.
108 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão
Ambiental, Campus Fortaleza, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos.

1. Cinzas de Resíduos de Serviços de Saúde. 2. Concreto de Cimento Portland. I. Título.

CDD 628

THIAGO LUCAS DE LIMA LINO

POTENCIAL DAS CINZAS DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE COMO
SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NO CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovado (a) em: 10/12/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos. (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Geraldo Fernando Gonçalves de Freitas (Membro Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Membro Externo)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Processo: 23256.016557/2025-22

Interessado: Gemmelle Oliveira Santos

THIAGO LUCAS DE LIMA LINO

POTENCIAL DAS CINZAS DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NO CONCRETO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* de Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovada em: **10/12/2025**.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos (orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Geraldo Fernando Gonçalves de Freitas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

Universidade Federal do Ceará (UFC)



Documento assinado eletronicamente por **Gemmelle Oliveira Santos, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 10/12/2025, às 16:25, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Anderson Borghetti Soares, Usuário Externo**, em 11/12/2025, às 10:00, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Fernando Gonçalves de Freitas, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 11/12/2025, às 13:40, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **8232096** e o código CRC **9E88F5D2**.

A Deus, que me fala nas dobras do
silêncio, onde o existir ganha sentido.

À minha família, minhas raízes profundas
e asas largas, que me sustentam na terra
e me libertam para o céu.

AGRADECIMENTOS

A Deus e à Santa Teresinha do Menino Jesus, por serem presenças generosas e constantes, fonte de alento nas horas difíceis e de serenidade nas incertezas do caminho.

Aos meus pais, pilares de amor incondicional e dedicação incansável, que me ensinaram, pelo exemplo, que o caráter se constrói no esforço diário e na dignidade das pequenas escolhas. Com eles, aprendi que o verdadeiro amor é um refúgio seguro.

Aos meus irmãos, companheiros de todas as jornadas, que sempre estiveram presentes com gestos de apoio e partilha. Na cumplicidade que nos une, encontro um dos maiores presentes que a vida me deu.

À minha tia e madrinha, cuja fé no meu potencial sempre foi alicerce firme nos momentos de dúvida. Sua presença constante me sustentou em muitos dos passos dados até aqui.

À minha prima-irmã, Nayara Sávia, por esse laço profundo que nos liga, feito de afeto, compreensão e acolhimento; mesmo quando os quilômetros nos separam.

Às minhas cunhadas, Aliny Hellen e Brunna Jéssyca, por somarem com carinho e afeto aos vínculos familiares, fortalecendo os laços que hoje se mostram ainda mais preciosos.

Aos meus avós, Seu Antônio (*in memoriam*), Maria Concebida e Erineuda Castro, por serem testemunhos vivos; ou eternizados na memória, de fé, coragem e amor. Sobre os alicerces que construíram, levantei minha própria história.

Ao meu orientador, Professor Dr. Gemmelle Oliveira, pela parceria constante e pelo acolhimento ao longo de tantos anos, cuja escuta generosa, orientação cuidadosa e olhar atento iluminaram meu percurso acadêmico com sabedoria e humanidade.

Ao Professor Dr. Roberto Antônio Cordeiro e à equipe do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, ao Professor Dr. Perboyre Barbosa Alcântara e à equipe do Laboratório de Materiais de Construção Civil, em especial aos colegas Leandro Willian e Saboia, ao Professor Dr. Antônio Acácio de Melo Neto, por meio do Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes, ao colega Igor Fernandes e à Professora Dra. Cellia Rodrigues Muniz, Laboratório de Biomagem, registro meus

sinceros agradecimentos pelo suporte técnico, científico, orientação e colaboração essenciais para a realização e aprimoramento desta pesquisa.

Às professoras Dra. Glória Maria Marinho, Dra. Bleine Queiroz Caúla, Ma. Geovânia Sabino Machado e Dra. Cláudia Ribeiro Pereira Nunes, por transformarem o caminho com palavras de apoio e amizade sincera nos momentos mais decisivos.

Ao amigo-chefe, Leandro Alves, por uma liderança humanizada que fez do trabalho um espaço de crescimento e afeto, deixando uma marca positiva nesta trajetória.

Às amigas Teresa Tainá, Beatriz Machado, Lara Cavalcante, Gemimah Maria, Mariana Sampaio, Tainá Waterloo, Letícia Cavalcanti, Letícia Baltar, Dominik Queiroz, Monaliza Nobre, Fernanda Frotta, Danielle Queiroz, Pedro Vitor e Matheus Cruz; obrigado por cada palavra de incentivo, por cada gesto de carinho. Carrego vocês comigo como parte essencial desta história.

Aos colegas do Programa, em especial Kilvia Sara, Joana Gabriela e Senira Marcos, que estiveram presentes nas horas mais exigentes, somando forças, afetos e aprendizados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio que tornou possível a continuidade e a concretização desta pesquisa.

Ao Grupo Marquise Ambiental, especialmente ao CTRP, pela parceria sólida e pelas contribuições decisivas para a realização deste trabalho.

E a todos os que, de alguma forma, deixaram sua marca nesta caminhada, registro minha mais sincera e profunda gratidão. Cada gesto, ainda que sutil, teve um papel fundamental na construção deste sonho.

“Contudo, o que em vós escapa ao tempo sabe que a vida escapa ao tempo. E sabe que o ontem é mera lembrança do hoje, e o amanhã, o sonho do hoje” (Khalil Gibran).

RESUMO

Este estudo investigou a influência da substituição parcial do cimento Portland por Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (CIRSS) nas propriedades físicas, químicas, morfológicas e mecânicas do concreto. As CIRSS apresentaram composição predominantemente rica em óxido de cálcio (45,56%) e baixos teores de sílica, alumina e óxido férrico, conferindo comportamento mais próximo ao de um aglomerante cimentício. Foram identificadas seis fases mineralógicas: etringita, calcita, anidrita, hidroxiapatita, perovskita e quartzo. A análise morfológica revelou partículas irregulares, angulosas, porosas e distribuídas de maneira heterogênea. Os melhores resultados de abatimento ocorreram com até 8,48% de substituição. Verificou-se redução progressiva da resistência à compressão com o aumento do teor de CIRSS. A análise dos modos de ruptura e da microestrutura indicaram fragilização crescente da matriz, especialmente para teores superiores a 10%. A cinza apresentou grande potencial para o desenvolvimento de concretos não estruturais. Ela também foi classificada como um material não pozolânico, concordando com a literatura. A pesquisa se soma aos trabalhos anteriores já desenvolvidos e abre novas possibilidades de reaproveitamento desse material..

Palavras-chave: Cinzas de Resíduos de Serviços de Saúde. Concreto de Cimento Portland.

ABSTRACT

This study investigated the influence of the partial replacement of Portland cement with Healthcare Waste Incineration Ash (HWIA) on the physical, chemical, morphological, and mechanical properties of concrete. The HWIA exhibited a composition predominantly rich in calcium oxide (45.56%) and low contents of silica, alumina, and iron oxide, resulting in behavior closer to that of a cementitious binder. Six mineralogical phases were identified: ettringite, calcite, anhydrite, hydroxyapatite, perovskite, and quartz. Morphological analysis revealed irregular, angular, porous particles with heterogeneous distribution. The best slump results were obtained with replacement levels of up to 8.48%. A progressive reduction in compressive strength was observed with increasing HWIA content. Analysis of failure modes and microstructural features indicated increasing matrix brittleness, especially at contents above 10%. The ash showed great potential for the development of non-structural concretes and was also classified as a non-pozzolanic material, in agreement with the literature. This research builds upon previously developed studies and opens new possibilities for the reuse of this material.

Keywords: Ashes from Healthcare Waste Incineration. Portland Cement Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	—	Determinação da consistência (<i>slump test</i>).....	39
Figura 2	—	Classificação dos Tipos de Ruptura em CPP.....	45
Figura 3	—	Vista geral das cinzas estudadas, incinerador de Fortaleza - CE.....	49
Figura 4	—	Etapas do tratamento inicial das amostras de CIRSS no laboratório.....	50
Figura 5	—	Curva granulométrica das CIRSS.....	52
Figura 6	—	Difratograma das CIRSS obtido por DRX.....	54
Figura 7	—	Aspecto morfológico das partículas de CIRSS.....	57
Figura 8	—	Curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo.....	59
Figura 9	—	Corpos de prova de referência (CP REF).....	60
Figura 10	—	CPs com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição.....	61
Figura 11	—	Valores do <i>slump test</i> no concreto com e sem CIRSS.....	66
Figura 12	—	Regressão polinomial para análise estatística do <i>slump test</i>	68
Figura 13	—	CP em Rompimento - Resistência à Compressão.....	70
Figura 14	—	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	71
Figura 15	—	Correlação entre a substituição e a resistência dos CP.....	72
Figura 16	—	CP 5 do traço REF (0% de CIRSS x NBR).....	74
Figura 17	—	CP 3 e CP4, T5 e T10 (x NBR), respectivamente.....	75
Figura 18	—	CP 1 do T15 (15% de CIRSS x NBR).....	76
Figura 19	—	CP 4 do T20 (20% de CIRSS x NBR).....	77
Figura 20	—	Aspecto morfológico das partículas do CP REF e com 5%.....	78
Figura 21	—	Aspecto morfológico das partículas do CP 10, 15 e 20%.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Teores de umidade na CIRSS estudada.....	51
Tabela 2	— Granulometria das CIRSS estudada e na literatura local.....	52
Tabela 3	— Composição química elementar das CIRSS estudada x literatura local.	53
Tabela 4	— Lista de análises, parâmetros e ensaios realizados.....	58
Tabela 5	— Propriedades físicas dos agregados.....	59
Tabela 6	— Descrição das preparações do concreto com e sem CIRSS.....	62
Tabela 7	— Quantitativo de materiais utilizados (kg) por traço de concreto formulado.....	62
Tabela 8	— Dosagem em massa para moldagem CP cilíndricos.....	64
Tabela 9	— Resultados dos ensaios de resistência à compressão (MPa) dos concretos.....	69
Tabela 10	— Resistências das argamassas A e B (em MPa).....	80

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Instituto Americano de Concreto
ACV	Análise de Ciclo de Vida
AF	Areia Fina
AG	Areia Grossa
AG	Água
AGG	Agregado Graúdo
AGM	Agregado Miúdo
AM	Areia Média
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ARs	Agregados Reciclados
ASM	Aterro Sanitário Metropolitano
CCP	Concreto de Cimento Portland
CIRSP	Cinzas da Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos
CIRSS	Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
CTRP	Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos
DEHA	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DRX	Difração de Raios X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

FRX	Fluorescência de Raios X
ICDD	Internacional Centre of Diffraction Data
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
LABTAG	Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes
LACAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
LD	<i>Linz-Donawitz</i>
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
NS	Nano Sílica
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PET	Politereftalato de etileno
PG	Pedregulho
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
RSP	Resíduos Sólidos Perigosos
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFCA	Universidade Federal do Cariri
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
2θ	Intervalo de Varredura
cm/s	Centímetros por segundo
g/cm ³	Grama por Centímetro Cúbico
kg	Quilograma
kgf/cm ²	Quilograma-força por Centímetro Quadrado
kV	Quilovolt
mA	Miliampere
mg/L	Miligramas por Litro
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
°/min	Grau por Minuto
rpm	Rotações por Minuto
θ	Ângulo de Incidência e Difração
λ	Comprimento de Onda.
μm	Micrómetro
p	p-valor
Psi	Libras-força por polegada quadrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Considerações Iniciais	18
1.2	Justificativa	20
2	OBJETIVOS	22
2.1	Geral	22
2.2	Específicos	22
3	REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1	As Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (CIRSS)	23
3.1.1	<i>Caracterização Geral</i>	23
3.1.2	<i>Alternativas de Aproveitamento</i>	30
3.2	O Concreto de Cimento Portland (CCP)	32
3.2.1	<i>Agregados Convencionais</i>	32
3.2.2	<i>Agregados Não Convencionais</i>	34
3.2.3	<i>Aglomerantes Não Convecionais</i>	36
3.2.4	<i>Concreto no Estado Fresco</i>	38
3.2.5	<i>Concreto Endurecido</i>	40
3.2.6	<i>Preparo e ensaios de ruptura dos corpos de prova</i>	43
3.3	Materiais Pozolânicos	47
3.3.1	<i>Determinação da Pozolanicidade</i>	48
4	MATERIAL E MÉTODOS	49
4.1	As Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (CIRSS)	49
4.2	Agregados no Concreto Estudado	58
4.3	Produção dos Concretos	60
4.3.1	<i>Concreto de referência</i>	60

4.3.2	<i>Concreto modificado</i>	61
4.3.3	<i>Trabalhabilidade do Concreto</i>	63
4.3.4	<i>Resistência à Compressão</i>	63
4.3.5	<i>Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland aos 28 Dias</i>	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
5.1	Trabalhabilidade do Concreto	66
5.2	Resistência à Compressão	69
5.3	Atividade Pozolânica	80
6	CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS	86
	APÊNDICE A — METODOLOGIA PARA DOSAGEM RACIONAL DO CONCRETO CONVENCIONAL DE REFERÊNCIA	101
	ANEXO A — RESULTADOS DO FRX - LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS -UFCA	106
	ANEXO B — LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DOS AGLOMERANTES – UFPE	107
	ANEXO C — BOLETIM COMERCIAL: CERTIFICADO DE QUALIDADE DO CIMENTO PORTLAND COMPOSTO - COMPANHIA INDUSTRIAL DE CIMENTO APODI	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos são áreas de estudo em constante evolução, configurando-se como um desafio interdisciplinar, diante do processo de urbanização, industrialização (Manjunath *et al.*, 2023), crescimento populacional e intensificação dos padrões de consumo.

Entre as tecnologias empregadas no tratamento dos resíduos sólidos, a incineração, apesar dos seus elevados custos, ganha notoriedade porque reduz significativamente o peso (até 70%) e o volume (até 90%) dos resíduos (Pinto, 2018), gerando cinzas que precisam ser melhor estudadas e reaproveitadas para evitar sua destinação aos aterros sanitários (Liu *et al.*, 2018) ou disposição irregular em outros locais.

Paralelamente, a construção civil é reconhecida como uma das indústrias mais impactantes em termos ambientais, devido ao elevado consumo de recursos naturais como água, solos, pedras e madeiras. Nos últimos anos, esse setor vem investindo em estratégias de mitigação, como o uso racional da água e da energia, bem como o reaproveitamento de resíduos em diferentes processos, especialmente na produção de concretos.

A produção de concreto¹ requer volumes expressivos de água, areia natural, brita e cimento, insumos de elevado valor ambiental, legalmente protegidos e, em grande parte, obtidos por meio de processos extrativos distantes dos centros urbanos. Tal dinâmica, além de intensificar a pressão sobre recursos naturais limitados, resulta em impactos ambientais significativos, destacando-se as emissões de dióxido de carbono (CO₂), reconhecido como um dos principais gases de efeito estufa.

Nesse contexto, a redução do consumo de, ao menos, um dos constituintes do concreto, sem prejuízo de suas propriedades técnico-estruturais, apresenta-se como desafio científico e tecnológico de grande relevância. Trata-se ainda de uma estratégia fundamental para o avanço em direção à sustentabilidade no setor, com potencial de

¹ Estima-se que até o ano de 2050, a produção global de concreto alcance 16 bilhões de toneladas por ano (Mehta; Monteiro, 2014).

gerar benefícios de ordem ambiental, econômica e social ao longo de toda a cadeia produtiva da construção civil.

Entre os constituintes do concreto, destaca-se o cimento Portland como o insumo mais impactante. Sua fabricação envolve a calcinação e fusão de uma mistura de calcário, argilas e óxidos de ferro e alumínio (Rocha; Lins; Santos, 2011), processo que consome grandes quantidades de energia (Silva *et al.*, 2018) e libera, em média, 900 kg de CO₂ para cada tonelada de cimento produzida (Hasanbeigi; Menke; Price, 2010).

Diante dessas considerações, torna-se cada vez mais relevante estudar formulações de concretos com menos cimento e mais insumos ou agregados não convencionais, a exemplo dos resíduos. Há pesquisas que substituíram alguns teores de cimento por cinzas volantes de biomassa (Teixeira; Camões; Branco, 2021), por resíduos de vidro moído (Pontes, 2023), por resíduo do bioetanol celulósico (Calado *et al.*, 2018) e por resíduos cerâmicos moídos (Pacheco-Torgal; Jalali, 2011). Há também testes com cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos (RSU), cinzas de pellets (Da Cunha, 2013) e cinzas de resíduos de serviços de saúde (Manjunath *et al.*, 2023; Memon; Sheikh; Paracha, 2013).

Em Fortaleza, no estado do Ceará, as cinzas resultantes da incineração de RSS são atualmente destinadas ao Aterro Sanitário Metropolitano (ASM)². Nesse contexto, torna-se fundamental ampliar as pesquisas acerca desse material, como já abordado em diferentes estudos que trataram da caracterização das Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde - CIRSS (Bastos *et al.*, 2021; Lino, 2022) e da investigação de seus potenciais aplicações em diferentes compósitos e processos (Correia, 2022; Moura, 2023; Oliveira, 2025; Soares, 2025).

² A destinação de cinzas em aterros sanitários no Brasil é permitida, desde que observados os critérios de classificação e os procedimentos de licenciamento ambiental. Entretanto, a crescente escassez de áreas adequadas para disposição de resíduos, aliada ao potencial de aproveitamento desses materiais, evidencia a necessidade de avanços regulatórios, à luz do que preconiza a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Nesse contexto, a experiência da Holanda, ao restringir o descarte e estimular estratégias de economia circular, apresenta-se como referência relevante para a formulação de instrumentos destinados à valorização de resíduos industriais (Brasil, 2010; Tang; Florea; Brouwers, 2017).

1.2 Justificativa

Na literatura existem diversas pesquisas envolvendo a preparação de concretos com insumos ou agregados não convencionais: há pesquisas que substituíram água por efluentes (Zeyad, 2023; Raj; Singh; Bhattacharya, 2023), areia natural por lodo seco (Mojapelo *et al.*, 2021; Mathye; Ikotun; Fanourakis, 2021), por lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes da indústria têxtil (Fernandes, 2023), por areia de fundição (Dyer *et al.*, 2021), por raspas de pneus, PET³ e bagaço de cana-de-açúcar (Guedes, 2020), além das que substituíram cimento por cinzas *in natura* provenientes da queima de palha de arroz (Guedes; Silva, 2022) ou por pó de rocha (Dobiszewska *et al.*, 2023).

As experiências demonstram que o concreto apresenta elevada capacidade de incorporação de materiais alternativos, devido à sua flexibilidade para adaptação a diferentes condições, ao seu potencial de encapsulamento de substâncias nocivas, à sua durabilidade quando corretamente dosado, à resistência moderada a agentes químicos e físicos (Leite, 2001) e à facilidade de aplicação.

Diante dessa versatilidade, decidiu-se investigar o comportamento mecânico de concretos com cinzas da incineração de RSS substituindo parcialmente o cimento, complementando a literatura que já vem empregando tais cinzas na construção de pavimentos e base de estradas (Patra; Whaung; Kwan, 2017), na incorporação em argamassas normais e adesivas (Aguiar *et al.*, 2002), em cerâmicas vermelhas (Coutinho; Vieira, 2016), em misturas asfálticas (Zhu *et al.*, 2018), em pisos intertravados (Correia, 2022), como elemento de filtração de lixiviados de aterros sanitários (Moura, 2023) e substituindo a areia em corpos de prova de concreto (Soares, 2025).

Os resultados da pesquisa podem indicar a viabilidade de reduzir o uso de cimento em misturas de concreto, contribuir para a valorização e o aproveitamento das cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos, diminuir o envio desse material a aterros sanitários, reduzir a demanda da construção civil por agregados e, sobretudo, criar uma alternativa técnica capaz de impulsionar, ainda que de forma indireta, o desenvolvimento de um concreto com menor pegada de carbono.

³ PET: Politereftalato de Etileno.

A presente pesquisa está em consonância com os princípios e objetivos definidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), além de atender às diretrizes da Resolução nº 222 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2018), à classificação das cinzas conforme a Resolução nº 316 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) e aos critérios estabelecidos pela Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 10004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2024). Além disso, a pesquisa perpassa os princípios estabelecidos pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, ao integrar ações e estratégias que incentivam a inovação e a responsabilidade ambiental no setor da construção civil (Organização das Nações Unidas, 2015).

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Estudar o efeito da substituição parcial de cimento Portland por Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (CIRSS) sobre as propriedades físicas, morfológicas, mecânicas e químicas de concretos.

2.2 Específicos

Determinar, em laboratório, algumas características químicas e físicas das CIRSS;

Determinar a resistência à compressão dos concretos produzidos com e sem a incorporação de CIRSS, nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%, em substituição parcial ao cimento Portland;

Avaliar a atividade pozolânica das CIRSS por meio da determinação do índice de desempenho e de seu efeito na resistência mecânica das argamassas;

Analisar a morfologia das superfícies de ruptura dos corpos de prova de concreto de referência e daqueles contendo CIRSS, correlacionando as características das fraturas com a microestrutura do material;

Contribuir para a valorização técnica, ambiental e o aproveitamento das CIRSS, promovendo o desenvolvimento de novos materiais, o crescimento da literatura local e a redução do seu envio ao aterro sanitário.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 As Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (CIRSS)

3.1.1 Caracterização Geral

Conforme a Resolução nº 222 da ANVISA (ANVISA, 2018), os RSS são aqueles gerados em atividades voltadas para a atenção à saúde humana ou animal. Essas atividades incluem assistência domiciliar, laboratórios, necrotérios, funerárias, serviços de embalsamamento (como tanatopraxia e somatoconservação), medicina legal, drogarias, farmácias (inclusive as de manipulação), estabelecimentos de ensino e pesquisa na área de saúde, centros de controle de zoonoses, distribuidores de produtos farmacêuticos, importadores e distribuidores de materiais e controles para diagnóstico *in vitro*, unidades móveis de atendimento à saúde, além de serviços de acupuntura, piercing, tatuagem, salões de beleza e estética.

A referida Resolução classifica os Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) em cinco grupos: A (resíduos com possível presença de agentes biológicos que podem apresentar risco de infecção), B (resíduos contendo produtos químicos que apresentam periculosidade à saúde pública ou ao meio ambiente, dependendo de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade), C (qualquer material que contenha radionuclídeo em quantidade superior aos níveis de dispensa especificados em norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e para os quais a reutilização é imprópria ou não prevista), D (resíduos que não apresentam risco biológico, químico ou radiológico à saúde ou ao meio ambiente, podendo ser equiparados aos resíduos domiciliares) e E (materiais perfurocortantes ou escarificantes, tais como lâminas de barbear, agulhas, escalpes, ampolas de vidro, brocas, limas endodônticas, pontas diamantadas, lâminas de bisturi, lancetas, tubos capilares, ponteiros de micropipetas, lâminas e lamínulas, espátulas, e todos os utensílios de vidro quebrados no laboratório).

Diante dessas particularidades, os RSS precisam sofrer tratamento adequado que modifique suas características físicas, químicas ou biológicas e reduza ou elimine o risco de danos ao meio ambiente ou à saúde pública. Assim, as principais

tecnologias adotadas para o tratamento desse tipo de resíduo são a incineração, autoclave, microondas e aterros industriais.

A incineração, palavra-chave nesta pesquisa, consiste na combustão dos RSS sob condições controladas de oxigênio e em temperaturas superiores a 800 °C. Conforme a literatura, esse processo resulta na geração de cinzas, gases, calor e efluentes (Lima, 2012; Jucá et al., 2014; Pimentel, 2017; Bastos et al., 2021; Oliveira, 2025; Soares, 2025). Os gases produzidos são submetidos a sistemas de tratamento com o objetivo de remover material particulado e compostos potencialmente tóxicos antes da liberação à atmosfera, enquanto os efluentes líquidos, provenientes principalmente da lavagem dos gases, são encaminhados para tratamento adequado.

A incineração reduz significativamente a massa e o volume do RSS (Juca et al., 2014; Pimentel, 2017), evita que ele seja disposto *in natura* em aterros sanitários (Cardozo; Mannarino; Ferreira, 2021) e permite a recuperação energética por meio da queima controlada dos resíduos, cujo calor gerado pode ser convertido em eletricidade ou utilizado diretamente para aquecimento⁴ (Nzihou; Flamant; Stanmore, 2012; Machado, 2015). Além disso, gera cinzas que podem apresentar viabilidade técnica para aplicações na construção civil (Kaur; Siddique; Rajor, 2019).

As cinzas geradas pela incineração de RSS vêm sendo objeto de estudos em diversos países (Azni et al., 2005; Cobo et al., 2009; Rajor; Kunal, 2011; Memon; Sheikh; Paracha, 2013; Elinwa, 2016; Akyildiz; Köse; Yildiz, 2017; Kaur; Siddique; Rajor, 2019; Honest et al., 2020; Ababneh et al., 2020; Katare; Samaiya; Iyer-murthy, 2022; Manjunath et al., 2023; Matalkah, 2023; Ramgopal et al., 2023), bem como no Brasil (Silva; Lange, 2008; Andrade, 2012; Pinto, 2018; Mendonça, 2018; Alencar, 2022; Bastos et al., 2021; Correia, 2022; Lino, 2022; Moura, 2023; Oliveira, 2025; Soares, 2025), evidenciando crescente interesse em compreender suas propriedades físico-químicas e avaliar seu potencial como material alternativo em diversas aplicações.

Silva e Lange (2008) realizaram a caracterização física e química de três amostras de cinzas de fundo provenientes de uma indústria incineradora situada em Belo Horizonte, Minas Gerais, responsável pelo tratamento de resíduos industriais e

⁴ Cabe destacar que tal prática já é adotada no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP) de Fortaleza-CE, onde o calor gerado durante o processo de incineração é aproveitado para o acionamento de uma autoclave.

de serviços de saúde. Os resultados indicaram que o teor de umidade variou entre 0,9% e 5,6%, a perda ao fogo entre 5,7% e 46,5%, e a massa específica entre 1,93 e 2,18 g/cm³. Do ponto de vista químico, foram identificados 14 componentes, sendo os principais, com seus respectivos valores máximos, o dióxido de silício (84,26%), o óxido de sódio (9,07%), o sulfato (4,94%), o óxido de cálcio (4,75%) e o óxido de magnésio (2,08%). Os autores destacam que as diferenças visuais entre as amostras e a presença de materiais não completamente queimados refletem variações no processo de incineração, diretamente associadas à diversidade dos resíduos tratados e às distintas condições operacionais de queima. Embora algumas amostras tenham apresentado fases cristalinas semelhantes, como halita, quartzo e carbonato de cálcio, bem como os mesmos elementos químicos (chumbo, níquel, cromo, cobre e zinco), observaram-se diferenças quantitativas significativas, o que evidencia a heterogeneidade intrínseca das cinzas geradas a partir da incineração conjunta de resíduos industriais e de serviços de saúde.

Andrade (2012) propôs a utilização de cinzas oriundas da incineração de RSS como substituintes parciais do cimento na produção de concreto convencional e concreto leve, considerando a similaridade composicional entre esses resíduos e materiais tradicionalmente empregados na indústria cimenteira. A caracterização granulométrica realizada por peneiramento revelou diferentes frações com composições visivelmente distintas: na peneira com abertura superior a 6,35 mm, foram encontrados frascos de vidro e materiais metálicos grosseiros; entre 6,35 mm e 2,83 mm, identificaram-se fragmentos de vidro mais finos, pedaços de lâminas metálicas e cinzas; entre 2,83 mm e 1,00 mm, observaram-se majoritariamente cinzas e pequenas hastes metálicas; nas frações de 1,00 mm a 0,355 mm, o material era predominantemente cinza, sem presença significativa de impurezas visíveis. As análises físico-químicas indicaram que as amostras retidas na peneira de abertura superior a 6,35 mm apresentaram em seus difratogramas uma região típica de material amorfo e um pico associado à presença de carbonato de cálcio. A espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) revelou elevadas concentrações de silício e oxigênio, além de teores intermediários de cálcio e enxofre e baixo teor de titânio. Além disso, os elementos identificados mostraram compatibilidade química com escórias de alto-forno, material largamente utilizado como adição no Cimento Portland.

Pinto (2018) investigou as propriedades físicas de cinzas provenientes da incineração de RSS e verificou que estas apresentaram módulo de finura inferior ao da areia natural (1,60 frente a 2,32), embora com maior diâmetro máximo (4,8 mm contra 2,4 mm). A distribuição granulométrica apresentou resultado com classificação apresentou uma classificação granulométrica homogênea, sem descontinuidades acentuadas entre as faixas granulométricas, com 35,33% das partículas passando pela peneira de 0,15 mm, indicando elevado teor de finos. A utilização das cinzas em argamassas e concretos evidenciou que as cinzas moídas⁵ proporcionaram maior compacidade ao material, preenchendo de forma mais eficiente os vazios da matriz e contribuindo para o aumento da resistência mecânica. No entanto, as cinzas naturais⁶ resultaram em argamassas com menor compacidade e maior volume de vazios, comprometendo as propriedades mecânicas e a estanqueidade. Ademais, o aumento gradual do teor de adição das cinzas moídas elevou a superfície específica do compósito⁷, exigindo maior quantidade de aglomerante para o completo envolvimento das partículas, impactando diretamente a trabalhabilidade das argamassas.

Mendonça (2018) caracterizou cinzas provenientes da incineração de RSS, fornecidas pela empresa Cril Soluções Ambientais, localizada no município de Belém do Brejo do Cruz, estado da Paraíba. A análise da curva granulométrica indicou distribuição aparentemente uniforme, com predominância de partículas situadas na faixa variando entre 0,3 mm e 0,6 mm. Considerando as faixas de módulo de finura para agregados miúdos, as cinzas apresentaram módulo de finura igual a 2,5, que está inserido numa zona ótima de utilização (2,20 – 2,90) e, portanto, comparável à classificação de areia média. Diante dos resultados físicos obtidos, o autor concluiu que o material é viável para aplicação na produção de concretos e argamassas. Em relação à composição química, os maiores teores corresponderam aos óxidos de cálcio e alumínio, seguidos de cloro, dióxido de silício e dióxido de titânio. Metais pesados e elementos alcalinos estiveram presentes em concentrações inferiores a 8% da amostra analisada.

Alencar (2022) avaliou o potencial de utilização das cinzas provenientes da incineração de RSS na estabilização de um solo arenoso com cimento Portland do

⁵ Cinzas que foram submetidas a moagem mecânica com o objetivo de reduzir o tamanho das partículas e aumentar a homogeneidade granulométrica.

⁶ Cinzas obtidas diretamente do processo de incineração, sem qualquer processamento adicional.

⁷ Argamassa produzida com a incorporação das cinzas, sendo considerado neste estudo como material cimentício resultante da combinação de cimento, agregados e cinzas.

tipo CP II-E, visando sua aplicação em camadas de pavimentos rodoviários. Foram realizados ensaios de compactação e compressão simples utilizando proporções de cimento (0%, 3%, 6% e 9%). Observou-se que o traço com 9% de cimento, compactado com energia modificada, apresentou o melhor desempenho, com aumento de resistência de 8,95% em relação ao traço com 6% de cimento. A partir dessa composição, efetuaram-se substituições parciais do solo por cinzas nos teores de 5%, 10% e 20%, obtendo-se resistências à compressão de 56,62 kgf/cm², 38,43 kgf/cm² e 32,46 kgf/cm², respectivamente. Os resultados obtidos foram superiores aos valores obtidos na mistura sem cinzas, indicando que a incorporação de até 20% de cinzas é tecnicamente viável, contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas do solo e oferecendo uma alternativa sustentável para o reaproveitamento desses resíduos.

Em Fortaleza, Ceará, estudos prévios que investigaram cinzas provenientes da mesma unidade de incineração, posteriormente empregadas na presente pesquisa, serviram de referência para este trabalho, destacando-se Bastos *et al.* (2021), Correia (2022), Lino (2022), Moura (2023), Oliveira (2025) e Soares (2025).

Bastos *et al.* (2021) realizaram a caracterização física e química das cinzas de fundo, com o objetivo de avaliar seu potencial de reaproveitamento em diferentes aplicações. A análise granulométrica revelou que aproximadamente 26% da amostra era composta por partículas semelhantes a pedregulhos, enquanto 17% correspondiam à fração de areia grossa, 17% à areia média, 19% à areia fina e 21% à fração de siltes e argilas, sendo predominante a fração de areia, que representou cerca de 53% do total. O ensaio de compactação Proctor Normal indicou massa específica aparente seca máxima de 1,315 g/cm³ e um teor de umidade ótima de 26%. Quanto à composição química, os maiores teores corresponderam ao óxido de cálcio (67%), seguido pelo dióxido de titânio (9%) e óxido férrico (7%), além de dióxido de silício (5%), trióxido de enxofre, pentóxido de fósforo e óxido de alumínio (3% cada), óxido de zinco (2%) e cloro (1%).

Correia (2022) avaliou o comportamento de pisos intertravados de concreto produzidos com frações de cinzas provenientes da incineração de RSP gerados no Incinerador de Fortaleza/CE. O estudo envolveu a caracterização física das cinzas, a análise da resistência à compressão, a absorção de água e o índice de vazios dos blocos produzidos. Os resultados granulométricos indicaram que a areia, as cinzas e

a amostra dos materiais misturados apresentaram, respectivamente, 11%, 22% e 14% de material fino, evidenciando a viabilidade do uso das cinzas como substituição parcial do agregado miúdo. Quanto à densidade real, a autora reportou valores de $2,65 \text{ g/cm}^3$ para as cinzas, $2,18 \text{ g/cm}^3$ para os materiais misturados e $2,67 \text{ g/cm}^3$ para o agregado miúdo, demonstrando que essa propriedade não segue, necessariamente, uma relação linear simples em misturas, uma vez que é influenciada pela heterogeneidade dos materiais e pelo empacotamento das partículas. Os resultados do equivalente de areia foram superiores para as cinzas (29%), indicando menor presença de materiais argilosos. No que se refere às propriedades de compactação, a areia apresentou massa específica aparente seca máxima de $1,884 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 10%, enquanto as cinzas apresentaram valores de $1,251 \text{ g/cm}^3$ e 33%, respectivamente, associados à sua maior porosidade e capacidade de absorção. A mistura apresentou valores intermediários de massa específica aparente seca máxima ($1,568 \text{ g/cm}^3$) e umidade ótima (20%). A absorção de água e o índice de vazios foram significativamente maiores na mistura em comparação aos blocos sem cinzas. Apesar disso, os blocos com adição de cinzas apresentaram resistência à compressão superior (8,15 à 8,31 MPa) em relação aos blocos de referência (5,40 à 6,77 MPa), com predominância de ruptura por cisalhamento lateral, indicando que a incorporação das cinzas contribuiu positivamente para o desempenho mecânico dos pisos intertravados.

Lino (2022) estudou as cinzas de RSS e verificou que o teor de umidade das amostras variou entre 2,14% e 51,75%, com média de 25,67%. A análise granulométrica revelou predominância de frações equivalentes à areia: 22,75% de pedregulhos, 24,5% de areia grossa, 22,75% de areia média, 13,25% de areia fina e 21% de siltes e argilas. Os ensaios de compactação pelo método Proctor Normal indicaram massa específica aparente seca máxima de $1,853 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 23,53%. A análise química evidenciou predomínio de óxido de cálcio (57,41%), seguido por óxido férrico (16,43%), dióxido de titânio (7,88%), dióxido de silício (4,47%), trióxido de enxofre (4,05%), óxido de alumínio (2,78%) e pentóxido de fósforo (2,56%). Esses resultados indicam características físicas e químicas compatíveis com uso potencial na construção civil, embora a variabilidade de umidade exija atenção quanto à manipulação e dosagem.

Moura (2023) avaliou a aplicabilidade das cinzas como material filtrante em sistemas de tratamento de lixiviados de aterros sanitários. A análise granulométrica revelou predominância de frações compatíveis com areia (61,4%), distribuídas em 20,8% de partículas semelhantes a pedregulhos, 24,8% de areia grossa, 23,0% de areia média, 13,6% de areia fina e 17,6% de siltes e argilas. O método Proctor Normal apontou massa específica aparente seca máxima média de 1,783 g/cm³ e umidade ótima de 23,1%, enquanto a densidade real variou de 2,065 a 2,367 g/cm³, com teor de umidade natural entre 2% e 52%. A caracterização química identificou 18 componentes, com destaque para óxido de cálcio (60,06%), dióxido de titânio (7,52%) e trióxido de enxofre (6,95%). Os resultados mostraram que o filtro com cinzas foi o mais eficiente na redução de parâmetros como cor aparente, fósforo, DQO, nitrato, nitrito, turbidez e sólidos dissolvidos.

Oliveira (2025) caracterizou as cinzas e comparou suas propriedades físicas, químicas e hidráulicas com as do solo de cobertura do novo Aterro Sanitário Metropolitano de Caucaia (ASMOC). Foram avaliados granulometria, teor de umidade, densidade real, composição química e permeabilidade à água e aos lixiviados. As cinzas apresentaram teor de umidade de 4,05% e densidade real entre 2,38 e 2,73 g/cm³, com predominância de óxido de cálcio (42,53%), seguido por dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido férrico e cloro; os demais elementos (Zn, Cu, K e Cr) não ultrapassaram 1%. A análise granulométrica permitiu fracionar as partículas, incluindo a fração fina utilizada nos ensaios de permeabilidade, evidenciando elevada drenagem do material em comparação ao solo de cobertura. Os resultados mostraram que a CIRSP apresentou permeabilidade à água e ao lixiviado superior à do solo em todas as faixas granulométricas, com redução dessa diferença nas frações mais finas. A permeabilidade ao lixiviado variou entre campanhas, sugerindo influência temporal associada às mudanças nas características dos resíduos incinerados. De forma geral, os coeficientes de permeabilidade obtidos não atendem aos limites exigidos pela NBR 13896:2007 para camadas de base de aterros ($k < 10^{-5}$ cm/s), e apenas dois valores ficaram dentro do requisito. Assim, nas condições estudadas pela autora, a CIRSP não apresenta desempenho hidráulico compatível para substituição direta do solo de cobertura, indicando a necessidade de novas investigações, especialmente envolvendo misturas solo-cinza ou compondo camadas intermediárias.

Soares (2025) investigou os efeitos da substituição parcial do agregado miúdo por cinzas nas propriedades físicas e mecânicas de concretos com Cimento Portland. Foram moldados corpos de prova com teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de cinzas, curados em água e submetidos a ensaios de compressão. Misturas com até 15% de cinzas atingiram resistências superiores a 20 MPa, enquanto teores maiores resultaram em queda de resistência. Os modos de ruptura foram considerados adequados, e a presença das cinzas resultou em concretos mais secos, com menor trabalhabilidade e tempo de pega reduzido.

3.1.2 Alternativas de Aproveitamento

As CIRSS possuem composição física, química e mineralógica variada, o que confere a ela um potencial para aplicação em diferentes processos e produtos. Contudo, para que possa ser utilizada de maneira adequada, é necessário prévia análise e adaptação às exigências específicas de cada aplicação.

Genazzini *et al.* (2003) investigaram a viabilidade de utilizar cinzas provenientes da incineração de resíduos de serviços de saúde na produção de argamassas, substituindo até 50% do cimento Portland. O estudo utilizou cinzas provenientes de um incinerador em La Plata, Argentina, previamente peneiradas em malha de 2 mm. As análises confirmaram a ausência de radioatividade, indicando que o material era seguro do ponto de vista radiológico, embora tenha sido detectada a presença de metais pesados, na seguinte ordem decrescente: zinco, cobre, chumbo, cromo e cádmio. Ensaios de lixiviação demonstraram que as argamassas foram capazes de incorporar ou encapsular o zinco, reduzindo sua concentração de 50 mg/L para menos de 1,3 mg/L, evidenciando que o resíduo pode ser reutilizado de forma ambientalmente segura e viável. As propriedades físico-mecânicas das argamassas indicaram que a substituição parcial do cimento por essas cinzas não comprometeu o desempenho do material, sugerindo que o aproveitamento do resíduo em argamassas é uma alternativa para reduzir o volume de resíduos destinados ao descarte. No entanto, os autores ressaltam a necessidade de estudos complementares, devido à variabilidade na composição das cinzas e aos possíveis efeitos sobre a durabilidade e resistência de argamassas e concretos.

Memon, Sheikh e Paracha (2013) investigaram a viabilidade de utilizar CIRSS geradas em um instituto de ciências médicas de Rawalpindi, Paquistão, como substituto parcial do cimento em misturas de concreto. Foram avaliadas proporções de 2, 4, 6 e 8% de substituição. Os resultados indicaram que, aos 28 dias, apenas a mistura com 2% de CIRSS manteve resistência à compressão comparável ao concreto de referência, enquanto teores maiores resultaram em resistência ligeiramente inferior, ainda que aceitável para determinadas aplicações. A análise de Difração de Raios X revelou que as cinzas são ricas em calcita, e a microscopia eletrônica de varredura mostrou partículas de morfologia irregular, influenciando a trabalhabilidade. Observou-se também que o aumento do teor de CIRSS reduziu o abatimento, a densidade do concreto fresco e a absorção de água. Os autores concluíram que as CIRSS pode ser utilizada como substituto parcial do cimento, especialmente em baixos teores, sem comprometer significativamente a resistência do concreto, contribuindo ainda para a redução de custos e para a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte dessas cinzas.

Ababneh *et al.* (2020) realizaram um estudo experimental visando tratar cinzas de resíduos de serviços de saúde contaminadas por metais pesados e avaliar sua possibilidade de reutilização em argamassas. Foram preparadas misturas com substituição parcial do cimento por cinzas, variando de 0% a 20% em massa, distribuídas em três grupos: controle, adição de Nano Sílica (NS) ao cimento, e substituição parcial de cimento por cinza associada à adição de NS. A análise por FRX revelou que as cinzas possuem como principais óxidos o óxido férrico e o dióxido de silício, além de concentrações relevantes de zinco, chumbo e cádmio. A adição de NS desempenhou papel fundamental, pois reage com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento, formando mais silicato de cálcio hidratado, o que aumenta a resistência mecânica, reduz a porosidade e auxilia no encapsulamento seguro dos metais pesados. Os resultados mostraram que, mesmo com a presença de cinzas, as argamassas foram capazes de reduzir a concentração de metais a níveis inferiores aos limites estabelecidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), demonstrando o potencial de reaproveitamento seguro desse resíduo em materiais de construção.

3.2 O Concreto de Cimento Portland (CCP)

3.2.1 Agregados Convencionais

O Concreto de Cimento Portland (CCP) é composto por cimento, água e agregados, podendo também incluir aditivos, pigmentos, fibras e adições minerais (Helene; Andrade, 2010).

Conforme Lima *et al.* (2014), no concreto, o aglomerante é constituído pela combinação de cimento e água, enquanto os agregados⁸ se subdividem entre miúdos (diâmetro inferior a 4,75mm) e graúdos (diâmetro superior).

Na forma de grãos, como as areias e britas, os agregados devem ser inertes, ou seja, não devem provocar reações indesejáveis (Ribeiro; Pinto; Starling, 2013). De acordo com os mesmos autores, os agregados têm um impacto significativo no custo final da produção de argamassas e concretos, representando aproximadamente 70% do volume total desses materiais. Além disso, eles desempenham um papel importante na redução da retração das pastas de cimento e água, contribuindo também para a melhoria da resistência ao desgaste superficial.

Os agregados podem ser classificados quanto à sua origem em naturais ou artificiais. Os naturais são obtidos diretamente da natureza, como ocorre com as areias e os pedregulhos extraídos de leitos de rios ou encostas. Já os artificiais resultam de processos industriais, como a fragmentação ou trituração de rochas provenientes da extração, originando materiais como britas e areias artificiais (Ribeiro; Pinto; Starling, 2013).

No Brasil, o consumo de agregados nas regiões mais industrializadas e nos grandes centros metropolitanos alcança cerca de 4 toneladas por habitante ao ano, sendo, portanto, os materiais mais consumidos pelo setor da construção civil. Ademais, os agregados representam uma parcela significativa do estoque de materiais utilizados em edificações e em obras de infraestrutura (Hashimoto; Tanikawa; Moriguchi, 2007; Bauer, 2019).

⁸ Os agregados configuram matérias-primas minerais de expressiva importância, caracterizando-se como materiais granulares com faixas granulométricas previamente estabelecidas. Sua aplicação é vasta, abrangendo pavimentação, lastros ferroviários, obras geotécnicas, concretos e argamassas, sendo, portanto, elementos indispensáveis às atividades da construção civil (Bauer, 2019).

A Norma Brasileira NBR 15116, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2021), estabelece a classificação e a definição dos agregados da seguinte forma:

3.1 agregado composto: agregado resultante da mistura intencional de agregado reciclado e agregado natural e/ou britado, possibilitando o ajuste da curva granulométrica em função das características do agregado e do produto a ser preparado com esse material;

3.2 agregado graúdo: agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm;

3.3 agregado miúdo: agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm;

3.4 agregado natural: material granular de origem natural, já encontrado fragmentado ou resultante da britagem de rochas, sendo classificado em função da dimensão granulométrica;

3.5 agregado reciclado: material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção classe A, com características técnicas para aplicação em obras de engenharia (ABNT, 2021)

A qualidade dos agregados pode ser verificada por meio de ensaios laboratoriais que possibilitam a comparação dos resultados com índices estabelecidos por normas técnicas. Entre os parâmetros avaliados, destacam-se a resistência aos esforços mecânicos, a resistência ao desgaste, a presença de substâncias potencialmente nocivas e a reatividade potencial dos materiais (Ribeiro; Pinto; Starling, 2013).

O consumo *per capita* de agregados está diretamente relacionado ao Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* da população, sendo mais elevado em países com maior desenvolvimento econômico. Em 2012, por exemplo, algumas nações europeias e os Estados Unidos apresentaram um consumo estimado entre 6 e 10 toneladas por habitante ao ano (La Serna; Rezende, 2011; Bauer, 2019). Dessa forma, o volume *per capita* desses materiais tende a ser bastante expressivo em países desenvolvidos ou em desenvolvimento, o que intensifica a pressão sobre as fontes naturais de extração e pode resultar em esgotamentos regionais. Nesse contexto, a literatura tem apresentado diversas pesquisas voltadas à utilização de agregados não convencionais como alternativa técnica.

3.2.2 Agregados Não Convencionais

Os agregados não convencionais podem ser produzidos industrialmente por meio da calcinação de argilas a temperaturas em torno de 1200 °C ou a partir do aproveitamento de resíduos da construção e demolição. A aplicação desses materiais⁹ é motivada por benefícios ambientais e econômicos, especialmente no contexto da sustentabilidade e da redução da extração de recursos naturais não renováveis (Bauer, 2019).

Ribeiro, Silva e Schons (2023) analisaram a viabilidade do uso de agregados miúdos alternativos e não convencionais na produção de concreto, discutindo suas implicações econômicas em contextos de políticas e gestão pública. O estudo considerou materiais como areia de rejeito da Vale S.A., rejeito magnético resultante de processos de desmagnetização e pó de brita; resíduos industriais granulados com propriedades adequadas para atuação como agregados. Os resultados indicaram que a substituição parcial dos agregados convencionais por essas alternativas pode proporcionar redução de custos, ampliar o acesso a projetos habitacionais e favorecer práticas mais sustentáveis no setor. Contudo, apesar do potencial da proposta, não foram apresentados dados quantitativos específicos sobre os ganhos em desempenho.

Carasek *et al.* (2018) realizaram uma investigação sobre agregados reciclados (ARs) provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD), objetivando compará-los à areia natural quartzosa na formulação de argamassas. Nesse contexto, foram analisados três tipos de agregados em diferentes faixas granulométricas, sendo: areia natural de rio, agregado reciclado misto e agregado reciclado cimentício. A caracterização ocorreu por meio de ensaios convencionais e não convencionais, como granulometria a laser, teor de material pulverulento (TMP), absorção de água, massa unitária, massa específica e inchamento. Embora o processo de britagem tenha resultado em distribuições granulométricas, ainda semelhantes, entre os ARs, outras propriedades físicas variaram significativamente, em especial o TMP e a absorção de água, destacando, assim, a maior porosidade e a heterogeneidade dos

⁹ A seleção desses materiais deve ser criteriosa, buscando-se a produção de compósitos ecoeficientes, com menor custo, melhor desempenho ambiental e, consequentemente, com baixa pegada de carbono (Marques, 2025).

reciclados. Essas diferenças impactaram direta e proporcionalmente no desempenho das argamassas, que foram avaliadas quanto à consistência, densidade de massa, retração e resistências mecânicas. Os resultados apontaram que os ARs podem ser utilizados em argamassas, desde que suas características sejam previamente conhecidas e consideradas no traço, sendo que propriedades como TMP e massa unitária se mostraram determinantes para prever o comportamento das misturas.

Zago (2019) avaliou a escória de aciaria LD (*Linz-Donawitz*) como substituição parcial do agregado miúdo na produção de concreto, em teores de 0%, 25%, 50% e 75%, com relação água/aglomerante de 0,54. O estudo visou a obtenção de concretos com resistência característica de 30 MPa aos 28 dias. Os resultados indicaram que a resistência à compressão dos concretos com escória foi semelhante à do concreto de referência, embora tenha sido observada redução no módulo de elasticidade. A resistência à tração apresentou tendência de diminuição com o aumento do teor de escória, com reduções de 5,9% e 8,0% aos 28 dias para os teores de 50% e 75%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Aos 180 dias, as diferenças de resistência à tração entre os concretos com escória e o de referência foram reduzidas. Apesar disso, os concretos atenderam à resistência especificada, mantendo desempenho estrutural satisfatório.

Luz (2015) investigou a viabilidade da produção de blocos para alvenaria a partir da incorporação de resíduos de Etileno Acetato de Vinila (EVA). Foram feitos traços utilizando Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) como material ligante e uma fração inerte composta por areia fina e grossa, parcialmente substituída por EVA nas formas granulada e em pó. Nos traços com EVA em grãos, foi possível observar a formação de fissuras, que resultou no comprometimento da resistência dos blocos. Por sua vez, o uso do EVA em pó apresentou desempenho mais vantajoso, pois os finos do material contribuíram com o processo argamassamento da mistura. Os ensaios de resistência à compressão indicaram que é possível substituir até 40% do agregado por EVA em pó, alcançando-se resistência de 2,57 MPa por meio da utilização de vibro-prensa.

3.2.3 Aglomerantes Não Convencionais

A evolução tecnológica, aliada às crescentes demandas por soluções ambientalmente responsáveis na construção civil, tem impulsionado o desenvolvimento e a adoção de materiais alternativos aos aglomerantes tradicionais, também denominados ligantes. Nesse contexto, observa-se um avanço significativo na busca por materiais capazes de mitigar impactos ambientais, seja por meio do reaproveitamento de resíduos anteriormente destinados ao descarte inadequado, seja pela utilização de recursos renováveis em substituição aos insumos convencionais (Maia *et al.*, 2020). Paralelamente, o elevado volume de CO₂ emitido durante a produção e o emprego do cimento Portland reforça a necessidade de investigar e desenvolver sistemas de aglomerantes alternativos.

Nesse cenário, os aglomerantes não convencionais destacam-se como uma categoria de materiais marcada por origens diversas, composições particulares e mecanismos de endurecimento que diferem substancialmente daqueles observados nos ligantes amplamente utilizados na indústria (Azevedo; Strecker; Lombardi, 2018).

Para Silva *et al.* (2014), a modificação dos concretos e o domínio dos aditivos ou modificadores adequados a cada tipo de mistura constituem uma vantagem estratégica, uma vez que permitem o desenvolvimento de concretos e estruturas com níveis de durabilidade significativamente superior aos obtidos pelos sistemas tradicionais.

Dentre as principais tipologias de aglomerantes não convencionais, destacam-se os geopolímeros, produzidos a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos. Esses materiais apresentam propriedades comparáveis às do cimento Portland e potencial de aplicação em distintos contextos construtivos (Azevedo; Strecker; Lombardi, 2018). Também integram essa categoria os aglomerantes de baixo teor de clínquer e aqueles derivados da ativação alcalina de materiais pozolânicos. Entre esses, os geopolímeros têm recebido atenção crescente, devido ao seu desempenho superior e ao menor impacto ambiental associado ao processo produtivo.

De forma geral, os aglomerantes não convencionais representam uma fronteira tecnológica emergente no setor de materiais de construção. Apesar disso, sua aplicação em larga escala ainda enfrenta desafios relevantes, como a ausência de normatização consolidada, a necessidade de estudos de durabilidade a longo prazo e

a adequação dos processos construtivos às características específicas desses materiais.

A relevância ambiental desses ligantes alternativos se torna ainda mais evidente ao se reconhecer que a fabricação do cimento Portland convencional permanece como uma das principais fontes industriais de emissões de CO₂. Nesse contexto, materiais como os geopolímeros despontam como alternativas promissoras, uma vez que podem reduzir as emissões em até 80%. Essa redução decorre, sobretudo, da eliminação da etapa de clínquerização, fase de maior demanda energética e responsável pela maior parcela dos impactos ambientais (Davidovits, 2015).

Madirisha, Dada e Ikotun (2024) entendem que os impactos ambientais associados à produção tradicional do cimento, caracterizada pelo elevado consumo energético e pela intensa depleção de recursos naturais, evidencia a necessidade de soluções por aglomerantes sustentáveis. Os autores reforçam que os geopolímeros constituem uma alternativa promissora ao aliar menor impacto ambiental a fundamentos químicos consolidados, nos quais processos como dissolução, polimerização e despolimerização desempenham papel central na formação da matriz endurecida.

No que se refere à durabilidade, concretos e argamassas baseados em sistemas geopoliméricos têm apresentado desempenho positivo frente a distintos mecanismos de degradação. Os resultados de Matsimbe *et al.* (2024) indicam que a incorporação de fosfogesso promove o adensamento da matriz, reduzindo a absorção de água e a porosidade.

Além dos aspectos relacionados à durabilidade, estudos de análise de ciclo de vida (ACV) indicam que os ligantes geopoliméricos podem alcançar reduções de emissões de CO₂ do berço ao portão de até 80% em relação ao cimento Portland, desde que subprodutos industriais, como cinzas volantes ou escória granulada de alto-forno moída, sejam utilizados como precursores sem impactos adicionais e que a avaliação considere apenas a etapa de produção (Ekinci *et al.*, 2025). No entanto, as reduções são condicionadas a variáveis como a origem das matérias-primas, o tipo e a concentração do ativador alcalino, o regime de cura e as distâncias de transporte envolvidas.

Nesse contexto, a adoção de aglomerantes alternativos não apenas viabiliza a descarbonização da produção de soluções alcalinas e a transição para fontes de energia renováveis, mas amplia o espectro de aplicações em cenários onde o cimento Portland pode apresentar desempenho limitado (Tushar *et al.*, 2025). Desse modo, o desenvolvimento e a padronização de aglomerantes não convencionais constituem uma estratégia para a consolidação de materiais de construção que apresentam sustentabilidade e desempenho técnico.

3.2.4 Concreto no Estado Fresco

No estado fresco, o concreto é constituído por uma combinação de agregados miúdos e graúdos envolvidos por uma pasta cimentícia composta essencialmente por grãos de cimento e água (Sobral, 2000; Bauer, 2019)¹⁰.

Legrand (1975) afirma que todos os aspectos do concreto no estado fresco estão diretamente relacionados aos fenômenos de superfície, promovidos pelas partículas finas, e aos fenômenos de massa, resultantes da presença de partículas graúdas.

No estado fresco, a trabalhabilidade do concreto é essencial para que as etapas de transporte, lançamento e adensamento alcancem desempenho satisfatório e compatível com as condições de aplicação definidas em projeto (Ribeiro; Pinto; Starling, 2013).

A ABNT, nas NBR 16887:2020 e 9833:2008, estabelecem que características como trabalhabilidade, consistência e teor de ar influenciam diretamente a qualidade da mistura antes do endurecimento, afetando sua aplicação e a durabilidade das estruturas. Por sua vez, a NBR 16889 (ABNT, 2020) indica o ensaio do abatimento do tronco de cone, conhecido como *slump test*, como método adequado para avaliar a consistência da mistura já que ele fornece uma indicação prática da sua trabalhabilidade antes do início do endurecimento.

A NBR 9833 (ABNT, 2008), define os procedimentos para a determinação da massa específica, rendimento e teor de ar da mistura por meio do método

¹⁰ Pela literatura (Bauer, 2019; Sobral, 2000), o conjunto formado pela pasta e pelos poros preenchidos por ar é denominado matriz. O ar pode estar presente sob a forma de bolhas isoladas ou em cavidades interligadas, sendo sua distribuição determinante para o comportamento reológico do concreto. A predominância de uma ou outra forma afeta diretamente a plasticidade da mistura, influenciando sua trabalhabilidade e a qualidade da aplicação.

gravimétrico. Complementarmente, a NBR 12655 (ABNT, 2022), embora tenha como foco principal o preparo, o controle e o recebimento do concreto, também contempla diretrizes significativas relativas às propriedades do material ainda fresco, especialmente no que diz respeito à consistência e à trabalhabilidade.

O ensaio de abatimento do tronco de cone (Figura 1) é indicado para concretos com abatimento entre 25 mm e 175 mm, faixa que corresponde a consistências classificadas entre baixa e média plasticidade. No caso de concretos de alto desempenho, o abatimento geralmente ultrapassa 200 mm, o que pode tornar esse método menos eficaz para caracterizar com precisão o comportamento desses materiais no estado fresco (Reis, 2008; De Castro; Liborio; Pandolfelli, 2011b).

Dessa forma, a avaliação da trabalhabilidade e da consistência, por meio de ensaios como o abatimento do tronco de cone, permite prever a facilidade de manuseio e aplicação do concreto e reduzir riscos de segregação e exsudação, garantindo que as propriedades observadas no estado fresco reflitam o desempenho esperado após o endurecimento (Mehta; Monteiro, 2014).

Figura 1 - Determinação da consistência (*slump test*)



Fonte: Autor (2025)

Zago (2019), ao investigar a substituição do agregado miúdo por agregados de escória de aciaria em concretos classificados como bombeáveis, avaliou a fluidez do concreto no estado fresco por meio do ensaio de abatimento, adotando como limite o valor de 120 mm. O autor constatou que o aspecto visual das misturas variou significativamente entre as diferentes composições e destacou que, com o aumento do teor de escória, a quantidade de argamassa tornou-se insuficiente para envolver

adequadamente o agregado graúdo, resultando em maior exposição desses grãos na mistura. Os valores de abatimento registrados para as substituições de 25, 50 e 75% foram, respectivamente, 120 mm, 90 mm e 56 mm, indicando a redução progressiva da fluidez com o aumento do teor de escória.

Kaur, Siddique e Rajor (2019) analisaram o efeito da substituição de agregados finos por cinzas de resíduos de serviços de saúde sobre a trabalhabilidade do concreto, avaliada pelo abatimento do tronco de cone. Os resultados mostraram que o abatimento diminuiu conforme aumentava o percentual de substituição: 62 mm para 5%, 53 mm para 10%, 39 mm para 15% e 33 mm para 20%, indicando que a consistência e a fluidez das misturas se reduzem à medida que o teor de cinzas aumenta.

Estudos similares de Lavado *et al.* (2020) confirmam que materiais substitutos com maior superfície específica ou porosidade tendem a reduzir significativamente o abatimento, exigindo ajustes no traço ou a utilização de aditivos plastificantes. Vitor *et al.* (2021) complementam que, apesar da diminuição da fluidez, materiais cimentícios suplementares podem melhorar a estabilidade e reduzir o risco de segregação, desde que o controle das propriedades no estado fresco seja observado.

3.2.5 Concreto Endurecido

Embora seja considerado um material sólido a partir do início da pega, o concreto apresenta uma natureza evolutiva, sensível às variações das condições ambientais, físicas, químicas e mecânicas (Ribeiro; Pinto; Starling, 2013).

Segundo Bauer (2019) as propriedades do concreto endurecido devem ser avaliadas considerando os requisitos específicos de cada aplicação. Entre essas características estão a densidade, o atrito, a absorção, a permeabilidade a líquidos e gases, o calor específico, a dilatação térmica, a condutividade térmica, elétrica e sonora, a adesão, a transmissão sonora, a radioatividade, a resistência ao fogo, a resistência mecânica, a durabilidade e as deformações (espontânea, elástica, plástica, lenta e por ruptura). Para estudos que envolvem a substituição parcial do cimento por materiais alternativos, como as CIRSS, algumas dessas propriedades ganham destaque, em especial a densidade, a absorção, a permeabilidade, a resistência

mecânica, a durabilidade e as deformações, pois são aquelas que mais influenciam o desempenho físico, estrutural e de longo prazo do concreto.

A caracterização adequada das propriedades do concreto no estado endurecido passa pela adoção de procedimentos normativos e ensaios padronizados. A NBR 5738 (ABNT, 2018) especifica, por exemplo, os métodos para moldagem, cura e preparação dos corpos de prova de concreto e estabelece as condições necessárias à condução dos ensaios laboratoriais. A NBR 5739 (ABNT, 2018) apresenta o procedimento para a realização do ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos, viabilizando a determinação da resistência. Já a NBR 7215 (ABNT, 2020) normatiza o método de determinação da resistência à compressão do cimento Portland.

A resistência do concreto é um dos principais indicadores de sua qualidade, sendo amplamente utilizada como controle para o material. Um dos principais fatores que influenciam diretamente essa resistência é a porosidade, pois a presença de vazios viabiliza o comprometimento de suas propriedades estruturais (Neville; Brooks, 2013).

Para Nawy (2000) a resistência à compressão do concreto está intrinsecamente ligada à relação entre água e cimento (a/c). Para o autor, quanto menor essa relação, maior será a resistência mecânica, pois reduz-se a quantidade de água disponível para a formação de poros na matriz cimentícia.

A resistência do concreto depende ainda de outros fatores, incluindo a proporção entre água e cimento (a/c), a dosagem dos materiais, o tempo de cura e sua idade (Chies, 2011). Souza (2006) e Albert *et al.* (2019) citam também o adensamento e a umidade no corpo de prova. Capraro *et al.* (2019) citam a geometria e as dimensões dos corpos de prova.

Akyıldız, Köse e Yıldız (2017), ao investigarem a substituição parcial do cimento por cinzas hospitalares, concluíram que o aumento da proporção de cinzas na mistura de concreto resultou na redução da resistência à compressão. Assim, quando utilizada uma mistura com 100% de cimento (0% de cinzas), a resistência à compressão foi de 38 MPa. No entanto, ao substituir 50% do cimento por cinzas, a resistência caiu para 11,3 MPa.

Suresh Kumar *et al.* (2021) investigaram os efeitos da incorporação de cinzas de RSS no comportamento mecânico do concreto geopolimérico. Os autores

relataram que, para a mistura de referência, a resistência à compressão foi de 27 MPa aos 7 dias e de 33,2 MPa aos 28 dias. A substituição de 30% do ligante por cinzas resultou em um leve incremento na resistência à compressão em comparação às demais composições, o que pode ser atribuído à reação pozolânica das cinzas com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando compostos cimentícios adicionais que reforçam a matriz do concreto. Entretanto, observou-se uma tendência de redução nos valores de resistência à medida que o teor de cinzas foi elevado de 35% para 50%, indicando que, embora adições moderadas promovam ganhos iniciais, a elevação excessiva da porcentagem de substituição reduz a quantidade de ligante ativo disponível, aumenta a porosidade e prejudica a coesão da mistura, comprometendo o desempenho mecânico do material.

Nataraja *et al.* (2023) realizaram uma análise experimental para avaliar a viabilidade da substituição parcial do cimento por cinzas de incinerador de resíduos biomédicos em concreto autoadensável de classe M30. A pesquisa contemplou diferentes proporções de substituição, variando de 0 a 20% em relação ao peso do cimento, com o objetivo de investigar os efeitos dessa substituição nas propriedades mecânicas do concreto. Os resultados mostraram que a mistura com 5% de cinzas apresentou a maior resistência entre as composições testadas. Para os autores, esse desempenho superior pode ser atribuído à ação das partículas finas do resíduo, que funcionam como material de preenchimento. No entanto, a adição de mais de 5% à mistura não resultou em aumento da resistência, devido à redução no teor de cimento/aglomerante.

Além dos aspectos mencionados, a densidade do concreto endurecido apresenta tendência de aumento com o avanço do tempo de cura, em decorrência do preenchimento gradual da porosidade. Jamellodin *et al.* (2022) relataram que as densidades das amostras com substituição parcial de agregado fino por resíduo de vidro variaram apenas de forma discreta em relação à amostra de controle, mantendo-se todas dentro da faixa de 2300 a 2400 kg/m³, característica do concreto de peso normal. O incremento observado entre 7 e 28 dias evidencia o processo contínuo de endurecimento, durante o qual os vazios internos são progressivamente preenchidos, resultando em uma estrutura mais densa e coesa.

Paralelamente, outro parâmetro relevante para a durabilidade do concreto é a absorção de água e a permeabilidade da matriz cimentícia. Estudos indicam que

substituições parciais por adições minerais ou cinzas podem alterar esses parâmetros, comprometendo a proteção do concreto frente à penetração de agentes agressivos e, consequentemente, influenciando o desempenho estrutural em longo prazo (Kannan; Raja Priya, 2021).

3.2.6 Preparo e ensaios de ruptura dos corpos de prova

As condições de moldagem, cura e preparação dos corpos de prova cilíndricos de concreto são determinantes para garantir a representatividade do material nos ensaios de compressão¹¹. Esses procedimentos estão definidos na NBR 5738 (ABNT, 2018) e asseguram que o comportamento do concreto no ensaio reflita, de forma consistente, suas propriedades reais.

Conforme Soares (2025), as rupturas podem ocorrer por diferentes mecanismos, influenciadas pelas tensões atuantes e pelas propriedades físico-mecânicas do concreto. Os principais modos de falha estrutural estão associados à compressão, tração, cisalhamento, flexão e fadiga, podendo ser classificados em distintas formas segundo sua manifestação visual e mecânica:

A **ruptura normal**, considerada a mais desejável em um ensaio bem conduzido, caracteriza-se por fraturas distribuídas ao longo do corpo de prova, com a formação de cones nas extremidades devido à restrição das placas da prensa, sendo típica de concretos homogêneos. A **ruptura por cisalhamento** ocorre quando o corpo de prova se divide em planos inclinados, podendo indicar falhas causadas por sobrecarga tangencial, agregados inadequados ou falta de uniformidade na mistura. A **ruptura por colapso lateral** se manifesta quando há uma expansão excessiva antes da falha, frequentemente associada a concretos com alto teor de finos ou baixa resistência à tração transversal. A **ruptura por lascamento** ocorre quando há destacamento irregular de fragmentos do concreto, frequentemente resultante de processos de compactação inadequados ou segregação da mistura (Soares, 2025, p. 37).

As normas ASTM C617, BS EN 12390-3:2002 e ABNT NBR 5739 convergem quanto ao objetivo de assegurar a precisão dos ensaios de resistência à compressão, por meio da preparação adequada das superfícies dos corpos de prova. A ASTM C617 especifica o uso de gesso de alta resistência ou argamassa de enxofre para o

¹¹ O ensaio de compressão, amplamente utilizado na engenharia civil em virtude de sua simplicidade operacional, baixo custo e disponibilidade de equipamentos laboratoriais, é descrito na NBR 5739 (ABNT, 2018) e permite avaliar a capacidade resistente do concreto sem ocorrência de rupturas prematuras.

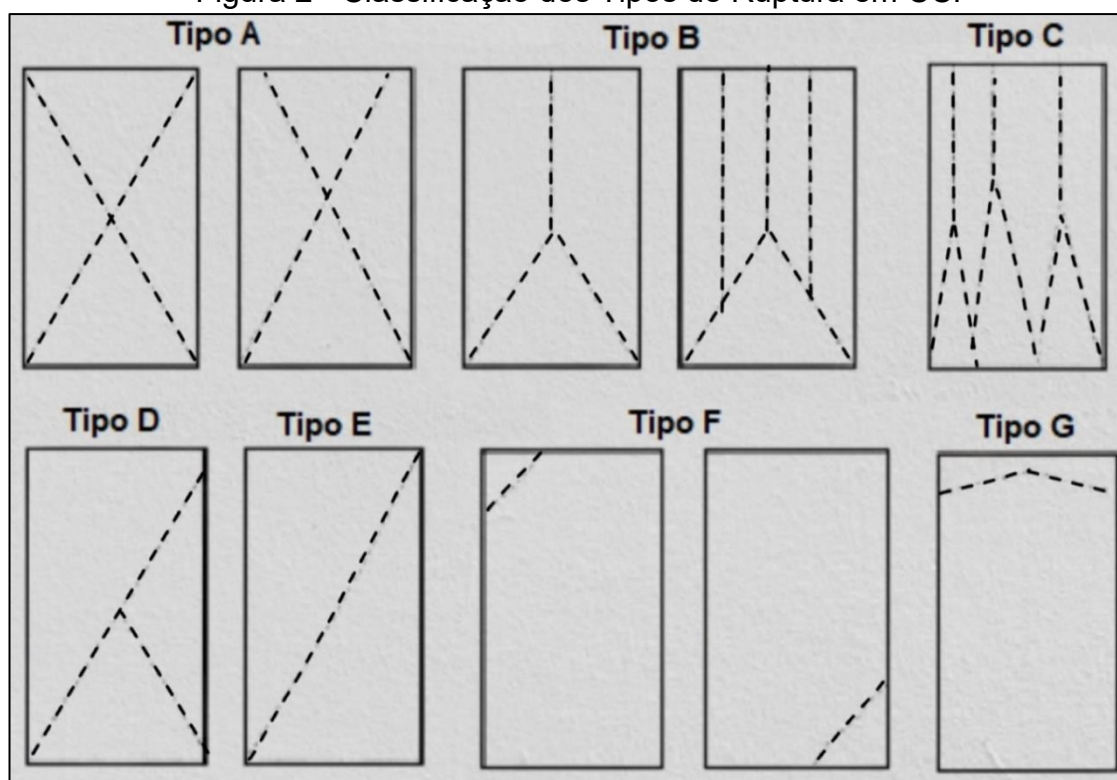
capeamento, a BS EN 12390-3:2002 permite a retificação mecânica como alternativa, e a NBR 5739 adapta os requisitos às condições e materiais disponíveis no contexto brasileiro (BSI, 2002; ASTM, 2015; ABNT, 2018).

Embora o ensaio de compressão axial seja aparentemente simples, por consistir na aplicação progressiva de carga até a ruptura, o modo como o corpo de prova rompe fornece informações fundamentais sobre a validade e a confiabilidade do resultado obtido. Apesar da carga aplicada ser axial, a ruptura raramente ocorre por compressão pura: à medida que o concreto se deforma, surgem tensões laterais de tração que geram planos de cisalhamento. Dessa forma, a ruptura ideal é aquela em que o corpo de prova apresenta um formato semelhante a uma ampulheta, evidenciando a deformação lateral típica associada ao coeficiente de Poisson¹² e à distribuição uniforme das tensões.

Segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), os tipos de ruptura podem ser classificados conforme apresentado na Figura 2. Os tipos A, B e C são considerados desejáveis, por indicarem que o carregamento e o contato entre o corpo de prova e as placas da prensa foram adequados; já os tipos D, E, F e G sinalizam possíveis irregularidades na preparação, nivelamento ou aplicação da carga.

¹² Quantifica a capacidade de um material de experimentar deformações em direções perpendiculares àquela em que está sendo submetido a um esforço mecânico de tração ou compressão (Couto, 2022).

Figura 2 - Classificação dos Tipos de Ruptura em CCP



Tipo A: Cônica e cônica com afastamento de 25 mm em relação ao capeamento; Tipo B: Cônica bipartida e cônica com múltiplas partições; Tipo C: Colunar com formação de cones Tipo D: Combinada cônica e cisalhada; Tipo E: Cisalhada
Tipo F: Fraturas localizadas no topo e/ou na base, abaixo da região do capeamento; Tipo G: Semelhante ao Tipo F

Fonte: Elaborado pelo autor com base na NBR 5739 (ABNT, 2018)

O Tipo A representa a ruptura cônica, com afastamento de aproximadamente 25 mm em relação ao capeamento, provocada pela concentração localizada de tensões na região de aplicação da carga. O Tipo B descreve a ruptura cônica bipartida ou com múltiplas partições, resultante da interação de diferentes tensões internas. O Tipo C, de caráter colunar, evidencia que a resistência à tração foi suficiente para manter a estrutura, embora a concentração de tensões tenha provocado a formação de cones.

As rupturas por cisalhamento (Tipos D e E) apresentam planos inclinados entre 35° e 39° em relação ao eixo de carregamento, e podem ser consideradas aceitáveis dentro do padrão de ensaio, desde que a falha ocorra de maneira simétrica e sem fraturas localizadas. Por outro lado, os Tipos F e G, com fraturas próximas às extremidades, indicam falhas na regularização ou nivelamento das superfícies de apoio, o que compromete a uniformidade da carga e, consequentemente, a validade do resultado obtido.

De modo geral, o padrão de ruptura do concreto depende diretamente do grau de adensamento, da planicidade e perpendicularidade das superfícies de carga, bem como da rigidez da prensa e do método de capeamento adotado (Bezerra, 2007; Jerônimo *et al.*, 2011). A análise crítica da forma de ruptura, portanto, é essencial para validar os resultados do ensaio, evitando interpretações equivocadas decorrentes de falhas de execução ou de preparação inadequada dos corpos de prova.

Correia (2022), ao avaliar o desempenho de pisos intertravados de concreto confeccionados com porções de CIRSS, observou a ausência de rupturas súbitas ou frágeis, o que foi atribuído à boa integração entre os agregados e ligante. Essa interação favoreceu a estabilidade estrutural do compósito e resultou em fraturas que não se propagaram por toda a extensão do concreto, sugerindo a manutenção da integridade estrutural e um comportamento de fratura controlada e de menor gravidade, mesmo com o aumento da porosidade.

De modo semelhante, Soares (2025) investigou o efeito da adição das CIRSP sobre as propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova de concreto. Foram moldadas e curadas amostras de referência e com diferentes teores de cinzas (5, 10, 15, 20 e 25%) em substituição ao agregado miúdo. A análise visual dos corpos de prova com melhor desempenho no ensaio de resistência à compressão revelou rupturas localizadas, sem propagação completa, indicando uma falha não homogênea, porém controlada. Tal comportamento foi interpretado como reflexo de uma boa coesão entre os componentes da mistura, sugerindo que o concreto manteve sua integridade mesmo sob tensões elevadas.

Esses resultados reforçam a importância da análise morfológica das rupturas como parâmetro complementar à resistência à compressão, permitindo compreender o modo como a adição de materiais alternativos influencia o comportamento estrutural do concreto e a dissipação de energia durante o processo de rompimento.

3.3 Materiais Pozolânicos

De acordo com a ABNT NBR 12653:2014 (ABNT, 2014) e com a Norma norte-americana ACI 116R-00:2005 (ACI, 2005), as pozolanas são caracterizadas como materiais de composição predominantemente silicosa ou sílico-aluminosa que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade cimentícia. Entretanto, quando finamente pulverizadas e em contato com a água, essas substâncias reagem com o hidróxido de cálcio, em condições normais de temperatura, formando compostos com propriedades aglomerantes.

Essa reação confere às pozolanas a capacidade de contribuir para o desenvolvimento da resistência e durabilidade das misturas cimentícias, sendo esse comportamento denominado atividade pozolânica ou pozolanicidade, a qual pode variar em intensidade conforme as características químicas e físicas de cada material (Fernandes, 2023).

As pozolanas são classificadas em três grupos distintos: a classe N, que inclui pozolanas naturais e artificiais, como materiais vulcânicos, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas; a classe C, composta por cinzas volantes provenientes da combustão de carvão mineral em usinas termoeletricas; e a classe E, que abrange outros materiais pozolânicos que não se enquadram nas categorias anteriores. Essa classificação é essencial para orientar o uso adequado desses materiais em sistemas cimentícios, considerando suas particularidades reativas e o desempenho esperado nas aplicações práticas (ABNT, 2014).

Para Mehta e Monteiro (2014), as pozolanas reagem com a portlandita, produto da hidratação do cimento Portland, formando silicatos de cálcio hidratados. Essa reação promove um refinamento da estrutura porosa e uma redução no tamanho dos grãos, o que resulta no aumento da resistência mecânica da pasta de cimento, além de melhorar a impermeabilidade e minimizar a ocorrência de microfissuras em concretos e argamassas. Portanto, a partir do conceito de reação pozolânica, compreende-se que uma maior pozolanicidade está relacionada tanto à quantidade máxima de hidróxido de cálcio, que o material é capaz de reagir ou combinar, quanto à velocidade com que essa reação ocorre, ou seja, à sua taxa de reatividade (Massazza, 1993).

3.3.1 Determinação da Pozolanicidade

Ao analisar os métodos utilizados para a determinação da atividade pozolânica, observa-se que estes se dividem em duas categorias: métodos diretos e métodos indiretos.

Os métodos diretos, conhecidos como químicos, fundamentam-se na avaliação da presença e do consumo de hidróxido de cálcio ao longo do tempo, empregando diferentes técnicas analíticas que possibilitam quantificar a extensão da reação pozolânica. Entre as técnicas comumente utilizadas nesses métodos destacam-se a DRX, a análise termogravimétrica (ATG) (Nakanishi, 2013; Basto, 2018).

Os métodos indiretos, também chamados de físicos, baseiam-se na análise de propriedades das amostras, como resistência mecânica, condutividade elétrica e porosidade, que refletem o desempenho pozolânico do material. Esses métodos avaliam o comportamento ao longo do tempo, relacionando a evolução das propriedades com o potencial de reação do material no concreto. Entre as propriedades mais utilizadas destacam-se a resistência à compressão, a condutividade elétrica e a evolução do calor determinada por condução calorimétrica (Donatello *et al.*, 2010; Basto, 2018; Fernandes, 2023).

No entanto, a grande diversidade de materiais pozolânicos, aliada à complexidade dos fenômenos de hidratação envolvidos, dificulta a formulação de um modelo único e abrangente capaz de descrever integralmente a atividade pozolânica, tornando necessária a utilização de métodos complementares para sua adequada avaliação (Basto, 2018).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 As Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (CIRSS)

As cinzas analisadas nesta pesquisa foram coletadas no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP), situado no bairro Passaré, em Fortaleza, Ceará, sob a operação da empresa Marquise Ambiental.

A planta incineradora tem tecnologia alemã, é do tipo leito fluidizado, e composta por duas câmaras cujas temperaturas operam, respectivamente, a 900 e 1000°C.

Em linhas gerais, os RSS são recebidos, pesados, registrados no sistema, direcionados a um fosso e levados até as câmaras de combustão por meio de esteiras. As cinzas resultantes desse processo se depositam no fundo do incinerador, são removidas por esteiras transportadoras e armazenadas em contêineres (Figura 3); de onde foram extraídas as amostras.

Figura 3 - Vista geral das cinzas estudadas, incinerador de Fortaleza - CE



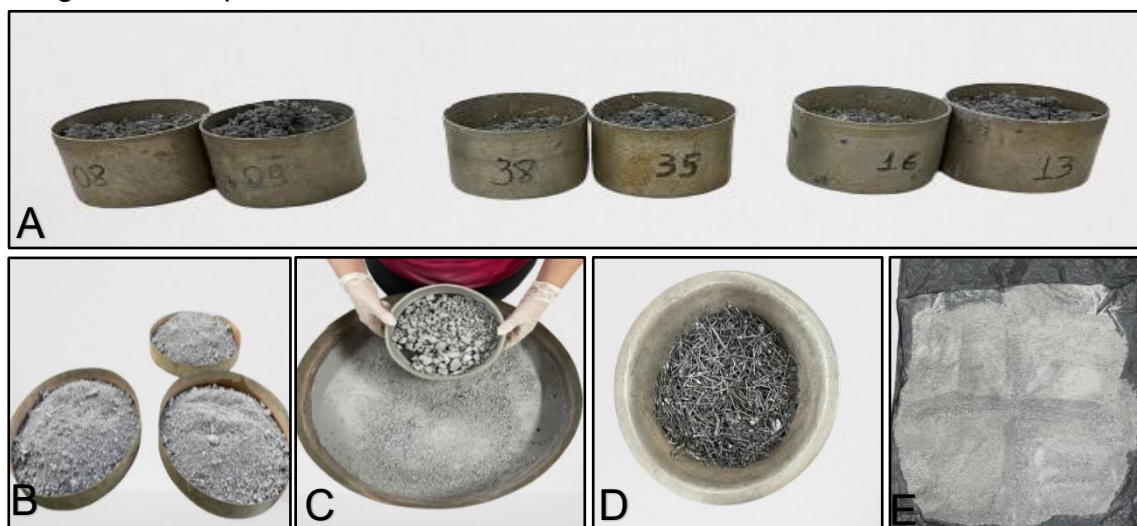
Fonte: Autor (2025)

No CTRP, atualmente, todas as cinzas geradas são destinadas ao Aterro Sanitário Metropolitano (ASM). Durante o período de realização desta pesquisa, o incinerador processava 9 toneladas de RSS por dia, sendo que as cinzas correspondiam a aproximadamente 10% desse total.

Em julho de 2024 foram coletados, a partir do contêiner contendo as cinzas, seis baldes com volume individual de 15,8 litros, resultando em uma massa aproximada de 96 kg de cinzas. As amostras obtidas foram encaminhadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP), vinculado ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foram submetidas aos procedimentos de caracterização e análise.

Antes de iniciar os ensaios de substituição parcial do cimento por cinzas nas misturas de concreto, foi realizada a separação manual de materiais não queimados, partículas grosseiras e resíduos potencialmente perigosos, como agulhas, lâminas de bisturi, peças metálicas, fios, ampolas de vidro e outros elementos. Posteriormente, foram retirados três pares de amostras para a determinação do teor de umidade, utilizando-se o método em estufa a uma temperatura entre 100 e 110 °C, durante um período de 24 horas. O material remanescente passou por um processo de secagem ao ar livre por 24 horas, seguido de destorroamento, peneiramento e quarteamento. Parte dessas etapas está ilustrada na Figura 4.

Figura 4 - Etapas do tratamento inicial das amostras de CIRSS no laboratório



A: Determinação da Umidade; B: Secagem ao ar livre;
C: Peneiramento; D; Catação; E: Quarteamento.

Fonte: Autor (2025)

O teor de umidade das CIRSS variou de 34,82% e 91,74% (a média das 06 amostras foi de 61,46%)¹³, conforme apresentado na Tabela 1. Pesquisas anteriores apontam para umidade variável e inferior à média encontrada: 20,0 a 28,0% (Bastos *et al.*, 2021); 2,14 a 51,75% (Lino, 2022); 2,0 a 52,0% (Moura, 2023); 6,69 a 9,62% (Soares, 2025); 4,05% (Oliveira, 2025).

Tabela 1 – Teores de umidade na CIRSS estudada

Amostras						
Conjunto 1		Conjunto 2		Conjunto 3		Média (%)
A1 (%)	A2 (%)	A1 (%)	A2 (%)	A1 (%)	A2 (%)	
37,73	40,26	72,71	91,74	34,82	91,49	61,46

Fonte: Autor (2025)

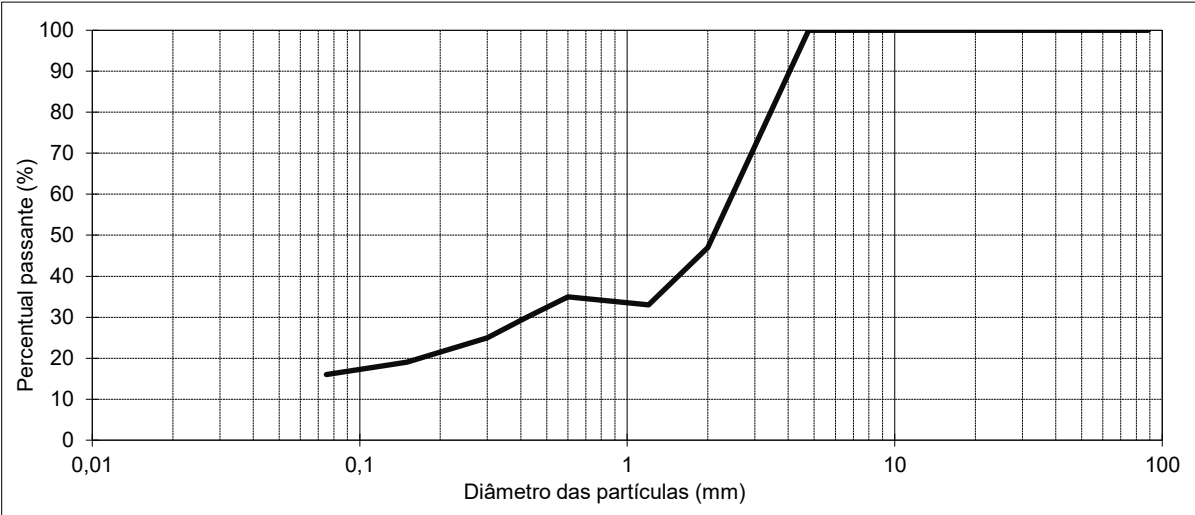
Conforme Moura (2023) a umidade desse material está diretamente relacionada com os procedimentos de lavagem dos gases (alcalina e ácida) realizada diariamente no incinerador e com o resfriamento do equipamento que antecede as paradas para manutenção.

A análise granulométrica das CIRSS indicou que 53,0% do material apresenta diâmetro de grãos equivalente à areia grossa, 17,0% à areia média, 14,0% à areia fina e 16,0% às frações finas, correspondentes a siltes e argilas. Não foi identificada a presença de pedregulhos, em razão da separação prévia realizada para a remoção de materiais grosseiros presentes nas cinzas. A distribuição de tamanhos de partículas está ilustrada na Figura 5 e comparada com dados da literatura local na Tabela 2¹⁴.

¹³ A composição das CIRSS apresenta grande variabilidade (materiais orgânicos e inorgânicos; plásticos; papéis e tecidos) cada um com distinta capacidade de retenção de água. Fatores como o grau de incineração, o acondicionamento e o armazenamento, bem como diferenças na granulometria e na porosidade do material, contribuem para a variabilidade dos valores. Dessa forma, o elevado desvio padrão observado reflete tanto a heterogeneidade natural das CIRSS quanto a sensibilidade do teor de umidade às condições de coleta e manipulação.

¹⁴ A elevada proporção de areia grossa e a ausência de pedregulhos nas CIRSS se devem à separação realizada previamente para remover grãos com dimensões superiores a 4,8 mm. Assim, a análise apresentada refere-se apenas à fração ajustada, sem pedregulhos. Comparações com outros materiais devem considerar essa distinção, podendo-se diferenciar duas granulometrias: completa (com pedregulhos) e ajustada (sem pedregulhos).

Figura 5 – Curva granulométrica das CIRSS.



Fonte: Autor (2025)

Tabela 2 – Granulometria das CIRSS estudada e na literatura local

Autor(es)	Local	Composição Granulométrica (%)				
		P	AG	AM	S/A	AF
Dados da Pesquisa	Fortaleza – Ceará	0,0	53,0	17,0	16,0	14,0
Bastos <i>et al.</i> (2021)		26,0	17,0	17,0	21,0	19,0
Lino (2022)		22,7	24,5	22,7	21,0	13,2
Correia (2022)		26,0	13,0	24,0	22,0	15,0
Moura (2023)		20,8	24,8	23,2	17,6	13,6
Soares (2025)		51,0	17,0	15,0	10,0	7,0
Oliveira (2025)		20,0	19,0	18,0	25,0	18,0

P (Pedregulho); AG (Areia Grossa); AM (Areia Média); S/A (Silte e Argila); AF (Areia Fina).

Fonte: Autor (2025).

A caracterização das CIRSS também foi realizada por meio do ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX), um método não destrutivo amplamente utilizado para identificação da composição química de diferentes materiais. O FRX possibilita conhecer quali-quantitativamente os elementos presentes na amostra, determinando sua composição elementar e a concentração proporcional de cada componente (Oliveira, 2011; Ribeiro *et al.*, 2021; Fernandes, 2023). Foi utilizado o espectrômetro *Malvern Panalytical*, modelo *The Epsilon 1*, com uma amostra do material passante

em peneira de malha 75 µm, encaminhada ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Cariri (UFCA).

A FRX se configura como uma técnica fundamental na caracterização das CIRSS e também foi empregada em estudos locais anteriores como os de Bastos *et al.* (2021), Lino (2022), Moura (2023) e Soares (2025). Os resultados obtidos nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 3, acompanhados de comparações com dados da literatura¹⁵.

Tabela 3 – Composição química elementar das CIRSS estudada x literatura local

Elemento	Autor (%)	Pesquisas Locais			
		A	B	C	D
Óxido de Cálcio	45,56	66,80	57,41	60,06	44,49
Dióxido de Silício	6,62	4,59	4,47	6,36	20,82
Óxido de Alumínio	4,47	2,54	2,78	5,64	10,72
Óxido Férrico	1,78	6,65	16,43	6,62	1,38
Cloro	1,44	1,50	1,40	1,39	2,88
Óxido de Zinco	0,75	2,05	2,03	1,53	-
Oxido de Cobre	0,15	0,39	0,22	0,18	-
Óxido de Potássio	0,12	0,36	0,33	0,26	0,27
Oxido de Cromo	0,11	-	0,20	0,08	-
Trióxido de Enxofre	6,47	3,26	4,05	6,95	9,89
Óxido de Sódio	-	-	-	0,30	3,18
Fosfato	-	2,75	2,56	1,85	2,61
Dióxido de Titânio	-	8,88	7,88	7,52	2,25
Óxido de Magnésio	-	-	-	5,74	1,79

A: Bastos *et al.*, (2021); B: Lino (2022); C: Moura (2023); D: Soares (2025)

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

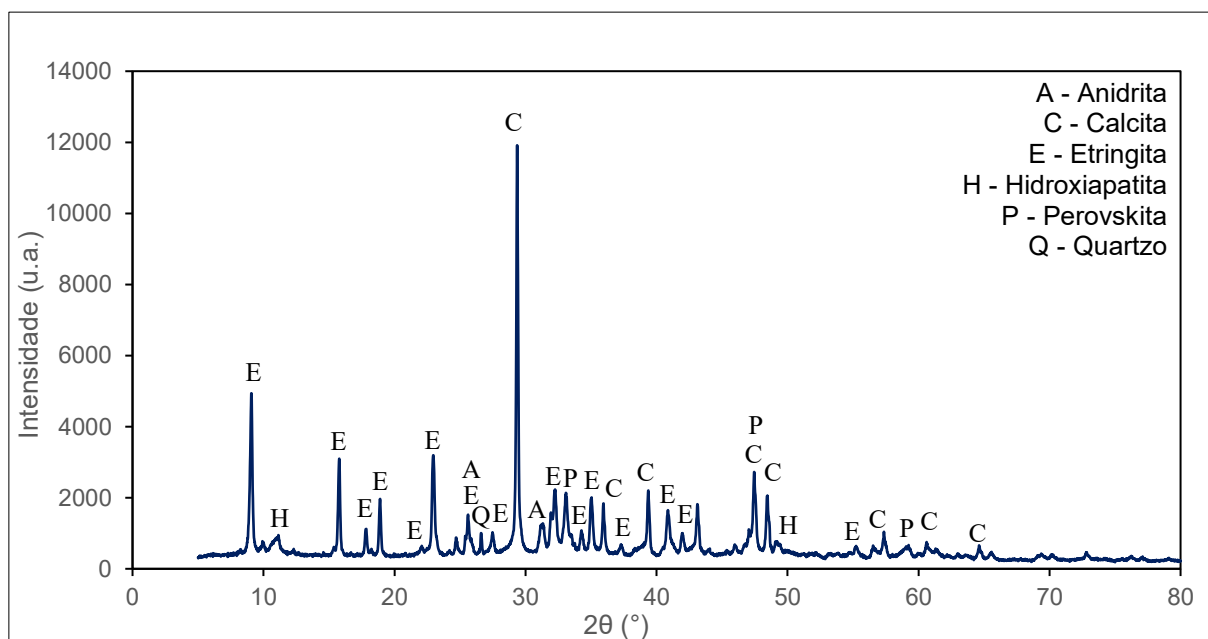
A caracterização das CIRSS foi complementada por meio da análise de Difração de Raios X (DRX), a qual permitiu identificar as fases mineralógicas presentes e analisar a estrutura cristalina do material (Gobbo, 2009; Fernandes, 2023). De acordo com o estudo de Moura (2023), realizado com as mesmas cinzas, o

¹⁵Para mais detalhes, o documento fornecido pelo laboratório está disponível no Anexo A.

difratograma obtido revelou cinco fases cristalinas predominantes: hidroxissulfato de alumínio e cálcio, carbonato de cálcio (calcita), dióxido de titânio (rutilo), óxido férrico (hematita) e dióxido de silício (quartzo).

Nesta pesquisa, o ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LABTAG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), utilizando o difratômetro *Bruker* modelo *D2 Phaser*, operando com corrente de 10 mA e tensão de 30 kV, passo angular de 0,02° e velocidade de varredura de 1,2°/min, cobrindo o intervalo de varredura (2θ) de 5° a 80°, com rotação da amostra a 15 rpm. A amostra, previamente peneirada em malha de 75 μm, foi preparada no porta-amostras, prensada com lâmina de vidro e inserida no difratômetro. A identificação das fases cristalinas foi realizada comparando o difratograma obtido com os padrões disponíveis no banco de dados PDF-2 do *Internacional Centre of Diffraction Data* (ICDD). A Figura 6 apresenta os resultados¹⁶.

Figura 6 - Difratograma das CIRSS estudadas obtido por DRX



Fonte: Autor (2025)

Os picos observados reforçam a predominância de materiais cristalinos no resíduo analisado, evidenciando a organização estrutural dos compostos identificados. A intensidade máxima dos picos alcançou aproximadamente 13.000

¹⁶Para mais detalhes, o documento fornecido pelo laboratório está disponível no Anexo B.

contagens, um valor expressivamente superior ao registrado por Moura (2023), cujas intensidades variaram entre 3.000 e 5.000 no mesmo material.

Foram identificadas 06 fases mineralógicas: etringita, calcita, anidrita, hidroxiapatita, perovskita e quartzo. A etringita, pertencente à classe dos sulfoaluminatos de cálcio, apresenta estrutura cristalina porosa e permeável. Embora tais características possam ser úteis em aplicações específicas, como filtragem de efluentes (Moura, 2023), sua presença pode gerar deterioração de compósitos cimentícios. Sob condições de alta umidade e temperaturas elevadas durante a cura, pode ocorrer a formação de etringita tardia, provocando expansão interna e fissuração da matriz, o que compromete sua durabilidade e estabilidade estrutural. No RSS, sua presença pode estar relacionada à incineração de materiais gessosos descartados (Da Silva *et al.*, 2017; Schovanz *et al.*, 2021; Krüger, 2021).

A calcita, o carbonato de cálcio mais abundante na natureza, é caracterizado por clivagem romboédrica, efervescência com ácido clorídrico e forte birrefringência óptica (Palma Filho, 2022).

A anidrita, um sulfato de cálcio anidro, pode estar associada ao descarte de materiais com gesso hospitalar usados em imobilizações ortopédicas e moldagens odontológicas, bem como à incineração de fragmentos ósseos e próteses odontológicas (Abreu, 2009).

A hidroxiapatita, principal constituinte inorgânico de ossos e dentes, foi igualmente observada, estando sua presença relacionada à incineração de resíduos biológicos (Mavropoulos, 1999).

A perovskita, mineral acessório comum em rochas subsaturadas em dióxido de silício e composto por titanatos, pode derivar do descarte de materiais contendo óxidos metálicos e cerâmicos, usados em equipamentos médicos e laboratoriais (Pires *et al.*, 2001; Ventura, 2013).

A presença de quartzo, pertencente ao grupo dos tectossilicatos e formado por tetraedros de sílica altamente polimerizados, também foi constatada. Esse mineral, devido à sua estrutura simples e estável, apresenta grande distribuição na natureza e no RSS pode ter origem na incineração de materiais ricos em sílica, como vidrarias laboratoriais, ampolas e componentes de equipamentos médicos (Santos, 2014).

Alencar (2022) relatou a presença de materiais tanto cristalinos quanto amorfos, destacando compostos inorgânicos de cálcio (CaO), resultantes da

decomposição térmica do carbonato de cálcio, além de picos correspondentes a compostos cristalinos complexos, cuja identificação é dificultada pela natureza variada e intrincada dessas fases.

Carvalho *et al.* (2022), ao realizarem a caracterização química das cinzas provenientes da incineração de resíduos de serviços de saúde, no estado da Bahia, identificaram a presença de diversas fases cristalinas: calcita (CaCO_3), óxido de alumínio (Al_2O_3), halita (NaCl) e quartzo (SiO_2).

Nesta pesquisa, os resultados da caracterização química mostram que as cinzas analisadas apresentam baixos teores de dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido férrico (Fe_2O_3), totalizando cerca de 12,87%. Este valor é significativamente inferior ao limite mínimo de 50% exigido pela NBR 12653/2014 para a classificação de um material pozolânico.

Além disso, foi observada uma predominância de óxido de cálcio (CaO), sugerindo que as cinzas podem ter um comportamento mais similar ao de um aglomerante cimentício do que ao de uma pozolana convencional.

A caracterização morfológica das CIRSS foi conduzida por meio de Microscopia Óptica (MO), técnica amplamente empregada na análise microestrutural de materiais particulados. Esse método se baseia na observação da imagem obtida por reflexão, em que o contraste entre as regiões da microestrutura decorre das variações na refletividade da luz (Duarte, 2010).

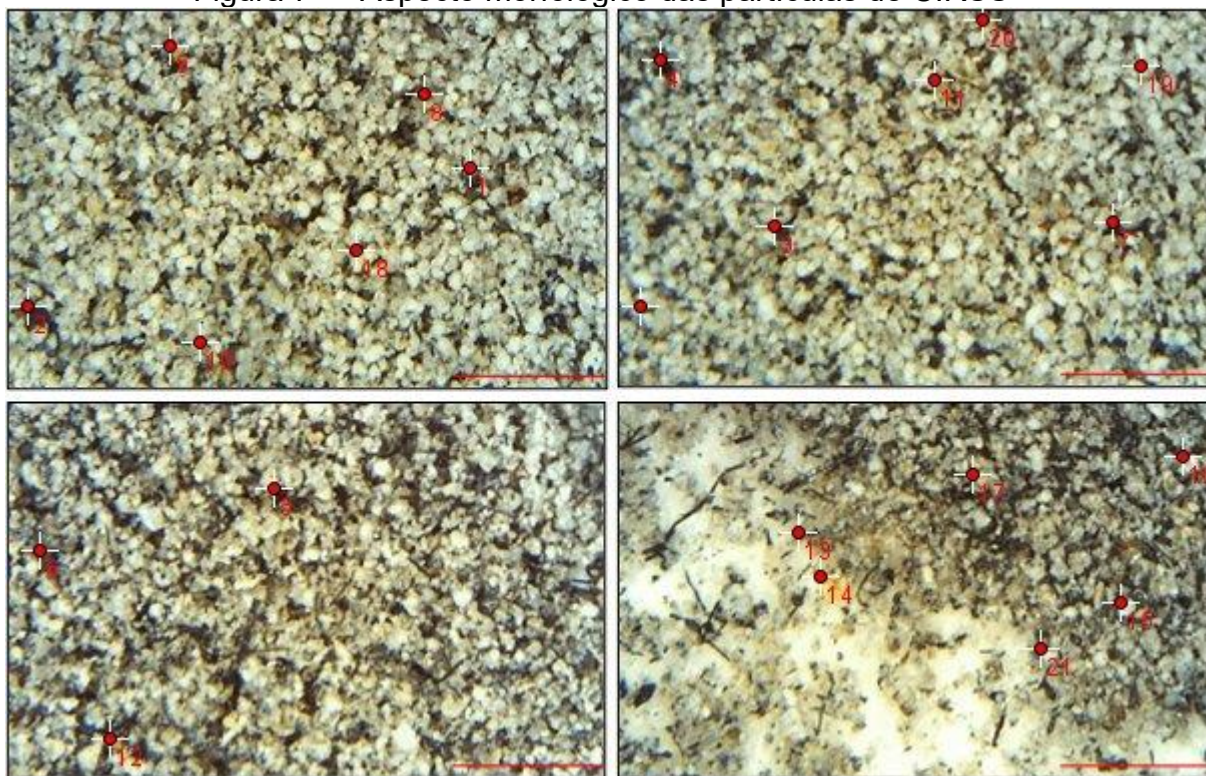
As amostras foram enviadas ao Laboratório de Bioimagem da Embrapa Agroindústria Tropical (EMBRAPA), em Fortaleza, no Ceará, onde foram examinadas em microscópio óptico da marca *Elikliv*, com ampliação de 500x e iluminação incidente. As análises foram realizadas sobre a fração passante na peneira de malha 75 μm , de modo a garantir a observação das partículas mais finas. As micrografias foram obtidas em diferentes regiões do campo de observação, de forma a representar adequadamente a distribuição e a morfologia das partículas. Posteriormente, as imagens foram tratadas no *software ImageJ*, utilizado para a inserção da barra de escala (0,5 mm) e para o ajuste de enquadramento e contraste.

A análise morfológica revelou partículas com ampla diversidade de formas e colorações, evidenciando a heterogeneidade intrínseca do material. Foram observadas estruturas claras, atribuídas à presença de óxidos de cálcio formados durante o processo de incineração, além de partículas inertes de quartzo, que podem

atuar como potenciais sítios de concentração de tensões internas. As CIRSS apresentaram superfície granulada e textura heterogênea, constituída predominantemente por partículas de morfologia irregular e tonalidades variando do bege claro ao acinzentado.

Constatou-se o predomínio de grãos angulosos de natureza essencialmente mineral, associados a fragmentos de óxidos de cálcio, alumínio e sílica, bem como a presença de traços vítreos e porosos. A disposição aleatória das partículas e a ocorrência de vazios interparticulados sugerem baixa densificação natural e elevado potencial de absorção de água, características que influenciam diretamente o comportamento físico e a capacidade de compactação da matriz cimentícia. A Figura 7 apresenta micrografias da mesma amostra em diferentes regiões, ilustrando a microestrutura típica das CIRSS analisadas.

Figura 7 — Aspecto morfológico das partículas de CIRSS



1 a 7: Grãos angulosos; 8 a 17: fragmentos de óxidos de cálcio, alumínio e sílica; 18 a 21: Traços vítreos e porosos. Ampliação: 500x
Fonte: Autor (2025).

4.2 Agregados no Concreto Estudado

Além das CIRSS, as misturas pesquisadas foram compostas por agregado graúdo (brita) com faixa granulométrica entre 6,3 mm e 25 mm, agregado miúdo (areia média) e água potável. O aglomerante empregado foi o Cimento Portland Composto CP II-F-32, classificado para uso geral, fabricado pela Companhia Industrial de Cimento Apodi. O certificado de qualidade do material, com todas as informações do fabricante, pode ser consultado no Anexo C.

A caracterização físico-mecânica dos agregados foi realizada por meio de ensaios normatizados, conforme apresentado na Tabela 4. As determinações foram conduzidas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) Campus Fortaleza.

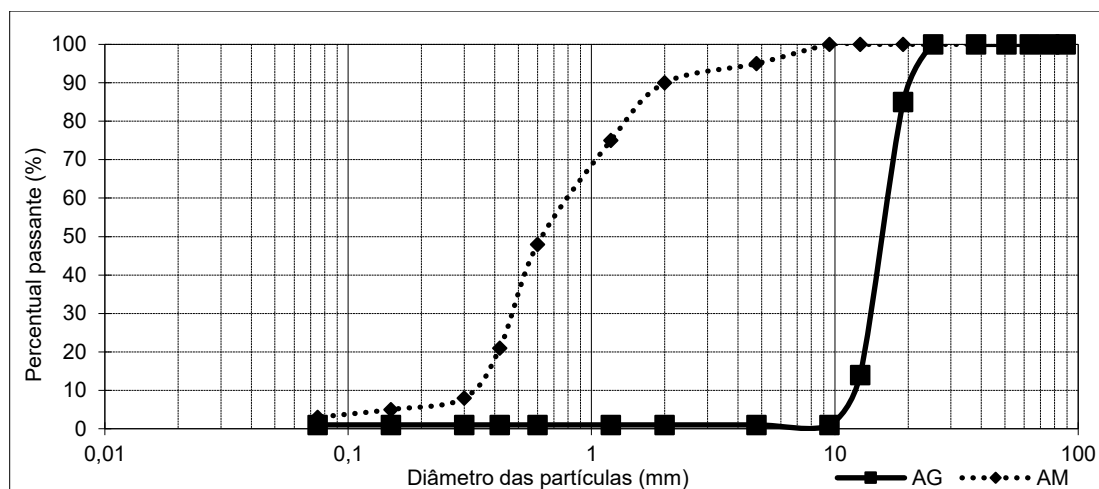
Tabela 4 – Lista de análises, parâmetros e ensaios realizados

Ensaio ou Procedimento	AGM	AGG	Referência
Quarteamento	X	X	ABNT NBR 16915/2021
Determinação de umidade	X	X	ABNT NBR 6457/2024
Granulometria	X	X	ABNT NBR 7181/2025
Massa específica dos agregados graúdos	-	X	NBR NM 53/2009
Massa específica dos agregados miúdos	X	-	NBR NM 52/2003
Massa unitária	X	X	ABNT NBR 16972:2021
Módulo de finura e dimensão máxima	X	X	NBR NM 248/2003
Legenda: AGM (Agregado Miúdo), AGG (Agregado Graúdo)			

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

As curvas granulométricas do material miúdo e graúdo estão representadas na Figura 8.

Figura 8 – Curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo



Fonte: Autor (2025)

O agregado graúdo apresentou uma distribuição predominantemente uniforme (mal graduada), com 99% de sua massa retida nas peneiras de maiores aberturas. De acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2019), essa configuração granulométrica permite sua classificação como brita tipo 2.

O agregado miúdo apresentou uma distribuição bem graduada, composta por 69% de areia média (AM), 18% de areia fina (AF), 5% de pedregulho (PG), 5% de areia grossa (AG) e 3% de frações finas (silte e argila). Informações complementares referentes à composição granulométrica dos materiais empregados encontram-se sistematizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades físicas dos agregados

Característica	AGG	AGM
Módulo de finura (mm)	7,12	2,53
Dimensão máxima (mm)	25	4,75
Massa unitária (kg/m³)	1560	1500
Massa específica (kg/m³)	2611	2486
AAGM: Agregado Miúdo; AGG: Agregado Graúdo		

Fonte: Autor (2025)

4.3 Produção dos Concretos

4.3.1 Concreto de referência

Foi preparado um traço convencional de concreto (CP REF), isento da incorporação de resíduos, com resistência característica à compressão de 20 MPa, enquadrando-se, portanto, na classe C20 (Grupo I), conforme a classificação da NBR 8953. No que se refere à consistência, adotou-se a classe S50, correspondente a um abatimento entre 50 mm e 100 mm (ABNT, 2015).

A dosagem do concreto foi definida por abordagem racional e experimental, conforme recomendações da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o *American Concrete Institute* (ACI), resultando inicialmente na proporção 1:1,94:3,26:0,57 (cimento, areia, brita e fator água/cimento, em massa). Durante a mistura e moldagem dos corpos de prova, de forma empírica e visual, observaram-se problemas de coesão, trabalhabilidade e indícios de segregação dos agregados graúdos, associados ao teor de água adotado. Em razão dessas observações práticas, a dosagem foi ajustada em duas etapas, alcançando a proporção final de 1:2:2,5:0,54, que apresentou melhor homogeneidade e estabilidade durante a moldagem.

Foi utilizada uma betoneira de 80L e foram moldados 06 corpos de prova de referência (Figura 9), realizada cura por imersão em água¹⁷ e rompimento com 28 dias.

Figura 9 – Corpos de prova de referência (CP REF).



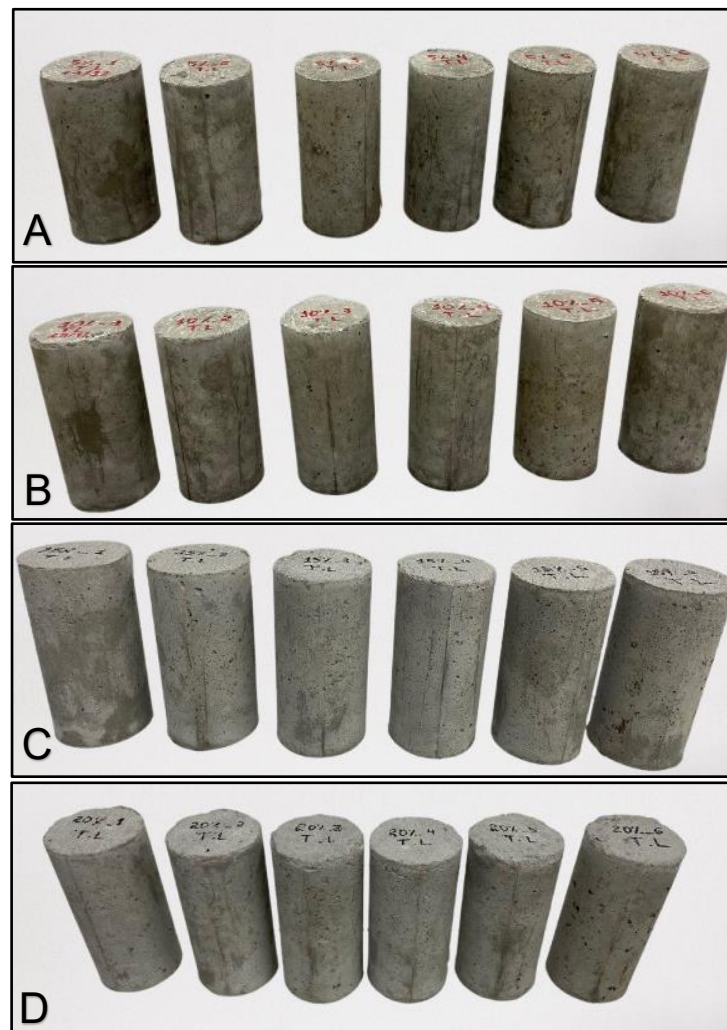
Fonte: Autor (2025).

¹⁷ Esse processo tem por finalidade evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, além de proporcionar redução da sua porosidade, contribuindo para aumentar a durabilidade das estruturas.

4.3.2 Concreto modificado

Para analisar os efeitos da incorporação das CIRSS nas propriedades físicas e mecânicas do concreto com cimento Portland (CCP), foram realizados ensaios experimentais com substituições parciais do cimento em teores de 5%, 10%, 15% e 20%, conforme apresentado na Tabela 6. Para cada traço, foram moldados seis corpos de prova, de modo a assegurar a representatividade e a confiabilidade dos resultados obtidos. A Figura 10 apresenta os corpos de prova confeccionados a partir dessas composições.

Figura 10 – CPs com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição.



Corpos de prova: A: 5% de CIRSS; B: 10%; C: 15%; D: 20%.

Fonte: Autor (2025)

A definição desses teores de substituição foi baseada em estudos anteriores que exploraram diferentes faixas de substituição do cimento por CIRSS, permitindo uma análise comparativa. Al-Rawas *et al.* (2005) investigaram proporções de 10, 20 e 30%, enquanto Memon, Sheikh e Paracha (2013) testaram teores menores, entre 2 e 8%. Outros pesquisadores adotaram valores fixos, como Aissa *et al.* (2018), com 10%, e Manjunath *et al.*, 2023. (2023), com 5%. Ababneh *et al.* (2020) exploraram intervalos entre 0% e 20%, e Pinto (2018) e Suresh Kumar *et al.* (2021) ampliaram a análise para substituições de até 50%. A Tabela 7 apresenta as quantidades de materiais utilizadas (em kg) para cada traço formulado.

Tabela 6 – Descrição das preparações do concreto com e sem CIRSS

Traço	Composição	Frações (%)	CP
REF	C, AGM, AGG, AG	C100/CIRSS 0	06
T5 (1)	C, AGM, AGG, AG, CIRSS	C95/CIRSS 5	06
T10 (2)	C, AGM, AGG, AG, CIRSS	C90/CIRSS 10	06
T15 (3)	C, AGM, AGG, AG, CIRSS	C85/CIRSS 15	06
T20 (4)	C, AGM, AGG, AG, CIRSS	C80/CIRSS 20	06

Legenda: C = Cimento; AGM = Agregado Miúdo; AGG = Agregado Graúdo; AG = Água; CIRSS = Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde; CP= Corpos de Prova

Fonte: Autor (2025)

Tabela 7 – Quantitativo de materiais utilizados (kg) por traço de concreto formulado.

Mat.	Und.	Referência	Misturas Ensaaiadas				
		T0	T5	T10	T15	T20	
Cimento	Kg	7,00	6,65	6,30	5,95	5,60	
Areia		14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	
Brita		14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	
Água		3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	
CIRSS		-	0,35	0,70	1,05	1,40	

Fonte: Autor (2025)

4.3.3 Trabalhabilidade do Concreto

A determinação da consistência do concreto fresco foi realizada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), conforme a NBR 16889:2020 (ABNT, 2020). A aparelhagem utilizada no ensaio compreendeu um molde tronco-cônico metálico com dimensões internas de 200 mm (base inferior), 100 mm (base superior) e 300 mm de altura; uma haste de adensamento em aço com 16 mm de diâmetro; uma placa metálica rígida e plana para suporte; e uma régua milimetrada para medição do abatimento.

O ensaio iniciou com a umidificação do molde e da placa de base, posicionados sobre superfície rígida e plana. O concreto foi colocado em três camadas de altura aproximadamente igual, cada uma adensada com 25 golpes da haste, garantindo penetração parcial nas camadas inferiores. Após nivelamento da superfície, o molde foi retirado verticalmente em 4 a 6 segundos, e o abatimento do concreto foi determinado como a diferença entre a altura do molde e a altura final do concreto, expresso em milímetros.

Os dados obtidos no ensaio foram posteriormente tratados estatisticamente e utilizados para elaboração de gráficos no R Studio (*R version 4.4.3*, 2025), *software* livre de computação estatística e análise de dados.

4.3.4 Resistência à Compressão

O ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto foi conduzido em conformidade com a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos de prova foram previamente moldados e submetidos à cura segundo as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2018).

Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram retirados da cura úmida, e suas dimensões foram determinadas pela média de dois diâmetros ortogonais na altura média, permitindo o cálculo preciso da área da seção transversal. Ao término do período de cura, os corpos de prova foram rompidos em uma prensa DL-30000, equipamento destinado à execução de ensaios de tração, compressão, flexão, dobramento e outros, capaz de aplicar forças de até 30.000 kgf (300 kN).

Cada corpo de prova foi posicionado e centralizado no prato inferior da máquina, utilizando os círculos concêntricos de referência, assegurando que o desvio entre os eixos do corpo de prova e da máquina não ultrapassasse 1% do diâmetro nominal. Os dados obtidos foram também tratados no R Studio.

4.3.5 Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland aos 28 Dias

A pozolanicidade foi avaliada segundo o método proposto pela NBR 5752:2014 (ABNT, 2014), que determina a atividade pozolânica em argamassas com cimento aos 28 dias. O método utiliza a resistência à compressão como parâmetro para aferir o índice de desempenho das pozolanas.

A execução do ensaio envolve a preparação de duas argamassas com dosagens distintas, denominadas A e B. A norma recomenda o uso de cimento da classe CP II-F-32, areia normal, além do material em estudo. A argamassa A é composta apenas por cimento, areia e água, enquanto a argamassa B substitui 25% em massa do cimento pelo material cuja pozolanicidade está sendo avaliada, mantendo as quantidades de água e areia constantes. As dosagens correspondentes para a confecção de seis corpos de prova cilíndricos de 50×100 mm estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Dosagem em massa para moldagem CP cilíndricos

Material	Massa (g)	
	A.A	A.B
Cimento Portland	624	468
Material Pozolânico	-	156
Areia normal	1872	1872
Água	300	300
A.A: Argamassa A; A.B: Argamassa B		

Fonte: Autor (2025)

O procedimento de moldagem e mistura dos materiais foi realizado conforme as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019). Os corpos de prova foram curados durante 28 dias, permanecendo inicialmente nos moldes em câmara úmida por cerca de 24 horas. Posteriormente, foram desmoldados e submersos em solução saturada

de cal pelos 27 dias restantes. Ao final do período de cura, os corpos de prova foram rompidos em uma prensa DL-30000.

O índice de desempenho das pozolanas com cimento Portland (*I*cimento) foi calculado como a razão entre a resistência média dos corpos de prova cilíndricos preparados com argamassa contendo 25% de substituição por material pozolânico (*f*cB) e a resistência média da argamassa de referência (*f*cA), conforme apresentado na Equação 01. Segundo a Norma, para que um material seja classificado como pozolânico, seu índice de desempenho deve ser igual ou superior a 90%

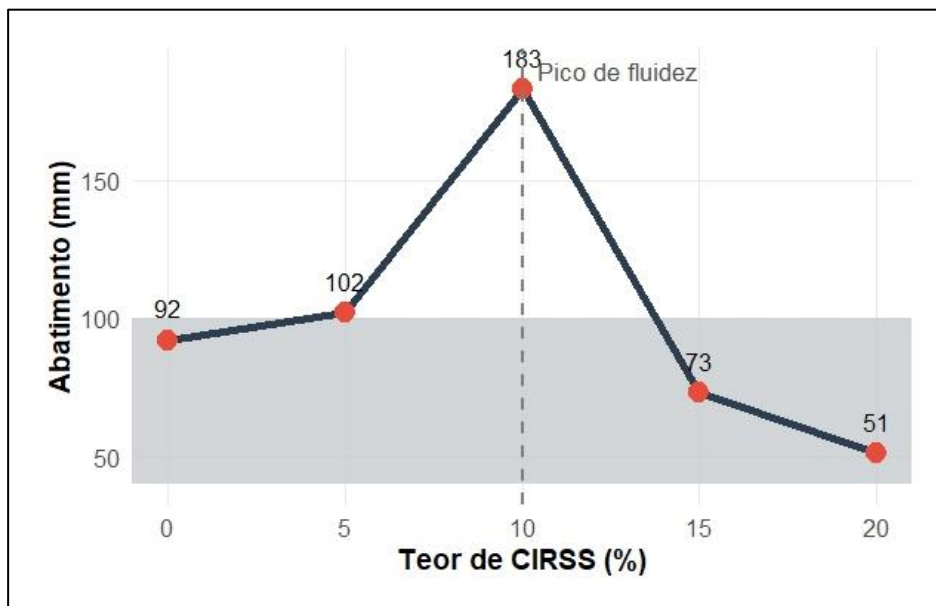
$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} * 100. \quad (01)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Trabalhabilidade do Concreto

A análise dos resultados do ensaio de abatimento indicou variações significativas na trabalhabilidade do concreto em função do aumento do teor de CIRSS na mistura. O traço REF (0% CIRSS) apresentou abatimento em torno de 92 mm, enquadrando-se na faixa S50, enquanto o T5 (substituição de 5% de cimento por CIRSS) elevou o abatimento para aproximadamente 102 mm, ultrapassando levemente o limite superior da faixa. No T10 (10% de substituição), o abatimento atingiu 183 mm, evidenciando aumento na fluidez da mistura. A partir do 15%, entretanto, verificou-se redução acentuada da trabalhabilidade, com valores de 73 mm e 51 mm para T15 e T20 de CIRSS, respectivamente. Esses resultados estão apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Valores do *slump test* no concreto com e sem CIRSS.



Fonte: Autor (2025)

A trabalhabilidade do concreto modificado com CIRSS apresentou relação direta com a reologia da mistura e com a interação entre seus constituintes. Até o teor de 10% de substituição, o material atuou como agente de preenchimento, favorecendo a dispersão dos agregados e reduzindo a coesão interna, o que resultou em maior

fluidez e aumento do abatimento. No entanto, teores superiores ($\geq 15\%$) ocasionaram aumento da demanda hídrica, devido à maior superfície específica e porosidade das partículas de CIRSS, que absorveram parte da água disponível, tornando o concreto mais seco e menos fluido.

Esse comportamento também pode estar associado à modificação da estrutura da pasta de cimento, dificultando o deslocamento das partículas e, conseqüentemente, reduzindo a trabalhabilidade da mistura. De acordo com De Castro, Liborio e Pandolfelli (2011a), as propriedades reológicas do concreto fresco são fortemente influenciadas tanto pelas características dos materiais constituintes quanto pelas condições de produção.

A redução da trabalhabilidade observada para os teores mais elevados de CIRSS decorre de múltiplos fatores inter-relacionados: a natureza porosa das cinzas favorece a absorção de água, aumentando a demanda hídrica da mistura; as partículas finas e angulares restringem a mobilidade da matriz cimentícia, enquanto a irregularidade superficial intensifica esse efeito, reduzindo a lubrificação e tornando o concreto mais seco e pegajoso.

Do ponto de vista químico, a presença de carbono não queimado e de fases silico-aluminosas reativas nas CIRSS pode interagir com íons de cálcio liberados durante a hidratação do cimento, formando complexos superficiais que diminuem a disponibilidade de água livre na pasta e alteram a relação água/cimento, agravando a perda de fluidez (Valderrama; Torres Agredo; Mejía de Gutiérrez, 2011; Kaur; Siddique; Rajor, 2019; Zago, 2019; Soares, 2025).

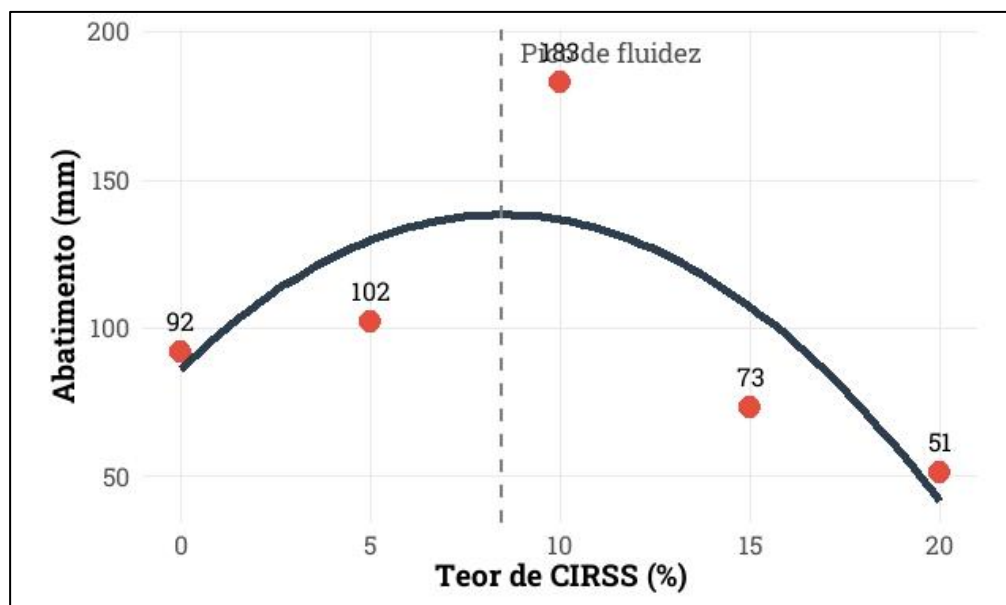
A análise dos modelos de regressão ajustados aos dados de abatimento em função do teor de substituição por CIRSS evidenciou uma relação não linear entre as variáveis, caracterizada por comportamento quadrático. O modelo linear apresentou um R^2 ajustado¹⁸ de 0,165, indicando capacidade limitada de representar a variação observada nos dados experimentais. Apesar de o modelo polinomial de segundo grau conseguir apresentar o mesmo R^2 ajustado, mostrou-se mais adequado para descrever a tendência empírica, particularmente ao captar a inversão de comportamento da trabalhabilidade nos teores mais elevados de CIRSS.

¹⁸ Coeficiente de determinação ajustado, que indica a proporção da variabilidade da variável dependente explicada pelo modelo, corrigindo para o número de preditores.

Apesar de os valores de p^{19} associados aos coeficientes do modelo quadrático não indicarem significância estatística, os coeficientes estimados (intercepto = 85,97; coeficiente linear = 12,35; coeficiente quadrático = -0,73²⁰) descrevem de forma coerente a dinâmica observada entre abatimento e teor de CIRSS.

A regressão ajustada confirmou a tendência empírica, com incremento da trabalhabilidade até aproximadamente 8,5% de substituição, correspondente ao ponto de máxima fluidez²¹ do concreto, seguido de queda acentuada nos teores superiores (10%, 15% e 20%). Esse comportamento evidencia o caráter não linear da resposta do abatimento e permite identificar um ponto crítico de substituição, estimado em 8,48% de CIRSS, que representa o limite máximo recomendado para incorporação ao traço, otimizando a fluidez da mistura sem comprometer sua consistência.

Figura 12 - Regressão polinomial para análise estatística do *slump test*



Fonte: Autor (2025).

A comparação com estudos prévios (Verma, Kumar, 2024; Anand, Chandra, 2019) indica concordância quanto ao comportamento observado: o aumento do teor de cinza na mistura resulta em redução progressiva do abatimento e, portanto, da

¹⁹ Probabilidade de se obter resultados iguais ou mais extremos do que os observados, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira; valores acima de 0,05 indicam falta de significância estatística.

²⁰ Parâmetros do modelo polinomial; o coeficiente linear representa a taxa de variação inicial do abatimento, enquanto o coeficiente quadrático indica a curvatura da função.

²¹ Valor do teor de CIRSS que maximiza o abatimento do concreto, identificado pelo cálculo $-b/(2a)$ no modelo quadrático.

trabalhabilidade. Soares (2025) observou resultados análogos ao substituir parcialmente a areia natural pelo agregado miúdo, utilizando as mesmas cinzas, embora os efeitos diferissem daqueles obtidos com a substituição parcial do cimento. Enquanto a modificação no agregado afeta principalmente a granulometria, a textura superficial e a absorção de água, a substituição do cimento altera a reologia da pasta em razão da maior finura e área específica das adições minerais. Dessa forma, embora não sejam diretamente comparáveis, ambos os casos demonstram que o incremento do teor de cinzas tende a reduzir a fluidez do concreto.

5.2 Resistência à Compressão

Os resultados relativos à resistência à compressão do concreto convencional e das misturas modificadas com diferentes teores de CIRSS estão apresentados na Tabela 9, enquanto o ensaio correspondente é apresentado na Figura 13, referente ao período de 28 dias de cura.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão (MPa) dos concretos

Dosagem	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	$\bar{x}$	σ	CV
REF	20,37	20,12	21,87	20,57	22,14	20,38	20,91	0,87	4,14
T5	19,37	19,22	21,19	19,74	18,84	19,11	19,58	0,84	4,31
T10	13,78	13,52	10,95	17,51	15,76	15,89	14,57	2,31	15,84
T15	12,25	10,09	9,04	10,75	11,77	11,33	10,87	1,17	10,81
T20	10,22	9,47	6,84	10,49	6,41	7,94	8,56	1,75	20,42

Legenda: REF = CIM 100/CIRSS 0; T5 = CIM 95/CIRSS 5; T10 = CIM 90/CIRSS 10; T15 = CIM 85/CIRSS 15; T20 = CIM 80/CIRSS 20; $\bar{x}$ = Média; σ = Desvio Padrão²²; CV = Coeficiente de Variação.

Fonte: Autor (2025)

²² O desvio padrão foi calculado considerando os corpos de prova como uma amostra, utilizando a fórmula amostral. Essa abordagem permite estimar a variabilidade do ensaio de resistência à compressão de forma adequada para conjuntos de dados experimentais limitados.

Os dados indicam que a substituição parcial do cimento por CIRSS afeta diretamente a resistência à compressão do concreto. O traço REF, sem substituição, apresentou média de 20,91 MPa, acima do limite mínimo de 20 MPa para concretos estruturais, evidenciando que, nas condições do ensaio, a formação das ligações cimentícias ocorreu de maneira satisfatória.

Figura 13 — CP em Rompimento - Resistência à Compressão



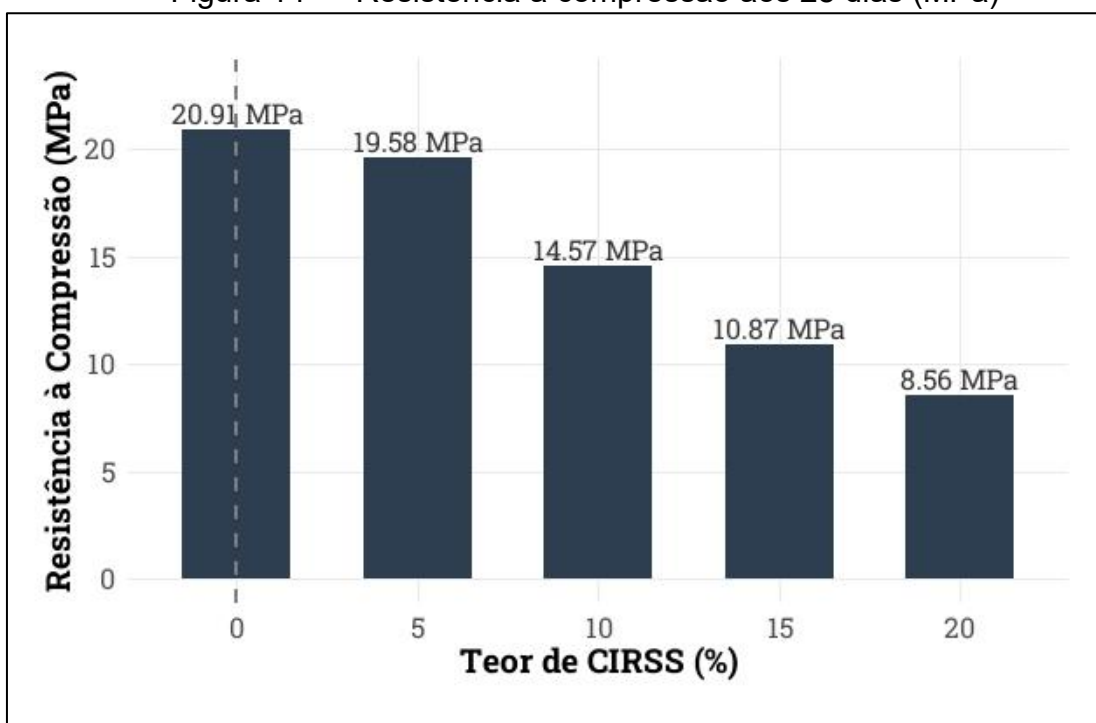
Fonte: Autor (2025).

Nesse contexto, foi possível observar que, à medida que o teor de CIRSS aumentou, a resistência à compressão do concreto apresentou redução progressiva, evidenciando uma relação inversa entre a quantidade de *filler* incorporado e o desempenho mecânico da mistura, conforme ilustrado na Figura 14. No traço T5, a resistência média foi de 19,58 MPa, representando uma diminuição de 6,36% em relação ao concreto de referência (REF). Para o traço T10, a resistência atingiu 14,57 MPa, correspondendo a uma queda de 30,31%. Essa tendência de redução se acentuou nos teores mais elevados de substituição, com valores de 10,87 MPa para T15 (redução de 48,04%) e 8,56 MPa para T20 (queda de 59,05%).

Além da redução na resistência, os valores do coeficiente de variação (CV) indicaram que a incorporação de CIRSS influenciou negativamente a uniformidade da mistura, tornando os resultados menos consistentes. Os traços de referência (REF) e com 5% de substituição (T5) apresentaram CV relativamente baixos (4,14% e 4,31%, respectivamente), evidenciando boa homogeneidade entre os corpos de prova. No entanto, os traços com teores mais elevados de substituição (T10, T15 e T20) exibiram dispersões significativamente maiores (15,84%, 10,81% e 20,42%, respectivamente), demonstrando que a adição de CIRSS compromete não apenas o desempenho

mecânico do concreto, mas também a previsibilidade dos resultados. Resultados semelhantes foram relatados por Abbá *et al.* (2014), que observaram aumento no coeficiente de variação da resistência à compressão em misturas contendo CIRSS quando comparadas às de controle.

Figura 14 — Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)



Fonte: Autor (2025)

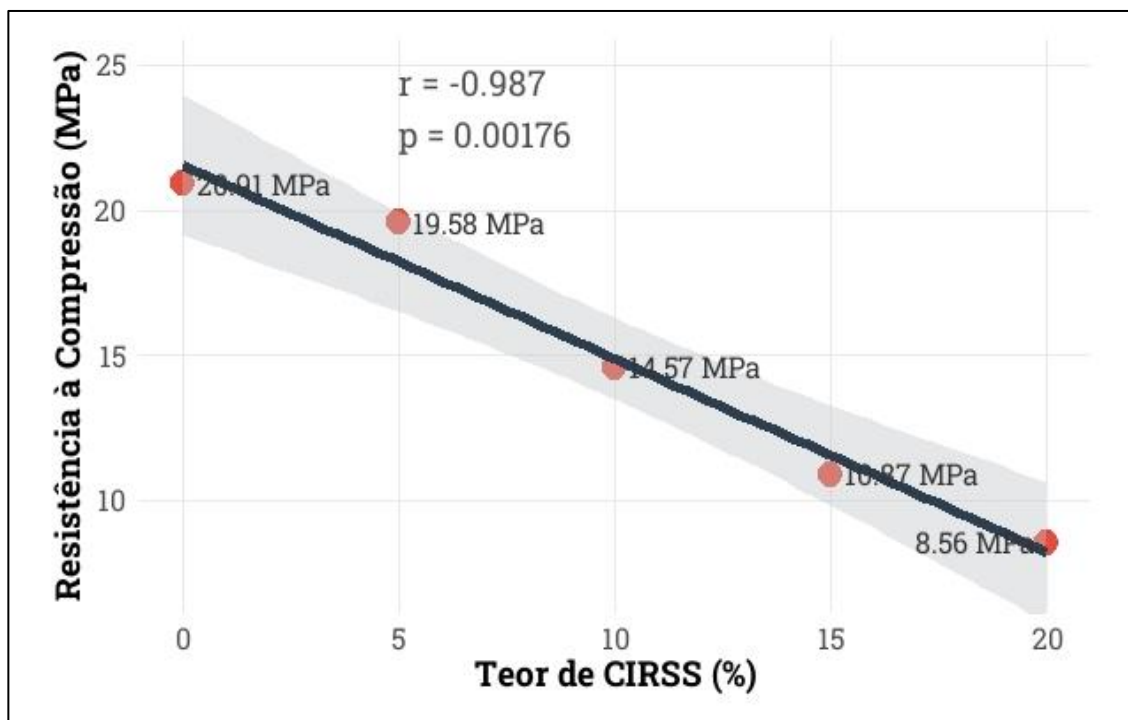
A análise pelo coeficiente de correlação de Pearson evidenciou uma associação negativa e estatisticamente significativa²³ entre o teor de CIRSS e a resistência à compressão do concreto, indicando que o aumento na substituição do cimento está diretamente relacionado à redução do desempenho mecânico. O coeficiente de correlação obtido ($r = -0,987$) confirma uma relação linear inversa entre as variáveis, demonstrando que a queda de resistência segue um comportamento consistente com os resultados experimentais.

Esses resultados estatísticos, em conjunto com as análises experimentais, indicam que teores mais elevados de CIRSS comprometem de forma expressiva a resistência do concreto, sendo recomendável limitar sua incorporação a percentuais que não afetem o desempenho mínimo exigido em aplicações estruturais. Assim, a

²³ O p-valor de 0,001763 indica que a correlação de Pearson é estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

correlação observada fornece subsídios para definir limites de substituição, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Correlação entre a substituição e a resistência dos CP



Fonte: Autor (2025)

Observou-se ainda que os concretos com substituição parcial de cimento por CIRSS apresentaram resistência à compressão inferior ao limite mínimo exigido para concretos estruturais (20 MPa). Contudo, esses materiais podem ser empregados em aplicações não estruturais, como pavimentos de passeio, calçadas, blocos de vedação, pavimentos industriais leves, revestimentos de pisos, meios-fios e elementos de paisagismo urbano, nos quais a resistência mecânica não é o fator determinante, enquanto propriedades como densidade e durabilidade assumem maior relevância. Dessa forma, a incorporação de CIRSS contribui para a valorização de um resíduo e para a redução do consumo de cimento Portland, apresentando benefícios ambientais que justificam sua utilização em contextos não estruturais.

A literatura apresenta diversas análises sobre a resistência à compressão de concretos contendo cinzas provenientes da incineração de resíduos. No entanto, a comparação entre os resultados deve ser realizada de forma cuidadosa, considerando as variações nos teores incorporados, nas propriedades físico-químicas dos resíduos,

nas tecnologias de incineração e nas condições operacionais dos processos (Soares, 2025).

Elinwa (2016) avaliou a substituição parcial do cimento por cinzas de incineração de resíduo hospitalar em concretos com teores variando de 0 a 40%, em Bauchi, Nigéria. Os resultados evidenciaram que a resistência à compressão diminuiu à medida que o teor de cinzas aumentava, sendo essa redução mais acentuada em maiores concentrações, quando se observa incremento na taxa de pega e na intensidade da reação de hidratação.

Sathvik *et al.* (2019) investigaram a substituição parcial de cimento por cinzas de resíduos biomédicos em concretos com diferentes proporções (5, 10 e 15%). Os autores observaram redução da resistência à compressão em relação ao concreto convencional, sendo que as misturas com 5% e 10% apresentaram bom desempenho, enquanto a de 15% apresentou resistência inferior, efeito atribuído à diminuição da densidade do concreto.

Ahmed, Chowdhury e Rahman (2020) avaliaram o uso de cinzas provenientes de resíduos hospitalares em misturas de concreto com diferentes proporções (0, 5, 10, 15 e 20% em peso). As amostras apresentaram resistência à compressão variando entre 27,17 e 34,25 MPa, com redução progressiva da resistência conforme aumentava o teor de cinzas. Os autores indicaram que misturas contendo até 15% de cinzas mantiveram desempenho satisfatório, sugerindo que teores de até 10% podem ser adequados para produção de argamassa de cimento de qualidade aceitável.

Mataalkah (2023) investigou o reaproveitamento de cinzas de resíduos hospitalares em argamassas com 40% de incorporação, avaliando quatro métodos de ativação das cinzas: moagem a seco, calcinação, moagem úmida e moagem úmida seguida de calcinação. Os resultados indicaram aumento significativo da resistência à compressão, sendo 20% para moagem a seco, 35% para calcinação e mais de 70% para a combinação de moagem úmida e calcinação, demonstrando que o tratamento prévio das cinzas pode melhorar consideravelmente o desempenho mecânico de materiais não estruturais.

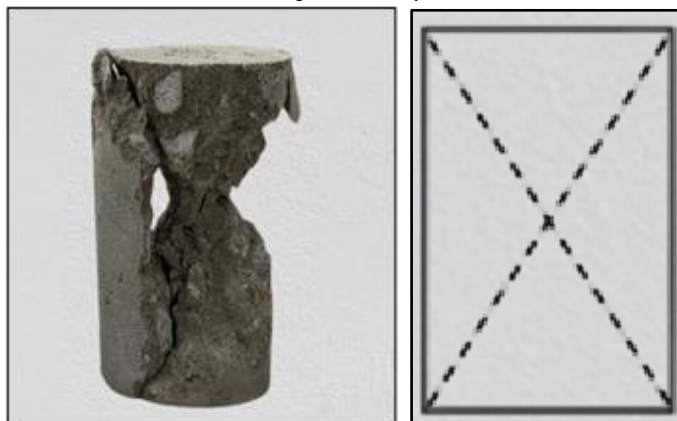
Lima Pinto (2025) mostrou que as argamassas com substituição de 10% e 20% de cimento por cinzas de RSS apresentaram resistência média à compressão de 18,0 MPa e 18,9 MPa, respectivamente; valores próximos ao traço de referência (20,7 MPa), evidenciando que essas proporções podem ser incorporadas sem comprometer

significativamente o desempenho mecânico. No entanto, o aumento do teor de cinzas para 30% resultou em queda acentuada da resistência média, para 11,4 MPa, indicando redução expressiva da capacidade de carga. Para autora, a diminuição está associada ao aumento da superfície específica do material, que demanda maior quantidade de aglomerante para o adequado envolvimento das partículas.

Com relação ao tipo de ruptura, foi realizada uma análise visual dos CP que obtiveram os melhores desempenhos no ensaio de resistência à compressão para cada traço avaliado. A interpretação das fraturas foi conduzida conforme os critérios da NBR 5739 (ABNT, 2018), que classifica os tipos de ruptura de A a G, sendo A, B e C considerados desejáveis, por indicarem adequada aplicação da carga e correto contato entre o corpo de prova e as placas da prensa, enquanto os tipos D, E, F e G sinalizam possíveis irregularidades na preparação, nivelamento ou execução do ensaio.

No concreto de referência (REF), o corpo de prova CP5 apresentou a maior resistência à compressão, alcançando 22,14 MPa, valor superior ao limite mínimo estabelecido para concretos estruturais. A ruptura observada foi classificada como Tipo A, caracterizada pela formação de fissuras diagonais, desprendimento das camadas laterais externas e deformação em forma de ampulheta, conforme ilustrado na Figura 16. Esse comportamento indica uma distribuição uniforme das tensões compressivas ao longo da superfície de contato com a prensa, o que favoreceu a ocorrência de planos de cisalhamento bem definidos, seguindo o padrão de deformação típico associado ao Coeficiente de Poisson.

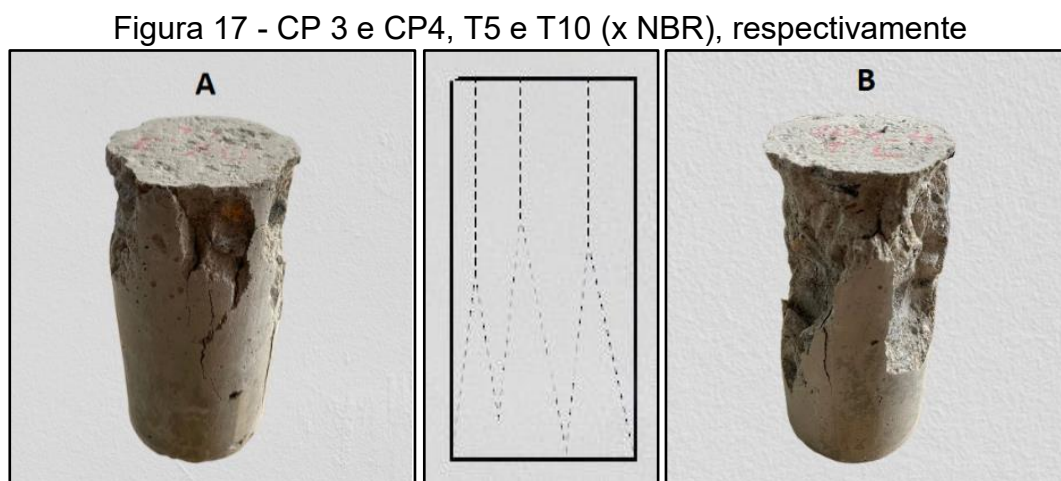
Figura 16 — CP 5 do traço REF (0% de CIRSS x NBR)



Fonte: Autor (2025).

Na dosagem contendo 5% de CIRSS, o corpo de prova CP3 apresentou resistência à compressão de 21,19 MPa, valor que representa um acréscimo de 5,95% em relação ao limite mínimo estabelecido. Esse resultado indica que pequenas substituições do cimento por CIRSS podem não comprometer significativamente o desempenho mecânico do concreto. Por outro lado, na dosagem com 10% de CIRSS, o corpo de prova CP4 atingiu resistência de 17,51 MPa, evidenciando uma redução de 12,45% em relação ao parâmetro de referência do limite mínimo. Esse comportamento sugere que, a partir desse teor de substituição, os efeitos benéficos do preenchimento são superados pela menor disponibilidade de compostos cimentantes ativos, resultando em uma microestrutura mais porosa e menos coesa.

As rupturas observadas em ambos os traços apresentaram características semelhantes, compatíveis com o padrão de fratura Tipo C, caracterizado pela formação de colunas com cones e pela presença de fissuras verticais associadas a trincas diagonais. Esse tipo de ruptura reflete um comportamento mecânico complexo e não simétrico, indicando a ocorrência de tensões internas distribuídas de forma irregular, o que pode estar relacionado à heterogeneidade da mistura e à variação na rigidez local do concreto, conforme ilustrado na Figura 17.



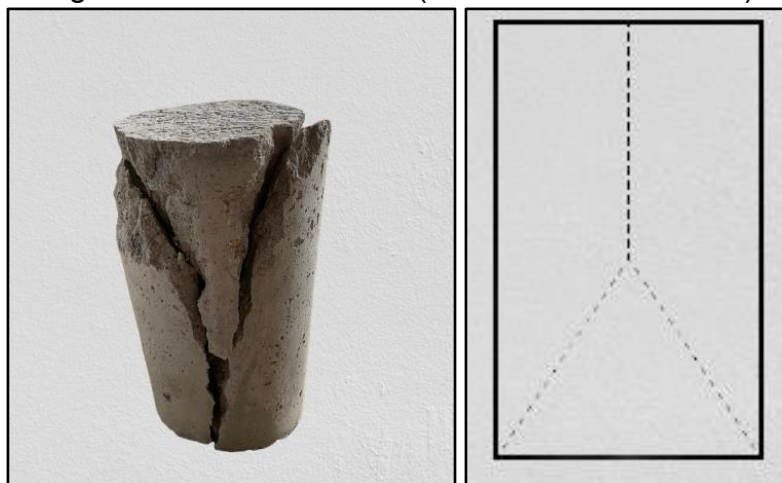
A: 5% de CIRSS; B: 10% de CIRSS
Fonte: Autor (2025).

Na dosagem contendo 15% de CIRSS, o corpo de prova CP1 apresentou resistência à compressão de 12,25 MPa, correspondendo a uma redução de 38,75% em relação ao limite mínimo. Esse resultado evidencia uma queda no desempenho mecânico do concreto, associada à menor quantidade de compostos hidratados

formados e ao aumento da porosidade na matriz cimentícia, decorrente da substituição parcial do cimento por material de menor reatividade. Além disso, a redução na coesão entre a pasta e os agregados pode ter contribuído para a perda de resistência e para a formação de zonas de transição interfaciais mais frágeis.

As fraturas observadas nesse traço apresentaram características compatíveis com o padrão de ruptura Tipo B, caracterizado por uma fratura cônica e bipartida, com separação bem definida das seções superior e inferior do corpo de prova. Esse tipo de ruptura reflete um comportamento predominantemente frágil, indicando que a carga aplicada foi distribuída de maneira concentrada, resultando em falha súbita e pouco deformável, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 — CP 1 do T15 (15% de CIRSS x NBR)

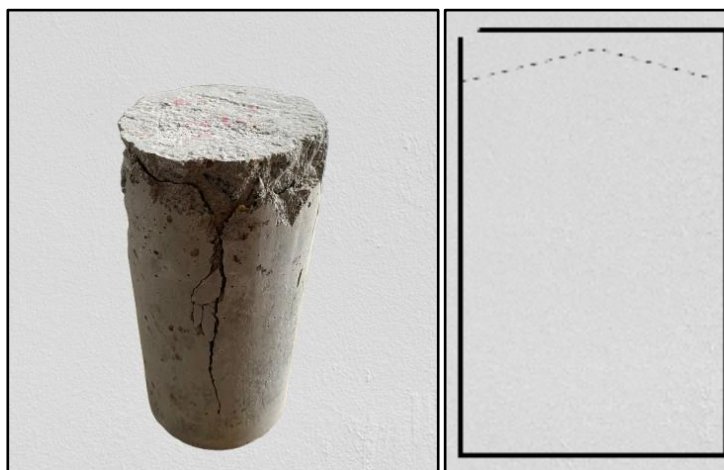


Fonte: Autor (2025).

Na dosagem contendo 20% de CIRSS, o corpo de prova CP4 apresentou resistência à compressão de 10,49 MPa, valor que representa uma redução de 47,55% em relação ao limite mínimo estabelecido. Observou-se uma ruptura, associada ao padrão Tipo G, caracterizado pela concentração de tensões na região superior e pela ocorrência de falha superficial sem propagação significativa ao longo do eixo vertical, conforme ilustrado na Figura 19. A amostra apresentou uma fissura vertical bem definida acompanhada de fragmentação na borda superior, indicando que, nesse teor de substituição, o concreto perdeu a capacidade de redistribuir adequadamente as tensões internas, resultando em um comportamento frágil e de baixa ductilidade.

Por sua vez, esse desempenho inferior pode ser atribuído à redução da quantidade de compostos hidratados de natureza cimentante, ao aumento da porosidade e à formação de zonas de transição mais frágeis entre a pasta e os agregados, decorrentes do elevado teor de substituição.

Figura 19 — CP 4 do T20 (20% de CIRSS x NBR)

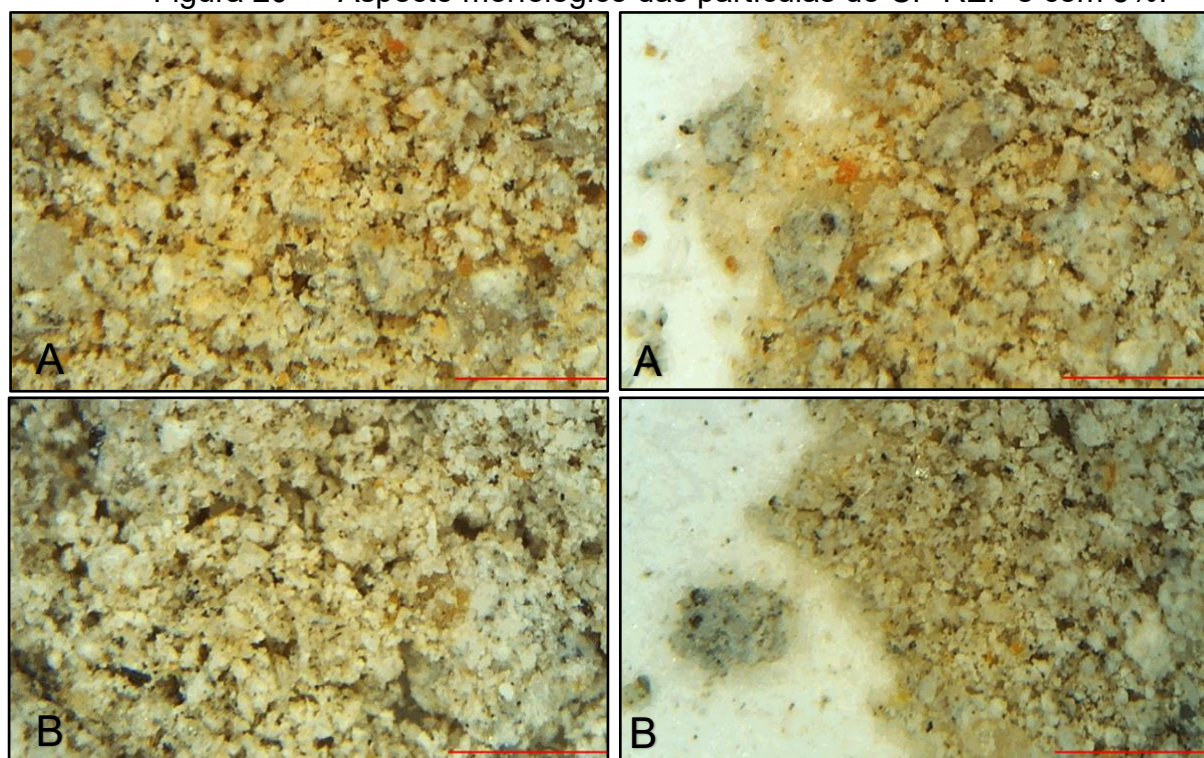


Fonte: Autor (2025).

Cabe destacar que todas as micrografias foram obtidas a partir da fração passante na peneira de 75 μm , analisada em diferentes regiões do campo de observação, conforme descrito na metodologia, de modo a assegurar a representatividade das partículas mais finas presentes nas amostras. Com base nessas análises, observase-se que a evolução das fraturas está relacionada às alterações na coesão e densidade da matriz cimentícia à medida que aumenta o teor de CIRSS.

No concreto de referência (REF), o material fragmentado apresentou partículas compactas, superfície contínua e textura homogênea, características de uma matriz densamente hidratada, evidenciando boa formação dos produtos de hidratação e adequada aderência entre pasta e agregados. Na mistura com 5% de substituição por CIRSS, observou-se partículas uniformes e baixa porosidade, indicando compatibilidade física e química satisfatória entre o cimento e o resíduo. As micrografias correspondentes ao REF e ao traço com 5% de CIRSS, apresentadas na Figura 20, permitem visualizar essas diferenças morfológicas e o comportamento microestrutural decorrente da adição do resíduo.

Figura 20 — Aspecto morfológico das partículas do CP REF e com 5%.



A: CP REF; B: CP 5%. Ampliação: 500x.

Fonte: Autor (2025)

No teor de 10% de CIRSS, começaram a surgir pequenas descontinuidades e microvazios, sugerindo o início da perda de coesão e homogeneidade entre as partículas fragmentadas. Com uma leve redução na densificação da matriz e um discreto aumento da heterogeneidade, possivelmente relacionados à menor eficiência do processo de hidratação e à dispersão limitada das cinzas no meio cimentício, o que compromete a formação uniforme dos produtos hidratados.

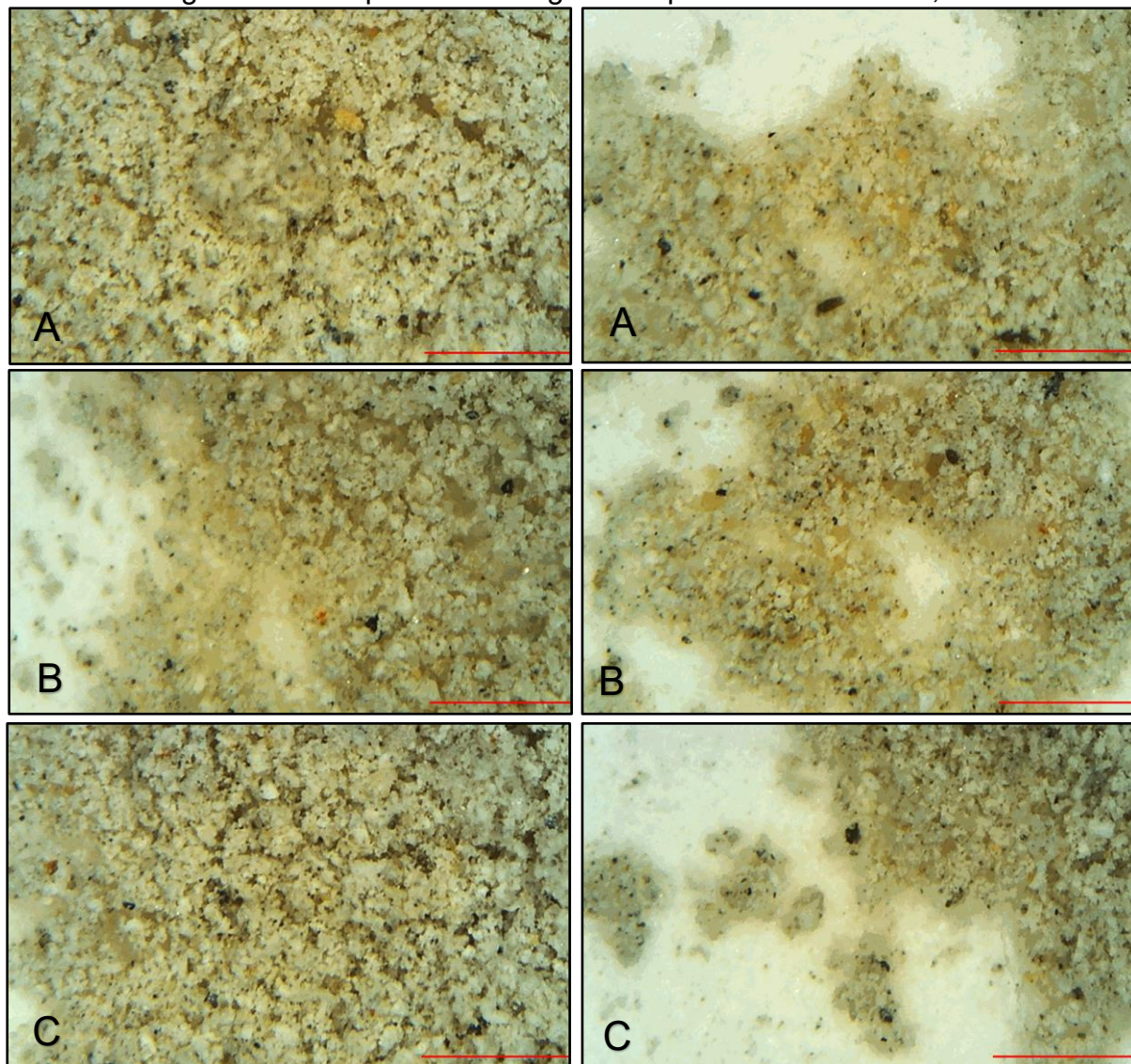
Na amostra com 15% de substituição, as micrografias revelaram uma textura mais frágil e irregular, com acúmulo de partículas inertes que prejudicaram a uniformidade e a coesão interna do material. Esse comportamento indica que, a partir desse teor, o resíduo deixa de atuar como agente de preenchimento. Como consequência, a microestrutura se torna mais porosa e menos compacta, causando a perda de resistência, como observado nos ensaios de compressão.

A amostra correspondente ao teor de 20% de CIRSS apresentou alta porosidade e distribuição desordenada dos grânulos, indicando degradação microestrutural. As partículas inertes atuaram como pontos de concentração de tensões, favorecendo a iniciação e propagação de fissuras e comprometendo de

forma significativa a integridade física da matriz cimentícia. Esses resultados confirmam a influência negativa de teores elevados de substituição sobre a coesão interna do material.

As três análises microestruturais, (teores de 10%, 15% e 20% de CIRSS) estão ilustradas na Figura 21.

Figura 21 — Aspecto morfológico das partículas do CP 10, 15 e 20%.



A: 10%; B: 15%; C: 20%. Ampliação: 500x.

Fonte: Autor (2025)

5.3 Atividade Pozolânica

Os resultados obtidos para as resistências da Argamassa A e da Argamassa B, formulada com substituição por material pozolânico, são apresentados na Tabela 10, juntamente com as médias empregadas no cálculo do índice de desempenho (Icimento).

Tabela 10 – Resistências das argamassas A e B (em MPa)

Corpo de Prova (CP)	Argamassa A	Argamassa B*
01	21,42	15,75
02	24,81	15,35
03	20,73	16,59
04	21,53	16,32
05	20,83	14,47
06	21,16	16,19
Média	21,75	15,78

* Segundo a norma, contém 25% do material estudado.

Fonte: Autor (2025)

Com base nos dados apresentados na Tabela 10, verificou-se que a Argamassa B apresentou resistência média aos 28 dias de 15,78 MPa, equivalente a aproximadamente 72,56% da resistência obtida pela argamassa de referência (21,75 MPa). Esse valor está abaixo do limite mínimo de 90% estabelecido pela NBR 5752:2014, indicando que o material avaliado não atende aos critérios normativos para ser classificado como pozolânico.

O comportamento observado é coerente com resultados apontados na literatura. Andrade (2012) identificou que a cinza proveniente da incineração de RSS apresentava atividade pozolânica limitada, atribuída à elevada heterogeneidade e à presença de fases cristalinas pouco reativas. Pinto (2018) verificou índices de desempenho de 31,37% e Mendonça (2018) encontrou 37,17%; ambos significativamente inferiores ao exigido pela norma. Matalkah (2023) também observou baixa reatividade das cinzas como principal limitante ao seu uso como

adição pozolânica. Biruni *et al.* (2024), que também não alcançaram o índice de desempenho da norma, observaram menor suscetibilidade à umidade e formação de compostos cimentantes secundários.

De forma complementar, Carvalho *et al.* (2022) mostraram que tratamentos térmicos podem elevar a reatividade de tais cinzas, com valores de 25,34% para cinzas pesadas²⁴ e 65,97% para cinzas calcinadas²⁵, embora ainda insuficientes para garantir o atendimento aos requisitos normativos.

Murillo *et al.* (2025) destacam que a pozolanicidade das CIRSS está associada principalmente à presença de sílica amorfa e à maior finura das partículas; características que favorecem a reação com hidróxido de cálcio. Contudo, os autores enfatizam que a composição química dessas cinzas varia significativamente em função da origem, o que influencia diretamente seu desempenho.

Estudos complementares reforçam que a moagem suplementar e a redução da granulometria contribuem para o aumento da atividade pozolânica. Conforme apontado por Juenger e Siddique (2015), esses processos ampliam a superfície específica disponível para reação e, com isso, potencializam o desenvolvimento das propriedades mecânicas.

No presente estudo, outro aspecto relevante se refere ao cimento utilizado. De acordo com a NBR 16697:2018, o CP II-F 32 deve atingir resistência mínima de 32 MPa aos 28 dias; entretanto, os valores registrados se situaram abaixo desse limite. Fatores como pequenas variações na dosagem, na homogeneidade da mistura e nas condições de cura também podem ter contribuído para o desempenho mecânico inferior. Dessa forma, esses aspectos devem ser considerados na interpretação dos efeitos dos diferentes teores de substituição sobre o comportamento das argamassas.

A influência do teor de cinzas também foi destacada por Lima Pinto (2025), que observou que substituições de até 20% mantêm resistências próximas à argamassa de referência (20,7 MPa), enquanto 30% ocasiona queda expressiva (11,4 MPa). Esses resultados reforçam o padrão identificado nesta pesquisa, indicando que teores mais elevados afetam de forma significativa a resistência mecânica.

Além dos efeitos associados às CIRSS, a literatura evidencia fatores granulométricos como determinantes na resistência das argamassas. Souza *et al.*

²⁴ Amostra de cinzas provenientes do fundo do incinerador.

²⁵ Amostra derivada de cinza pesada e submetida à calcinação em forno mufla.

(2013) atribuíram resistências inferiores aos 28 dias ao elevado teor de finos da areia empregada, que compromete a estrutura interna do material. Ribeiro e Sousa (2019) também observaram desempenho reduzido devido à predominância de frações muito finas, destacando que proporções maiores de areia grossa e média tendem a melhorar o empacotamento dos grãos e, conseqüentemente, a capacidade resistente.

Outros estudos, como o de Ramgopal *et al.* (2024), mostram que, embora o aumento do teor de cinzas de RSS reduza a resistência à compressão, as argamassas ainda podem ser aplicáveis em contextos específicos, como tijolos para construções temporárias ou elementos não estruturais, onde a resistência não é o principal parâmetro de projeto.

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar o efeito da substituição parcial do cimento por Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (CIRSS) sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas do Concreto de Cimento Portland (CCP). Após profunda caracterização das cinzas, ensaios de trabalhabilidade, de resistência à compressão e avaliação da atividade pozolânica, foi possível concluir que:

- As CIRSS apresentam altos teores de óxido de cálcio (45,56%), baixos teores de dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido férrico (totalizando 12,87%), sugerindo comportamento mais próximo ao de aglomerante cimentício que ao de material pozolânico convencional;
- A análise por DRX identificou seis fases mineralógicas predominantes: etringita, calcita, anidrita, hidroxiapatita, perovskita e quartzo, sendo que algumas, como a etringita, podem provocar expansão interna e fissuração em compósitos cimentícios sob condições específicas de umidade e temperatura;
- As CIRSS apresentaram superfície granulada e heterogênea, composta por partículas de morfologia irregular e tonalidades variando do bege claro ao acinzentado, predominando grãos angulosos de natureza mineral;
- A disposição aleatória das partículas e a presença de vazios interparticulados indicam baixa densificação natural e elevado potencial de absorção; fatores determinantes para o comportamento físico e para a compactação da matriz cimentícia;
- O *slump test* mostrou que teores baixos de CIRSS (5% à 10%) aumentam a fluidez do concreto, enquanto teores elevados (15% à 20%) reduzem a trabalhabilidade devido à maior absorção de água e porosidade das partículas;
- A resistência à compressão do concreto diminuiu progressivamente com o aumento do teor de CIRSS, evidenciando uma relação inversamente proporcional entre a substituição e o desempenho mecânico;
- A regressão ajustada indicou que a trabalhabilidade do concreto aumenta até cerca de 8,48% de CIRSS substituindo o cimento (ponto de máxima fluidez sem

comprometer a consistência da mistura) e decai acentuadamente para teores superiores;

- A evolução dos tipos de ruptura com o aumento do teor de CIRSS evidenciou uma fragilização progressiva da matriz cimentícia, pois os concretos com menores teores de substituição mantiveram fraturas típicas, com redistribuição de tensões, enquanto teores elevados (T15 e T20) resultaram em rupturas concentradas e fragmentação localizada, indicando perda significativa da resistência estrutural;
- A análise morfológica, da forma avaliada, revelou que o concreto de referência apresentava matriz densa e homogênea, com boa coesão interna. A incorporação de CIRSS até 5% manteve essa integridade estrutural, enquanto teores superiores testados (10% à 20%) causaram desordem na distribuição das partículas, reduzindo a densificação da matriz e comprometendo sua coesão;
- A substituição de 25% do cimento por material pozzolânico reduziu a resistência média das argamassas em relação à referência, resultando em um índice de desempenho de aproximadamente 72,56%; abaixo do limite de 90% exigido para classificação como pozzolânico;
- De forma geral, a incorporação de CIRSS em teores baixos (5% a 8%) apresenta potencial técnico para aplicações estruturais de baixa carga e permite reduzir o teor de cimento Portland, contribuindo para a diminuição da pegada de carbono. Para teores superiores a 10%, a substituição não é recomendada em concretos estruturais devido à fragilização da matriz e à redução da resistência. Os concretos desenvolvidos podem ser empregados em aplicações não estruturais, como pavimentos de passeio, calçadas, blocos de vedação e elementos de paisagismo.

Diante dessas conclusões, sugere-se para pesquisas futuras:

- Analisar o comportamento de concretos e argamassas com CIRSS devidamente ativadas (moagem, calcinação ou adição de ativadores químicos), de modo a potencializar sua atividade pozzolânica e minimizar impactos negativos sobre a trabalhabilidade e a resistência mecânica das misturas;

- Estimar a não emissão de carbono proveniente da produção de concretos com tais cinzas;
- Investigar a possibilidade de lixiviação e/ou solubilização de concretos contendo as CIRSS.

REFERÊNCIAS

- ABABNEH, A. *et al.* Recycling of pre-treated medical waste fly ash in mortar mixtures. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 1, p. 207-220, 2020. DOI: 10.1007/s10163-019-00928-z. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00928-z>.
- ABBÀ, A. *et al.* On the reliability of reusing bottom ash from municipal solid waste incineration as aggregate in concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 58, p. 502–509, 2014.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248:2003** – Agregados — Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 52:2003** – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833:2008** – Concreto fresco — Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 53:2009** – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:2014** – Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953** – Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018** – Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2018** – Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018** – Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2022** – Agregados para concreto — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:2020** – Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16887:2020** – Concreto — Determinação do teor de ar em concreto fresco — Método pressométrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889:2020** – Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:2021** – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915:2021** – Norma sobre amostragem de agregados. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972:2021** – Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:2022** – Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2024** – Resíduos sólidos — Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:2024** – Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:2025** Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2025

ABREU, C. B. **Tratamento hidrometalúrgico do rejeito da rota de processamento de zinco primário para a recuperação de sulfato de cálcio visando aplicação industrial**. 2009. 154 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, 2009.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 116R-00**: Cement and Concrete Terminology. Reaprovado em 2005. Michigan: ACI, 2005.

AGUIAR, B. *et al.* **Utilização de cinzas volantes de incineração de RSU.** In: SEMINÁRIO BETÃO PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL: A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS NÃO CONVENCIONAIS NA PRODUÇÃO DE BETÕES CORRENTES, 1., 2002, Lisboa. Anais. Lisboa: Centro de Congressos de Lisboa, 2002.

AISSA, T. *et al.* Effect of pharmaceutical wastes usage as partial replacement of cement on the durability of high-performance concrete. **Procedia Structural Integrity**, v. 13, p. 218-221, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.036>.

AKYILDIZ, A.; KÖSE, E. T.; YILDIZ, A. Compressive strength and heavy metal leaching of concrete containing medical waste incineration ash. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 326-332, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817301952>. Acesso em: 09 mar. 2025.

ALBERT, C. *et al.* **Avaliação de métodos para preparo de superfície de corpos de prova prismáticos de argamassa submetidos a ensaio de compressão axial.** *Evaluation of methods for surface preparation of mortar prismatic specimens subjected to axial compression test.* 2019.

AL BIRUNI, M. T. *et al.* Sustainable use of medical waste incineration fly ash in compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 452, p. 138886, 2024.

ALENCAR, V. L. L. **Caracterização geotécnica de solo estabilizado com cimento e cinzas de resíduos sólidos da saúde.** 2022. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

AL-RAWAS, A. A. *et al.* Use of incinerator ash as a replacement for cement and sand in cement mortars. **Building and Environment**, v. 40, n. 9, p. 1261-1266, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.10.009>.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção.** São Paulo: Pini, v. 16, 2012.

ANAND, M.; CHANDRA, S. An experimental study and analysis on partial replacement of cement with hospital waste ash in concrete. **Journal of Engineering Sciences**, v. 10, n. 12, p. 1249-1259, dez. 2019. ISSN 0377-9254. DOI: 10.15433/JES.2021.V10I12.43P.156.

ANDRADE, C. E. S. **Análise e caracterização de cinzas do processo de incineração de resíduos de serviço de saúde para reaproveitamento.** 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução nº 222, de 28 de março de 2018. Dispõe sobre o regulamento técnico para o gerenciamento de

resíduos de serviços de saúde. **Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, nº 61, 29 mar. 2018.**

ASTM – ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C 617** – Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken: ASTM, 2011.

AZEVEDO, A. G. de S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 64, p. 388-396, 2018.

AZNI, I. *et al.* Stabilization and utilization of hospital waste as road and asphalt aggregate. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 7, p. 33-37, 2005.

BASTO, P. E. A. **Determinação da pozolanicidade por condutividade elétrica do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) para adição ao cimento Portland.** [s. l.], p. 1–100, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29683>

BASTOS, J. B. S. *et al.* **Caracterização física e química das cinzas de fundo de um incinerador de resíduos sólidos perigosos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 31., 2021, Curitiba. Anais. Curitiba: ABES, 2021.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção.** 6. ed. Coordenação João Fernandes Dias. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BEZERRA, A. C. S. **Influência das variáveis de ensaio nos resultados de resistência à compressão de concretos: uma análise experimental e computacional.** 2007. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

BRAGA, S. M. **Estudo do comportamento de concretos com diferentes teores de resíduos de fresado de pavimentos asfálticos.** 2024. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010, p. 3.** (Publicação Original).

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 12390-3:2002** – Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens. Londres: BSI, 2002.

CALADO, C. *et al.* **Estudo para uso do resíduo do bioetanol celulósico adicionado ao cimento em argamassas de concreto.** In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, 3., 2018, Coimbra. Anais. Coimbra. 2018. p. 1-12.

CALIXTO FILHO, N. **Influência do tipo de preparação das bases de corpos de prova de concreto utilizando placas de neoprene e retificação no ensaio de resistência à compressão**. 2022. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Unidade Delmiro Gouveia, Campus do Sertão, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2024.

CAPRARO, D. F. A. *et al.* Avaliação experimental e numérica da influência da forma e dimensão de corpos de prova de argamassa em ensaios de compressão. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, p. 429-444, 2019.

CARASEK, H. *et al.* Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, v. 64, p. 288-300, 2018.

CARDOZO, B. C.; MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A. Análise do monitoramento ambiental da incineração de resíduos sólidos urbanos na Europa e a necessidade de alterações na legislação brasileira. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, p. 123-131, 2021.

CARVALHO, J. L. V. de *et al.* **Caracterização físico-química de cinzas de resíduos perigosos para uso na construção civil**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 27, n. 4, p. e20220139, 2022.

CHIES, J. A. **Corpos-de-prova submetidos à compressão: influência do tipo de preparação das faces para diferentes níveis de resistência do concreto**. 2011. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

COBO, M. *et al.* Characterization of fly ash from a hazardous waste incinerator in Medellín, Colombia. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, n. 2-3, p. 1223-1232, 2009.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 316, de 29 de outubro de 2002**. Estabelece critérios e procedimentos para a classificação de resíduos sólidos quanto ao seu potencial de periculosidade. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, nº 224, p. 92-95, 20 nov. 2002.

CORDEIRO, G. C. *et al.* Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 5, p. 529-534, 2011.

CORREIA, J. A. **Utilização de cinzas de resíduos sólidos perigosos na produção de pisos intertravados de concreto**. 2022. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2022.

COUTINHO, N. C.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização e incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 62, n. 363, p. 249-255, 2016.

COUTO, A. F. do. **Uma introdução sobre os efeitos do Coeficiente de Poisson Negativo e conceitos de desenvolvimento para estruturas têxteis auxéticas**. 2022. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2022.

DA CUNHA, A. I. T. **Estudo da possibilidade de utilização de resíduos em materiais cimentícios**. 2013. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Porto, 2013.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and applications**. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2008.

DA SILVA, D. L. *et al.* Considerações sobre a formação de etringita tardia (DEF). **Construindo**, v. 9, p. 36-46, 2017.

DA SILVA, R. M. B.; SILVA, F. M. Adição de cinzas em concreto. **Multidebates**, v. 6, n. 2, p. 57-65, 2022.

DE CASTRO, A. L.; LIBÓRIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, v. 57, p. 10-21, 2011a.

DE CASTRO, A. L.; LIBÓRIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil: revisão. **Cerâmica**, v. 57, p. 63–75, 2011b.

DOBISZEWSKA, M. *et al.* Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: An alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. **Journal of Building Engineering**, v. 69, p. 106180, 2023.

DNER. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093/94** – Método de ensaio para determinação da densidade real dos solos. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 2, p. 121-127, 2010.

DUARTE, T. J. S. **Técnicas de microscopia aplicadas a materiais de base cimentícia**. 2010. 226 f. : il. Color. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Mestrado em Engenharia Civil — Especialização em Materiais e Processos de Construção, Porto, 2010. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/583044>. Acesso em: 25 out. 2025.

DYER, P. P. O. L. *et al.* **O emprego de resíduos de areia de fundição (RAF) em concreto asfáltico: uma alternativa para a sustentabilidade na pavimentação**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 26, n. 1, p. e12952, 2021. Disponível

em: <https://www.scielo.br/j/materia/a/ZDwPR4ZJDy5KBgWhFgX8rCK>. Acesso em: 13 maio 2025.

EKINCI, E. *et al.* Historiography, current practice and future perspectives: a critical review of geopolymer binders. **Sustainability**, v. 17, n. 20, p. 9204, 2025.

ELINWA, A. U. **Hospital ash waste-ordinary Portland cement concrete**. Science Research, v. 4, n. 3, p. 72-78, 2016.

FERNANDES, I. V. **Avaliação da pozolanicidade do lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes da indústria têxtil para uso como material cimentício suplementar**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/49625>. Acesso em: 3 abr. 2025.

GENAZZINI, C. *et al.* Hospital waste ashes in Portland cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, p. 1643-1650, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603001091>. Acesso em: 4 jan. 2025.

GLANVILLE, W. H.; COLLINS, A. R.; MATTHEWS, D. D. **The grading of aggregates and workability of concrete**. London: Road Research Technical, 1947.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. 2009. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. DOI: 10.11606/T.44.2009.tde-23072009-144653. Acesso em: 20 abr. 2025.

GUEDES, P. H. F. **Análise da viabilidade técnica do uso de resíduos sólidos em concreto**. 2020. 51 f. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2020.

HASANBEIGI, A.; MENKE, C.; PRICE, L. The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 15, p. 1509-1518, 2010. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.06.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610002179>. Acesso em: 16 mar. 2025

HASHIMOTO, S.; TANIKAWA, H.; MORIGUCHI, Y. Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? – A material flow analysis of construction minerals for Japan. **Waste Management**, v. 27, n. 12, p. 1725-1738, 2007.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland: cap. 29**. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2010.

HONEST, A. *et al.* Assessment of the heavy metal levels in the incinerator's bottom ash from different hospitals in Dar es Salaam. **African Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, n. 11, p. 347-360, 2020.

IQBAL, M. S. *et al.* Experimental analysis of concrete with partial cement replacement using incinerated hospital waste ash. **Budownictwo i Architektura**, v. 23, n. 3, p. 115-127, 2024.

JAMELLODIN, Z. *et al.* Evaluation of fresh and hardened concrete properties incorporating glass waste as partial replacement of fine aggregate. **Sustainability**, v. 14, n. 23, p. 15895, 2022.

JERÔNIMO, V. L. *et al.* Análise da influência da regularização dos topos de corpos de prova cilíndricos sobre a resistência à compressão do concreto. In: **53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 53., 2011, Florianópolis, SC. Anais. Florianópolis: IBRACON, p. 1-16, 2011.

JUCÁ, J. F. T. *et al.* **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Recife: CCS Gráfica Editora Ltda, 2014.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 71–80, 2015.

KANNAN, V.; RAJA PRIYA, P. Evaluation of the permeability of high strength concrete using metakaolin and wood ash as partial replacement for cement. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 1, p. 90, 2021.

KATARE, K. N.; SAMAIYA, N. K.; IYERMURTHY, Y. Strength and durability properties of concrete using incinerated biomedical waste ash. **Environmental Engineering Research**, v. 28, n. 2, p. 220024, 2022.

KAUR, H.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, A. Influence of incinerated biomedical waste ash on the properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 428-441, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819319105>. Acesso em: 4 jan. 2025.

KRÜGER, P. **Efeito de diferentes teores de resíduo de gesso sobre o ataque interno por sulfato em argamassas incorporando agregados reciclados de concreto (ARC) ou misto (ARM)**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2021.

KUMAR, U.; SRIVASTAVA, V.; SINGH, A. K. Suitability of biomedical waste ash in concrete. **International Journal of Engineering and Technical Research**, v. 5, n. 2, p. 2454-4698, 2016.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados para a Construção Civil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral (CNPIM), 2011.

LAVADO, J. *et al.* Fresh properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117322, 2020.

LEGRAND, C. **Estudio reológico y mecánico del concreto fresco**. Caracas: Asociación Venezolana de Productores de Cementos, 1975. p. 95–115.

LIMA, S. F. *et al.* **Concreto e suas inovações**. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS, v. 1, n. 1, p. 31–40, 2014. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/1285>. Acesso em: 19 out. 2024.

LIMA PINTO, T. O. **Resistência à compressão de argamassas contendo cinzas de incineração de resíduos sólidos perigosos**. 2025. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2025.

LINO, T. L. L. **A incineração de resíduos sólidos perigosos em Fortaleza: um estudo de caracterização da composição das cinzas**. 2022. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2022.

LIU, Y. *et al.* Alkali-treated incineration bottom ash as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 371–378, 2018.

LUZ, L. A. **Viabilidade do uso de resíduo de EVA na produção de blocos de alvenaria com finalidade não estrutural**. 2015. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

MADIRISHA, M. M.; DADA, O. R.; IKOTUN, B. D. Chemical fundamentals of geopolymers in sustainable construction. **Materials Today Sustainability**, v. 27, p. 100842, 2024.

MAIA, J. V. R. *et al.* Avaliação da proporção de cimento/agregado em misturas cimentícias para impressão 3D. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 10, p. e8836–e8836, 2024.

MANJUNATH, B. *et al.* Exploring the potential use of incinerated biomedical waste ash as an eco-friendly solution in concrete composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 387, p. 131595, 2023.

MARQUES, M. D. **Um estudo sobre as dimensões que contribuem para a adoção da construção civil sustentável**. 2025. 133 f. Tese (Doutorado em Agronegócio e Desenvolvimento) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Tupã, 2024.

MASSAZZA, F. Pozzolanic cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 15, n. 4, p. 185-214, 1993.

MATALKAH, F. Recycling of hazardous medical waste ash toward cleaner utilization in concrete mixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 400, p. 136736, 2023.

MATSIMBE, J. *et al.* Durability properties of ambient-cured fly ash-phosphogypsum blended geopolymer mortar in terms of water absorption, porosity, and sulfate resistance. **Discover Sustainability**, v. 5, n. 1, p. 330, 2024.

MATHYE, R. P.; IKOTUN, B. D.; FANOURAKIS, G. C. The effect of dry wastewater sludge as sand replacement on concrete strengths. **Materials Today: Proceedings**, v. 38, p. 975-981, 2021.

MAVROPOULOS, E. **A hidroxiapatita como absorvedor de metais**. 1999. 105 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais**. 2. ed. São Paulo: PINI Ltda, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. ISBN 978-85-985762-13.

MEMON, S. A.; SHEIKH, M. A.; PARACHA, M. B. Utilization of hospital waste ash in concrete. **Mehran University Research Journal of Engineering & Technology**, v. 32, n. 1, p. 1-8, 2013.

MENDONÇA, F. L. **Caracterização das cinzas de incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde para inserção em ciclos produtivos e ambientais**. 2018. 27 f. Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

MOJAPELO, K. S. *et al.* Utilization of wastewater sludge for lightweight concrete and the use of wastewater as curing medium. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00667, 2021.

MOURA, M. C. C. **Avaliação do comportamento das cinzas da incineração de resíduos sólidos perigosos no tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. 2023. 98 f. : il. color. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2023.

MURILLO, M. *et al.* Valorization of medical waste in cement-based construction materials: a systematic review. **Buildings**, v. 15, n. 10, p. 1643, 2025.

NAKANISHI, E. Y. **Cinza residual da queima de biomassa do capim elefante (*Pennisetum purpureum*) como material pozolânico substituto do cimento Portland**. 2013. 112 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de

Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2013.

NATARAJA, M. C. *et al.* Self-compacting concrete incorporating incinerated biomedical waste ash: a performance assessment. **Journal of Engineering and Applied Science**, v. 70, n. 1, p. 22, 2023.

NAWY, E. G. **Fundamentals of high-performance concrete**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NZIHOU, A.; FLAMANT, G.; STANMORE, B. Synthetic fuels from biomass using concentrated solar energy – a review. **Energy**, v. 42, n. 1, p. 121-131, 2012.

NODEHI, M.; TAGHVAEE, V. M. Alkali-activated materials and geopolymer: a review of common precursors and activators addressing circular economy. **Circular Economy and Sustainability**, v. 2, n. 1, p. 165-196, 2022.

OLIVEIRA, S. M. **Estudo da Permeabilidade das Cinzas da Incineração de Resíduos Perigosos à Água e aos Lixiviados de Aterro Sanitário**. 2025. 76 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2025

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 21 jul. 2025.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Desempenho de betões com substituição parcial de 20% de cimento Portland por resíduos cerâmicos moídos. **Betão**, Lisboa, v. 27, nov. 2011. Lisboa: Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto (APEB), 2011.

PALMA FILHO, N. B. **Caracterização da superfície (10-14) da calcita por espectroscopia vibracional não linear**. 2022. Dissertação (Mestrado em Física Biomolecular) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

PATRA, S.; WHAUNG, S. T.; KWAN, W. L. Analysis of heavy metals in incineration bottom ash in Singapore and potential impact of pre-sorting on ash quality. **Energy Procedia**, v. 143, p. 454-459, 2017.

PINTO, B. H. A. **Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde**. 2018. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40449>. Acesso em: 01 set. 2024.

PONTES, K. H. M. **Incorporação de resíduos de vidro moído em argamassas: uma alternativa às cinzas volantes?** 2023. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade do Minho, Portugal, 2023.

RAJ, S.; SINGH, H.; BHATTACHARYA, J. Treatment of textile industry wastewater based on coagulation-flocculation aided sedimentation followed by adsorption: Process studies in an industrial ecology concept. **Science of The Total Environment**, v. 857, p. 159464, 2023.

RAJOR, A.; KUNAL, G. Bio-medical waste incinerator ash: A review with special focus on its characterization, utilization and leachate analysis. **International Journal of Geology**, v. 1, p. 2277-2081, 2011.

RAMGOPAL, L. *et al.* An investigation of the bio-medical waste ash on cement mortar bricks. **Materials Today: Proceedings**, v. 103, p. 463-468, 2024.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: estudo de caso.** 2008. 177 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008.

RIBEIRO, C. C. B.; SOUSA, J. G. G. **Modelagem estatística de misturas de argamassa com areia normal brasileira.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 61., 2019, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: IBRACON, 2019.

RIBEIRO, C. C. R.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil.** 4. ed. rev. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013.

RIBEIRO, D. V. *et al.* **Princípios da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos.** 1. ed. Curitiba: Appris, 2021.

RIBEIRO, J. A.; SILVA, A. C.; SCHONS, E. Agregados miúdos não convencionais como alternativa na composição do concreto. **Revista Foco**, v. 16, n. 12, p. e3716-e3716, 2023.

RITCHIE, A. G. B. The triaxial testing of fresh concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 14, n. 40, p. 37–42, mar. 1962.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. F. C.; SANTO, B. C. do E. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, p. 1-10, 2011.

SANTANA, M. R. O. de *et al.* Modelos de regressão aplicados na caracterização de argamassas leves contendo agregados não convencionais de EVA e fibras de piaçava. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, p. e12168, 2018.

SANTOS, Murilo Ferreira Marques dos. **Avaliação de jazidas brasileiras de quartzo mais adequadas para uso em sílica vítrea**. 2014. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2014.

SATHVIK, S. *et al.* Partial replacement of biomedical waste ash in concrete. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, v. 8, n. 64, p. 854-857, 2019.

SCHOVANZ, D. *et al.* **Estudo da formação da etringita tardia (DEF) por meio do ensaio SDT (Stiffness Damage Test)**. Anais do 62º Congresso Brasileiro do Concreto, 2021. DOI: 10.4322/2175-8182.62CBC037.

SILVA, D. D. C. **Materiais de construção civil: dosagem do concreto - uma abordagem prática**. Curitiba: CRV, 2019. 86 p.

SILVA, H. M. R. D. *et al.* **Desenvolvimento e estudo de ligantes modificados inovadores para infraestruturas de transporte**. In: CONGRESSO LUSO-MOÇAMBICANO DE ENGENHARIA, 7., 2014. Anais [...]. [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 978-989-98832-0-8.

SILVA, K. D. S. *et al.* Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de concreto sustentável. **Revista Diálogos: Economia e Sociedade**, v. 2, n. 1, p. 176-190, 2018. ISSN 2594-4320.

SILVA, M. L.; LANGE, L. C. Caracterização das cinzas de incineração de resíduos industriais e de serviços de saúde. **Química Nova**, v. 31, p. 199-203, 2008.

SINGH, A. *et al.* Sustainable use of different size fractions of municipal solid waste incinerator bottom ash and recycled fine aggregates in cement mortar. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01434, 2022.

SOARES, A. B. **Estudo da resistência de concretos com diferentes teores de cinzas da incineração de resíduos sólidos perigosos**. 2025. 102 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2025

SOBRAL, H. S. **Propriedades do concreto fresco**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000.

SOUZA, L. M. C. **Estudo das matérias-primas utilizadas na construção dos conjuntos habitacionais localizados na cidade de Campina Grande**. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2013. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/2597>.

SOUZA, G. G. **Influência dos procedimentos de ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos no controle de qualidade do concreto**. 2006. 116 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SURESH KUMAR, A. *et al.* Reduction of hazardous incinerated bio-medical waste ash and its environmental strain by utilizing in green concrete. **Water Science and Technology**, v. 84, n. 10-11, p. 2780-2792, 2021. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/84/10-11/2780/82748/Reduction-of-hazardous-incinerated-bio-medical>. Acesso em: 18 mar. 2025.

TANG, P.; FLOREA, M. V. A.; BROUWERS, H. J. H. Employing cold bonded pelletization to produce lightweight aggregates from incineration fine bottom ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1371-1384, 2017.

TEIXEIRA, E. R.; CAMÕES, A.; BRANCO, F. G. **Avaliação do potencial do uso de cinzas volantes de biomassa na produção de betões**. In: CONGRESSO NACIONAL REABILITAR & BETÃO ESTRUTURAL, 2020, Lisboa. Anais. Lisboa: LNEC, 2021. p. 227–236

TORRES, A. F.; ROSMAN, C. E. **Método para dosagem racional do concreto**. São Paulo: ABCP, 1956.

TUSHAR, Q. *et al.* **Carbon footprint and uncertainties of geopolymer concrete production: a comprehensive life cycle assessment (LCA)**. C, v. 11, n. 3, p. 55, 2025.

VALDERRAMA, C. P.; TORRES AGREDO, J.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. A high unburned carbon fly ash concrete's performance characteristics. **Ingeniería e Investigación**, v. 31, n. 1, p. 39-46, 2011. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092011000100004&script=sci_arttext&lng=en. Acesso em: 09 nov. 2025.

VENTURA, A. C. F. C. **Síntese das ferritas com características potenciais para aplicação em cátodos de SOFC**. 2013.

VERMA, S. K.; KUMAR, V. Investigation on utilization of medical waste ash in concrete. **Work**, v. 60, p. 80, 2024.

VITOR, I. M. *et al.* Analise das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido com a adição de fibras de aço. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 28236-28249, 2021.

WONG, L. S. Durability performance of geopolymer concrete: a review. **Polymers**, v. 14, n. 5, p. 868, 2022.

ZAGO, S. de C. **Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de agregados de escória de aciaria LD**. 2019. Tese (Doutorado em Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de Engenharia

de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019. DOI: 10.11606/T.97.2019.tde-01102019-160407. Acesso em: 14 abr. 2025.

ZEYAD, A. M. Sustainable concrete production: incorporating recycled wastewater as a green building material. **Construction and Building Materials**, v. 407, p. 133522, 2023.

APÊNDICE A — METODOLOGIA PARA DOSAGEM RACIONAL DO CONCRETO CONVENCIONAL DE REFERÊNCIA

A.1 – Dados do Concreto

Parâmetro	Valor	Unidade	Observação
Resistência característica (fck28)	20	MPa	Classe C20
Resistência média estimada (fcm28)	26,6	MPa	
Desvio padrão (sd)	4	MPa	Condição A
Abatimento	70 ± 10	mm	Classe C20 S50
Grupo	I	–	

A.2 – Dados dos Agregados

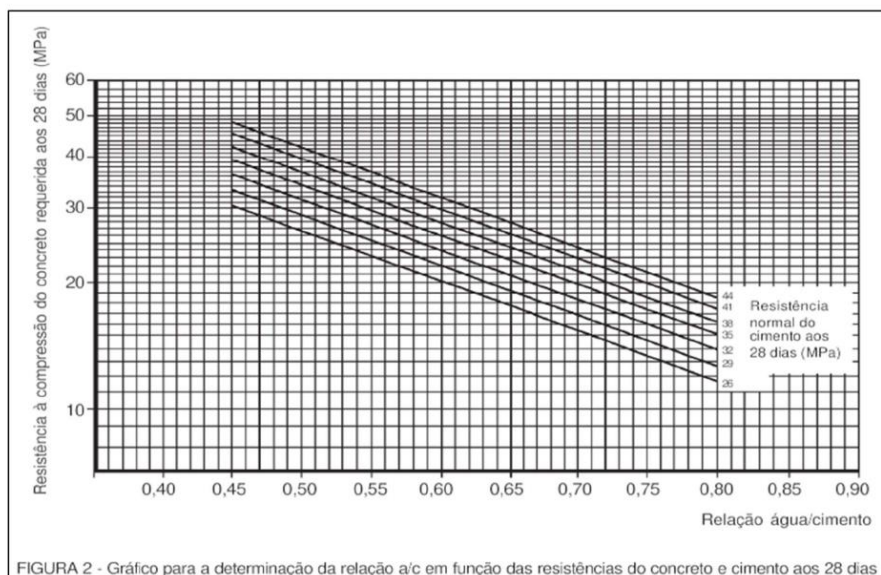
Propriedade	Areia	Brita 1	Unidade
Módulo de finura	2,53	–	–
Massa unitária	1500	1560	kg/m³
Massa específica	2486	2611	kg/m³
Diâmetro máximo (Dmáx)	–	25	mm

A.3 – Dados do Cimento

Propriedade	Valor	Unidade
Tipo	CP II	–
Classe	32	–
Resistência aos 28 dias	32	MPa
Massa específica	3100	kg/m³

A.4 – Fixação da Relação Água/Cimento (a/c)

Parâmetro	Valor	Unidade	Observação
Resistência normal do cimento	32	MPa	
Resistência requerida do concreto	26,6	MPa	
Fator a/c	0,57	–	Obtido pela curva de Abrams (Figura 2)



A.5 – Determinação do Consumo de Água (Ca)

Parâmetro	Valor	Unidade	Observação
Abatimento	70 ± 10	mm	
Diâmetro máximo	25	mm	
Consumo de água (Ca)	195	L/m³	Obtido a partir do Quadro 2

QUADRO 2 - Consumo de água aproximado (L/m³)					
Abatimento do tronco de cone (mm)	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

A.6 – Determinação do Consumo de Cimento (Cc)

Parâmetro	Valor	Unidade	Cálculo
Ca	195	L/m³	
Fator a/c	0,57	–	
Consumo de cimento	342	kg/m³	$Cc = Ca / a/c$

A.7 – Determinação do Consumo de Agregado Graúdo (Cb)

Parâmetro	Valor	Unidade	Observação
Módulo de finura	2,53	–	
Diâmetro máximo	25	mm	
Volume (Vc)	0,715	m³	Obtido do Quadro 3
Massa específica (Mc)	1560	kg/m³	Brita 1
Consumo (Cb)	1115	kg/m³	$Cb = Vc \times Mc$

QUADRO 3 - Volume compactado seco (V_c) de agregado graúdo por m^3 de concreto

MF	$D_{max} (mm)$				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

QUADRO 4 - Proporcionamento de britas

Britas utilizadas	Proporção
B0, B1	30% B0 e 70% B1
B1, B2	50% B1 e 50% B2
B2, B3	50% B2 e 50% B3
B3, B4	50% B3 e 50% B4

A massa unitária das britas assim composta (Quadro 4) tendem a aumentar com D_{max} . Quando não for possível sua determinação, adotar o valor aproximado de 1500 kg/m^3 .

A.8 – Determinação do Consumo de Agregado Miúdo (Cm)

Parâmetro	Valor	Unidade	Observação
Consumo de cimento (Cc)	342	kg/m^3	
Consumo de brita (Cb)	1115	kg/m^3	
Consumo de água (Ca)	195	L/m^3	
Massa específica do cimento	3100	kg/m^3	
Massa específica da	2611	kg/m^3	

brita			
Massa específica da água	1000	kg/m ³	
Massa específica da areia	2486	kg/m ³	
Volume de areia (Va)	0,2676	m ³	$V_a = 1 - ((C_c/M_{Ec}) + (C_b/M_{Eb}) + (C_a/M_{Ea}))$
Consumo de areia (Cm)	665	kg/m ³	$C_m = M_{Ea} \times V_a$

A.9 – Traço em Massa do Concreto

Material	Proporção em relação ao cimento
Cimento	1
Agregado miúdo (Cm)	1,94
Agregado graúdo (Cb)	3,26
Fator a/c	0,57

ANEXO A — RESULTADOS DO FRX - LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS – UFCA

14-Oct-2024 08:56:44

Page 1

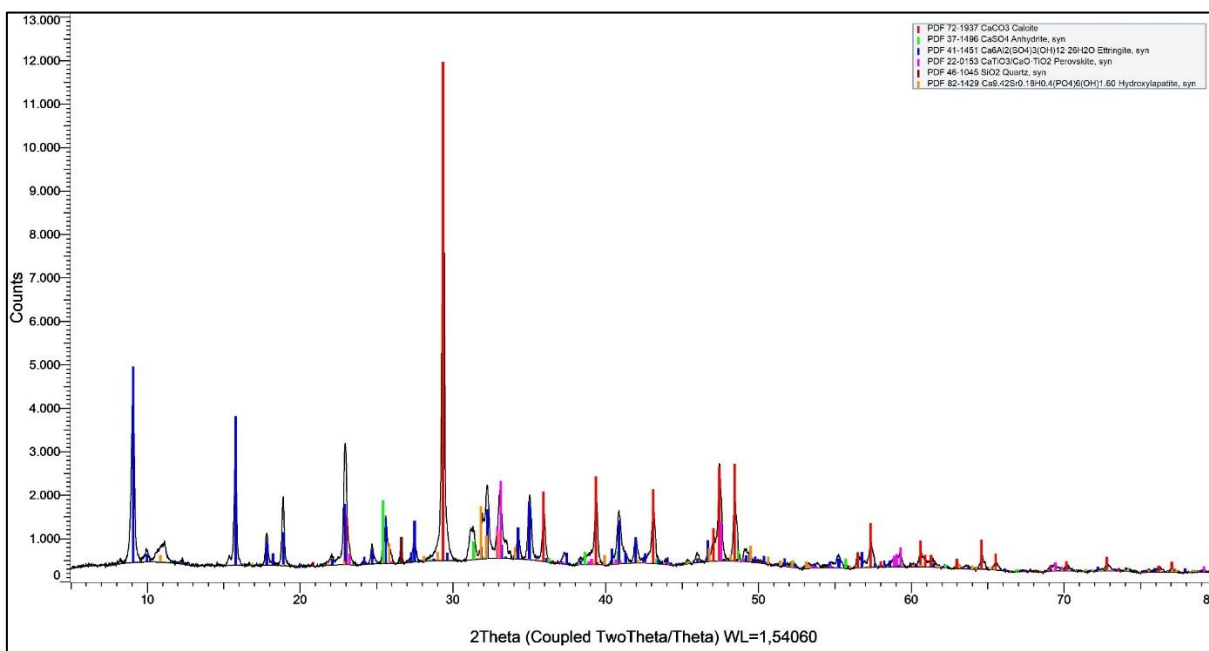
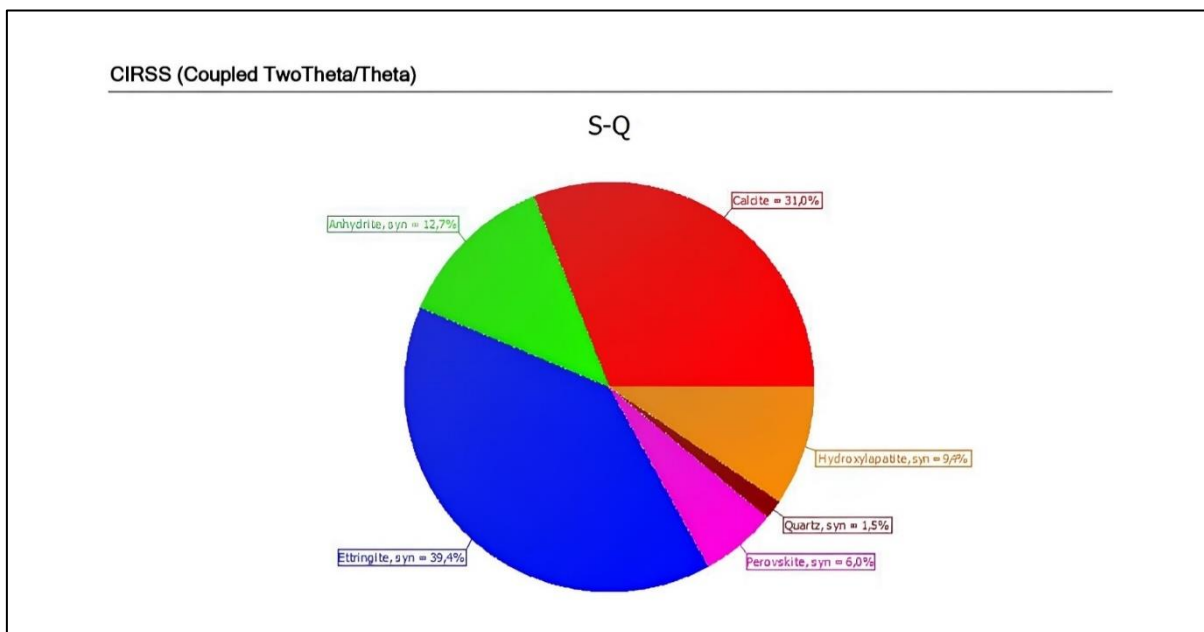
Sample results

Sample ident											
IFCE											

Application	<Omnian>
Sequence	1 of 1
Position	Large sample
Measurement time	10-Oct-2024 16:16:09

Compound	Al2O3	SiO2	SO3	Cl	K2O	CaO	Cr2O3	Fe2O3	CuO	ZnO
Conc	4.470	6.619	6.468	1.444	0.120	42.563	0.109	1.775	0.149	0.750
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

ANEXO B — LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DOS AGLOMERANTES – UFPE



ANEXO C — BOLETIM COMERCIAL: CERTIFICADO DE QUALIDADE DO
CIMENTO PORTLAND COMPOSTO - COMPANHIA INDUSTRIAL DE CIMENTO
APODI



Certificado de Qualidade

Cimento Portland Composto
Companhia Industrial de Cimento Apodi
Unidade Quixeré



CP II F-32

DEZEMBRO/2024

NF nº

ENSAIOS QUÍMICOS

ENSAIO	NBR Nº	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697
Perda ao Fogo - PF	17086-6	%	9,67	≤ 12,5
Óxido de Magnésio - MgO	14656	%	3,56	Não Aplicável
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	14656	%	2,92	≤ 4,5
Resíduo Insolúvel - RI	17086-4	%	2,22	≤ 7,5

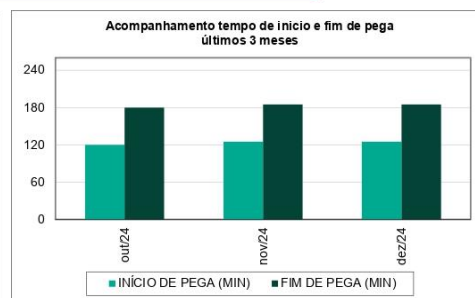
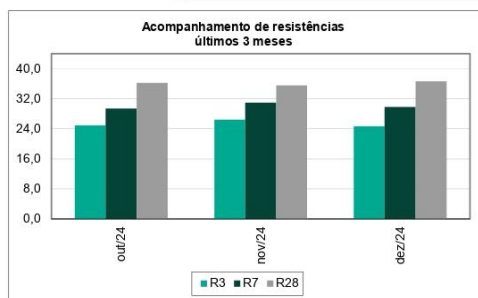
ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

ENSAIO	NBR Nº	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697
Área Específica (Blaine)	16372	cm ² /g	4473	Não Aplicável
Massa Específica	16605	g/cm ³	3,01	Não Aplicável
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200)	11579	%	2,3	≤ 12,0
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325)	12826	%	12,1	Não Aplicável
Início de Pega	16607	min	125	≥ 60
Fim de Pega	16607	min	185	≤ 600
Expansibilidade de Le Chatelier - A Quente	11582	mm	0,00	≤ 5,0

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) - NBR 7215

IDADE (DIAS)	MÉDIA	ESPECIFICAÇÕES NORMA NBR 16697
3	24,7	≥ 10,0 MPa
7	29,8	≥ 20,0 MPa
28	36,6	≥ 32,0 MPa

ESTABILIDADE DE PARÂMETROS DE QUALIDADE: RESISTÊNCIA E PEGA



OBSERVAÇÕES

- As resistências aos 28 dias referem-se ao mês anterior.
- Cimento granel: a validade do cimento é de 90 dias após a data do carregamento, as informações de data de carregamento e massa líquida do cimento entregue constam na NF que acompanha este boletim.
- Cimento ensacado: data fabricação impressa na sacaria.

Francisco Robson dos Santos
Responsável Técnico

Angelo Giuseppe Durand Gomes
Gerente de Fábrica

Atualizado em: 27/12/2024