



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

ALESSANDRA BASTOS SOARES

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES DE
CINZAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS**

FORTALEZA
2025

ALESSANDRA BASTOS SOARES

ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES DE
CINZAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS

Dissertação apresentada ao Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial 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)

S676e Soares, Alessandra Bastos Soares.

ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES DE CINZAS
DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS / Alessandra Bastos Soares
Soares. - 2025.

105 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão
Ambiental, Campus Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos.

1. Incineração. 2. Resíduos Sólidos Perigosos. 3. Cinzas. 4. Concretos. I. Título.

CDD 628

ALESSANDRA BASTOS SOARES

ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES DE
CINZAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS

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

Área de Concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovado (a) em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos (Orientador)

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

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Membro Externo)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Sergio dos Santos (Membro Externo)

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

Dedico esse trabalho a Meu Deus, aos meus antepassados, a minha amada Mãe Fatima, ao meu companheiro Renato e a todos professores, colegas, amigos que colaboraram para que tudo acontecesse.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida e pelo livre arbítrio que me permitiu fazer minhas escolhas.

À minha querida e amada mãe, amiga incondicional.

Ao meu companheiro, que, mesmo sem compreender totalmente, me ajudou dentro de suas possibilidades.

Ao meu estimado orientador

Aos professores e à coordenação do mestrado

Aos bolsistas do Laboratório de Materiais de Construção do IFCE

A Funcap que disponibilizou bolsa para ajuda financeira e dedicação na pesquisa

Aos professores do DET da UFC

A todos que, gentilmente, dedicaram seu tempo para colaborar com esta pesquisa.

*As minhas obras, não sou eu que realiza,
mas a força de Deus-pai que permeia o
Céu e a terra.*

Masaharu Tanigushi

RESUMO

O crescimento econômico e a intensificação da geração de resíduos sólidos perigosos impõem desafios ambientais e sanitários significativos. Nesse contexto, a presente pesquisa avaliou o aproveitamento de cinzas oriundas da incineração desses resíduos como substituto parcial do agregado miúdo em Concretos de Cimento Portland (CCP), buscando alternativas sustentáveis e alinhadas à Política Nacional de Resíduos Sólidos. A caracterização prévia das cinzas apresentou elevado teor de óxido de cálcio, ferro, titânio e enxofre. Foram moldados e curados corpos de prova de referência e com diferentes teores de substituição de areia por cinzas (5, 10, 15, 20 e 25%). Os resultados mostraram que as substituições inferiores a 15% mantiveram a resistência à compressão acima de 20 MPa, mínimo exigido para concretos estruturais, sendo tais resultados inéditos e positivos. Observou-se redução da trabalhabilidade e o encurtamento do tempo de pega com aumento da substituição, resultando em concretos mais secos e firmes. Os achados reforçam a viabilidade técnica da incorporação de tais cinzas em concretos, promovendo o reaproveitamento desse tipo de resíduo e contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil.

Palavras-chave: Incineração, Resíduos Sólidos Perigosos, Cinzas, Concretos.

ABSTRACT

Economic growth and the intensification of hazardous solid waste generation pose significant environmental and public health challenges. In this context, the present study evaluated the use of ash derived from the incineration of such waste as a partial replacement for fine aggregate in Portland Cement Concrete (PCC), seeking sustainable alternatives aligned with the National Solid Waste Policy. Preliminary characterization of the ashes revealed a high content of calcium oxide, iron, titanium, and sulfur. Reference test specimens and others with different sand-to-ash replacement levels (5%, 10%, 15%, 20%, and 25%) were molded and cured. The results showed that replacements below 15% maintained compressive strength above 20 MPa, the minimum required for structural concrete, representing novel and positive findings. A reduction in workability and a shortening of setting time were observed with increasing ash content, resulting in drier and firmer concretes. The findings reinforce the technical feasibility of incorporating such ash into concrete, promoting the reuse of this type of waste and contributing to more sustainable practices in the construction industry.

.

Keywords: Incineration, Hazardous Solid Waste, Ash, Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de ruptura em corpos de prova de concreto.....	38
Figura 2 - Visão geral do incinerador de Fortaleza-CE.....	42
Figura 3 - Vista geral do RSS e das cinzas no incinerador de Fortaleza-CE.....	42
Figura 4 - Materiais utilizados na pesquisa.....	44
Figura 5 - Exemplos dos corpos de prova elaborados na pesquisa.....	45
Figura 6 - Ensaio de rompimento do corpo de prova aos 28 dias.....	46
Figura 7 - Partes dos equipamentos e materiais utilizados.....	47
Figura 8 - Curva granulométrica dos agregados miúdos utilizados.....	48
Figura 9 - Curva granulométrica da brita utilizada.....	52
Figura 10 - Imagem da CIRSP estudada via microscopia eletrônica.....	54
Figura 11 - Espectro obtido por EDS da amostra de CIRSP.....	54
Figura 12 - Resistência à compressão (MPa) dos concretos estudados.....	58
Figura 13 - Rompimento do CP 3 do concreto de referência (0% de CIRSP).....	61
Figura 14 - Rompimento do CP 9 do concreto com 5% de CIRSP.....	61
Figura 15 - Rompimento dos CP's do concreto com 10, 15 e 20% de CIRSP.....	62
Figura 16 - Rompimento do CP 9 do concreto com 25% de CIRSP.....	63
Figura 17 - Valores do Slump Test no concreto com e sem CIRSP.....	64
Figura 18 - Imagens do Slump Test.....	65
Figura 19 - Concreto em desagregação na betoneira com 20% e 25% de CIRSP...	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de análises, parâmetros e ensaios realizados.....	45
Tabela 2 - Descrição das preparações do concreto com e sem CIRSP.....	46
Tabela 3 - Distribuição dos insumos nas dosagens estudadas.....	47
Tabela 4 - Composição granulométrica dos agregados miúdos utilizados.....	48
Tabela 5 - Outras características físicas dos agregados miúdos.....	49
Tabela 6 - Características físicas das cinzas na literatura.....	51
Tabela 7 - Classificação da brita.....	52
Tabela 8 - Características físicas da brita.....	53
Tabela 9 - Composição química elementar da CIRSP estudada x literatura local....	55
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão.....	57
Tabela 11 - Percentual de CP's com resistência à compressão acima de 20MPa....	59

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONCLA	Comissão Nacional de Classificação
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
CTRP	Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
POFA	Palm Oil Fuel Ash
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RC	Resistência à Compressão
RDC	Resolução da diretoria colegiada
RHA	Rice Husk Ash
RSI	Resíduos Sólidos Industrias
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SCBA	Sugarcane Bagasse Ash
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
OMS	Organização Mundial da Saúde
WWA	Cinza de Resíduos de Madeira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Considerações Gerais.....	15
1.2 Justificativa.....	17
2.0 Objetivos.....	19
2.1 Geral.....	19
2.2 Específicos.....	19
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	20
3.1 Os Resíduos Sólidos Perigosos - RSP.....	20
3.2 Os Resíduos de Serviços de Saúde (RSS)	22
3.3 Os Resíduos da Indústria.....	23
3.4 A Incineração de Resíduos Perigosos.....	25
3.5 As Cinzas da Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU.....	27
3.6 As Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde - RSS.....	29
3.6.1 Alternativas de Aproveitamento.....	31
3.7 O Concreto de Cimento Portland (CCP)	33
3.7.1 Considerações Gerais.....	33
3.7.2 Agregados para a Produção de Concreto.....	35
3.7.3 Propriedades no Estado Fresco.....	35
3.7.4 Propriedades no Estado Endurecido.....	36
3.7.5 Moldagem e Ruptura dos Corpos de Prova.....	37
3.8 Concretos com Agregados Alternativos.....	39
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	42
4.1 Considerações Gerais.....	42
4.2 Materiais Utilizados.....	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
5.1 Resistência à Compressão.....	57
5.2 Trabalhabilidade do Concreto.....	64
5.3 Tempo de Pega.....	68
6 CONCLUSÕES.....	70
7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	72

REFERÊNCIAS.....	73
Apêndice A - Cálculo do Traço.....	83
Apêndice B - Quantidade de Insumos por m ³	87
Apêndice C - Análise Granulométrica por Peneiramento (Cinza Catada).....	88
Apêndice D - Análise Granulométrica por Peneiramento (Cinza Britada).....	89
Apêndice E - Análise Granulométrica por Peneiramento, Areia.....	90
Apêndice F - Análise Granulométrica por Peneiramento, Brita.....	91
Apêndice G - Cálculo do Módulo de Finura e Dimensão Máxima, Cinza Catada.....	92
Apêndice H - Cálculo do Módulo de Finura e Dimensão Máxima, Cinza Britada.....	93
Apêndice I - Cálculo do Módulo de Finura e Dimensão Máxima, Areia.....	94
Apêndice J - Cálculo do Módulo de Finura e Dimensão Máxima, Brita.....	95
Apêndice L - Gráficos da Caracterização.....	96
Apêndice M - Densidade Real Cinzas e Areia.....	97
Apêndice N - Massa Unitária, Massa Específica, Absorção, Material Pulverulento.....	98
Apêndice O - Traço para Resistência de 20 Mpa - Branco.....	99
Apêndice P - Traço para Resistência de 20 Mpa com substituição de 5%.....	100
Apêndice Q - Traço para Resistência de 20 Mpa com substituição de 10%.....	101
Apêndice R - Traço para Resistência de 20 Mpa com substituição de 15%.....	102
Apêndice S - Traço para Resistência de 20 Mpa com substituição de 20%.....	103
Apêndice T - Traço para Resistência de 20 Mpa com substituição de 55%.....	104
Apêndice U - Análise Química da CIRSP pelo Método EDS.....	105

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O desenvolvimento econômico e social resulta no aumento do consumo de recursos naturais e na crescente geração de resíduos sólidos de diversos tipos. Essa realidade traz consigo desafios significativos, acarretando riscos sanitários, ambientais e econômicos (PINTO, 2018).

No âmbito nacional, estão sendo estudadas e aplicadas várias alternativas para tratar e dispor adequadamente os resíduos sólidos, com destaque para a reciclagem, destinada à fração inorgânica; a compostagem, utilizada para tratar a fração orgânica; a incineração, pirólise ou microondas, aplicadas em sua maioria aos resíduos de serviços de saúde; e o aterramento sanitário, utilizado para as sobras dos processos supracitados e demais resíduos (SANTOS, 2008).

Pela Norma Brasileira - NBR nº10004/2004, os resíduos sólidos são classificados como perigosos (Classe I), não inertes (Classe IIA) e inertes (Classe IIB) e pela Lei nº12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, os resíduos tem por origem os domicílios, a limpeza urbana, os estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, os serviços públicos de saneamento básico, a construção civil, as atividades agrossilvopastoris, os serviços de transportes, a mineração, as indústrias e os serviços de saúde (tanto humana quanto animal).

Uma parte dos resíduos gerados nas indústrias e nos serviços de saúde são Classe I (perigosos) em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade e por apresentarem significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental.

Nesse contexto, a PNRS objetiva (Artigo 7º, V) a redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos; tem por instrumento (Artigo 8º, XV) o cadastro nacional de operadores de resíduos perigosos; prevê (Artigo 37) que a instalação e o funcionamento de empreendimento ou atividade que gere ou opere com resíduos perigosos somente seja autorizada ou licenciada pelas autoridades competentes se o responsável comprovar, no mínimo, capacidade técnica e econômica, além de condições para prover os cuidados necessários ao gerenciamento desses resíduos.

No Brasil, a principal normativa sobre Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) é a Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº222/2018, onde constam a classificação em 05 grupos: A (biológicos), B (químicos), C (radioativos), D (comum) e E (perfurocortantes). Sobre resíduos industriais, tem-se a Resolução Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA nº313/2002 e a Norma Regulamentadora 25.

Moura (2023), no que diz respeito ao tratamento dos Resíduos Sólidos Perigosos (RSP), cita o uso da incineração, autoclave, microondas e aterros industriais (que representam as alternativas mais caras), a blendagem e o coprocessamento em fornos de cimenteiras (que são formas de aproveitamento desses resíduos como insumos) e o envio para aterros sanitários Classe IIA ou outras disposições sobre o solo (com diversos riscos ambientais e sociais).

Em Fortaleza-CE, os geradores de RSP (independente do volume) são obrigados a assumir todos os custos pelos serviços de manejo, conforme a Lei Municipal nº10.340/2015 (FORTALEZA, 2015). Em geral, esses geradores enviam seus RSP para o Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos - CTRP, localizado no bairro Passaré, Fortaleza-CE.

No CTRP existem dois equipamentos: um incinerador e um autoclave. Por rotina, alguns resíduos são apenas incinerados, outros autoclavados e outros passam pelos dois processos. A incineração, tema dessa dissertação, resulta na geração de cinzas (que são enviadas para o Aterro Sanitário Metropolitano), gases (que são tratados antes de serem lançados na atmosfera) e calor (que é aproveitado no aquecimento da autoclave do CTRP).

A incineração é um processo de queima controlada dos resíduos sob altas temperaturas, reduzindo drasticamente o peso, o volume e os riscos sanitários e ambientais dos resíduos enquanto a autoclavagem é um processo de esterilização a vapor que promove apenas a desinfecção.

A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA 316/2002 classifica as cinzas e escórias provenientes do processo de tratamento térmico, para fins de disposição final, como resíduo perigoso, mas admite sua classificação como não perigoso se o operador do equipamento comprovar sua inertização junto ao órgão ambiental competente.

Os estudos locais sobre tais cinzas têm avançado nos últimos anos (BASTOS *et al.*, 2021; LINO, 2022; CORREIA, 2022; MOURA, 2023) e essa pesquisa, a partir

desse histórico, visa contribuir com o crescimento desse tema à medida que avaliou sua incorporação em concretos, substituindo a areia (um agregado natural caro, proveniente de áreas cada vez mais distantes e legalmente protegidas).

1.2 Justificativa

Em várias partes do mundo, vem crescendo a tentativa de aumentar a valorização das cinzas provenientes da incineração de resíduos perigosos e reduzir seu envio aos aterros sanitários.

Alguns estudos têm investigado sua aplicabilidade na construção de pavimentos e base de estradas (Patra; Whaung; Kwan, 2017), na produção de cimento (Clavier *et al.*, 2020), na incorporação em argamassas normais e adesivas (Aguiar *et al.*, 2002), em cerâmicas vermelhas (Coutinho; Vieira, 2016), em misturas asfálticas (Zhu *et al.*, 2018a), mas pouco se sabe sobre o comportamento dessas cinzas como agregado em concreto, ou seja, substituindo a areia.

Conforme Braga (2024) a produção de concretos exerce grande pressão sobre o meio ambiente a medida em que demanda agregados naturais (como a areia), água e cimento em sua composição tradicional. Ainda segundo o autor, cresce o esforço de torná-lo mais sustentável com a incorporação de materiais alternativos.

A incorporação das cinzas na construção civil pode evitar danos ambientais, desperdício de materiais e reduzir a pressão sobre a exploração de jazidas naturais. Nesse sentido, além de atender a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), o aproveitamento dessa cinza é um indicador alinhado com o previsto no conceito de desenvolvimento sustentável.

Considerando a tendência de crescimento na geração de cinzas da incineração de resíduos, a literatura local, a necessidade de se pesquisar as possibilidades de reaproveitamento e valorização desse material, a importância de se reduzir sua destinação ao aterro sanitário e a busca por soluções inovadoras e sustentáveis na gestão de resíduos, decidiu-se analisar o efeito da adição das cinzas provenientes da incineração de resíduos perigosos sobre as propriedades físicas e mecânicas do Concreto de Cimento Portland (CCP).

Conforme Oliveira *et al.* (2021) a reutilização adequada dos resíduos, perpassa pelo conhecimento técnico das propriedades e testes que comprovem segurança e

atendam as legislações vigentes, evitando aplicações que venham impactar a saúde e ao meio ambiente da sociedade.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar o efeito da adição das Cinzas da Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos (CIRSP) sobre as propriedades físicas e mecânicas de Concretos de Cimento Portland (CCP)

2.2 Específicos

Determinar, em laboratório, algumas características físicas e mecânicas das CIRSP;

Moldar e ensaiar corpos de prova com (e sem) CIRSP incorporados ao concreto sob diferentes teores (5, 10, 15, 20 e 25%) em substituição ao agregado natural miúdo/areia;

Avaliar o comportamento físico-mecânico dos diferentes corpos de prova;

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

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Os Resíduos Sólidos Perigosos - RSP

A mais recente publicação da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA (2023) aponta que 63,8 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) foram coletadas no Brasil em 2022¹ e, desse total, 61% foi encaminhado para aterros sanitários e 39% foi destinado a áreas de disposição inadequada, distribuídas por todas as regiões do país.

No Brasil, o conceito mais recente de resíduo sólido está na Lei Federal nº12.305/2010:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Na referida Lei, os resíduos podem ser classificados quanto à origem e quanto à periculosidade. No que diz respeito à origem, os resíduos podem ser domiciliares, de limpeza urbana, sólidos urbanos, de estabelecimentos comerciais, de serviços públicos de saneamento básico, industriais, de saúde, da construção civil, agrossilvopastoris, de transporte e de mineração. Quanto à periculosidade, os resíduos são classificados em Classe I (Perigosos), Classe IIA (Não Inertes) e Classe II B (Inertes).

Entende-se por resíduo perigoso aquele que possui uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade, mutagenicidade (BRASIL, 2010).

Nesse contexto, um dos objetivos da Lei Federal nº12.305/2010 é a redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos (Artigo 7º, V), um dos seus instrumentos é o Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos (Artigo 8º,

¹Essa estimativa considerou a massa total declarada por 5.060 municípios, que representam 90,8% dos municípios brasileiros e 96,8% da população total.

XV), uma das suas exigências é que os geradores desse tipo de resíduo elaborem planos de gerenciamento (Artigo 20, II, a).

Além desses aspectos, a referida Lei prevê que a instalação e o funcionamento de empreendimento ou atividade que gere ou opere com resíduos perigosos somente podem ser autorizadas ou licenciadas pelas autoridades competentes se o responsável comprovar, no mínimo, capacidade técnica e econômica, além de condições para prover os cuidados necessários ao gerenciamento desses resíduos (Artigo 37).

O Artigo 40 da referida Lei prevê ainda que no licenciamento ambiental de empreendimentos ou atividades que operem com resíduos perigosos, o órgão licenciador do Sistema Nacional de Meio Ambiente - SISNAMA pode exigir a contratação de seguro de responsabilidade civil por danos causados ao meio ambiente ou à saúde pública, observadas as regras sobre cobertura e os limites máximos de contratação fixados em regulamento.

No Brasil existe ainda a NBR nº12.235/1992, que fixa as condições exigíveis para o armazenamento de resíduos sólidos perigosos de forma a proteger a saúde pública e o meio ambiente.

Pela Norma, o acondicionamento de resíduos perigosos, como forma temporária de espera para reciclagem, recuperação, tratamento e/ou disposição final, pode ser realizado em contêineres, tambores, tanques e/ou a granel, e nenhum resíduo perigoso pode ser armazenado sem análise prévia de suas propriedades físicas e químicas, uma vez que disso depende a sua caracterização como perigoso ou não, e o seu armazenamento adequado.

Conforme o item 4.2.2 da referida Norma, o local de armazenamento deve possuir um plano de amostragem de resíduos que tenha: a) os parâmetros que são analisados em cada resíduo, justificando-se cada um; b) os métodos de amostragem utilizados; c) os métodos de análise e ensaios a serem utilizados; d) a frequência de análise; e) as características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, bem como as propriedades que os caracterizam como tais; f) a incompatibilidade com outros resíduos.

Os resíduos perigosos podem ser gerados em vários locais, principalmente nos serviços destinados à saúde (humana e animal) e na indústria.

3.2 Os Resíduos de Serviços de Saúde (RSS)

No Brasil, a resolução mais recente sobre RSS é a RDC 222/2018, que regulamenta as boas práticas de gerenciamento e dá outras providências. Nela, são considerados geradores de RSS todos os serviços cujas atividades estejam relacionadas com a atenção à saúde humana ou animal, inclusive os serviços de assistência domiciliar; laboratórios analíticos de produtos para saúde; necrotérios, funerárias e serviços onde se realizem atividades de embalsamamento (tanatopraxia e somatoconservação); serviços de medicina legal; drogarias e farmácias, inclusive as de manipulação; estabelecimentos de ensino e pesquisa na área de saúde; centros de controle de zoonoses; distribuidores de produtos farmacêuticos, importadores, distribuidores de materiais e controles para diagnóstico *in vitro*; unidades móveis de atendimento à saúde; serviços de acupuntura; serviços de *piercing* e tatuagem, salões de beleza e estética, dentre outros afins.

Os RSS são classificados em 05 grupos:

Grupo A: resíduos com a possível presença de agentes biológicos que, por suas características, podem apresentar risco de infecção;

Grupo B: resíduos contendo produtos químicos que podem apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente, dependendo de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade;

Grupo C: rejeitos radioativos;

Grupo D: resíduos que não apresentam risco biológico, químico ou radiológico à saúde ou ao meio ambiente, podendo ser equiparados aos resíduos domiciliares;

Grupo E: resíduos perfurocortantes ou escarificantes, tais como: lâminas de barbear, agulhas, escalpes, ampolas de vidro, brocas, limas endodônticas, fios ortodônticos cortados, próteses bucais metálicas inutilizadas, pontas diamantadas, lâminas de bisturi, lancetas, tubos capilares, micropipetas, lâminas e lamínulas, espátulas e todos os utensílios de vidro quebrados no laboratório (BRASIL, 2018).

Conforme a RDC 222/2018, o gerenciamento do RSS deve abranger todas as etapas de planejamento dos recursos físicos, dos recursos materiais e da capacitação dos recursos humanos envolvidos, e todo serviço gerador de RSS deve dispor de Plano de Gerenciamento observando as regulamentações federais, estaduais, municipais ou do Distrito Federal.

O Artigo 6º da RDC 222/2018 prevê que o gerador de RSS deve:

I – estimar a quantidade dos RSS gerados por grupos;

II - descrever os procedimentos relacionados ao gerenciamento dos RSS quanto à geração, à segregação, ao acondicionamento, à identificação, à coleta, ao armazenamento, ao transporte, ao tratamento e à disposição final ambientalmente adequada;

III - estar em conformidade com as ações de proteção à saúde pública, do trabalhador e do meio ambiente;

IV - estar em conformidade com a regulamentação sanitária e ambiental, bem como com as normas de coleta e transporte dos serviços locais de limpeza urbana;

V - quando aplicável, contemplar os procedimentos locais definidos pelo processo de logística reversa para os diversos RSS;

VI - estar em conformidade com as rotinas e processos de higienização e limpeza vigentes no serviço gerador de RSS;

VII - descrever as ações a serem adotadas em situações de emergência e acidentes decorrentes do gerenciamento dos RSS;

VIII - descrever as medidas preventivas e corretivas de controle integrado de vetores e pragas urbanas, incluindo a tecnologia utilizada e a periodicidade de sua implantação;

IX – descrever os programas de capacitação desenvolvidos e implantados pelo serviço gerador abrangendo todas as unidades geradoras de RSS e o setor de limpeza e conservação;

X - apresentar documento comprobatório da capacitação e treinamento dos funcionários envolvidos na prestação de serviço de limpeza e conservação que atuem no serviço, próprios ou terceiros de todas as unidades geradoras;

XI - apresentar cópia do contrato de prestação de serviços e da licença ambiental das empresas prestadoras de serviços para a destinação dos RSS;

XII - apresentar documento comprobatório de operação de venda ou de doação dos RSS destinados à recuperação, à reciclagem, à compostagem e à logística reversa.

3.3 Os Resíduos da Indústria

A Comissão Nacional de Classificação (CONCLA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) subdivide a indústria em duas classes: seção B (indústria extrativista, que contempla as divisões 05 a 09) e seção C (indústria de transformação, que contempla as divisões 10 a 33).

De acordo com a Norma Regulamentadora 25/2022, entendem-se como resíduos industriais aqueles provenientes dos processos industriais, na forma sólida, líquida ou gasosa ou combinação dessas, e que por suas características físicas,

químicas ou microbiológicas não se assemelham aos resíduos domésticos, como cinzas, lodos, óleos, materiais alcalinos ou ácidos, escórias, poeiras, borras, substâncias lixiviadas e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como demais efluentes líquidos e emissões gasosas contaminantes atmosféricos.

Ainda segundo a NR 25:

- i) a organização deve buscar a redução da exposição ocupacional aos resíduos industriais por meio da adoção das melhores práticas tecnológicas e organizacionais disponíveis;
- ii) os resíduos industriais devem ter disposição de acordo com a lei ou regulamento específico, sendo vedado o lançamento ou a liberação no ambiente de trabalho de quaisquer contaminantes advindos desses materiais que possam comprometer a segurança e saúde dos trabalhadores;
- iii) as medidas, métodos, equipamentos ou dispositivos de controle do lançamento ou liberação de contaminantes gasosos, líquidos ou sólidos devem ser submetidos ao exame e à aprovação dos órgãos competentes.
- iv) a organização deve adotar as melhores práticas tecnológicas e organizacionais disponíveis para reduzir a exposição ocupacional a esses resíduos e garantir sua disposição conforme a legislação ou regulamentação específica (BRASIL, 2022).

Além da NR 25, há uma Resolução do CONAMA sobre Resíduos Sólidos Industriais (RSI): a 313/2002. Nela está previsto que as indústrias apresentem aos órgãos ambientais do SISNAMA informações sobre geração, características, armazenamento, transporte e destinação de seus resíduos sólidos (Artigo 4º). Cita no seu Anexo II vários tipos de resíduos perigosos: aparas de couro curtido ao cromo, resíduos de catalizadores, resíduos de laboratórios, solventes contaminados, restos e borras de tintas e pigmentos, lodo de ETE, borra de óleo, borras de tintas e pigmentos, óleo lubrificante entre outros.

Em linhas gerais, os resíduos industriais podem ser tratados por diversos métodos, dependendo de suas características físicas, químicas e biológicas. A literatura (CHEREMISINOFF, 2002; TCHOBANOGLIOUS; KREITH, 2002; METCALF; EDDY, 2003; WANG; HUNG; SHAMMAS, 2004; CHRISTENSEN, 2011) cita o:

- tratamento físico (que inclui processos que alteram a forma física dos resíduos sem modificar sua composição química: sedimentação, filtração, centrifugação e desidratação);

- tratamento químico (que envolve reações químicas para transformar os resíduos em formas menos perigosas: neutralização, oxidação, redução, precipitação, coagulação/floculação e troca iônica);
- tratamento biológico (que utiliza microrganismos para degradar resíduos orgânicos, transformando-os em substâncias menos nocivas: compostagem, biorremediação, digestão anaeróbia e lodos ativados);
- tratamento térmico (que utiliza altas temperaturas para reduzir o volume dos resíduos, destruindo compostos perigosos: incineração, pirólise e plasma térmico);
- tratamento de estabilização e solidificação (método que combina os resíduos com materiais de ligação, como cimento, para criar uma massa sólida que impede a liberação de contaminantes);
- aterros industriais (construídos com sistemas de impermeabilização e monitoramento para garantir a segurança ambiental).

3.4 A Incineração de Resíduos Perigosos

A incineração é um processo que atinge temperaturas superiores a 1000°C e que demanda um alto investimento tanto na sua implantação quanto na operação, além de necessitar de um monitoramento eficaz dos gases emitidos (TAKAYANAGUI, 2005).

Segundo Souza (2009) a incineração é a técnica de tratamento térmico mais amplamente utilizada pelos geradores de Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) devido à sua alta eficiência na inativação biológica e sua capacidade de reduzir significativamente o peso e o volume dos resíduos.

De acordo com Machado (2015) as técnicas de incineração mais utilizadas são a queima em massa ("Mass Burning") e a combustível derivado de resíduos ("Refuse Derived Fuel"). Na primeira, os resíduos são incinerados sem pré-tratamento, exceto pela remoção de partes volumosas. Na segunda, os resíduos passam por um processamento prévio para separar materiais recicláveis e reduzir a heterogeneidade da massa a ser incinerada. Devido à sua simplicidade, a primeira técnica é a mais comum.

Lu *et al.* (2017) estimam que existem 1.179 usinas de incineração em operação no mundo, localizadas principalmente na União Europeia, nos EUA e no Leste Asiático.

Segundo Tabasová (2012) a tecnologia empregada em uma usina de incineração pode variar consideravelmente de acordo com o tipo de resíduo a ser

queimado. Atualmente, existem instalações de incineração de última geração projetadas para lidar com resíduos sólidos urbanos, bem como resíduos perigosos ou industriais. Existem plantas que processam apenas 50 toneladas por dia até aquelas que lidam com 2.000 toneladas diárias (SANTOS, 2016).

Os principais subprodutos da incineração são gases, efluentes, calor e cinzas (de fundo e volantes).

Os gases da incineração, conforme a Agência Ambiental Europeia (2020), possuem dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxidos de enxofre, compostos orgânicos voláteis, dioxinas e furanos, que podem gerar sérios impactos na saúde pública, bem como no meio ambiente, contribuindo para a acidificação de solos e corpos de água, além de intensificar as mudanças climáticas. Para mitigar esses efeitos, as instalações de incineração são equipadas com sistemas avançados de controle da poluição atmosférica, como filtros de mangas, lavadores de gases e sistemas de adsorção por carvão ativado, como também destacaram Santos (2016) e Barros (2012).

No Brasil, a NBR 11.175/90 fixa as condições exigíveis de desempenho para equipamentos de incineração de resíduos sólidos perigosos, citando os padrões de emissão para ácido clorídrico, ácido fluorídrico, monóxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, material particulado total entre outros.

A Agência Ambiental de Portugal (2019) sublinha que a geração de efluentes líquidos decorre da lavagem dos gases resultantes da incineração, portanto são efluentes que podem conter ácidos, metais pesados, sais e compostos orgânicos perigosos. Segundo a Agência, o tratamento adequado destes efluentes requer a utilização de técnicas de precipitação química, filtração e neutralização, antes de serem descartados ou reutilizados.

Sobre tais efluentes, há uma pesquisa em Fortaleza-CE: Da Silva (2017). O autor caracterizou, do ponto de vista físico-químico, os efluentes provenientes da lavagem dos gases da incineração de resíduos sólidos perigosos realizada em um equipamento de grande porte em funcionamento em Fortaleza-CE. Entre os meses abril e setembro de 2016, ele realizou 06 coletas de amostras na entrada e na saída da estação de tratamento de efluentes do referido incinerador. O efluente bruto (entrada) apresentou média de pH (8,0), acidez (8 mg/L), alcalinidade total (128 mg/L), dureza total (2290 mg/L), cloreto (1592 mg/L), DQO (1433 mg/L), sólidos suspensos

totais (610 mg/L), condutividade elétrica (7363 $\mu\text{S}/\text{cm}$), cor (70 uH) e turbidez (69 uT). O autor citou que, dentre os 10 parâmetros analisados, 5 apresentaram redução em suas concentrações após o tratamento em todas as campanhas (sólidos suspensos totais, turbidez, cor verdadeira, demanda química de oxigênio e alcalinidade total). Observou remoção de até 90% para os sólidos suspensos totais (5ª coleta), 81% para a cor verdadeira (4ª coleta), 92% para turbidez (2ª e 3ª coletas), 56% para DQO (4ª coleta) e 68% para alcalinidade total (6ª coleta). Além desses parâmetros, a dureza total também apresentou redução em suas concentrações após tratamento em 5 das 6 campanhas (o valor máximo de remoção foi 53% na 6ª coleta). Concluiu apontando para a eficiência do tratamento.

A incineração também gera cinzas. Segundo a Organização Mundial da Saúde – OMS (2017) estas cinzas podem ser classificadas em volantes e de fundo. Conforme Dourado (2013) as cinzas de fundo se depositam no forno devido ao seu peso e granulometria mais grosseira e as cinzas volantes são formadas por partículas finas que permanecem em suspensão nos gases resultantes da combustão.

As propriedades dessas cinzas são influenciadas por sua origem, pelas características dos resíduos e pelo método de tratamento utilizado (MEMON; SHEIKH; PARACHA, 2013).

3.5 As Cinzas da Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

A produção de cinzas de RSU (BOSIO *et al.*, 2014; RIGHI *et al.*, 2022) vem aumentando anualmente, ampliando a necessidade de estratégias eficazes para o seu descarte e tratamento. Tais autores mencionam que as cinzas contêm concentrações elevadas de cloretos e substâncias tóxicas, tornando essencial o desenvolvimento de métodos que minimizem seus impactos ambientais.

Na literatura (GAO *et al.*, 2024; HONESTO *et al.*, 2020), as cinzas da incineração de resíduos contêm substâncias nocivas como dioxinas e metais pesados.

De acordo com Li *et al.* (2012), as cinzas residuais possuem partículas de maior dimensão, podendo atingir vários centímetros de tamanho, e geralmente estão em quantidade consideravelmente menor que as cinzas volantes. As cinzas volantes são finas e estão relacionadas aos próprios gases emitidos.

Honesto *et al.* (2020) adicionam que as cinzas de fundo apresentam variações em sua forma física, desde uma mistura pulverulenta até um pó homogêneo de fluxo livre, incluindo fragmentos metálicos residuais, carvão ou escória. Eles enfatizam que as cinzas de fundo devem ser homogêneas, quimicamente e biologicamente inertes, além de isentas de materiais orgânicos e com um teor reduzido de carbono.

Na Alemanha, cerca de 100 usinas de incineração de RSU estão em operação, gerando aproximadamente 6 milhões de toneladas de cinzas por ano. Além disso, são produzidas cerca de 640.000 toneladas anuais de cinzas volantes.

Reis-Barros; Lopes (2006) apontam o panorama geral em outros países da Europa: Suécia (produção anual de 340.000 toneladas de cinzas de fundo), Reino Unido (250.000 toneladas/ano), Finlândia (95.000 toneladas/ano), Dinamarca (420.000 toneladas/ano).

Considerando que a composição das cinzas de fundo é semelhante à das matérias primas minerais, elas podem ser reutilizadas como material de construção secundário (SIMON; KALBE, 2023; SINGH *et al.*, 2023).

Para Chimenos *et al.* (1999) as partículas com dimensões superiores a 1 mm predominam nas cinzas do fundo. A fração com tamanhos entre 4 e 25 milímetros representa cerca de 50% do peso total dessas cinzas, onde são encontrados vidros, cerâmicas sintéticas e minerais. Ainda segundo os autores, a composição das cinzas de fundo abrange uma combinação de materiais, incluindo silicatos, fosfatos, sulfatos, carbonatos e cerâmicas, que frequentemente se fragmentam devido ao transporte mecânico e aos choques térmicos no incinerador associados a processos de recuperação de calor e ao peneiramento mecânico na grelha. Nitsh (2014) cita que tais cinzas costumam ser destinadas a aterros sanitários ou reaproveitadas na produção de materiais para construção.

Segundo Eighmy *et al.* (1994) 85% dessas cinzas são constituídas por materiais fundidos durante o processo térmico, enquanto os 15% restantes não foram efetivamente queimados pelo incinerador. Os autores destacam a presença de elementos vítreos residuais e minerais cristalinos formados pela fusão, incluindo espinélios e melilitas. A presença desses dois componentes também foi citada por Wei *et al.* (2011) e Nitsh (2014).

Na literatura há um ponto de convergência: a necessidade de se aplicar tecnologias avançadas para caracterizar de maneira aprofundada a composição

química e estrutural dessas cinzas, além da necessidade de se avaliar os impactos ambientais e as formas de integrá-las em cadeias produtivas, alinhando-se aos princípios da economia circular.

3.6 As Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (RSS)

As pesquisas realizadas por Pinto (2018), Bastos *et al.* (2021), Lino (2022) e Manjunatha *et al.* (2023) fornecem informações abrangentes sobre as propriedades físicas das cinzas de RSS.

Pinto (2018) observou que as cinzas possuem um módulo de finura inferior (1,60) em relação ao da areia (2,32), porém com maior diâmetro máximo (4,8 mm contra 2,4 mm da areia). Na pesquisa do autor, a distribuição granulométrica das cinzas mostrou-se homogênea, com alta proporção de partículas finas (35,33% passando pela peneira de 0,15 mm). Segundo o autor, essa composição favorece o aumento do consumo de água para amassamento, influenciando o desempenho das argamassas. Além disso, ele constatou que as cinzas naturais têm densidade menor que as trituradas devido à menor compactação dos grãos, resultando em argamassas mais leves.

Bastos *et al.* (2021) analisaram cinzas de fundo do incinerador de RSS de Fortaleza-CE, classificando o material como 26% semelhante a pedregulhos, 17% a areia grossa, 17% a areia média, 19% a areia fina e 21% a silte/argila. Em tais cinzas, Lino (2022) observou teor de umidade natural com variância entre 2,14% e 51,75%, ensaio granulométrico com 63,5% de material semelhante à finura da areia, e Proctor Normal com massa específica aparente seca máxima de 1,853 g/cm³ e 23,53% de umidade ótima. Ainda segundo o autor, as cinzas apresentaram na sua composição Óxido de Cálcio (57,41%), Óxido Férrico (16,43%), Dióxido de Titânio (7,88%), Dióxido de Silício (4,47%), Trióxido de Enxofre (4,05%), Óxido de Alumínio (2,78%), Pentóxido de Fósforo (2,56%).

Manjunatha *et al.* (2023) observaram que a densidade específica das cinzas varia de 1,82 a 2,64 kg/m³ com área superficial específica, com temperatura a 1000°C, de 399 a 433 m²/kg, reduzindo para 260 m²/kg a 700°C. Os autores também ressaltaram que as características químicas e mineralógicas das cinzas dependem amplamente de sua origem e processos de formação.

As análises realizadas por Lombardi *et al.* (1998), Cobo *et al.* (2009), Akyıldız; Köse; Yıldız (2017) e Alencar (2022) destacam a diversidade de composições químicas das cinzas provenientes da incineração de RSS, evidenciando sua importância em aplicações cimentícias, químicas e outras áreas.

Segundo Memon; Sheikh; Paracha (2013) as cinzas de RSS são ricas em calcita (CaCO_3) com partículas de formato altamente irregular e tamanho médio inferior a 10 microns. Essa composição influencia diretamente as propriedades do concreto, pois a calcita atua como um *filler* fino, melhorando a compactação da matriz e acelerando a hidratação inicial do cimento, o que pode beneficiar a resistência à compressão nos primeiros dias. No entanto, o formato irregular das partículas aumenta a fricção interna da mistura, reduzindo o abatimento e afetando a trabalhabilidade do concreto.

Moura (2023) identificou 18 componentes químicos nas cinzas da incineração de resíduos de saúde de Fortaleza-CE, com maior relevância para óxido de cálcio (60,06%), dióxido de titânio (7,52%) e trióxido de enxofre (6,95%), reforçando o potencial das cinzas em aplicações químicas e cimentícias. De forma similar, Akyıldız; Köse; Yıldız (2017) detectaram 38,5% de CaO , 7,96% de SiO_2 , 6,9% de Al_2O_3 e 1,09% de Fe_2O_3 em suas amostras. Além disso, a análise por difração de raio X revelou a presença de compostos como halita, maienita, rondorfita, cloreto de titânio e anortita, destacando a complexidade mineralógica dessas cinzas.

Os resultados de Cobo *et al.* (2009) complementam essa análise ao indicar a presença de metais pesados nas cinzas provenientes da incineração de resíduos de serviços de saúde (RSS), incluindo arsênico (As), chumbo (Pb), cádmio (Cd), prata (Ag), ferro (Fe) e zinco (Zn). Essas características químicas acendem alertas sobre os riscos ambientais, ao mesmo tempo que abrem perspectivas para seu aproveitamento em materiais especializados.

Alencar (2022) identificou cálcio (53,80%) e sódio (13,14%) como os principais elementos nas cinzas estudadas, corroborando com Lombardi *et al.* (1998), que, ao analisarem propriedades mecânicas das cinzas de RSS combinadas com cimento, também relataram altos teores de cálcio (60%) e cloro (11,2%) nas amostras.

Elinwa (2016) observou um elevado teor de CaO (47%) nas cinzas de RSS, o que lhes confere propriedades cimentícias. Além disso, elas apresentam concentrações significativas de SiO_2 (20,6%) e Fe_2O_3 (8,06%).

Como se observa, os estudos evidenciam como as cinzas apresentam composições químicas e mineralógicas diversificadas, destacando o papel do cálcio como componente predominante, além da presença de outros elementos que conferem propriedades mecânicas e químicas. Essa variabilidade também sugere a necessidade de estudos adicionais para adaptar o material a usos específicos, maximizando seu desempenho e segurança.

3.6.1 Alternativas de Aproveitamento

Conforme Allegrini *et al.* (2015), o uso de cinzas de RSP provenientes da incineração permite reduzir a demanda por recursos naturais, contribuindo para a proteção ambiental. Essa prática representa uma alternativa sustentável, tanto para reduzir a contaminação relacionada ao descarte de cinzas quanto para promover a sustentabilidade no setor da construção (MANJUNATHA, 2023).

Kaur; Siddique e Rajor (2023) afirmam que as cinzas de RSS podem ser utilizadas como substituto da areia em misturas de concreto, mas o tamanho médio das partículas influencia no processo de dosagem.

De acordo com alguns autores (MEMON; SHEIKH; PARACHA, 2013; MANJUNATHA, 2023) as cinzas de RSS podem ser incorporadas com sucesso em argamassas e concretos, permitindo a substituição parcial do cimento ou da areia. Além disso, seu uso como substituto parcial do cimento pode reduzir o custo do concreto em cerca de 3%, ao mesmo tempo em que contribui para a gestão sustentável desses resíduos, diminuindo a quantidade descartada e minimizando os impactos ambientais (MEMON; SHEIKH; PARACHA, 2013). O percentual ideal para a substituição do cimento é de 5% e de areia pode chegar a uma dosagem entre 5% e 15% para maximizar o desempenho mecânico do concreto (MANJUNATHA, 2023).

Para Elinwa (2016) a ausência de Al_2O_3 (óxido de alumínio) pode influenciar negativamente a reatividade pozolânica das cinzas de RSS, mas o alto teor de CaO permite sua incorporação ao concreto de forma eficiente em níveis de substituição de até 10% de RSS por areia (acima dessa proporção, observa-se redução na resistência à compressão do concreto, especialmente em aplicações expostas a condições de clima quente).

Na visão de Matallaha (2023), antes de serem usadas em aplicações de concreto, as cinzas devem passar por um processo adicional de calcinação e moagem, porque são resíduos tóxicos que contêm concentrações relativamente elevadas de metais pesados. O autor demonstrou que quatro métodos de ativação foram eficazes para aumentar a reatividade das cinzas: moagem a seco, calcinação, moagem úmida e uma combinação de moagem úmida seguida de calcinação. Os corpos de prova de argamassa feitos com cinzas ativadas tiveram melhoria na resistência à compressão e reações pozolânicas mais eficientes. Além disso, a ativação reduziu significativamente a lixiviação de metais pesados como cádmio, cromo, cobre e zinco.

Kaur; Siddique e Rajor (2019) investigaram a influência das cinzas de RSS nas propriedades de resistência e permeabilidade do concreto. Os resultados do estudo experimental indicaram que a incorporação de 5% como substituição parcial da areia melhorou o desempenho em termos de resistência e durabilidade do concreto. No teste de lixiviação, o material se comportou como não perigoso.

Katare; Samaiya; Murthy (2022) observaram que a substituição de 7,5% do cimento por cinzas de RSS melhorou a resistência à compressão em 20%, a resistência à tração em 17% e a resistência à flexão em 14%, em relação à mistura de controle aos 28 dias.

Pinto (2018) identificou que a incorporação de até 20% de cinzas de RSS, tanto na sua forma natural quanto moída, em argamassas, se mostrou um método eficiente para a destinação desse resíduo porque a resistência a compressão aumentou. Acima desse percentual, as misturas apresentaram fissuras e elevada expansão volumétrica, tornando-as inadequadas para aplicações convencionais.

Alencar (2022) observou que a incorporação de até 20% de cinzas de RSS no traço de solo-cimento revelou-se tecnicamente viável para a estabilização de sub-bases e bases de pavimentos. Para o autor, o emprego dessas cinzas como substituto parcial do solo em compósitos de solo-cimento não apenas aumenta a resistência mecânica, mas também diminui a dependência de materiais nobres, proporcionando uma abordagem sustentável para o gerenciamento desses resíduos. Essa prática contribui para a economia de espaço em aterros sanitários, além de promover a redução no consumo de recursos naturais, auxiliando na preservação de materiais para as gerações futuras.

Em Fortaleza, existem duas pesquisas voltadas ao aproveitamento da cinza de RSS: Correia (2022) e Moura (2023). Correia (2022) avaliou o comportamento de pisos intertravados de concreto elaborados com frações desse material. A autora percebeu que a areia, as cinzas e a amostra dos materiais misturados possuíam 11%, 22% e 14% de materiais finos. A densidade real foi de 2,65 para as cinzas, 2,18 para os materiais misturados e 2,67 para o agregado miúdo. Para a areia foi obtida a massa específica aparente seca máxima de 1,884 g/cm³ e 10% de umidade ótima; para as cinzas (1,251 g/cm³ e 33%), para os materiais misturados (1,568 g/cm³ e 20%). A taxa de absorção variou entre 4,8% e 5,9% (amostra sem cinzas) e entre 12,0% e 12,5% (mistura). Sobre o índice de vazios, houve uma variação entre 10,4% e 12,7% (amostra sem cinzas) e entre 21,6% e 22,3% (mistura). No que diz respeito a resistência à compressão, observou-se uma variação entre 5,40 e 6,77 Mpa (sem cinzas) e entre 8,31 e 8,15 Mpa (mistura). De maneira geral, concluiu a autora, observou-se um acréscimo na resistência dos corpos de prova à medida que se acrescentava as cinzas.

Moura (2023), com as mesmas cinzas, em suas caracterizações físicas, observou 20,8% de material semelhante aos pedregulhos, 24,8% semelhante com a areia grossa, 23% (areia média), 13,6% (areia fina), 17,6% do(a)s siltes/argilas, portanto, com dimensão semelhante a areia (61,4%). Diante dessa caracterização, a autora estudou a capacidade desse material como elemento de filtração de lixiviados de aterros sanitários, mostrou maior eficiência nos filtros com a presença de cinzas como elemento filtrante e as maiores reduções para óleos e graxas (92%), sólidos dissolvidos (99,9%) e materiais sedimentáveis (100%).

3.7 O Concreto de Cimento Portland (CCP)

3.7.1 Considerações Gerais

O Concreto de Cimento Portland (CCP) é composto por cimento, água e agregados, podendo também incluir aditivos, pigmentos, fibras e adições minerais (ANDRADE; TIBÉRIO, 2010). A proporção entre esses componentes é cuidadosamente ajustada para atender às exigências de propriedades mecânicas,

físicas e de durabilidade, além de garantir a trabalhabilidade necessária para o transporte, lançamento e adensamento.

Conforme Petrucci (1998), no concreto convencional, o aglomerante é o cimento, o agregado miúdo é a areia, o agregado graúdo é a brita, os aditivos são plastificantes e retardadores de pega e as adições podem ser metacaulim, cinza volante, pozolanas, cal, pó de pedra e aço.

No Brasil, a Norma Brasileira - NBR 7211/2022 estabelece os requisitos e orientações para a utilização de agregados em concreto, define os diferentes tipos de agregados e especifica as características físicas e químicas que eles devem apresentar. Também estabelece os requisitos de qualidade que os agregados precisam atender, incluindo limites de impurezas, granulometria, resistência e durabilidade, assegurando que o concreto produzido tenha as propriedades desejadas.

O cimento, entre os componentes do concreto, é o elemento principal. Segundo Castro (2021) o cimento é produzido pela reação térmica entre dois componentes básicos: calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos de alumínio e ferro). Segundo o autor, o carbonato de cálcio (CaCO_3), ao ser aquecido a altas temperaturas, transforma-se em cal (CaO) e libera CO_2 na atmosfera em um processo conhecido como clínquerização ou sintetização. Durante essa etapa, ocorrem diversas reações físicas e químicas, e, ao esfriar, o material se aglomera em partículas chamadas clínquer, que variam de 2 a 20 mm de diâmetro. O clínquer, por si só, é responsável por até 50% da composição do cimento.

O cimento do tipo Portland possui óxido de cálcio como componente mais significativo (entre 61 e 67% do material), óxido de silício (17 a 24%), óxido de alumínio (3 a 8%), óxido de ferro (1 a 6%), óxido de magnésio (0,1 e 4%) entre outros (CASTRO, 2021).

Quando possuem aditivos, são chamados CP I, e acompanhados pelos números 25, 32 ou 40 indicam a resistência à compressão aos 28 dias de idade, em MPa (NBR 5732/1991).

Existem também o CP tipo II, um cimento composto mais resistente ao ataque de sulfatos, que pode conter escória, pozolana ou filer, e o CP de alto forno, conhecido como CP III, que contém a adição de 35 a 70% de escória, o que lhe confere maior durabilidade.

3.7.2 Agregados para a Produção de Concreto

A NBR 7211/2022 estabelece os requisitos técnicos para os agregados destinados à produção de concreto, incluindo o agregado miúdo, que é composto, principalmente, por materiais como a areia natural ou provenientes do britamento de rochas estáveis. Pela Norma, o agregado miúdo é aquele que passa pela peneira de malha de 4,75 mm (nº 4). Já o agregado graúdo, que é composto principalmente por fragmentos de rochas britadas, cascalho ou seixos naturais, é aquele que fica retido na peneira com abertura de malha de 4,75 mm (nº4). A norma especifica que esses agregados devem ser isentos de impurezas, como materiais orgânicos, argilas, silte ou qualquer outro contaminante que possa comprometer a qualidade e o desempenho do concreto. A brita recomendada para utilizar no concreto depende das necessidades específicas do projeto.

3.7.3 Propriedades no Estado Fresco

As normas da ABNT que regulamentam as propriedades do concreto no estado fresco abrangem diretrizes relacionadas à trabalhabilidade, consistência, teor de ar, entre outras características fundamentais do concreto antes de seu endurecimento. Dentre as principais normas, destaca-se a NBR 16889/2020, que define os requisitos para o concreto autoadensável no estado fresco, abordando aspectos como fluidez, coesão e a capacidade do concreto de passar entre armaduras sem segregação. Essa norma é essencial para o controle e aceitação do concreto autoadensável em seu estado inicial de aplicação.

A NBR 7223/1992 estabelece os métodos para a determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar no concreto fresco por meio do método gravimétrico. Esses parâmetros são cruciais para o controle de qualidade do material e para assegurar a durabilidade das estruturas.

Outro ensaio importante é descrito na NBR 9833/2008, que trata da determinação da consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone, conhecido como *slump test*. Esse ensaio mede a trabalhabilidade do concreto, permitindo verificar sua consistência no estado fresco, fator determinante para a facilidade de manuseio e aplicação.

A NBR 12655/2022, embora tenha foco principal no preparo, controle e recebimento do concreto, também apresenta orientações relevantes sobre as propriedades do concreto no estado fresco, como a consistência e a trabalhabilidade; aspectos fundamentais para assegurar a conformidade do material durante o processo de produção e aplicação em obras.

As propriedades no estado fresco da argamassa e do concreto são influenciadas pelos agregados. Além disso, a densidade aparente, a distribuição granulométrica, a forma e a textura superficial também impactam essas propriedades. A consistência é valorada pela estabilidade, mobilidade, compatibilidade, trabalhabilidade e capacidade de melhoria da argamassa e do concreto (GONÇALVES *et al.*, 2007; CORDEIRO *et al.*, 2016).

3.7.4 Propriedades no Estado Endurecido

As propriedades do concreto no estado endurecido são fundamentais para garantir a qualidade e a durabilidade das estruturas de concreto.

A NBR 5738/2018 estabelece os métodos necessários para a preparação e cura de corpos de prova para avaliação precisa das propriedades mecânicas do concreto.

Complementarmente, a NBR 5739/2018, define o procedimento para realizar ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos, permitindo a determinação da resistência.

A NBR 7215/2020, por sua vez, especifica o método para a determinação da resistência à compressão do cimento Portland, um aspecto crucial que influencia diretamente a resistência do concreto.

Para a resistência à tração, tem-se a NBR 8522/2017; para o ensaio de absorção de água e permeabilidade, a NBR 10844/2020; para determinar a expansão por reações álcali-agregado, a NBR 15577/2018.

Finalmente, a NBR 12042/2008, que estabelece o procedimento para avaliar a resistência ao desgaste por abrasão.

3.7.5 Moldagem e Ruptura dos Corpos de Prova

A ruptura do concreto pode ocorrer de diversas formas, dependendo das tensões aplicadas e das características do material. As principais formas de ruptura incluem: ruptura por compressão, tração, cisalhamento, flexão e ruptura por fadiga.

Segundo a NBR 5738/2018, que regulamenta a moldagem e cura de corpos de prova, a ruptura pode se manifestar de diferentes formas.

A ruptura normal é caracterizada por fraturas bem distribuídas ao longo do corpo de prova, geralmente formando cones nas extremidades devido à restrição imposta pelas placas da imprensa, sendo essa, a ruptura esperada para um ensaio bem prolongado e um concreto homogêneo.

A ruptura por cisalhamento² ocorre quando o corpo de prova se divide em planos sugeridos, o que pode indicar falhas devido à sobrecarga tangencial, agregados inadequados ou falta de uniformidade na mistura.

A ruptura por colapso lateral ocorre quando há uma expansão excessiva antes da falha, indicando um concreto com alto teor de finos ou baixa resistência à tração transversal.

A ruptura por lascamento manifesta-se com o destacamento de fragmentos do concreto de forma irregular, podendo ser consequência de uma compactação deficiente ou segregação.

A identificação do tipo de ruptura é fundamental para verificar a qualidade do concreto e detectar possíveis falhas no processo de moldagem, cura e adensamento. Além disso, auxilia na avaliação do desempenho mecânico do material, pois o estudo de uma ruptura pode indicar problemas na composição do concreto, exigindo ajustes no processo produtivo.

As relações entre resistência e ruptura também podem ser compreendidas através da Norma Britânica BS EN 12390-3:2002. Nela e na NBR, observa-se a importância do(a):

(I) ajuste e do preparo correto para evitar desvios, (II) controle das condições de cura para assegurar resultados consistentes,

² Para Neville; Brooks (2013) os principais fatores que contribuem para esse tipo de ruptura estão as propriedades intrínsecas do concreto, as condições de carregamento, a geometria da amostra, o teor de umidade, as condições de cura, as características dos agregados e os fatores ambientais.

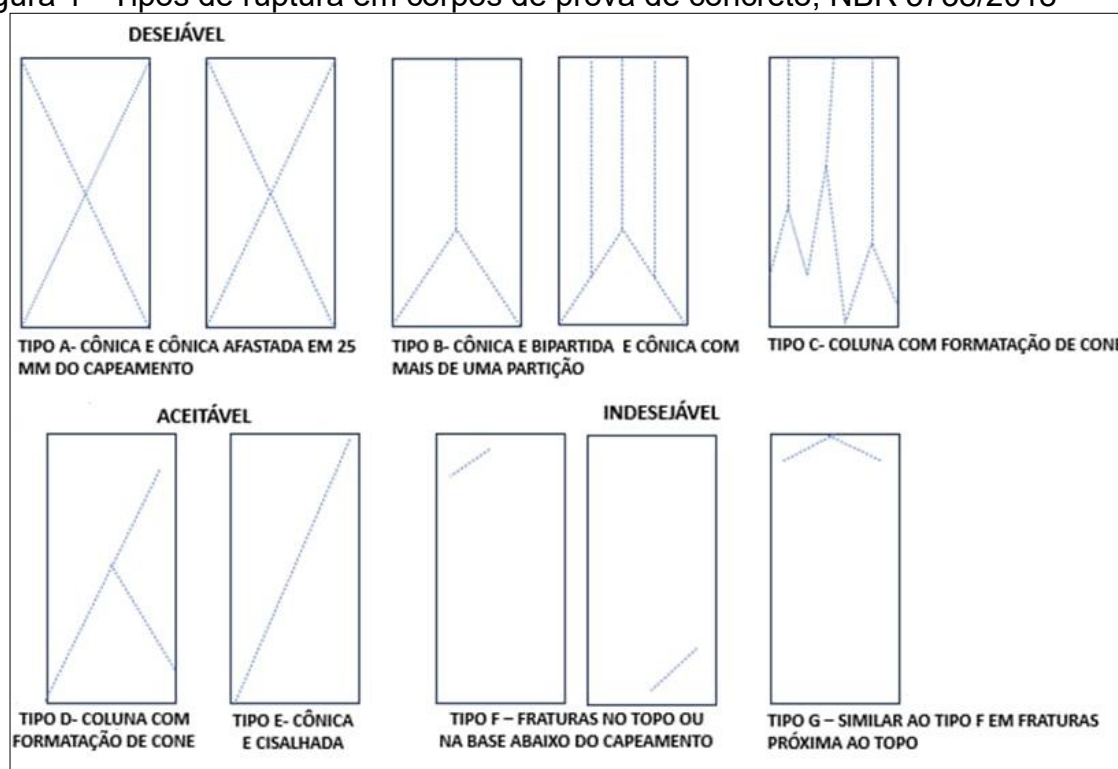
(III) centralização do corpo de prova para evitar falhas prematuras ou não satisfatórias, (IV) aplicação contínua da carga e ausência de choques, (V) análise visual das falhas como algo crucial para validar a execução correta do ensaio, (VI) superfícies dos pratos planos e (VII) máquinas calibradas.

Entre as diferenças:

A NBR (I) padroniza a relação altura/diâmetro ideal de 2:1 enquanto a Norma Britânica é mais flexível, recomendando ajustes caso as dimensões apresentem desvios significativos, (II) aceita apenas corpos de prova cilíndricos enquanto a Norma Britânica aceita também os corpos cúbicos, refletindo práticas regionais distintas.

A Figura 1 mostra os tipos de ruptura dos concretos nos corpos de prova, considerando a Norma Brasileira.

Figura 1 - Tipos de ruptura em corpos de prova de concreto, NBR 5738/2018



Fonte: Elaborado pela autora com base na NBR 5738/2018.

3.8 Concretos com Agregados Alternativos

A utilização de materiais alternativos no concreto tem crescido na construção civil em função das preocupações com a sustentabilidade ambiental, questões econômicas e de inovação tecnológica. Além disso, esses materiais, em muitos casos, também apresentam melhorias no desempenho das edificações.

Zeyad (2023) avaliou a viabilidade do uso de águas residuárias recicladas na produção de concreto sustentável. A substituição de 100% da água por efluente reduziu em 10,5% na resistência à compressão (mesma observação de Raj; Singh, 2023), mas proporciona redução na emissão de carbono e preservação dos recursos hídricos, indicando que essa prática pode reduzir o impacto ambiental e a dependência de recursos naturais sem comprometer significativamente a resistência e a durabilidade do material. No entanto, a qualidade das águas residuárias deve ser rigorosamente controlada, pois sua composição pode influenciar a microestrutura do concreto; conclusão semelhante a de Varshney; Khan (2021) e Aruntas; Nalli (2022). Um elevado conteúdo orgânico pode levar a uma redução significativa na resistência à compressão, o que é crucial para aplicações estruturais (TAHERLOU; ASADOLLAHFARDI, 2021).

Mojapelo; Kupolati (2021) investigaram a viabilidade do uso de lodo seco como substituto parcial da areia na composição do concreto. Os resultados indicaram que até 7,5% da areia pode ser substituída pelo lodo seco sem comprometer a aplicação estrutural do concreto. Observaram que o peso unitário do concreto diminuiu com o aumento do teor de lodo, devido à sua menor densidade, e análises microestruturais revelaram uma superfície porosa e irregular. Já Mathye; Ikotun (2021) indicaram que tal substituição pode chegar a 10%.

Guedes (2021), ao estudar a viabilidade técnica do uso de diferentes resíduos sólidos como componentes alternativos na fabricação de concreto, observou que é possível substituir até 10% da areia por raspas de pneus sem comprometer as propriedades mecânicas do concreto, sendo uma alternativa viável para pavimentação de rodovias, construção de meio-fio e calçadas. Observou ainda que os resíduos de PET também mostraram potencial como substitutos da areia em até 10%, sendo adequado para obras sem função estrutural, como aquelas destinadas ao tráfego de pedestres e veículos leves. Por fim, o autor concluiu que a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, com suas características pozolânicas, pode ser usada tanto como

suplemento ao cimento quanto como substituto da areia em proporções entre 30% e 50% sem prejudicar a resistência à compressão, tração, absorção de água, capilaridade e índice de vazios do concreto.

García (2024) investigou a utilização da areia de fundição (um subproduto do processo de fundição de metais) como substituto da areia natural na produção de argamassas, concreto e concreto autoadensável. A resistência à compressão começou a diminuir significativamente após uma substituição de 20%. Além disso, a presença de impurezas no subproduto pode ter contribuído para a redução da trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade.

Dobiszewska *et al.* (2023) estudaram a viabilidade de utilizar pó de rocha como substituto do cimento e observaram que até 15% de substituição não prejudicou as propriedades mecânicas dos compósitos de cimento, mantendo a integridade estrutural e a durabilidade. Além desse limite, os resultados foram negativos em função da dificuldade de hidratação; um fenômeno que permite a formação dos produtos responsáveis pela resistência e pela proteção contra a degradação.

Rifa *et al.* (2023), em revisão abrangente sobre o desempenho de concretos produzidos com agregados finos reciclados (pó de granito, brita, resíduos cerâmicos, agregados de vidro, tijolos, plásticos e borracha), observaram (I) absorção de água dentro dos limites permitidos para até 45% de substituição de areia nas misturas, (II) boa sorptividade do concreto modificado com até 25% de substituição, (III) trabalhabilidade inferior para as misturas contendo pó de granito, brita e agregados de vidro.

Zhang *et al.* (2024) estudaram concretos com Agregados Grossos Reciclados (AGR) misturados com água e areia do mar. Observaram atenuação dos efeitos negativos do AGR e aumento na resistência da ligação entre o concreto e barras revestidas com epóxi. Segundo os autores, a introdução de água e areia do mar melhorou a microestrutura do concreto, contribuindo para o aprimoramento das propriedades mecânicas. O aumento na taxa de substituição de areia natural por AGR melhorou a resistência à tração e flexão, sendo que os níveis ótimos de substituição para maximizar essas propriedades são de 15% e 60%, respectivamente.

Da Silva; Silva (2022) avaliaram a resistência do concreto ao substituir parcialmente o cimento Portland por cinzas *in natura* provenientes da queima de palha de arroz. Em termos de trabalhabilidade, os traços com 5 e 10% de cinzas

apresentaram maior densidade, o que pode ser vantajoso dependendo da aplicação. Em relação à absorção de água, observaram que o aumento do teor de cinzas leva a uma maior absorção, sendo esse aspecto um ponto negativo uma vez que pode comprometer a durabilidade do concreto. No quesito de resistência à compressão, o traço com 5% de cinzas superou a resistência do concreto de referência. Já no traço com 10% de cinzas, verificou-se uma perda significativa de resistência.

Cordeiro *et al.* (2019) estudaram a utilização da cinza de caroço de açaí como aditivo em concretos. Eles observaram que, apesar das propriedades físicas adequadas do material, a mistura resultou em uma diminuição da resistência à compressão axial e um aumento na absorção de água em comparação ao concreto de referência. No entanto, notaram uma densificação da matriz cimentícia, atribuída à variação no tamanho das partículas da cinza, o que pode promover uma maior compactação e otimizar o empacotamento dos grãos. No que diz respeito à caracterização pozolânica, o material não atendeu aos parâmetros estabelecidos pela NBR 12653/2016.

Alcântara (2018) estudou a utilização de cinzas pesadas de termoelétricas na produção de blocos de concreto para pavimentos intertravados e observou que todos os blocos foram aprovados nas avaliações visuais, de dimensões e de resistência ao desgaste por abrasão. No entanto, apresentaram valores inferiores ao mínimo recomendado pela NBR 9781/2013 para o ensaio de resistência à compressão. Os resultados indicaram que porcentagens mais baixas de substituição (10%, 20% e 30%) eram mais gerenciáveis em termos de mistura, enquanto porcentagens mais altas (40% e acima) apresentaram desafios que precisam ser abordados em estudos futuros. Do ponto de vista ambiental, tanto as cinzas pesadas quanto os blocos produzidos foram classificados como resíduos não perigosos e não inertes.

Dinamarquês *et al.* (2023) avaliaram o potencial de utilização de cinza de casca de arroz (RHA), cinza de folhas de bambu (BLA), cinza de bagaço de cana-de-açúcar (SCBA), cinza de resíduos de madeira (WWA) e cinza de combustível de óleo de palma (POFA), no desempenho de compósitos cimentícios. O teor de substituição que não compromete as propriedades mecânicas dos compósitos foi de 5% a 15% para RHA, 5% a 10% para BLA, 5% a 30% para SCBA, 5% a 10% para WWA e 5% a 20% de POFA.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Considerações Gerais

As cinzas utilizadas nesta pesquisa foram geradas a partir do processo de incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) realizado no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP), situado na Rua A, nº725, bairro Passaré, Fortaleza-CE (Figura 2).

Figura 2 - Vista geral do incinerador de Fortaleza-CE



Fonte: Autora (2025)

O incinerador foi inaugurado em 2001 e durante um ano esteve sob a gestão da empresa Contenur do Brasil. Em 2002, a administração passou para a empresa Marquise Ambiental. Atualmente, a unidade recebe 10 toneladas diárias de RSS, resultando 10% na forma de cinzas de fundo (Figura 3).

Figura 3 - Vista geral do RSS e das cinzas no incinerador de Fortaleza-CE



Fonte: Autora (2025)

No CTRP, os resíduos recebidos são inicialmente pesados e direcionados ao fosso, de onde seguem para as câmaras de combustão. Durante o processo de incineração, são gerados dois tipos de cinzas: as cinzas volantes, que se dispersam junto aos gases da combustão e as cinzas de fundo, que se acumulam na parte inferior do equipamento.

As cinzas de fundo ficam sobre as grelhas e são removidas por meio de um mecanismo de raspagem, sendo conduzidas por esteiras até os contêineres de armazenamento (de onde foram extraídas as amostras da pesquisa). A maior parte dessas cinzas é enviada para o Aterro Sanitário Metropolitano (ASM). Caso haja necessidade, uma parte delas pode ser misturada com outros RSS e reinserida no incinerador.

No CTRP, os gases são tratados por lavagem em contrafluxo sob pressão. Inicialmente, no tanque 1, ocorre uma lavagem alcalina, seguida de uma lavagem ácida no tanque 2³. Após esse processo, os gases seguem para um filtro de carvão, que atua na redução de odores, dioxinas e furanos. Em seguida, os gases passam por um filtro de manga, que retém o material particulado. Somente após esses tratamentos, são liberados na atmosfera.

O calor gerado no processo de incineração, ao longo dos últimos anos, vem sendo direcionado para uma autoclave. Nesse sistema, o vapor resultante é utilizado para a esterilização de outros RSS, eliminando os microrganismos, porém sem mudar o volume e o peso dos resíduos.

O tratamento do efluente gerado durante o processo de lavagem dos gases da incineração é realizado em estação interna sob processos físicos e químicos. A água tratada volta ao equipamento, promovendo um ciclo fechado. Outras informações sobre esse tratamento estão na pesquisa de Da Silva (2017), como já citado na revisão de literatura.

4.2 Materiais Utilizados

Os principais materiais utilizados na pesquisa foram CIRSP⁴ com granulometrias equivalentes à da areia média (0,6 mm a 1,2 mm), britas que variavam

³Esse processo aumenta a umidade das cinzas estudadas.

⁴Não foi possível utilizar a Cinza bruta, sendo necessário catar e britar o material.

entre 12,5 a 19,0 mm, areia grossa natural (1,2 a 2,4 mm), Cimento Portland de Alto-forno Poty CPIII 32-RS e água potável (Figura 4).

Figura 4 - Materiais utilizados na pesquisa



Fonte: Autora (2024)

Nesta pesquisa, o concreto foi preparado inicialmente conforme o traço de referência definido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP): 1:1,74:2,98:0,53 (cimento, areia, brita, fator água/cimento, em massa), com resistência característica à compressão de 20MPa (classe de resistência C20 e classe de consistência S50; mínimo admissível para concreto estrutural). Foi utilizada uma betoneira de 80L e para vibração do concreto no corpo de prova foi usado a mesa vibratória. Após verificar que os corpos de prova ficaram com muitos vazios, foi feito ajuste de traço, sendo utilizado 1:2,00:2,00:0,55 (cimento, areia, brita, fator água/cimento, em massa). Foram moldados 09 corpos de prova de referência (concreto tradicional), realizada cura por imersão em água⁵ e rompimento⁶ (Figura 5 e 6) com 28 dias.

⁵Esse 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.

⁶Os ensaios de resistência foram realizados no laboratório de materiais do Departamento de Construção Civil do IFCE com prensa de concreto de 300 toneladas.

As amostras dos materiais utilizados foram submetidas aos ensaios listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Lista de análises, parâmetros e ensaios realizados

Ensaio ou Procedimento	CIRSP	A	B	CP	Referência
Quarteamento	X	X	X		NBR 16915/2021
Granulometria	X	X	X		NBR NM 248/2003
Determinação de umidade	X	X	X		NBR 6457/2016
Módulo de finura e dimensão máxima	X	X	X		NBR 7211/2022
Massa específica dos agregados miúdos	X	X			NBR NM 52/2003
Massa específica dos agregados graúdos			X		NBR NM 53/2009
Densidade real dos agregados miúdos	X	X			DNER/ME093/1994
Material pulverulento	X	X	X		NBR 16973/2021
Massa unitária	X	X	X		NBR 16972/2021
Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos				X	NBR 5738/2015
Cura dos corpos-de-prova cilíndricos				X	NBR 5738/2015
Resistência à compressão				X	NBR 5739/2018
Ensaio de abatimento				X	NBR 16889/2020
Análise química	X				EDS

CIRSP: Cinzas da Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos, A: Areia, B: Brita, CP: Corpo de prova, EDS: Espectroscopia de Energia Dispersiva

Fonte: Autora (2024)

Figura 5 - Exemplos dos corpos de prova elaborados na pesquisa



Fonte: Autora (2025)

Figura 6 - Ensaio de rompimento de alguns corpos de prova aos 28 dias



Fonte: Autora (2025)

Para analisar o efeito da adição da CIRSP nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, realizou-se a substituição parcial da areia por teores crescentes de CIRSP passantes na peneira de 2mm. Foram preparados traços de concreto com 5, 10, 15, 20 e 25% de substituição em massa. Para cada mistura, foram moldados 09 corpos de prova, conforme detalhado na Tabela 2.

Tabela 2 - Descrição das preparações do concreto com e sem CIRSP

Traço	Composição	Frações (%)	Corpos de Prova
Referência	Cimento, areia, brita, água	A100/CIRSP 0	09
1	Cimento, areia, CIRSP, brita, água	A95/CIRSP 5	09
2		A90/CIRSP 10	09
3		A85/CIRSP 15	09
4		A80/ CIRSP 20	09
5		A75/ CIRSP 25	09
Total			54

A = Areia, CIRSP: Cinzas da Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos

Fonte: Autora (2025)

A CIRSP, antes da utilização nas misturas, ficou dentro de uma bandeja metálica durante 48 horas exposta ao sol para redução da sua umidade, passou catação manual (para retirada de materiais grosseiros não queimados, além de agulhas,

vidros) e foi britada por aproximadamente 40 minutos e peneirada até apresentar granulometria similar a areia.

O plano de dosagem (Tabela 3) foi ajustado para bateladas de 20 litros de concreto. As misturas foram colocadas em formas metálicas para moldagem dos corpos de prova cilíndricos (de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura) sendo utilizado a mesa vibratória (Figura 7). A Tabela 3 mostra a quantidade de material (em Kg) utilizada em cada traço. Os ensaios de resistência foram realizados no laboratório de materiais do Departamento de Construção Civil do IFCE Campus Fortaleza com prensa de concreto de 300 toneladas.

Figura 7 - Partes dos equipamentos e materiais utilizados



Fonte: Autora (2025)

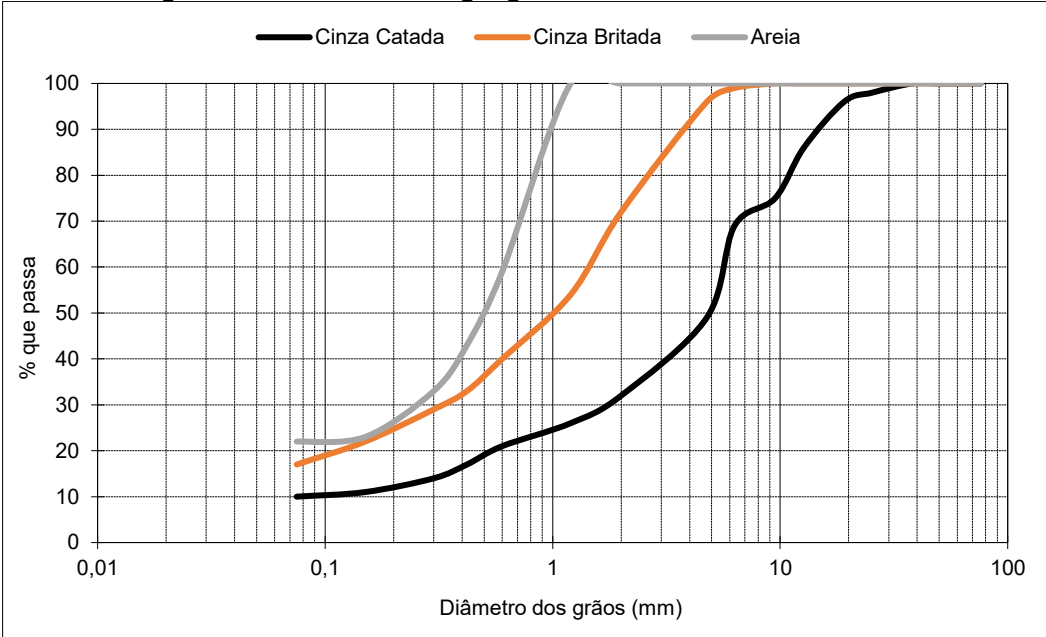
Tabela 3 - Distribuição dos insumos nas dosagens estudadas

Materiais	Un	Referência	Misturas Ensaçadas				
		A100	A90	A90	A85	A85	A75
		CIRSP 0	CIRSP 5	CIRSP 10	CIRSP 15	CIRSP 20	CIRSP 25
Cimento	Kg			8			
Areia		0	15,2	14,4	13,6	12,8	12
Brita				16			
Água				5,5			
CIRSP		16	0,8	1,6	2,4	3,2	4

Fonte: Autora (2025)

As curvas granulométricas das Cinzas (Catada e Britada) e da areia estão representadas na Figura 8 e detalhadas na Tabela 4. Foi observada uma granulometria diferente para os três materiais, sendo a cinza britada e a areia utilizadas no concreto modificado e de referência, respectivamente. A cinza britada se encaixou dentro dos limites utilizáveis recomendados pela NBR 7211/2022 para agregado miúdo. Já as curvas granulométricas das amostras cinzas catadas não se encaixaram, sendo tal material excluído das etapas seguintes.

Figura 8 - Curva granulométrica dos agregados miúdos utilizados



Fonte: Autora (2024).

Tabela 4 - Composição granulométrica dos agregados miúdos

COMPOSIÇÃO (%)	Cinza		Areia
	Catada	Britada	
Pedregulho	51	4	0
Areia grossa	17	24	0
Areia média	15	39	57
Areia fina	7	16	21
Silte/Argila	10	17	22

Fonte: Autora (2024).

A análise granulométrica revelou diferenças significativas na composição dos materiais com implicações diretas nas suas propriedades físicas e aplicações. A cinza

catada apresentou predominância de fração grossa, com 51% de pedregulho, o que indica um material com baixa quantidade de partículas finas, maior porosidade e não adequação aos ensaios posteriores. A fração semelhante à finura da areia grossa e média totalizaram 32%, enquanto o teor semelhante à silte/argila foi relativamente baixo (10%), sugerindo uma menor coesão e menor capacidade de retenção de água.

A cinza britada apresentou uma distribuição mais uniforme nas frações granulométricas, com destaque para a areia média (39%) e areia grossa (24%), totalizando 63% das partículas. O teor de silte/argila foi de 17%, valor intermediário em relação aos outros materiais, o que pode influenciar sua trabalhabilidade e compactação. A ausência de pedregulho nesta amostra reforçou sua natureza predominantemente arenosa, com granulometria mais controlada.

Bastos *et al.* (2021), com a mesma cinza, encontraram 26% de material semelhante a pedregulhos, 17% a areia grossa, 17% a areia média, 19% a areia fina e 21% a silte/argila (média de 04 amostras). No ano seguinte, Lino (2022) observou 22,75% de material similar às características de pedregulhos, 24,5% à areia grossa, 22,75% à areia média, 13,25% à areia fina e 21% aos siltes e às argilas.

As demais características físicas dos agregados miúdos utilizados na pesquisa foram reunidas na Tabela 5.

Tabela 5 - Outras características físicas dos agregados miúdos

Características	Cinza		Areia
	Catada	Britada	
Umidade (%)	9,62	6,69	5,40
Módulo de finura (mm)	6,97	5,75	2,48
Dimensão máxima (mm)	25,40	6,35	2,38
Massa unitária (g/cm ³)	-	1,00	1,32
Massa específica (g/cm ³)	-	2,50	2,53
Material pulverulento (%)	-	0,36	0,44
Densidade Real	-	2,37	2,69

Fonte: Autora (2024).

Como se observa, a umidade dos materiais variou consideravelmente, sendo maior na cinza catada (9,62%) e menor na areia (5,40%), enquanto a cinza britada apresentou um valor intermediário (6,69%). Esse fator pode influenciar na demanda

de água nas misturas. Correia (2022), que desenvolveu pisos intertravados de concreto com (e sem cinzas) do CTRP de Fortaleza-CE observou taxa de absorção variando entre 4,8% e 5,9% (amostra sem cinzas) e entre 12,0% e 12,5% (mistura com cinzas). Lino (2022), com as mesmas cinzas, observou teor de umidade variando entre 2,14% e 51,75%. Segundo a autora, essa variação se deveu à forma de coleta da amostra inicial, visto que as cinzas foram coletadas dentro de um contêiner, que por sua vez já estavam expostas às interferências de sol e vento, tornando-as previamente secas; enquanto as outras amostras foram coletadas diretamente do fundo do incinerador, por meio da raspagem, conferindo-lhes maior quantidade de água.

O módulo de finura, importante para o dimensionamento do traço de concreto, apresentou os maiores valores para a cinza catada (6,97mm) e cinza britada (5,75mm), enquanto a areia teve um módulo significativamente menor (2,48mm), cabendo destacar que a cinza britada foi posteriormente passada na peneira de malha de 2mm, ganhando uniformidade, para utilização nos traços estudados; enquanto a catada foi descartada.

A dimensão máxima dos grãos também variou expressivamente, sendo maior na cinza catada (25,40 mm), seguida pela cinza britada (6,35 mm) e pela areia (2,38 mm). Isso indica que a cinza catada continha partículas mais grosseiras, não servindo para a preparação dos traços. Materiais grosseiros também foram observados por Andrade (2012) correspondendo a 34% da amostra analisada, Gupta *et al.* (2021), que encontraram entre 10 e 20% de suas amostras. O mesmo resultado foi encontrado por Matallaha (2023).

Em relação à massa unitária, a areia apresentou um valor mais elevado (1,32 g/cm³) em comparação com a cinza britada (1,00 g/cm³), sugerindo uma maior densidade do material compactado. Silva; Barroso; Cabral (2020) encontraram massa unitária da areia de 1,41 g/cm³ para a areia natural e de 1,46 g/cm³ para a areia britada. Já a massa específica seguiu um padrão semelhante ao valor da areia (2,53 g/cm³) e cinza britada (2,50 g/cm³), indicando que ambos possuem composição mineralógica semelhante.

O teor de material pulverulento, que pode afetar a trabalhabilidade e o consumo de água na mistura, foi baixo nos materiais avaliados, com que a areia apresentou um valor ligeiramente superior (0,44%) em comparação com a cinza britada (0,36%).

Kaur; Siddique e Rajor (2019), em suas análises do teor de material pulverulento nas cinzas de resíduos biomédicos incinerados, observaram a presença significativa de partículas finas, com dimensões inferiores a 0,075 mm. Segundo os autores, essas partículas atuam como material de preenchimento na matriz cimentícia, promovendo a redução da porosidade e influenciando diretamente a trabalhabilidade e a permeabilidade do concreto.

A densidade real, que reflete a densidade dos grãos sólidos sem considerar os vazios, foi maior na areia (2,69) que na cinza britada (2,37), indicando uma diferença na composição mineral dos materiais. Correia (2022) observou densidade real de 2,65 para as cinzas e 2,67 para a areia. Os resultados dos ensaios contidos na Tabela 6 tratam das características das cinzas na literatura.

Tabela 6 - Características físicas das cinzas de RSS na literatura

Características	Literatura						
	1	2	3	4	5	6	7
Módulo de finura (mm)	2,75	2,50	1,60				
Massa unitária (g/cm³)	2,36	0,46	4,80				
Massa específica (g/cm³)		2,03		3,15			
Densidade Real						1,76	2,07

¹Graupmann; Martins (2019), ²Kaur; Siddique; Rajor (2019), ³Pinto (2018), ⁴Gupta; Singh (2022), ⁵Moura (2023), ⁶Alencar (2022), ⁷Alam; Singh; Kumar (2021)

Fonte: Autora (2024).

A curva granulométrica da brita está representada na Figura 9. A brita 0, com dimensão entre 4,8 mm e 9,5 mm, representou 7,90% do material, indicando menor participação no conjunto total do agregado.

Essa granulometria mais fina pode contribuir para melhorar a compactação do material quando misturado a outras frações de maior granulometria, otimizando a distribuição dos grãos no concreto.

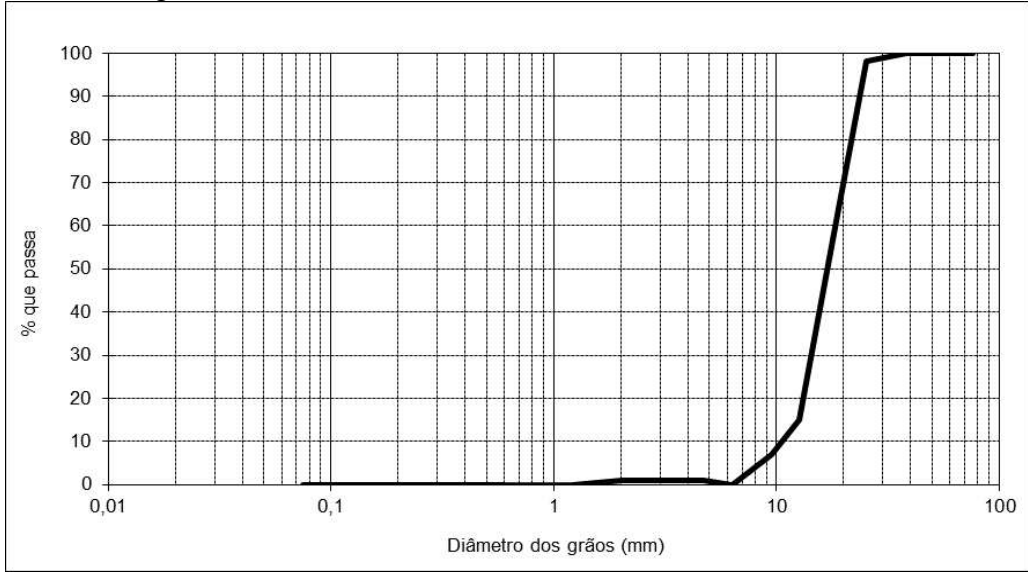
A brita 1, com dimensão entre 9,5 mm e 19 mm, esteve em maior fração, correspondendo a 52,4% do total. Essa granulometria intermediária é amplamente utilizada em concretos estruturais, pois proporciona um bom equilíbrio entre resistência e trabalhabilidade.

A brita 2, com dimensão entre 19 mm e 25 mm, representou 35,9% do material, sendo a segunda fração mais abundante. Esse tamanho maior contribui para a

estruturação do concreto, reduzindo o consumo de pasta de cimento e melhorando a resistência mecânica da mistura.

A distribuição granulométrica apresentada indicou material adequado para concretos convencionais e estruturais com bom intertravamento e redução de vazios no sistema.

Figura 9 - Curva granulométrica da brita utilizada



Fonte: Autora (2023).

Observou-se que a curva granulométrica da amostra de brita se encaixou dentro dos limites da zona granulométrica 9,5/25 recomendados pela NBR 7211/2022. As demais características físicas do agregado gráudo utilizado na pesquisa estão reunidas na Tabela 7 e 8.

Tabela 7 - Classificação da brita

Brita	Dimensão (mm)	% Retido
0	4,8 - 9,5	7,90
1	9,5 - 19	52,4
2	19 - 25	35,9

Fonte: Autora (2024).

Tabela 8 - Características físicas da brita

Características	Brita
Módulo de finura (mm)	8,05
Dimensão máxima (mm)	25,40
Massa específica da brita (g/cm ³)	2,53
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,46
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,61
Material pulverulento (%)	3,09

Fonte: Autora (2024)

O módulo de finura da brita foi 8,05mm, indicando um material predominantemente grosso. A dimensão máxima do agregado foi de 25,40mm, classificando-o como um material de granulometria relativamente grande, adequado para concretos de maior resistência e menor retração volumétrica, favorecendo o intertravamento entre os grãos e proporcionando um esqueleto granular mais resistente e estável.

A massa específica da brita foi de 2,53 g/cm³; um valor típico para rochas de origem granítica ou basáltica, indicando uma composição mineralógica densa.

A massa unitária solta, que corresponde à densidade do material sem compactação, foi de 1,46 g/cm³, enquanto a massa unitária compactada foi de 1,61 g/cm³, demonstrando que a compactação reduziu os vazios no material, aumentando sua densidade aparente e melhorando o empacotamento das partículas, que é um fator importante para a dosagem de concretos.

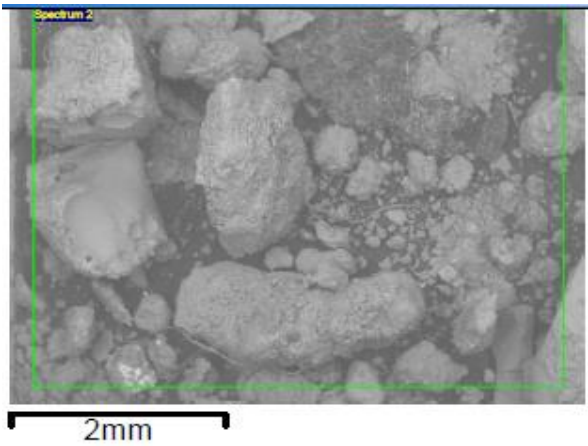
O teor de material pulverulento foi de 3,09%; um valor relativamente elevado para agregados graúdos, o que pode impactar negativamente a aderência da brita com a matriz cimentícia, aumentando a demanda de água no concreto e potencialmente reduzindo sua resistência, tornando necessária a lavagem do agregado antes do uso em concretos estruturais.

Por fim, o estudo foi concluído com a análise de uma amostra da CIRSP por Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS). Foram separadas 100 g do material e maceradas manualmente com auxílio de um almofariz. Em seguida, a amostra foi peneirada utilizando uma malha de 0,0075 mm, resultando em aproximadamente 79 g de material fino. A análise foi realizada no Laboratório de

microscopia eletrônica da Geologia da Universidade Federal do Ceará, conforme apresentado na Tabela 1.

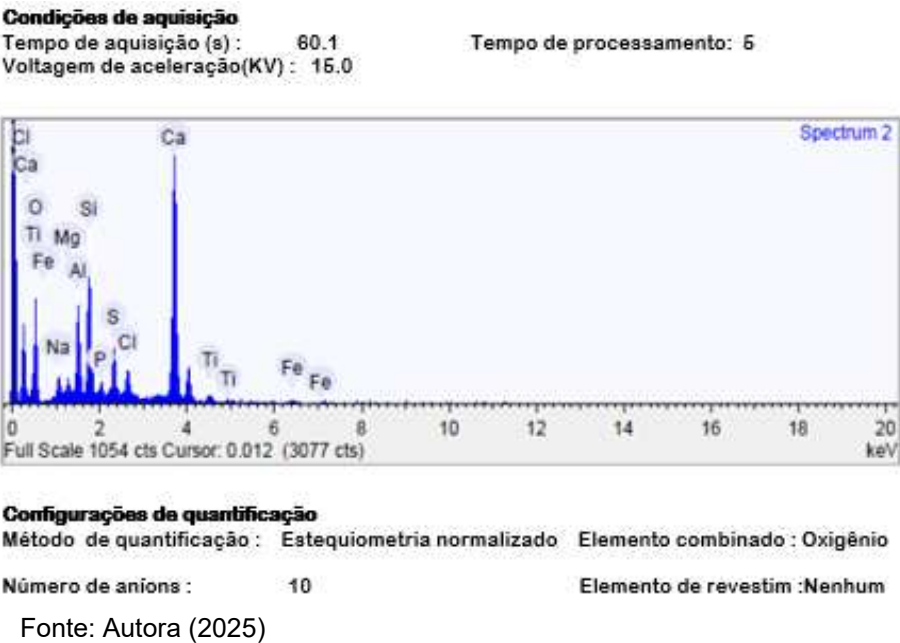
A técnica de EDS permite a caracterização química e a análise elementar do material com base na excitação energética dos átomos, promovendo a transição de elétrons entre camadas e a consequente emissão de raios X característicos. A intensidade dos picos gerados no espectro está relacionada à concentração dos elementos presentes na amostra. A imagem microscópica obtida da amostra encontra-se na Figura 10 e o respectivo espectro de picos elementares é apresentado na Figura 11.

Figura 10 - Imagem da CIRSP estudada via microscopia eletrônica



Fonte: Autora (2025)

Figura 11 - Espectro obtido por EDS da amostra de CIRSP



As características até então citadas mostram que a química e a mineralogia das cinzas dependem amplamente de sua origem e processos de formação. Além disso, as cinzas parecem ser um material versátil em função de sua granulometria e densidade.

Observou-se a presença de 09 componentes principais na CIRSP, sendo majoritária a participação do Óxido de Cálcio - CaO (44,49%), Dióxido de Silício - SiO₂ (20,82%), Óxido de Alumínio - Al₂O₃ (10,72%) e Trióxido de Enxofre - SO₃ (9,89%), conforme se observa na Tabela 9 (em ordem decrescente de concentração %); que também traz semelhança com os resultados de outras pesquisas locais realizadas com o mesmo material.

Tabela 9 - Composição química elementar da CIRSP estudada x literatura local

Elemento (%)	Pesquisas Locais			
	Autor (2025)	Bastos <i>et al.</i> (2021)	Lino (2022)	Moura (2023)
Óxido de Cálcio	44,49	66,8	57,41	60,06
Dióxido de Silício	20,82	4,59	4,47	6,36
Óxido de Alumínio	10,72	2,54	2,78	5,64
Óxido Férrico	1,38	6,65	16,43	6,62
Cloro	2,88	1,50	1,40	1,39
Óxido de Zinco	-	2,05	2,03	1,53
Oxido de Cobre	-	0,39	0,22	0,18
Óxido de Potássio	0,27	0,36	0,33	0,26
Oxido de Cromo	-	-	0,2	0,08
Trióxido de Enxofre	9,89	3,26	4,05	6,95
Óxido de Sódio	3,18	-	-	0,30
Fosfato	2,61	2,75	2,56	1,85
Dióxido de Titânio	2,25	8,88	7,88	7,52
Óxido de Magnésio	1,79	-	-	5,74

Fonte: Elaborado pela Autora (2025)

Os resultados mostrados na Tabela 9 permitem ainda outra observação: as cinzas estudadas tiveram um desempenho químico insatisfatório para classificação como material pozolânico; mesma conclusão obtida por Memon; Sheikh; Parache

(2013), Carvalho *et al.* (2022), Matallaha (2023).

Segundo a NBR 12653/2014, os materiais pozolânicos são aqueles que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante quando aplicados sozinhos, mas na presença de água e finamente divididos reagem, na temperatura ambiente, com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes. Pela Norma, a soma dos percentuais de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ deve ser acima de 50% (para material pozolânico classe E) e 70% (para material classe N e C), ou seja, percentuais bem acima dos 32,92% obtidos nesta pesquisa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resistência à Compressão

Os resultados da resistência⁷ à compressão do concreto convencional e do concreto modificado (com teores diferentes de cinzas provenientes da incineração de RSS substituindo a areia) foram reunidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Corpos de Prova	Dosagens <i>versus</i> Mpa					
	REF	M5	M10	M15	M20	M25
CP1	28,39	24,24	23,65	23,65	23,33	13,6
CP2	25,99	25,84	17,67	17,67	17,48	11,21
CP3	29,25	25,66	21,06	21,06	14,43	10,53
CP4	28,89	28,34	24,93	24,93	17,43	10,47
CP5	26,06	30,42	22,50	18,23	10,78	11,07
CP6	28,63	28,20	21,28	22,54	13,01	10,52
CP7	22,83	30,27	22,34	19,49	14,94	11,53
CP8	25,44	24,81	23,02	20,22	14,82	11,75
CP9	26,47	32,33	22,55	16,35	9,99	16,33
Média	26,88	27,79	22,11	20,46	15,13	11,89
Desvio	2,09	2,83	2,03	2,86	4,01	1,93

Legenda: CP (Corpo de Prova), REF (Referência), M (Mistura)

Fonte: Autora (2025).

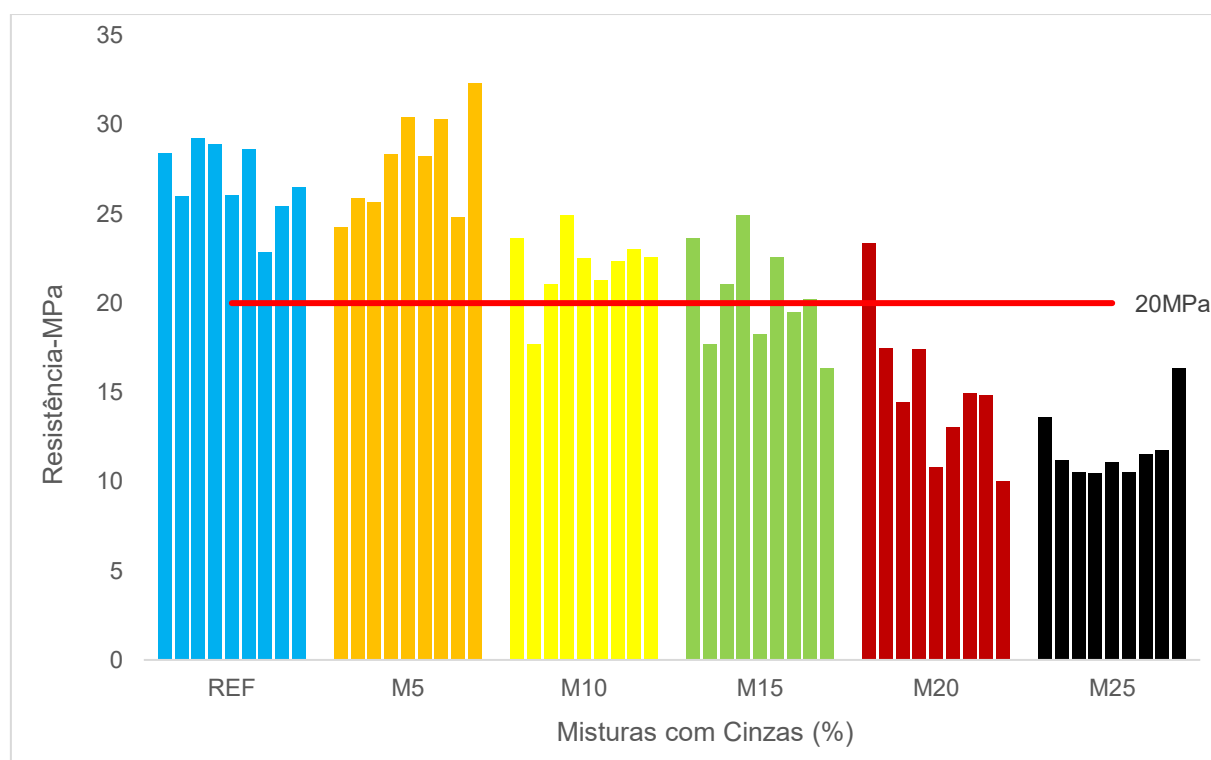
Como se observa, 04 dosagens (destacadas em verde na Tabela 10) apresentaram resistência média à compressão acima dos 20 MPa previstos como valor mínimo para concreto estrutural, a saber: a dosagem de referência (REF) e as M5, M10⁸ e M15.

⁷A resistência à compressão é uma das propriedades mecânicas mais importantes do concreto e é amplamente utilizada para avaliar sua qualidade e adequação para uma determinada aplicação estrutural.

⁸Essa dosagem apresentou o menor desvio padrão, o que significa que os dados estão mais próximos da média, indicando menor variabilidade ou dispersão. Em outras palavras, os valores são mais consistentes e homogêneos; indiretamente um concreto com maior confiabilidade estrutural.

A dosagem de referência apresentou resistência média à compressão de 26,88MPa, ou seja, 34,4% acima do mínimo exigido para concreto estrutural. Esse resultado foi ainda melhor quando 5% da areia foi substituída por CIRSP (M5 com 27,79MPa, ou seja, 38,9% acima dos 20 MPa). Quando foi adicionada 10% de cinzas, a resistência média ainda foi adequada e ficou 10,55% superior à do concreto de referência (M10 com 22,11 MPa). Não menos importante, a M15 também superou a resistência média de referência em 2,3% (M15 com 20,46 MPa). A Figura 12 mostra o comportamento geral da resistência de todos os 54 corpos de prova elaborados.

Figura 12 - Resistência à compressão (MPa) dos concretos estudados



Fonte: Autora (2025).

A mistura com 15% (M15), destacada em verde na Figura 13, merece ainda outra observação: ela apresentou 05 corpos de prova com resistência superior aos 20 MPa exigidos (CP's 1, 3, 4, 6 e 8), ou seja, 55,5% dos seus resultados foram adequados, mas é mais prudente utilizar o uso de dosagens um pouco inferiores a 15%. As dosagens M20 (destacada em vermelho) e M25 (destacada em preto) também devem ser evitadas, pois estiveram 24,3 e 40,5% abaixo do exigido (20 MPa), respectivamente. Além disso, a M20 apresentou o maior desvio padrão (4,01 MPa), refletindo uma alta variabilidade nos resultados.

Uma análise mais aprofundada sobre os dados da Tabela 10 permite observar a influência geral do acréscimo das cinzas sobre a redução da resistência à compressão dos concretos.

Tabela 11 - Percentual de CP's com resistência à compressão acima de 20MPa

Corpos de Prova	RC > 20 MPa	
	Quantidade	%
REF	09	100,0
M5	09	100,0
M10	08	88,9
M15	05	55,6
M20	01	11,1
M25	00	0,0
Legenda: CP (Corpo de Prova), REF (Referência), M (Mistura), RC (Resistência à Compressão)		
Fonte: Autora (2025)		

Na literatura, diversos estudos também investigaram a resistência à compressão de concretos contendo cinzas oriundas de equipamentos de incineração de resíduos sólidos perigosos. No entanto, ao comparar os resultados, é necessário cautela, pois há variações nos teores adicionados, nas características dos resíduos (tanto quantitativas quanto qualitativas) e nas especificidades dos incineradores, considerando a tecnologia utilizada e os métodos operacionais empregados.

Kaur; Siddique e Rajor (2019), ao substituírem até 10% da areia por cinzas de RSS, observaram melhoria no desempenho mecânico do concreto, com aumento da resistência à compressão (semelhante a esta pesquisa) e tração. Segundo os autores, isso ocorreu porque tal cinza contém óxidos de cálcio e sílica, que reagem com o cimento, formando compostos pozolânicos que aumentam a resistência e densificam a estrutura. Além disso, a adição dessas cinzas reduziu a permeabilidade do concreto, tornando-o mais denso e menos suscetível à penetração de íons de cloreto, devido ao efeito de preenchimento das partículas finas da cinza, que diminuem os vazios internos. O teste de lixiviação demonstrou que o concreto - com cinzas de RSS - não é perigoso, pois a estabilização com cimento ajudou a imobilizar metais pesados, tornando-o ambientalmente seguro. No entanto, a substituição da areia por tais cinzas aumentou a absorção de água, especialmente para proporções mais altas, devido ao

aumento da porosidade do concreto, o que comprometeu a trabalhabilidade e a resistência quando usado em excesso (acima de 10% de substituição).

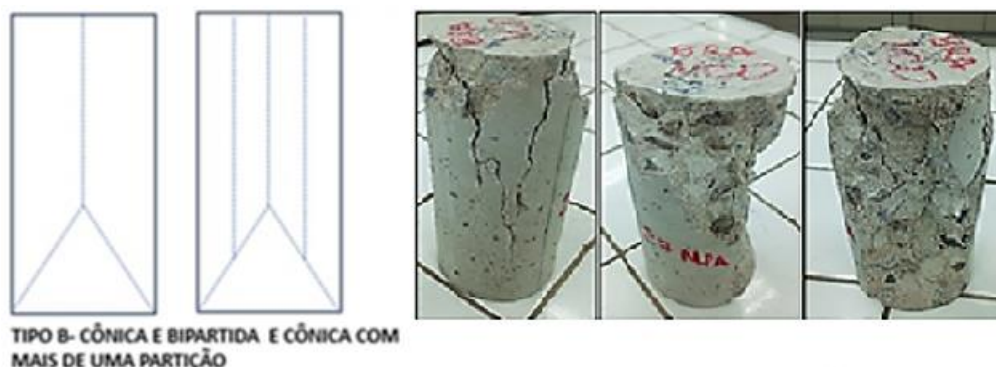
Ramgopal *et al.* (2023) observaram que até 15% de cinzas de RSS substituindo a areia não compromete o desempenho estrutural do concreto (semelhante a esta pesquisa). Conforme os autores, a microscopia eletrônica revelou uma estrutura mais densa e menos porosa na mistura com cinzas, sugerindo melhorias nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto modificado. O concreto modificado apresentou um gel de CSH (Silicato de Cálcio Hidratado) mais sólido, menos cristais de CH (Cálcio Hidratado) e uma menor porcentagem de poros na zona de transição em comparação ao concreto controle. Sugeriram ainda que o concreto modificado pode ser utilizado em edifícios, incluindo paredes compostas e paredes de parapeito. Citam que a utilização das cinzas de RSS ajuda a reduzir os custos de produção do concreto.

Hamada; Ismail; Závodská (2023) substituíram 2, 4, 6, 8 e 10% da areia por cinzas de RSS em misturas de concreto e, em seguida, avaliaram a trabalhabilidade, resistência (à compressão e à flexão) e potencial de lixiviação, entre outros. Em linhas gerais, observaram redução progressiva nas resistências com o aumento da substituição, tanto após 28 dias de cura quanto em idades de cura mais precoces (7 e 14 dias), embora a substituição de 10% tenha alcançado uma resistência satisfatória de 33,39 MPa após 7 dias de cura, superando o valor mínimo exigido de 17 MPa para concreto leve. As misturas com cinzas apresentaram melhora na trabalhabilidade e os resultados do teste de lixiviação indicaram ausência de componentes perigosos.

No que diz respeito ao tipo de ruptura, foi realizada análise visual dos corpos de prova que alcançaram os melhores resultados no ensaio de resistência à compressão em cada dosagem.

Entre os Corpos de Prova (CP) do concreto de referência (0% de CIRSP), a maior resistência à compressão foi observada no CP 3: 29,25 MPa (46% acima dos 20 MPa mínimos exigidos para concreto estrutural). Sua ruptura, tomando como referência a NBR 5739/2018, apresentou semelhança a uma fratura do Tipo B, caracterizada por colunas com formação cônica e bipartida. Esse padrão de ruptura é classificado como desejável pela Norma Brasileira, indicando que o ensaio foi executado corretamente, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Rompimento do CP 3 do concreto de referência (0% de CIRSP)



Fonte: Elaborado pela Autora (2025) com base na NBR 5739/2018

Entre os Corpos de Prova (CP) do concreto com 5% de CIRSP substituindo a areia, a maior resistência à compressão foi observada no CP 9: 32,33 MPa (62% acima dos 20 MPa). Sua ruptura apresentou semelhança a uma fratura do Tipo C, caracterizada por colunas com formação de cones e foi classificada como desejável pela Norma Brasileira, como apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Rompimento do CP 9 do concreto com 5% de CIRSP

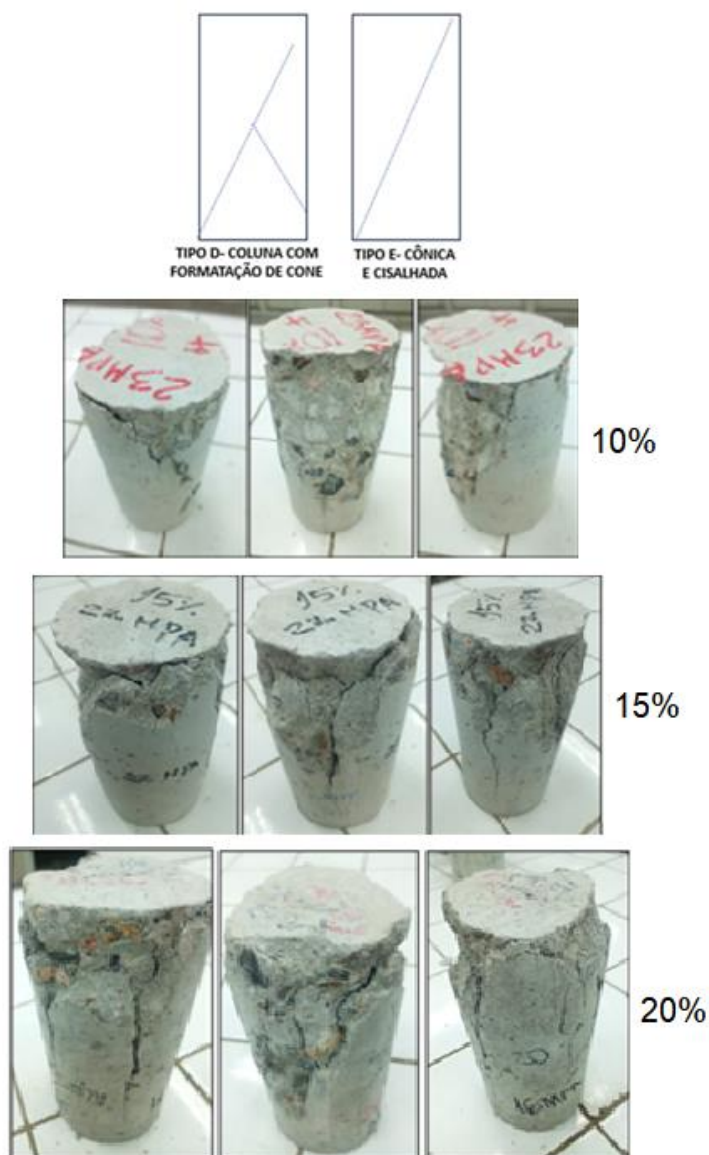


Fonte: Elaborado pela Autora (2025) com base na NBR 5739/2018

Entre os Corpos de Prova (CP) do concreto com 10, 15 e 20% de CIRSP substituindo a areia, a maior resistência à compressão foi observada, coincidentemente, no CP 4 (24,93 MPa nas duas primeiras dosagens, %) e no CP 1 (23,33 MPa). Tais valores estão 25% e 17% acima dos 20 MPa mínimos exigidos para concreto estrutural. Suas rupturas apresentaram semelhança a uma fratura do Tipo D ou E, caracterizada como cônica ou cisalhada. Esse padrão de ruptura é classificado

como desejável pela Norma Brasileira, indicando que o ensaio foi executado corretamente, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Rompimento dos CP's do concreto com 10, 15 e 20% de CIRSP



Fonte: Elaborado pela Autora (2025) com base na NBR 5739/2018

Por fim, tem-se os Corpos de Prova (CP) de concreto com 25% de CIRSS substituindo a areia, onde a maior resistência à compressão foi observada no CP 9 (16,33 MPa, ou seja, 18% abaixo dos 20 MPa mínimos exigidos). Sua ruptura, caracterização e classificação foi semelhante às dosagens anteriores, A Figura 16 apresenta uma diferença significativa: foi a única mistura que resultou uma ruptura do Tipo A (cônica e cônica). Esse aspecto demanda uma investigação mais aprofundada

em pesquisas futuras, visto que os resultados de resistência à compressão dessa substituição não alcançaram o mínimo de 20 MPa exigido para concreto estrutural. Além disso, sua forma de ruptura se comportou da mesma maneira que as demais substituições que atingiram esse limite.

Figura 16 - Rompimento do CP 9 do concreto com 25% de CIRSP



Fonte: Elaborado pela Autora (2025) com base na NBR 5739/2018

Neville, Brooks (2013) explicam que as fissuras estão presentes antes mesmo da aplicação de carga, especialmente na junção entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, em razão das diferenças nas propriedades mecânicas, retração ou variações térmicas. A microfissuração manifesta-se tanto em concretos de resistência convencional quanto em concretos com baixa relação água/cimento (0,25), submetidos à cura em ambiente úmido. Segundo os autores, embora as dimensões exatas das microfissuras não estejam claramente definidas, considera-se que seu tamanho não deve exceder 0,1 mm. Durante o carregamento, essas fissuras permanecem estáveis até aproximadamente 30% da carga máxima. A partir desse ponto, começam a aumentar em extensão, abertura e quantidade. Entre 70% e 90% da resistência final, ocorre uma propagação acelerada das fissuras pela matriz de argamassa (composta pela pasta de cimento e pelo agregado miúdo).

De acordo com Vieira e Dal Molin (2011) a fratura final, sob a ação de uma compressão uniaxial, acontece em decorrência da quebra por tração dos grãos de cimento ou do rompimento da ligação em uma direção perpendicular à carga exercida. Além disso, pode ser consequência do desgaste provocado pelo surgimento de planos inclinados de cisalhamento. Esse processo explica a fratura em formato cônico, acompanhada por planos inclinados de cisalhamento a 45° em corpos de prova cilíndricos de concreto.

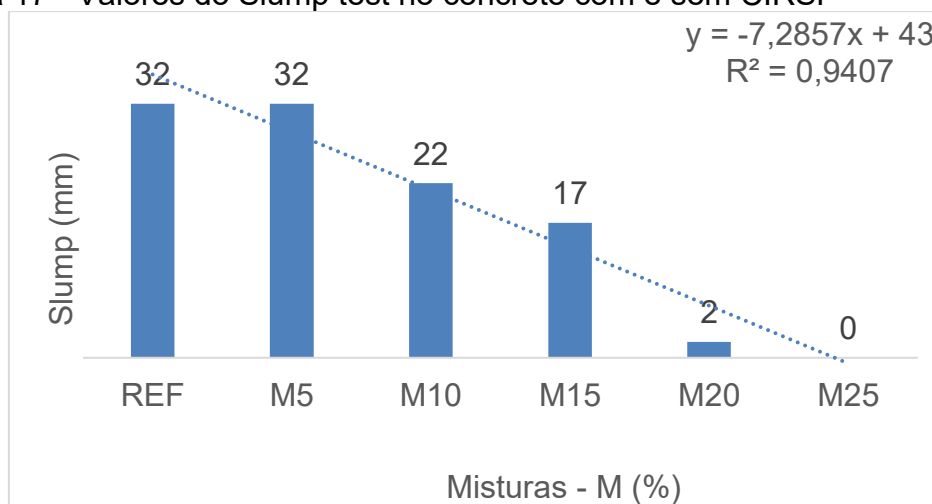
Correia (2022), que avaliou o comportamento de pisos intertravados de concreto elaborados com frações da mesma cinza, verificou ausência de rupturas explosivas ou frágeis, e interpretou tal resultado como decorrente de uma boa coesão da mistura entre cimento, areia e cinzas, assegurando maior estabilidade estrutural ao material (comportamento semelhante ao ocorrido nesta pesquisa). Ainda segundo a autora, apesar do aumento observado na porosidade do material, a fratura não foi brusca, sugerindo que o concreto permaneceu estruturalmente estável. O comportamento mecânico registrado nos testes indicou que o material pode ser utilizado em aplicações práticas com segurança, desde que sejam realizados ajustes para melhorar a absorção de água e reduzir o índice de vazios.

5.2 Trabalhabilidade do Concreto

A trabalhabilidade do concreto é uma propriedade fundamental que define a facilidade com que o concreto fresco pode ser misturado, transportado, lançado, adensado e acabado, sem segregação ou exsudação excessiva. Em outras palavras, é a medida da maleabilidade do concreto.

Nesta pesquisa, os valores do abatimento variaram de acordo com teor substituído, conforme apresentado na Figura 17. Observou-se também que o concreto com 5% de CIRSP teve o mesmo abatimento do concreto de referência (avaliado como algo positivo), enquanto a mistura com 25% de substituição apresentou consistência muito seca, com baixa fluidez (*Slump* zero).

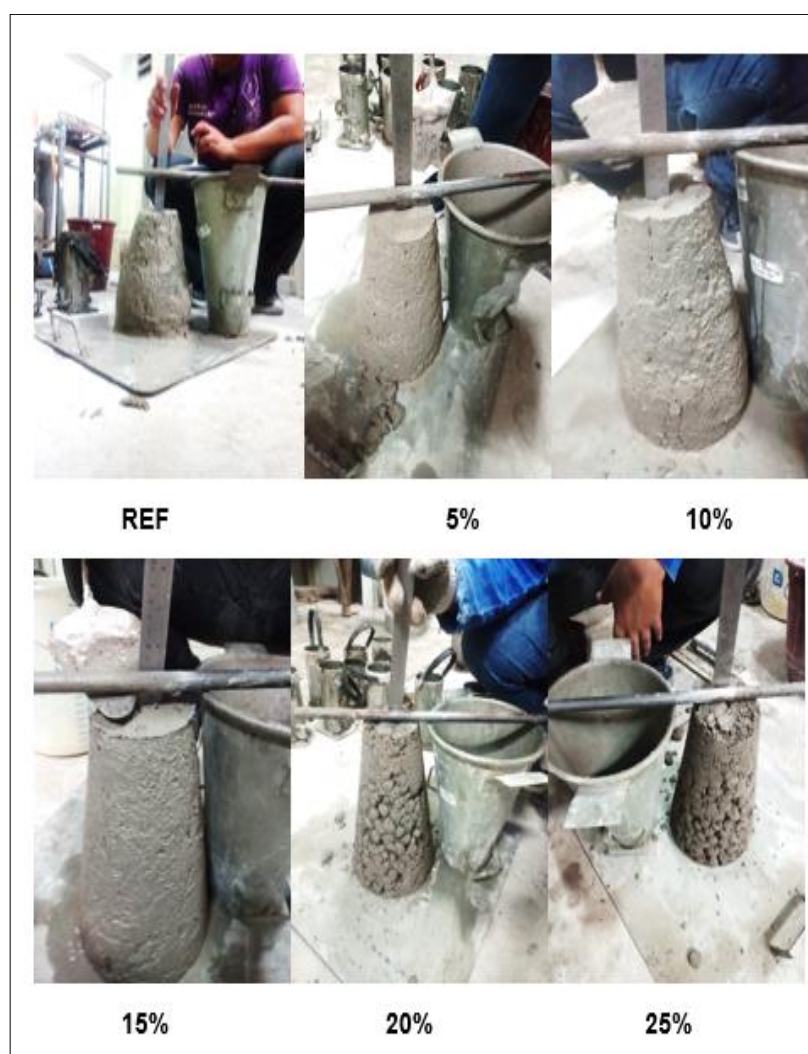
Figura 17 - Valores do Slump test no concreto com e sem CIRSP



Fonte: Autora (2024)

Considerando a classificação dos concretos realizada por Andolfato (2002), abatimentos entre 0 e 2,0cm apontam para um concreto seco (nesta pesquisa tem-se as misturas M15, M20 e M25). Em linhas gerais, este tipo de concreto serve em aplicações específicas, como construção de estradas (onde a baixa fluidez é desejável para garantir a estabilidade do pavimento), barragens e pavimentos industriais (compactado com rolo). Ainda segundo o autor, abatimento entre 2,0 e 5,0cm apontam para um concreto firme (nesta pesquisa, tem-se o REF e as misturas M5 e M10). A Figura 18 demonstra os ensaios de *Slump test*.

Figura 18 - Imagens do *Slump Test*



Fonte: Autora (2024)

Há outro aspecto a destacar: o resultado alcançado no concreto de referência (32mm) ficou abaixo do valor sugerido para concreto de consistência plástica apontado pela NBR 8953/2015 ($50 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$). Segundo Neville, Brooks (2013), a

consistência plástica é amplamente utilizada em aplicações estruturais devido à sua boa trabalhabilidade. Essa classe de consistência equilibra fluidez e coesão, facilitando o lançamento e o adensamento, seja por meios manuais ou mecânicos, sem risco excessivo de segregação ou perda de homogeneidade.

Os resultados das misturas com 5, 10 e 15% de CIRSP substituindo a areia, apesar de relativamente baixos, foram classificados como positivos, pois resultaram em um concreto com maior fluidez e trabalhabilidade, sem sinais de segregação, exsudação ou perda de resistência; fatores essenciais para a integridade estrutural do concreto.

A Figura 17 permitiu observar ainda que o aumento do percentual de CIRSP diminuiu a trabalhabilidade da mistura. Acredita-se que as cinzas tenham absorvido mais água que o ideal, comprometendo a coesão e reduzindo a fluidez do concreto. Com 20 e 25% de CIRSP ficou a clara a desagregação, Figura 19.

Figura 19 - Concreto em desagregação na betoneira com 20% e 25% de CIRSP



Fonte: Autora (2024).

Há vasta literatura que aponta para o comportamento observado nesta pesquisa: o aumento do teor de CIRSP no concreto diminui a trabalhabilidade: Memon; Sheikh; Paracha (2013), Wang; Song (2016), Kaur; Siddique e Rajor (2019), Hamada; Ismail; Závodská (2023) e Matallaha (2023).

Em linhas gerais, esses autores citam que (I) as cinzas tornam a mistura mais seca ou pegajosa, (II) a diminuição da trabalhabilidade está associada à alta

quantidade de carbono não queimado presente nas cinzas, que tende a adsorver e reter água, alterando a relação água/cimento, (III) as partículas finas e irregulares das cinzas comprometem a fluidez do concreto devido à maior absorção de água, (IV) o alto poder de absorção de água das cinzas decorre da sua natureza porosa e morfologia.

Elinwa (2016), que também observou queda progressiva no abatimento do concreto com o aumento da proporção de cinzas, sugerindo o uso de plastificantes para melhorar a manuseabilidade da mistura e permitir maiores níveis de substituição. Da Silva; Silva (2022) observaram maior dificuldade na trabalhabilidade no traço com 10% de cinzas. Kaur; Siddique e Rajor (2019) sugerem substituir até 20% da areia por cinzas.

Os fatores que influenciam a trabalhabilidade do concreto incluem a relação água/cimento, o tipo e a quantidade de cimento, as características dos agregados (como forma, tamanho e textura), a presença ou ausência de aditivos (plastificantes e superplastificantes) e as condições ambientais, como temperatura e umidade.

De acordo com Mehta; Monteiro (2008), um dos principais fatores que afetam o abatimento é a relação água/cimento inadequada. Uma baixa quantidade de água gera um concreto mais seco e rígido, reduzindo a trabalhabilidade e a fluidez. Além disso, a granulometria desfavorável dos agregados também pode comprometer o abatimento. Se a distribuição das partículas é irregular, especialmente com excesso de finos ou agregados muito graúdos, o movimento interno da mistura é dificultado, prejudicando a consistência. A perda de umidade durante o transporte ou manuseio é outro fator que pode impactar o abatimento. O transporte por longas distâncias ou a exposição prolongada antes do lançamento podem provocar evaporação da água, tornando a mistura mais seca e menos trabalhável. Ademais, uma mistura mal homogeneizada pode gerar regiões desiguais, com áreas mais secas que dificultam a uniformidade do resultado no *Slump*. Finalmente, o tempo excessivo de mistura também afeta o comportamento do concreto. Períodos prolongados podem levar à absorção de água pelos agregados e ao início do processo de hidratação do cimento, prejudicando a trabalhabilidade e reduzindo o abatimento.

5.3 Tempo de Pega

O tempo de pega do concreto é um conceito fundamental na construção civil, pois se refere ao intervalo de tempo entre o momento em que o cimento entra em contato com a água e o momento em que ele começa a perder a sua plasticidade, tornando-se rígido e adquirindo resistência. Os fatores que influenciam o tempo de pega são: tipo de cimento, temperatura, aditivos e proporção água/cimento.

Nesta pesquisa, o tempo de pega do concreto também demonstrou ser influenciado pela presença de cinzas. De um modo geral, quanto maior o percentual de cinzas incorporado, mais rápido ocorreu o endurecimento da mistura, resultando em um tempo de pega reduzido. É importante destacar que essa tendência não é unânime na literatura, refletindo diferenças nas propriedades químicas e na reatividade de cada cinza utilizada, apontando para a necessidade de novos estudos.

Alguns autores observaram o aumento do tempo de pega com a adição de cinzas de RSS e atribuíram esse comportamento à baixa reatividade pozolânica das cinzas e à diluição dos compostos hidratáveis do cimento Portland, sugerindo que as cinzas podem atuar como retardadoras do tempo da pega (Memon, Sheikh. Paracha, 2013; Elinwa, 2016).

Por outro lado, Manjunatha (2023) identificaram que o tempo de pega diminuiu com o aumento da proporção de cinzas na mistura. Para os autores, isso ocorre devido à natureza absorvente das cinzas, redução da quantidade de cimento nos sistemas mistos e presença de altos teores de álcalis (9%) nas cinzas, que aceleram a hidratação e encurtam o tempo de indução. Para os autores, esse efeito acelerador reforça a importância de se avaliar a composição química das cinzas antes de sua aplicação.

O mesmo autor também destacou que o tempo de pega é sensível à composição química das cinzas de RSS. Segundo o autor, a presença de SiO_2 e Al_2O_3 tende a prolongar o tempo de pega das pastas, enquanto altos teores de álcalis aceleram o processo de endurecimento. Essas variações mostram que o controle da composição das cinzas é essencial para obter o tempo de pega ideal em aplicações específicas.

O tempo de pega rápida do concreto apresenta vantagens significativas em diversas aplicações que demandam agilidade na execução e cura do material. Em

intervenções emergenciais, como o fechamento de fissuras em estruturas, calçadas e muros, a rápida consolidação do cimento é essencial, sobretudo em locais de grande circulação de veículos e pedestres, onde a espera prolongada para a secagem pode comprometer a funcionalidade do espaço. Além disso, sua utilização é fundamental na fixação de elementos estruturais, permitindo a instalação eficiente de postes, placas e calçadas pré-moldadas, sem comprometer a estabilidade ou a segurança estrutural. Em ambientes úmidos ou submersos, como sistemas de esgoto, reservatórios e canais de água, o tempo de pega acelerado impede a dispersão do cimento antes de sua completa consolidação, garantindo maior resistência e durabilidade da estrutura. Dessa forma, a adoção da pega rápida contribui para a otimização dos processos construtivos, especialmente em cenários onde a eficiência e a minimização de impactos operacionais são primordiais.

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve por objetivo analisar o efeito da adição das Cinzas da Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos (CIRSP) sobre as propriedades físicas e mecânicas de Concretos de Cimento Portland (CCP). Após a caracterização física e química do material, moldagem das misturas e ensaio sobre os corpos de prova, foi possível concluir que:

1. o emprego desse tipo de cinza demanda prévia retirada de materiais grosseiros e britagem para alcançar a granulometria adequada à substituição da areia em misturas de concreto;
2. os demais parâmetros físicos da cinza (granulometria, teor de umidade, módulo de finura, dimensão máxima, massa unitária, teor de material pulverulento, densidade real), mesmo comparados com a literatura local, são específicos do dia/período da coleta;
3. o cálcio, silício, alumínio e enxofre são os principais componentes químicos das cinzas, concordando com a literatura local;
4. aparentemente, as cinzas estudadas tem baixa atividade pozolânica;
5. três dosagens com cinzas (intituladas M5, M10 e M15) apresentaram resistência média à compressão acima dos 20 MPa previstos como valor mínimo para concreto estrutural, ficando comprovado o efeito positivo desses percentuais de substituição sobre essa propriedade;
6. entre as dosagens M5, M10 e M15, a dosagem M10 foi a que apresentou o menor desvio padrão entre os valores da resistência à compressão;
7. não é recomendado o uso de dosagens superiores a 15% de substituição de areia por CIRSP;
8. houve uma relação diretamente proporcional entre o acréscimo das cinzas e a redução da resistência à compressão dos concretos;
9. em geral, todas as rupturas (do concreto de referência até a M25) foram classificadas como desejáveis à luz da Norma Brasileira, indicando execução correta dos ensaios;
10. houve uma relação diretamente proporcional entre o acréscimo das cinzas e a redução dos valores do abatimento, mas a M5 teve o mesmo resultado do concreto de referência;

11. em linhas gerais, a introdução de cinzas resultou em concretos mais secos e firmes, restringindo aplicações futuras (caso utilizado da forma pesquisada);
12. a trabalhabilidade das misturas com 5, 10 e 15% de CIRSP foi classificada como adequada, ou seja, sem sinais de segregação, exsudação ou perda de resistência;
13. em linhas gerais, a introdução de cinzas encurtou o tempo de pega, ou seja, mais rápido ocorreu o endurecimento da mistura e, em algumas aplicações, essa característica é fundamental.

7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A análise de concretos com teores de CIRSP devidamente ativadas por processos de moagem a seco, calcinação, moagem úmida e combinações e/ou com adição de aditivos e plastificantes;

A análise da atividade pozolânica da CIRSP e de sua capacidade de substituição do cimento em misturas de concreto;

A análise de solubilização e lixiviação de concretos contendo CIRSP.

.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA AMBIENTAL DE PORTUGUAL – AAP. **Resíduos Perigosos**. 2019. Disponível em: <https://rea.apambiente.pt/content/res%C3%ADduos-perigosos>. Acesso em: 04 abr. 2025.
- AGÊNCIA AMBIENTAL EUROPEIA - AEA, **Relatório sobre gestão de resíduos**. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt>. Acesso em: 05 set. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. **Resolução 222**. Regulamenta as boas práticas de gerenciamento dos resíduos de serviços de saúde e dá outras providências. 2018.
- AGUIAR *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. 1ª sessão, Centro de Congressos de Lisboa, Praça das Indústrias, Lisboa. **Anais...** Lisboa, 2002.
- AKYÖLDÜZ, A.; KÖSE, E. T.; YÖLDÜZ, A. Compressive strength and heavy metal leaching of concrete containing medical waste incineration ash. **Construction and Building Materials**, v.138, p. 326-332, mai., 2017.
- ALAM, P.; SINGH, D.; KUMAR, S. Incinerated municipal solid waste bottom ash bricks: a sustainable and cost-efficient building material. **Material Today: Proceedings**, v.49, p.1566-1572, part 5., 2021.
- ALCANTARA, M. R. G. **Estudo da utilização de cinzas pesadas de termoeletricas para produção de blocos de concreto para pavimentos intertravados**. 2018. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- ALENCAR, V. L. L. **Caracterizacao geotecnica de solo estabilizado com cimento e cinzas de residuos solidos da saude**. 2022. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.
- ALLEGRIANI *et al.* Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash. **Journal of Environmental management**, v.151, p.132-143, 2015.
- ANDOLFATO, R. P. **Desenvolvimento das técnicas de produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural na escala (1: 4)**. 2002. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2002.
- ANDRADE, C. E. S. **Análise e caracterização de cinzas do processo de incineração de resíduos de serviço de saúde para reaproveitamento**. 2012. 74f. Dissertação (Mestrado Engenharia Química), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ARUNTAŞ, H. Y.; NALLI, E.; KAPLAN, G. Use of ready-mixed concrete plant wastewater in concrete with superplasticizer: effect on physico-mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v.348, sep., 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Norma Brasileira - NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, RJ. 1991.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ. 2024.

_____. **NBR 6457**: Determinação de umidade, Rio de Janeiro RJ. 2016.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ. 2022.

_____. **NBR 7215**: Determinação da resistência à compressão de cimento Portland. Rio de Janeiro, RJ. 2020.

_____. **NBR 7223**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, RJ. 1992.

_____. **NBR 8522**: determinação do módulo estático de elasticidade e o módulo de deformação do concreto. Rio de Janeiro, RJ. 2017.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais. Rio de Janeiro, RJ. 2015.

_____. **NBR 9781**: Peças de Concreto para pavimentação. Rio de Janeiro, RJ. 2013.

_____. **NBR 9833**: Método de ensaio para determinar a massa específica, o rendimento e o teor de ar do concreto fresco utilizando o método gravimétrico. Rio de Janeiro, RJ. 2008.

_____. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, RJ. 2004.

_____. **NBR 10844**: Drenagem Pluvial. Rio de Janeiro, RJ. 2020.

_____. **NBR 11.175**: Incineração de resíduos sólidos perigosos - Padrões de desempenho - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ. 1990.

_____. **NBR 11.3749**: Requisitos para execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, RJ. 2017.

_____. **NBR 12.042**: estabelece o procedimento para avaliar a resistência ao desgaste por abrasão em concretos, utilizando o método de ensaio conhecido como abrasímetro. Rio de Janeiro, RJ. 2008.

_____. **NBR 12.235:** Armazenamento de Resíduos Sólidos Perigosos. Rio de Janeiro, RJ. 1992.

_____. **NBR 12.653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ. 2016.

_____. **NBR 12.655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ. 2022.

_____. **NBR 15577:** Os procedimentos e critérios para prevenir e avaliar os efeitos da reação álcali-agregado em concretos. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

_____. **NBR 16.697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

_____. **NBR 16.889:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump test). Rio de Janeiro, RJ. 2020.

_____. **NBR 16.915:** Quarteamento - Amostragem. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 16.916:** Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 16.917:** Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 16.972:** Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 16973:** Material pulverulento. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 16974:** Agregado graúdo - Ensaios de resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles*. Rio de Janeiro, RJ. 2022.

_____. **NBR 17054:** Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ. 2022.

_____. **NBR NM 52:** Massa específica de agregados miúdos, Rio de Janeiro RJ. 2003.

_____. **NBR NM 53:** Massa específica de agregados Graúdos, Rio de Janeiro RJ. 2004.

_____. **NBR NM 248:** Granulometria. Rio de Janeiro, RJ. 2003.

BARROS, R. T. V. **Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos**. Belo Horizonte, Tessitura, 424p., 2012.

BARROS-REIS, J.; LOPES, M. G. Escórias de RSU: caracterização mecânica para fins rodoviários. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 10, Lisboa, **Anais...**Portugal, 2006.

BASTOS *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, **Anais...** Curitiba, ABES, 2021.

BOSIO *et al.* A Sustainable Technology for Pb and Zn Stabilization Based on the Use of Waste Materials Alone: a green chemistry approach to avoid chemicals and promote CO₂ sequestration. **Chem. Eng.** v.253, 2014.

BRAGA, S. M. **Estudo do comportamento de concreto de diferentes teores de resíduos de fresado de pavimentos asfálticos**. 2024. 129f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia em Gestão Ambiental), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Fortaleza, 2024.

BRASIL. REPÚBLICA FEDERATIVA DO. Lei 12.305/2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **DOU**: Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRITISH STANDARD INSTITUTION - BSI. **Testing hardened concrete - Compressive strength of test specimens**. London, 2002.

CARVALHO, J. L. V.; SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; SOUSA, J. G. G. Caracterização físico-química de cinzas de resíduos perigosos para uso na construção civil. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v.27, n.4, 2022.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. In: **Compósitos madeira-cimento**: um produto sustentável para o Futuro. Mossoró: EDUFERSA, p.13-21, 2021.

CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies**. Butterworth-Heinemann. 2002.

CHIMENOS *et al.* Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. **Journal of hazardous materials**, v.64, n.3, p.211-222., feb., 1999.

CHRISTENSEN, T. H. **Solid Waste Technology & Management**. Wiley Online Library. 2010.

CLAVIER *et al.* Opportunities and challenges associated with using municipal waste incineration ash as a raw ingredient in cement production - a review. **Resources, Conservation and Recycling**. v.160, sep., 2020.

COBO, M. A.; GALVEZ, J. A; CONESA, C. M. Characterization of fly ash from a hazardous waste incinerator in Medellín, Colombia. **Journal of Hazardous Materials**. v.168, n.2-3, sep., 2009.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução 313**. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. 2002.

_____. **Resolução 316**. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. 2002.

CORDEIRO *et al.* Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído**, v.19, n.1, p.45-55, 2019.

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

COUTINHO, N. C.; VIEIRA, C. M. F. Characterization and incorporation of MSWI ash in red ceramic. **Cerâmica**, v.62, p.249-255. 2016.

DA SILVA, R. B. L. **Caracterização físico-química preliminar dos efluentes da incineração de resíduos perigosos de Fortaleza-CE**. 2017. 79p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Fortaleza, 2017.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ME 093: Densidade real dos agregados miúdos. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DINAMARQUÊS *et al.* Valorization of biomass ashes in the production of cementitious composites: a comprehensive review of properties and performance. **Construction and Building Materials**, v.405, nov., 2023.

DOBISZEWSKA *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, jun., 2023.

DOURADO, I. N. **Avaliação da aplicabilidade de cinzas de fundo de resíduo sólido urbano (RSU) em camadas de pavimento**. 2013. 125p. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, 2013.

EIGHMY *et al.* Particle petrogenesis and speciation of elements in MSW incineration bottom ashes. **Studies in Environmental Science**. v.60, p.111-136, 1994.

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

FORTALEZA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. **Lei Municipal 10.340**: Altera os arts. 1º ao 33 da Lei 8.408, de 24 de dezembro de 1999, e dá outras providências. Fortaleza, 2015.

GAO *et al.* Utilization of municipal solid waste incineration fly ash in ecological concrete and pavement bricks: Mechanical properties and environmental impact. **Case Studies in Construction Materials**, v.21, 2024.

GARCÍA *et al.* Systematic review on the use of waste foundry sand as a partial replacement of natural sand in concrete. **Construction and Building Materials**, v.430, 2024.

GONÇALVES *et al.* Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v.37, n.6, 2007.

GRAUPMANN *et al.* Analysis of the compressive strength of concrete with addition of ash from landfill. **Revista Materia**, v.24, n.02, e-12348, 11p., 2019.

GUEDES, P. H. F. **Análise da viabilidade técnica do uso de resíduos sólidos em concreto**. 2021. 68f. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2021.

GUPTA *et al.* MSW incineration bottom ash (MIBA) as a substitute to conventional materials in geotechnical applications: A characterization study from India and comparison with literature. **Construction and Building Materials**, v.308, 2021.

HAMADA, L. K.; ISMAIL, Z. Z.; ZÁVODSKÁ, A. Sustainable utilization of mixed healthcare waste as aggregate in lightweight concrete mixes: mechanical behavior, water absorption and leaching studies. **Journal of Science and Technology in Civil Engineering**, v.17, n.3, p.33-45, 2023.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais** (Organizador/editor). IBRANCON, capítulo 29, p.905-943, 2010.

HONESTO *et al.* Assessment of the heavy metal-levels in the incinerators bottom-ash from different hospitals in Dares Salaam. **African Journal of Environmental Science and Technology**. v.14, n.11, p.347-360, 2020.

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, 2022.

KAUR, H.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, A. Effect of bacteria on strength properties and toxicity of incinerated biomedical waste ash concrete. **Environmental Technology**, v.44, n.12, p.1705-1729, 2023.

_____. Influence of incinerated biomedical waste ash on the properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v.226, p.428-441, 2019.

LI *et al.* Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement. **Journal of Cleaner Production**, v.32, p.96-100, set., 2012.

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

LOMBARDI *et al.* Mechanical and leaching properties of fly ash incinerator of cement-solidified hospital solid waste incinerator, **Waste Management**, v.18, n.2, p.99-106, 1998.

LU *et al.* Status and perspectives of municipal solid waste incineration in China: A comparison with developed regions. **Waste Management**, v.69, p.170-186, 2017.

MACHADO, A. C. Técnicas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.6, p. 561-567, 2015.

MANJUNATH *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, n.17, jul., 2023.

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

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.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, 2008.

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

METCALF, L.; EDDY, H. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4. ed. New York: **McGraw-Hill**, 2003.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO - MTE. **Norma Regulamentadora 25**. Dispõe sobre resíduos industriais. Brasília, DF, 1978.

MOJAPELO *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. 98f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Fortaleza, 2023.

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

NITSH, J. G. **Estudo de alternativas para reuso, tratamento e destinação final de cinzas de fundo geradas no processo de incineração de resíduos sólidos**

urbanos. 2014. 61f. Monografia (Graduação em Engenharia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

OLIVEIRA *et al.* Gestão de resíduos orgânicos e viabilidade financeira: um estudo de caso. **Research Society and Development**, v.10, n.2, feb., 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS. **Incineração de Resíduos de Saúde**. 2017. Disponível em: <https://www.who.int/> Acesso em: 05 set. 2024.

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.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**, 307p. 1998.

PINTO, B. H. A. **Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde**. 2018. 24f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

RAJ, S.; SINGH, H.; BHATTACHARYA, J. Textile industry wastewater treatment based on coagulation-flocculation-assisted sedimentation followed by adsorption: Process studies in an industrial ecology concept. **Science of The Total Environment**, v.857, part 2., jan., 2023.

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

RIFA *et al.* Systematic comparison of performance of recycled concrete fine aggregates with other alternative fine aggregates: An approach to find a sustainable alternative to river sand. **Journal of Building Engineering**, v.78, nov., 2023.

SANTOS, A. C. F. dos. **A incineração na gestão e gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde**: revisão e estudo de caso. 2016.86f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SANTOS, G. O. **Resíduos sólidos domiciliares, ambiente e saúde: (Inter)relações a partir da visão dos trabalhadores do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos de Fortaleza-CE**. 2008. 164p. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL - SNSA. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília: Ministério das Cidades, 2023.

SILVA, W. B. C.; BARROSO, S. H. A.; CABRAL, A. E. B. Avaliação da aplicação de cinzas pesadas de termelétrica em blocos intertravados de concreto para pavimentos. **Revista Materia**, v.25, n.01, e-12570, 16p., 2020.

SIMON, F. G., KALBE, U. Case study on secondary building materials for a greener economy. **Appl. Sci.** v.13, n.10, 2023.

SINGH *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, e01434, dec., 2022.

SOUZA *et al.* Avaliação de blocos para pavimento intertravado com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos cerâmicos. **Revista Interdisciplinar em Saúde, Cajazeiras**, v.6, n.3, p.23-44, ago., 2019.

SOUZA, T. E. **Autoclavagem e incineração no tratamento de resíduos de serviços de saúde: um problema, duas soluções**. Monografia (Especialização), Universidade de Taubaté, 2009.

TABASOVÁ *et al.* Waste-to-energy technologies: Impact on environment. **Energy**, v.44, n.1, p.146-155, 2012.

TAHERLOU, A.; ASADOLLAHFARDI, G.; SALEHI, A. M.; KATEBI, A. Sustainable use of municipal solid waste incinerator bottom ash and the treated industrial wastewater in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v.297, n.23, aug., 2021.

TAKAYANAGUI, A. M. M. **Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde**. In: PHILLIPI JÚNIOR, A. Saneamento saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Manole, 2005.

TCHOBANOGLOUS, G. K. F. **Handbook of solid waste management**. Mcgraw-hill, 2002.

VARSHNEY, H.; KHAN, R. A.; KHAN, I. K. Sustainable use of different wastewater in concrete construction: A review. **Journal of Building Engineering**, v.41, p.102411, 2021.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da resistência à compressão, resistência à tração e formação de microfissuras em concretos produzidos com diferentes tipos de cimentos, quando aplicado um pré-carregamento de compressão. **Ambient constr.** v.11, n.1, mar., 2011.

WANG, L. K.; HUNG, Y.; SHAMMAS, N. K. Physicochemical Treatment Processes. **Handbook of Environmental Engineering**, v.3, 2004.

WANG, Z.; SONG, Y. Adsorption properties of CFBC cement ash slurries compared to PCC cement fly ash slurries. **International Journal of Coal Science & Technology**, v.3, n.1, p.62-67, 2016.

WEI *et al.* Mineralogical characterization of municipal solid waste incineration bottom ash with an emphasis on heavy metal-bearing phases. **Journal of Hazardous Materials**, v.187, n.1-3, p.534-543, 2011.

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

ZHANG, L.; YANG, S. Performance of concrete containing different percentages of fly ash and bottom ash. **Construction and Building Materials**, v.98, p.102-110, 2016.

ZHU *et al.* Emission characteristics of PCDD/Fs in stack gas from municipal solid waste incineration plants in Northern China. **Chemosphere**, v.200, p.23-29, 2018

Apêndice A – Cálculo do Traço

Estudo de Dosagem do Concreto Dosagem Racional e Experimental

1. Dados do Concreto:

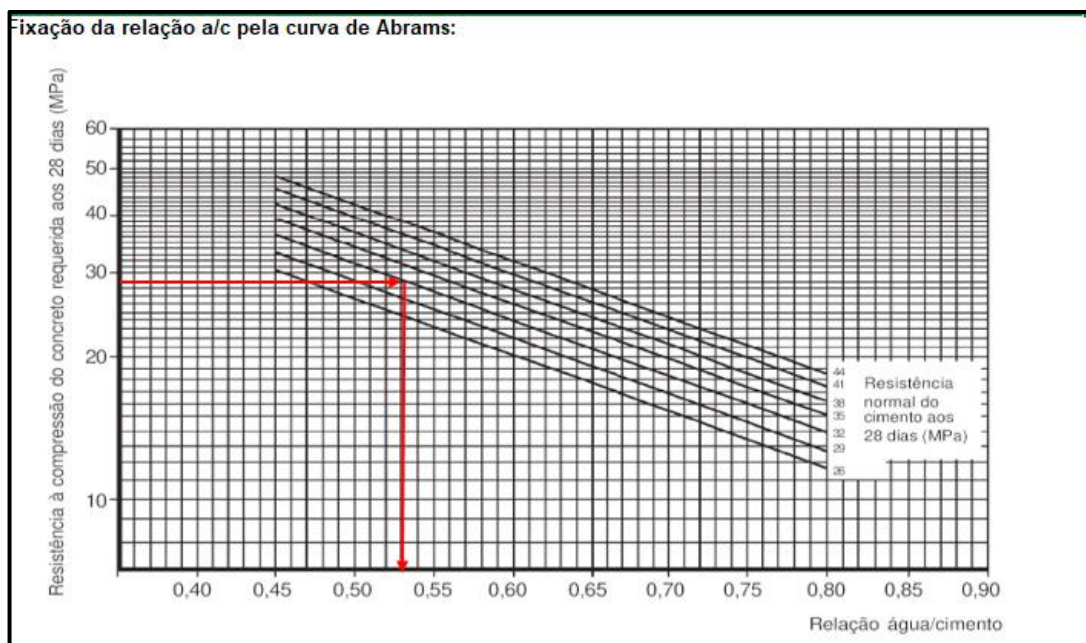
fck28 =	20	MPa	Classe =	C20
Condição de preparo =	B	(tab.7)	sd =	5,5 MPa
fcm28 =	29,1	MPa	Grupo =	I
Abatimento =	50	(+/- 10) mm	Classe =	C20 S50

2. Dados do Agregados:

AREIA	BRITA 1
Módulo de finura = 2,48	D máx = 25,4 mm
Massa unitária = 1320 kg/m³	Massa unitária = 1462,5 kg/m³
Massa específica = 2530 kg/m³	Massa específica = 2530 kg/m³

3. Dados do Cimento:

Tipo = CP III	Resistência aos 28 dias = 32 MPa
Classe = 32	
Massa específica = 3100 kg/m³	



4. Fixação da relação a/c pela curva de Abrams:

Resist. normal do cimento = 32 Mpa

Resist. requerida do concreto = 29,1 Mpa

Fator a/c =

0,53

=> Retirado da curva de Abrams.

5. Determinação aproximada do consumo de água (Ca):

Consumo de água aproximado

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

Abatimento = 50 (+/- 10) mm

D máx = 25,4 mm

Ca = **195** litros

6. Determinação do consumo de cimento (Cc):

Ca = 195 litros/m³

Fator a/c = 0,53

Formulário

:

Cc = 368 kg/m³

Cc = Ca / a/c

7. Determinação do consumo de agregado graúdo (Cb):

MF	D _{max} (mm)					
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0	
1,8	0,645	0,710	0,795	0,820	0,845	
2,0	0,625	0,720	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	

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/m³.

Módulo de finura = 2,48

D máx = 25,4 mm

Vc = 0,730 m³

=> Retirado do Quadro acima

Mc = 1500 kg/m³

=> Adotado.

Formulário

:

Cb = 1095

kg/m³

Cb = Vc x Mc

8. Determinação do consumo de agregado miúdo (Cm):

Cc = 368 kg/m³

Massa específica cimento = 3100 kg/m³

Cb = 1095 kg/m³

Massa específica brita = 2530 kg/m³

Ca = 195 litros/m³

Massa específica água = 1000 kg/m³

Massa específica 2530 kg/m³
areia =

Formulário
:

Volume de Areia (Va) 0,25348 m³ Va = 1 - ((Cc/Mesp.c)+(Cb/Mesp.b)+(Ca/Meso.a))
= 4
Cm = 641 kg/m³ Cm = Mesp.areia x Va

9. Apresentação do traço em massa (resultado final da dosagem):

Cimento : Agregado Miúdo : Agregado Graúdo: Fator a/c

Cc/Cc : Cm/Cc : Cb / Cc : a/c

1 : 641/368 : 1095/368 : 0,53

1 : 1,74 : 2,98 : 0,53

Fonte: Autora (2024).

Apêndice B – Quantidade de Insumos por m³.

TRAÇO (KG/M3)	CIMENTO (KG/M3)	AREIA (KG/M3)	BRITA (KG/M3)	CINZA PENEIRADA (KG/M3)	ÁGUA (KG/M3)
<i>REF</i>	368	736	736	0	202,4
<i>ALT 1-25%</i>	368	552	736	184	202,4
<i>ALT 2-50%</i>	368	368	736	368	202,4
<i>ALT 3-75%</i>	368	184	736	552	202,4
<i>ALT 4- 100%</i>	368	0	736	736	202,4

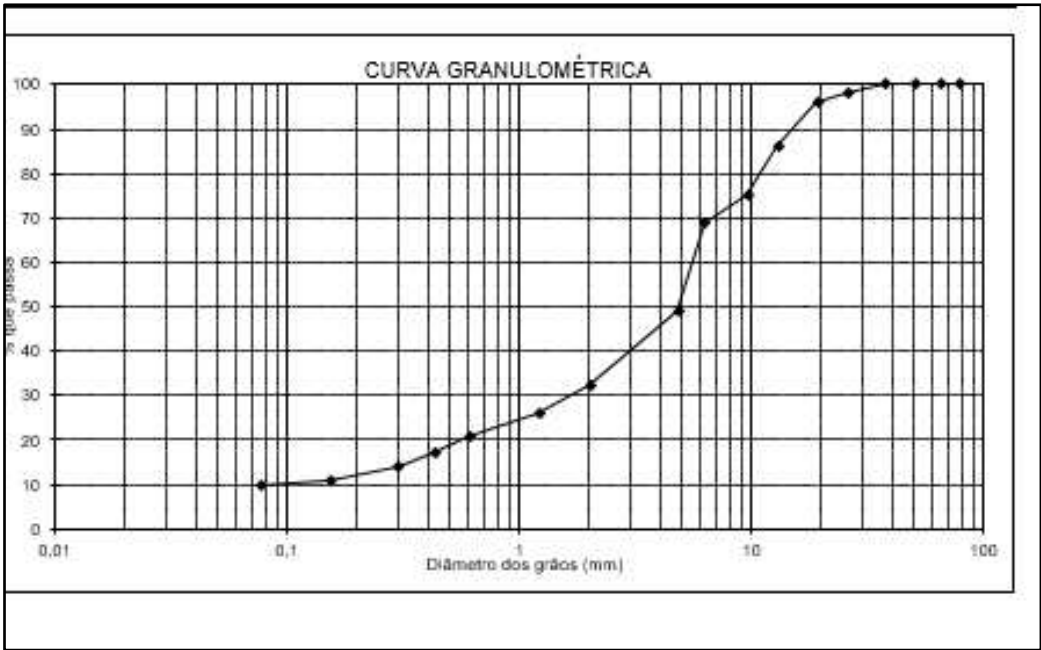
✓ Transformando o valor do cimento para kg= $368/100 = 3,68$ Kg de cimento
Traço inicial = 1 : 1,74 : 2,98 : 0,53
Cimento = 3,68kg
Agregado miúdo(areia)= $3,68 \times 1,74 = 6,40$ kg
Agregado graúdo(brita)= $3,68 \times 2,98 = 10,96$ kg
Água $3,68 \times 0,53 = 1,95$ l

✓ Ajustando o traço para melhor trabalhabilidade do concreto:
Cimento: 6 kg
Areia: 12Kg
Brita: 12Kg
Água 3,30 litros

Fonte: Autora (2024).

Apêndice C – Análise Granulométrica por Peneiramento (Cinza Catada)

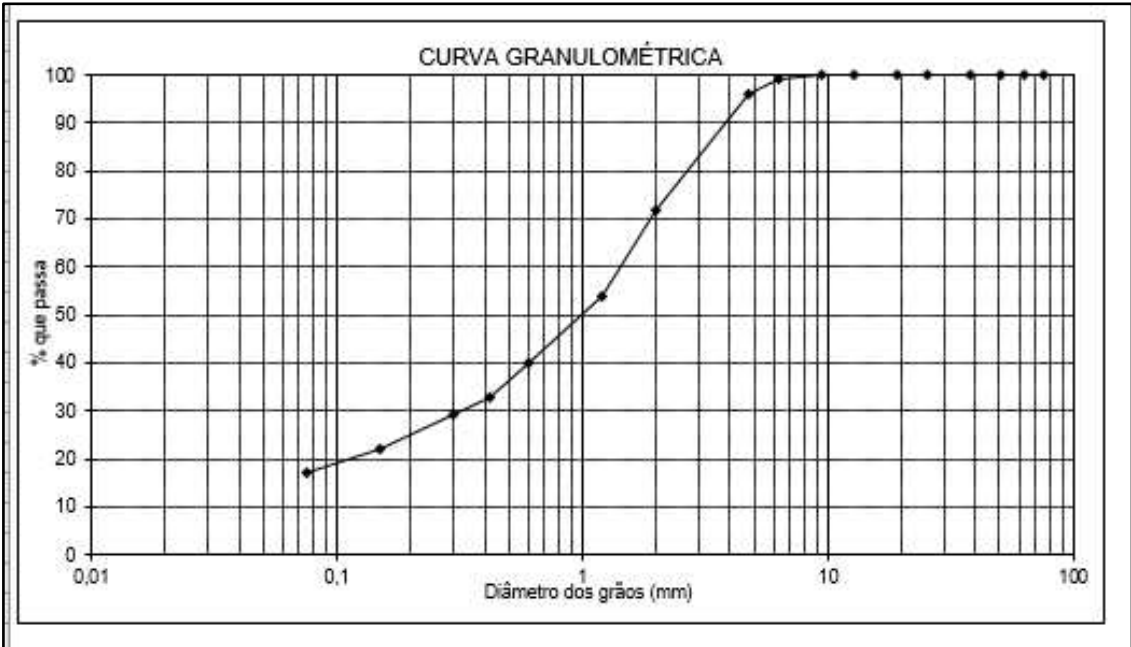
UMIDADE					
CÁPSULA N° 1			AMOSTRA TOTAL		TOTAL
P.b.h.	46,69		P. ÚMIDO		1500,00
P.b.s.	44,03		P. RETIDO NA # N° 10		989,33
Tara	16,39		P.h. PASSA # N° 10		510,67
ÁGUA	2,66		P.s. PASSA # N° 10		465,85
SOLO SECO	27,64		P. AMOSTRA SECA		1455,18
UMIDADE %	9,62				91,22
PENEIRAS			P.RETIDO	PESO	% PASSA
	POLEGADAS	mm	PARCIAL (g)	PASSA (g)	AM.TOTAL
M E G R O S S O	3"	76,2	0,00	1455,18	100
	2 1/2"	63,3	0,00	1455,18	100
	2"	50,8	0,00	1455,18	100
	1 1/2"	38,1	0,00	1455,18	100
	1"	25,4	28,98	1426,20	98
	3/4"	19,1	31,78	1394,42	96
	1/2"	12,7	138,57	1255,85	86
	3/8"	9,5	160,00	1095,85	75
	1/4"	6,3	93,07	1002,78	69
	N° 4	4,76	294,93	707,85	49
F I N O	N° 10	2	242,00	465,85	32
	N° 16	1,2	17,82	73,40	26
	N° 30	0,60	13,46	59,94	21
	N° 40	0,42	10,82	49,12	17
	N° 50	0,30	9,95	39,17	14
	N° 100	0,15	7,49	31,68	11
	N° 200	0,075	2,20	29,48	10
OBSERVAÇÕES:					
COMP.GRANULOMÉTRICA (%)					
PEDREGULHO:					51
AREIA GROSSA					17
AREIA MÉDIA:					15
AREIA FINA:					7
SILTE+ARGILA:					10



Fonte: Autora (2024).

Apêndice D – Análise Granulométrica por Peneiramento (Cinza Britada)

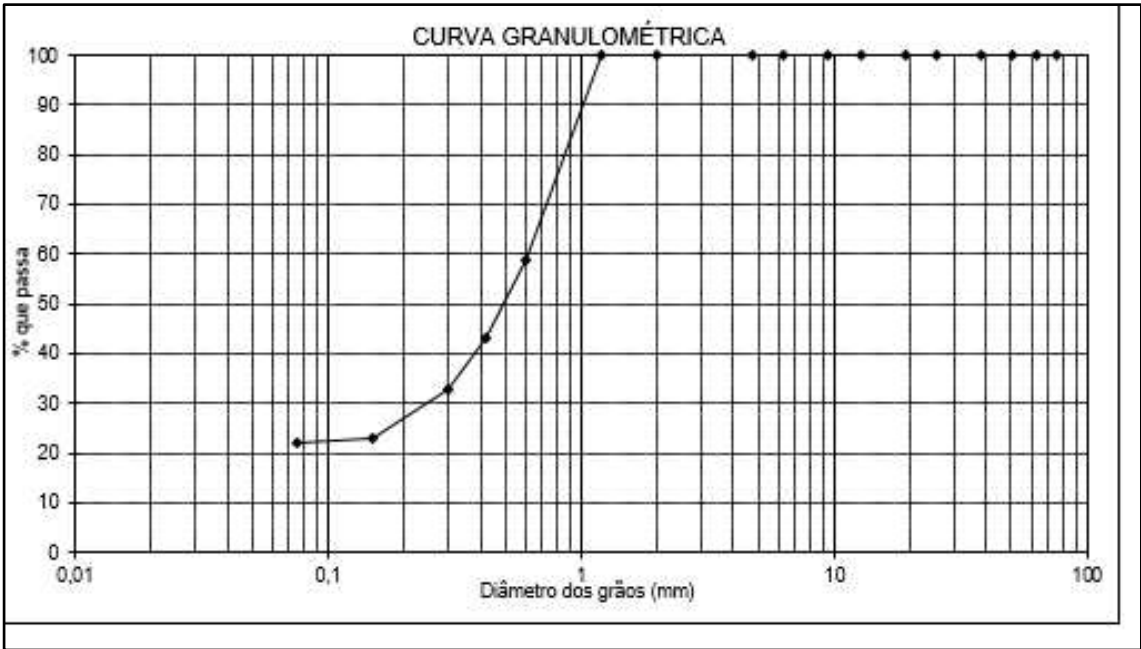
UMIDADE						
CÁPSULA Nº 500			AMOSTRA TOTAL		TOTAL	PARCIAL
P.b.h. 66,89			P. ÚMIDO		1500,00	
P.b.s. 63,60			P. RETIDO NA # Nº 10		400,34	
Tara 14,41			P.h. PASSA # Nº 10		1099,66	100,00
ÁGUA 3,29			P.s. PASSA # Nº 10		1030,71	93,73
SOLO SECO 49,19			P. AMOSTRA SECA		1431,05	93,73
UMIDADE % 6,69						
P	PENEIRAS		P.RETIDO	PESO	% PASSA	OBSERVAÇÕES:
E	POLEGADAS	mm	PARCIAL (g)	PASSA (g)	AM.TOTAL	
N	3"	76,2	0,00	1431,05	100	
.	2 1/2"	63,3	0,00	1431,05	100	
G	2"	50,8	0,00	1431,05	100	
R	1 1/2"	38,1	0,00	1431,05	100	
O	1"	25,4	0,00	1431,05	100	
S	3/4"	19,1	0,00	1431,05	100	
S	1/2"	12,7	0,00	1431,05	100	
O	3/8"	9,5	2,04	1429,01	100	
	1/4"	6,3	11,78	1417,23	99	
	Nº 4	4,76	37,65	1379,58	96	
	Nº 10	2	348,87	1030,71	72	
	Nº 16	1,2	23,12	70,61	54	
	Nº 30	0,60	18,94	51,67	40	
	Nº 40	0,42	8,06	43,61	33	
F	Nº 50	0,30	5,97	37,64	29	
I	Nº 100	0,15	9,60	28,04	22	
N	Nº 200	0,075	5,82	22,22	17	
O						COMP.GRANULOMÉTRICA (%)
						PEDREGULHO: 4
						AREIA GROSSA: 24
						AREIA MÉDIA: 39
						AREIA FINA: 16
						SILTE+ARGILA: 17



Fonte: Autora (2024).

Apêndice E – Análise Granulométrica por Peneiramento Areia

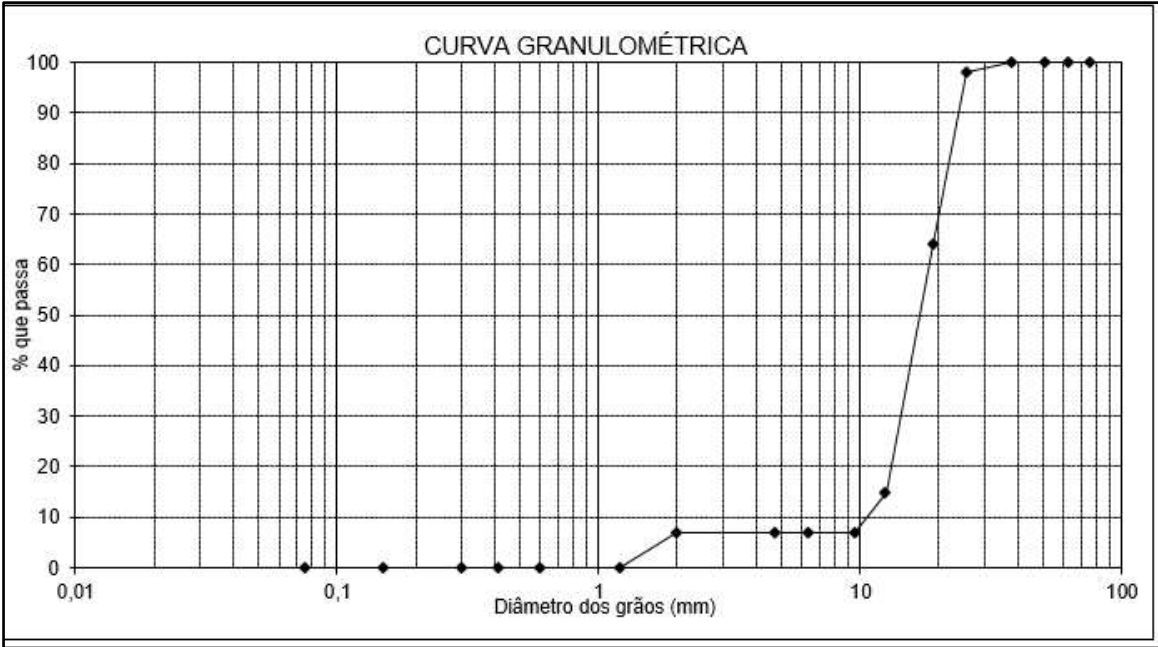
UMIDADE						
CÁPSULA Nº			AMOSTRA TOTAL		TOTAL	PARCIAL
P.b.h.			P. ÚMIDO		505,00	
P.b.s.			P. RETIDO NA # Nº 10		0,00	
Tara			P.h. PASSA # Nº 10		505,00	100,00
ÁGUA			P.s. PASSA # Nº 10		479,13	94,88
SOLO SECO			P. AMOSTRA SECA		479,13	94,88
UMIDADE %						
5,40						
P	PENEIRAS		P.RETIDO	PESO	% PASSA	OBSERVAÇÕES:
E	POLEGADAS	mm	PARCIAL (g)	PASSA (g)	AM.TOTAL	
N	3"	76,2	0,00	479,13	100	
.	2 1/2"	63,3	0,00	479,13	100	
R	2"	50,8	0,00	479,13	100	
G	1 1/2"	38,1	0,00	479,13	100	
O	1"	25,4	0,00	479,13	100	
S	3/4"	19,1	0,00	479,13	100	
S	1/2"	12,7	0,00	479,13	100	
O	3/8"	9,5	0,00	479,13	100	
	1/4"	6,3	0,00	479,13	100	
	Nº 4	4,76	0,00	479,13	100	
	Nº 10	2	0,00	479,13	100	
	Nº 16	1,2	120,47	479,13	100	
	Nº 30	0,60	198,66	280,47	59	
	Nº 40	0,42	73,12	207,35	43	
	Nº 50	0,30	50,82	156,53	33	
	Nº 100	0,15	44,75	111,78	23	
	Nº 200	0,075	8,49	103,29	22	
	FUNDO		4,4	98,89	21	
COMP.GRANULOMÉTRICA (%)						
PEDREGULHO: 0						
AREIA GROSSA: 0						
AREIA MÉDIA: 57						
AREIA FINA: 21						
SILTE+ARGILA: 22						



Fonte: Autora (2024).

Apêndice F – Análise Granulométrica por Peneiramento, Brita

UMIDADE					
CAPSULA Nº			AMOSTRA TOTAL	TOTAL	PARCIAL
P.b.h.			P. ÚMIDO	1000,00	
P.b.s.			P. RETIDO NA # Nº 10	934,78	
Tara			P.h. PASSA # Nº 10	65,22	100,00
ÁGUA			P.s. PASSA # Nº 10	65,22	100,00
SOLO SECO			P. AMOSTRA SECA	1000,00	100,00
UMIDADE %					
P	PENEIRAS		P.RETIDO	PESO	% PASSA
	POLEGADAS	mm	PARCIAL (g)	PASSA (g)	AM.TOTAL
E N G R O S S O	3"	76,2	0,00	1000,00	100
	2 1/2"	63,3	0,00	1000,00	100
	2"	50,8	0,00	1000,00	100
	1 1/2"	38,1	0,00	1000,00	100
	1"	25,4	16,88	983,12	98
	3/4"	19,1	340,43	642,69	64
	1/2"	12,7	496,36	146,33	15
	3/8"	9,5	74,38	71,95	7
	1/4"	6,3	0,00	71,95	7
	Nº 4	4,76	6,55	65,40	7
F I N O	Nº 10	2	0,18	65,22	7
	Nº 16	1,2	0,00	0,00	0
	Nº 30	0,60	0,00	0,00	0
	Nº 40	0,42	0,00	0,00	0
	Nº 50	0,30	0,00	0,00	0
	Nº 100	0,15	0,00	0,00	0
	Nº 200	0,075	0,00	0,00	0
	FUNDO		0	0,00	0
OBSERVAÇÕES:					
COMP.GRANULOMÉTRICA (%)					
PEDREGULHO: 93					
AREIA GROSSA: 0					
AREIA MÉDIA: 7					
AREIA FINA: 0					
SILTE+ARGILA: 0					



Fonte: Autor (2024).

Apêndice G - Cálculo do Módulo de Finura e Dimensão Máxima, Cinza Catada

AMOSTRA 01 (catada)				
Peneiras		massa	porcentagem (%)	
pol	mm	g	retida	acum.
1.1/4"	31,78	-	0,0%	0,0%
1"	25,4	28,98	2,8%	2,8%
3/4"	19,1	31,78	3,0%	5,8%
1/2"	12,7	138,57	13,2%	19,0%
3/8"	9,5	160,00	15,2%	34,2%
1/4"	6,35	93,07	8,9%	43,0%
nº 4	4,76	294,93	28,1%	71,1%
nº 8	2,38	242,00	23,0%	94,1%
nº 16	1,2	17,82	1,7%	95,8%
nº 30	0,6	13,46	1,3%	97,1%
nº 40	0,42	10,82	1,0%	98,1%
nº 50	0,3	9,95	0,9%	99,1%
nº 100	0,15	7,49	0,7%	99,8%
nº 200	0,075	2,20	0,2%	100,0%
	Fundo	-	0,0%	100,0%
	total	1.051,07	100,0%	

Módulo de Finura
= 6,97

D máx (mm) = 25,40 inferior a 5%

Fonte: Autor (2024).

Apêndice H - Cálculo do Módulo de Finura e Dimensão Máxima, Cinza Britada

AMOSTRA 02 (britada)				
Peneiras		massa	porcentagem (%)	
pol	mm	g	retida	acum.
1.1/4"	31,78		0,0%	0,0%
1"	25,4		0,0%	0,0%
3/4"	19,1		0,0%	0,0%
1/2"	12,7		0,0%	0,0%
3/8"	9,5	2,04	0,4%	0,4%
1/4"	6,35	11,78	2,5%	2,9%
nº 4	4,76	37,65	8,0%	10,9%
nº 8	2,38	348,87	73,9%	84,8%
nº 16	1,2	23,12	4,9%	89,7%
nº 30	0,6	18,94	4,0%	93,8%
nº 40	0,42	8,06	1,7%	95,5%
nº 50	0,3	5,97	1,3%	96,7%
nº 100	0,15	9,60	2,0%	98,8%
nº 200	0,075	5,82	1,2%	100,0%
	Fundo	-	0,0%	100,0%
	total	471,85	100,0%	

Módulo de
Finura = 5,75

D máx (mm) = 6,35

inferior a
5%

Fonte: Autor (2024).

Apêndice I - Cálculo do Módulo de Finura e Dimensão Máxima, Areia

AMOSTRA areia					AMOSTRA 02(britada)				
Peneiras		massa	porcentagem (%)		Peneiras		massa	porcentagem (%)	
pol	mm	g	retida	acum.	pol	mm	g	retida	acum.
1.1/4"	31,78	-	0,0%	0,0%	1.1/4"	31,78		0,0%	0,0%
1"	25,4	-	0,0%	0,0%	1"	25,4		0,0%	0,0%
3/4"	19,1	-	0,0%	0,0%	3/4"	19,1		0,0%	0,0%
1/2"	12,7	-	0,0%	0,0%	1/2"	12,7		0,0%	0,0%
3/8"	9,5	-	0,0%	0,0%	3/8"	9,5	-	0,0%	0,0%
1/4"	6,35	-	0,0%	0,0%	1/4"	6,35	-	0,0%	0,0%
nº 4	4,76	-	0,0%	0,0%	nº 4	4,76	-	0,0%	0,0%
nº 8	2,38	28,61	2,9%	2,9%	nº 8	2,38	34,81	3,5%	3,5%
nº 16	1,2	140,17	14,0%	16,9%	nº 16	1,2	154,30	15,4%	18,9%
nº 30	0,6	354,66	35,5%	52,4%	nº 30	0,6	340,88	34,1%	53,0%
nº 40	0,42	-	0,0%	52,4%	nº 40	0,42	-	0,0%	53,0%
nº 50	0,3	236,98	23,7%	76,1%	nº 50	0,3	262,43	26,2%	79,2%
nº 100	0,15	208,88	20,9%	97,0%	nº 100	0,15	177,37	17,7%	97,0%
nº 200	0,075	-	0,0%	97,0%	nº 200	0,075	-	0,0%	97,0%
	Fundo	30,09	3,0%	100,0%		Fundo	30,29	3,0%	100,0%
	total	999,39	100,0%			total	1.000,08	100,0%	
Módulo de Finura = 2,45					Módulo de Finura = 2,52				
D máx (mm) = 2,38					D máx (mm) = 2,38				

Fonte: Autor (2024).

Média=2,48

Apêndice J - Cálculo do Módulo de Finura e Dimensão Máxima, Brita

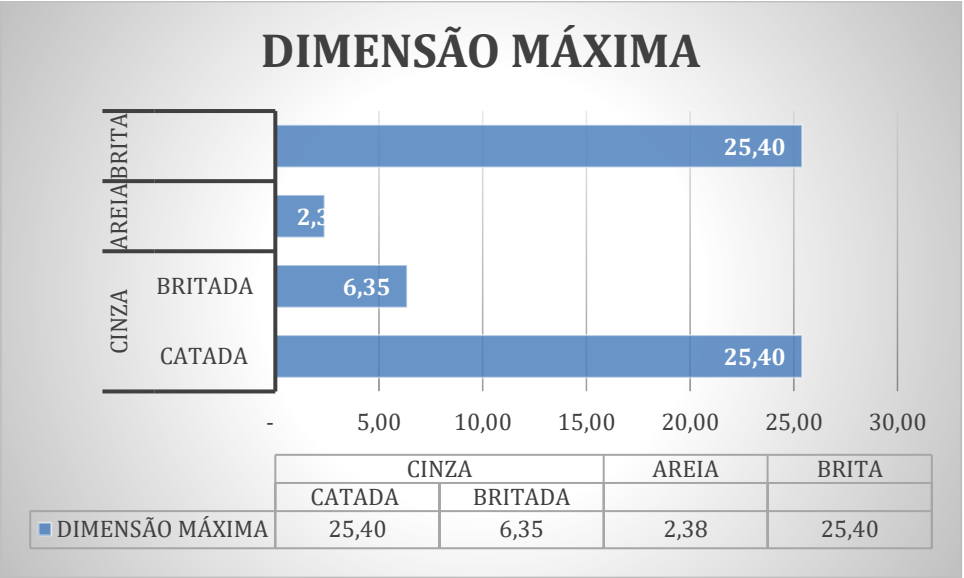
BRITA				
Peneiras		massa	porcentagem (%)	
pol	mm	g	retida	acum.
1.1/4"	31,78	-	0,0%	0,0%
1"	25,4	-	0,0%	0,0%
3/4"	19,1	690,30	13,8%	13,8%
1/2"	12,7	3.506,70	70,1%	83,9%
3/8"	9,5	553,80	11,1%	95,0%
1/4"	6,35	225,40	4,5%	99,5%
nº 4	4,76	-	0,0%	99,5%
nº 8	2,38	-	0,0%	99,5%
nº 16	1,2	-	0,0%	99,5%
nº 30	0,6	-	0,0%	99,5%
nº 40	0,42	-	0,0%	99,5%
nº 50	0,3	-	0,0%	99,5%
nº 100	0,15	-	0,0%	99,5%
nº 200	0,075	-	0,0%	99,5%
	Fundo	25,70	0,5%	100,0 %
	total	5.001,90	100,0%	

Módulo de
Finura = 8,05

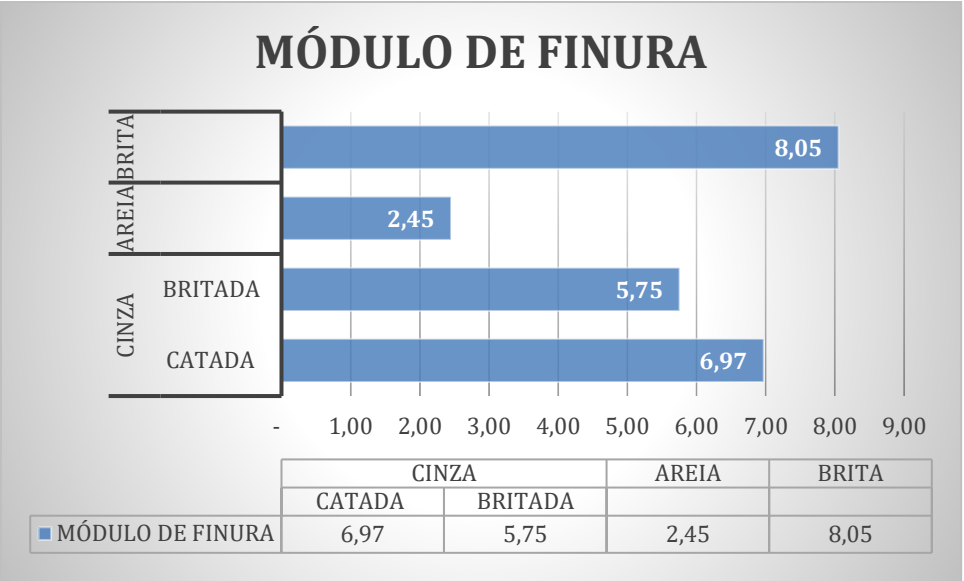
D máx (mm) = 25,40

Fonte: Autor (2024).

Apêndice L – Gráficos da Caracterização



Fonte: Autor (2024).



Fonte: Autor (2024).

Apêndice M – Densidade Real Cinzas e Areia

DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL DOS GRÃOS DE SOLOS PELO MÉTODO DO PICNÔMETRO										
AMOSTRA	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	δ	$\Delta\delta$	δ	T °	K ₂₀	δ -20°
Amostra CINZAS britada	40,05	50,79	96,10	89,76	2,441	0,067	ERRO	24	0,9998	#VALOR!
	40,17	50,40	97,25	91,33	2,374					
	37,28	47,75	91,82	88,74	1,417					

média 2,374

DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL DOS GRÃOS DE SOLOS PELO MÉTODO DO PICNÔMETRO										
AMOSTRA	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	δ	$\Delta\delta$	δ	T °	K ₂₀	δ -20°
areia	40,81	51,94	98,49	91,45	2,721	0,028	ERRO	23	0,9998	#VALOR!
	29,40	43,24	88,03	79,48	2,616					
	37,24	51,62	97,84	88,80	2,693					

média 2,693

Fonte: Autor (2024).

Apêndice N - Massa Unitária, Massa Específica, Absorção, Material Pulverulento

<i>ENSAIO MASSA UNITÁRIA</i>	<i>CINZAS BRITADA (MM)</i>	<i>AREIA(MM)</i>	<i>BRITA</i>	<i>BRITA(compactada)</i>
	<i>1,001 G/cm3</i>	<i>1,32 G/cm3</i>	<i>1462,50</i>	<i>1612,50</i>

<i>ENSAIO MASSA ESPECIFICA</i>	<i>CINZAS BRITADA (MM)</i>	<i>AREIA(MM)</i>	<i>BRITA</i>
	<i>2,50 G/cm3</i>	<i>2,53 G/cm3</i>	<i>2,53 G/cm3</i>

<i>ENSAIO ABSORÇÃO</i>	<i>CINZAS BRITADA (MM)</i>	<i>AREIA(MM)</i>	<i>BRITA</i>
			<i>0,65%</i>

<i>ENSAIO MATERIAL PULVERULENTO</i>	<i>CINZAS BRITADA (MM)</i>	<i>AREIA(MM)</i>	<i>BRITA</i>
	<i>0,16%</i>	<i>0,44%</i>	<i>3,09%</i>

Fonte: Autor (2024).

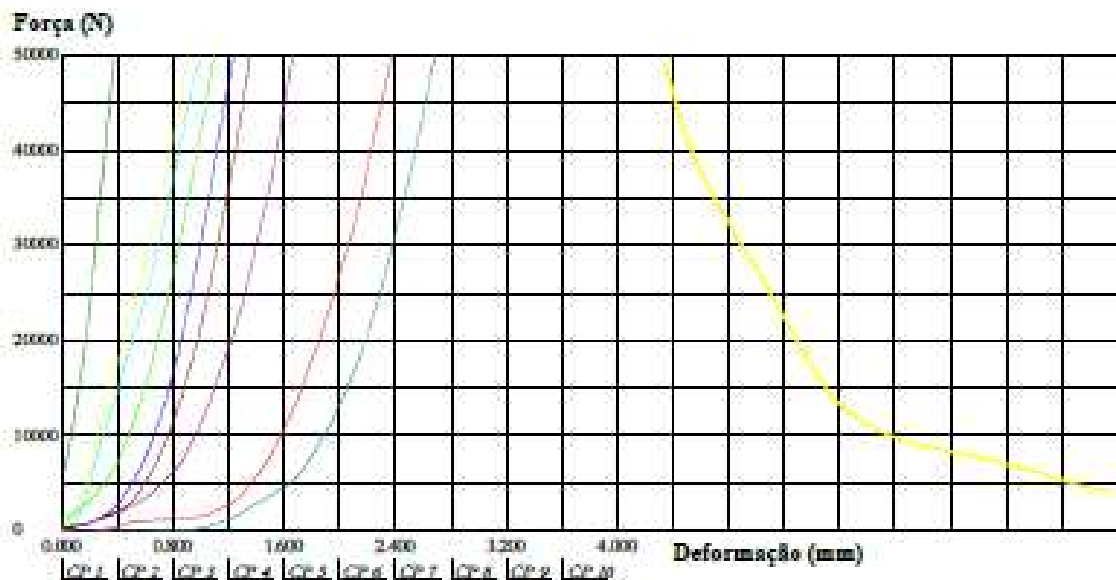
Apêndice O – Traço para Resistência de 20 Mpa - Branco.

LABORATÓRIO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL
COMPRESSÃO CORPO DE PROVA 5X10 NBR 7215

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL3000N Célula: Trd 29 Extensômetro: Trd 11 Data: 06/01/2025 Hora: 13:00:57 Trabalho nº: 0506
Programa: Test versão 3.04 Método de Ensaio: COMPRESSÃO CORPO DE PROVA 5X10 NBR 7215
Ident.: Amostra:

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)
CP 1	201006.328	26.060
CP 2	169080.094	21.399
CP 3	159785.906	21.401
CP 4	221265.828	28.629
CP 5	189484.000	24.616
CP 6	190144.188	24.552
CP 7	174310.016	22.829
CP 8	198200.531	25.439
CP 9	168657.172	21.647
Número CPs	9	9
Média	185800	24.06
Mediana	189500	24.55
Desv. Padrão	19550	2.470
Coef. Var. (%)	10.52	10.26
Mínimo	159800	21.40
Máximo	221300	28.63



Fonte: Equipamento de resistência a compressão- laboratório de materiais de construções -IFCE

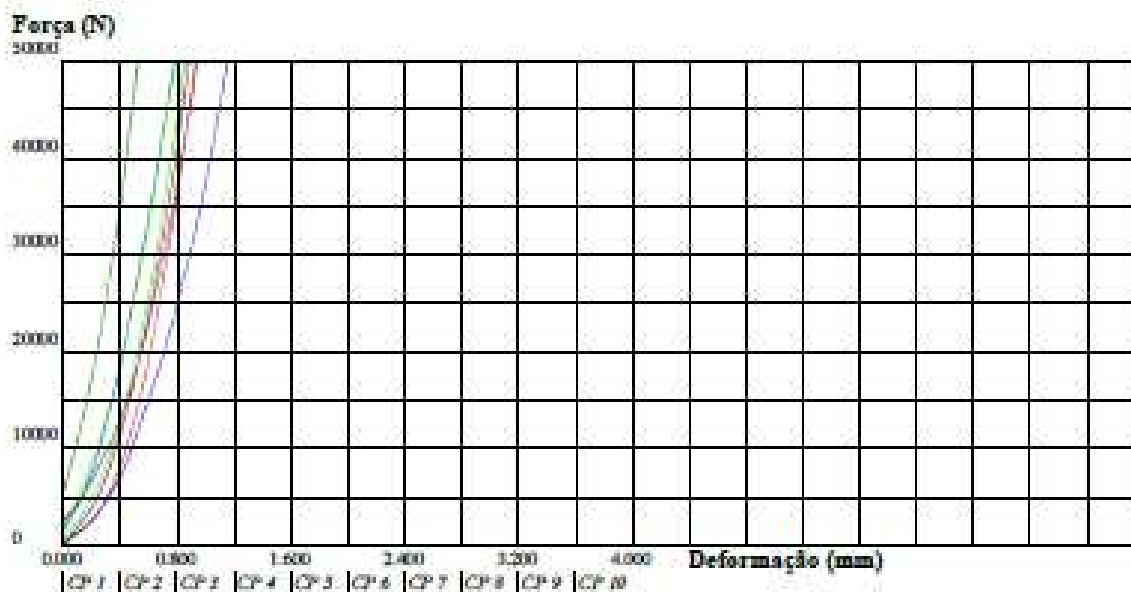
Apêndice P – Traço para Resistência de 20 Mpa com substituição de 5%

LABORATÓRIO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL COMPRESSÃO CORPO DE PROVA 5X10 NBR 7215

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 29** Extensômetro: - Data: 07/01/2025 Hora: 14:30:17 Trabalho nº **0507**
 Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **COMPRESSÃO CORPO DE PROVA 5X10 NBR 7215**
 Ident. Amostra:

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)
CP 1	196869.844	24.235
CP 2	215695.500	25.837
CP 3	199108.297	25.658
CP 4	224783.391	28.336
CP 5	235542.375	30.415
CP 6	223256.703	28.200
CP 7	239616.969	30.266
CP 8	198796.828	24.813
CP 9	250860.766	32.327
Número CPs	9	9
Média	220500	27.79
Mediana	223300	28.20
Desv.Padrão	19520	2.827
Coef.Var.(%)	8.854	10.17
Mínimo	196900	24.24
Máximo	250900	32.33



Fonte: Equipamento de resistência a compressão- laboratório de materiais de construções -IFCE

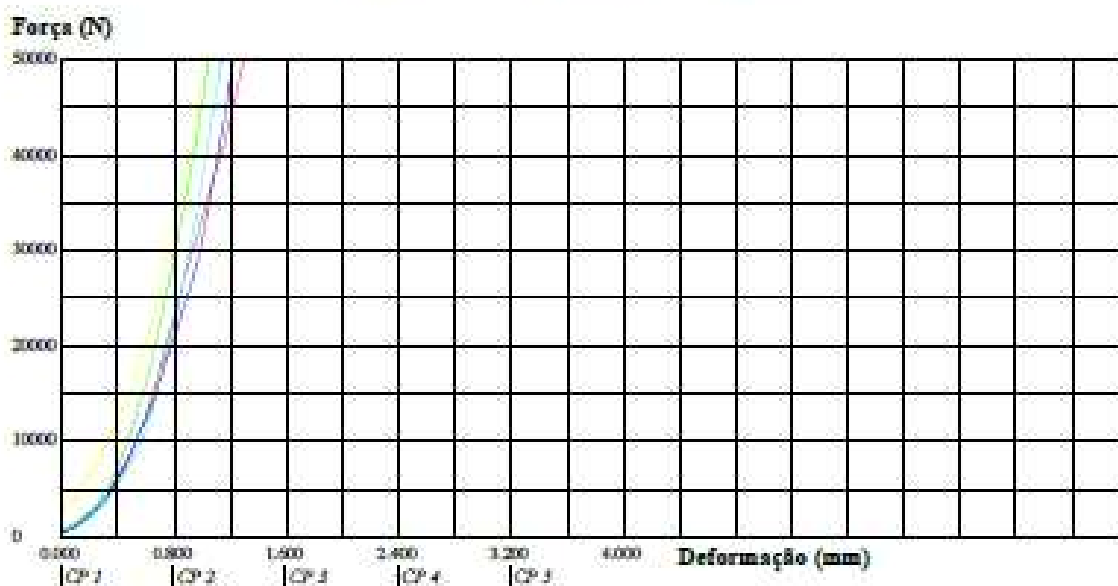
Apêndice Q – Traço para Resistência de 20 Mpa com substituição de 10%

LABORATÓRIO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL COMPRESSÃO CORPO DE PROVA 5X10 NBR 7215

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 29** Extensômetro: - Data: **07/01/2025** Hora: **15:00:20** Trabalho nº **0508**
 Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **COMPRESSÃO CORPO DE PROVA 5X10 NBR 7215**
 Ident. Amostra:

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)
CP 1	178167.984	22.505
CP 2	168151.703	21.282
CP 3	162756.750	22.346
CP 4	185533.203	23.020
CP 5	209392.766	26.554
Número CPs	5	5
Média	180800	23.14
Mediana	178200	22.50
Desv. Padrão	18250	2.010
Coef. Var. (%)	10.09	8.685
Mínimo	162800	21.28
Máximo	209400	26.55



Fonte: Equipamento de resistência a compressão- laboratório de materiais de construções -IFCE

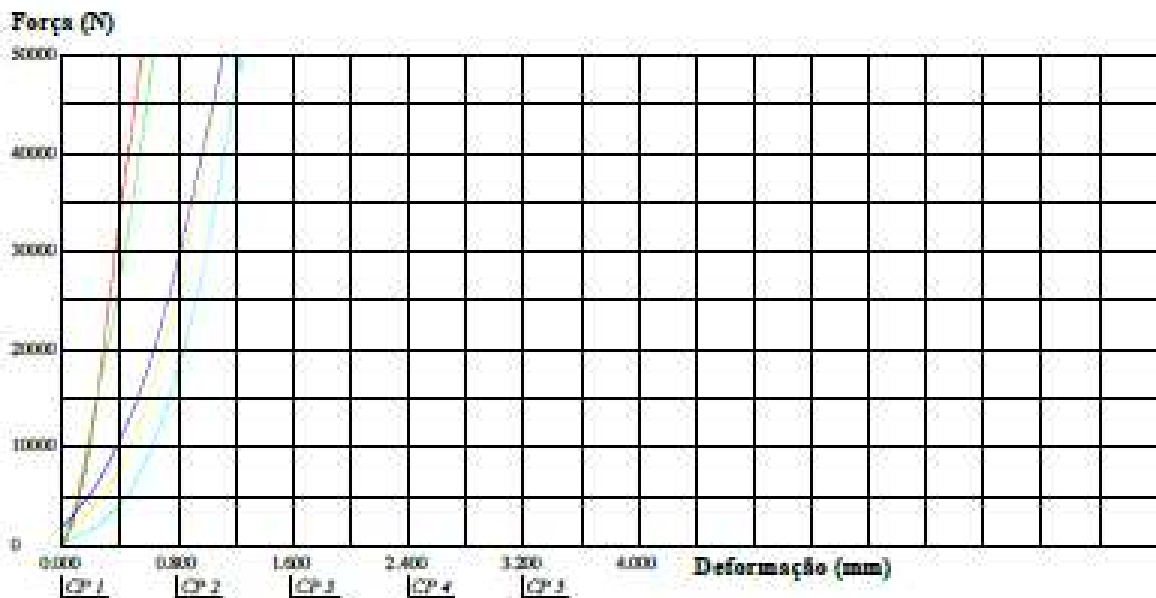
Apêndice R - Traço para Resistência de 20 Mpa com substituição de 15%

LABORATÓRIO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL
COMPRESSÃO CORPO DE PROVA 5X10 NBR 7215

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 29** Extensômetro: **-** Data: **07/01/2025** Hora: **15:30:07** Trabalho nº **0509**
Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **COMPRESSÃO CORPO DE PROVA 5X10 NBR 7215**
Ident. Amostra: **.....**

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)
CP 1	141527.609	18.238
CP 2	176393.734	22.549
CP 3	151543.875	19.490
CP 4	159497.078	20.227
CP 5	130479.789	16.351
Número CPs	5	5
Média	151900	19.37
Mediana	151500	19.49
Desv. Padrão	17490	2.305
Coef. Var. (%)	11.52	11.90
Mínimo	130500	16.35
Máximo	176400	22.55



Fonte: Equipamento de resistência a compressão- laboratório de materiais de construções -IFCE

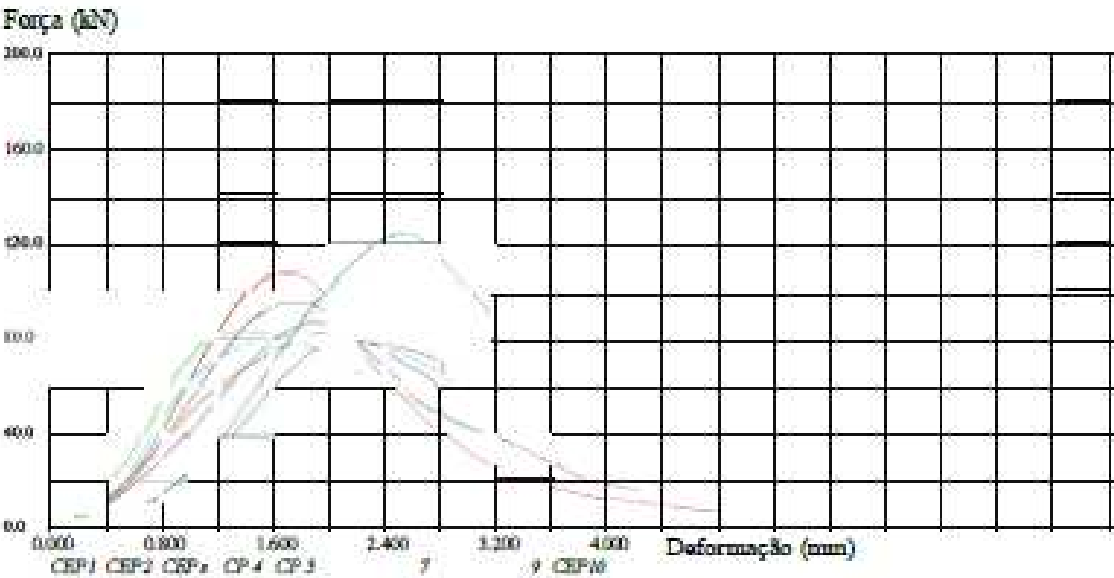
Apêndice S - Traço para Resistência de 20 Mpa com substituição de 20%

LABORATÓRIO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL
COMPRESSÃO CORPO DE PROVA 5X10 NBR 7215

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trl 29 Extensômetro:- Data: 10/01/2025 Hora: 09:44:51 Trabalho n° 05111
Programa: Tesc versão 3.04 Método de Ensaio: COMPRESSÃO CORPO DE PROVA 5X10 PR 7215
Ident./mostr: ~~~~~

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)
CP 1	107424.813	13.396
CP 2	87712.039	11.213
CP 3	83018.523	10.328
CP 4	81708.469	10.466
CP 5	86917.758	11.067
CP 6	82925.688	10.316
CP 7	89310.930	11.332
CP 8	94705.898	11.731
CP 9	123960.438	16.334
Número CPs	9	9
Média	93080	11.89
Mediana	87710	11.21
Desv.Padão	14040	1.927
Coef.Var(%)	15.08	16.21
Mínimo	81710	10.47
Máximo	124000	16.33

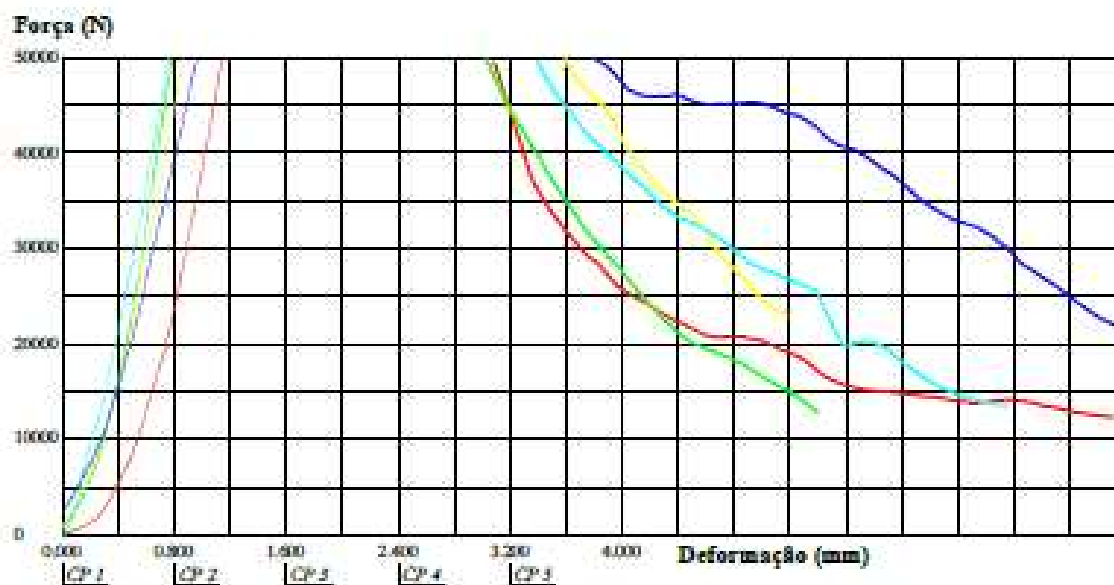


Fonte: Equipamento de resistência a compressão- laboratório de materiais de construções -IFCE

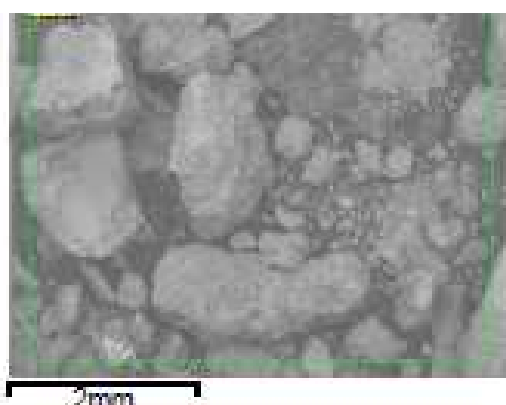
Relatório de Ensaio

Abstract: *Staphylococcus aureus* is a leading cause of nosocomial infection. The purpose of this study was to determine the prevalence of *S. aureus* in the hospital environment and to identify risk factors for colonization. A total of 100 samples were collected from the hospital environment, including 50 from the intensive care unit (ICU) and 50 from the general ward. The results showed that the prevalence of *S. aureus* was 40% in the ICU and 20% in the general ward. The risk factors for colonization were identified as the use of antibiotics, contact with medical equipment, and colonization of the skin.

Número CPs	5	5
Média	98850	12.71
Mediana	99800	13.02
Desv. Padrão	15750	2.270
Coef. Var. (%)	15.93	17.86
Mínimo	78940	9.991
Máximo	114800	14.94



Apêndice U – Análise Química da CIRSP pelo Método EDS

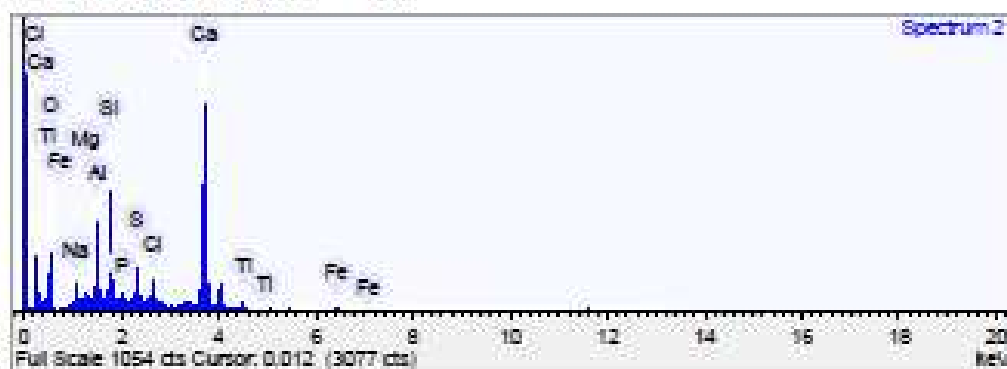


Acquisition conditions

Acquisition time (s): 60.1

Process time : 5

Accelerating voltage (kV): 15.0



Quantification Settings

Quantification method: Stoichiometry (normalised)

Combined element :	Oxygen
Coating element :	None

Number of anions : 10.0

Coating element :	None
-------------------	------

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	2.361	0.203	2.433	3.183	Na ₂ O
Magnesium	1.078	0.152	1.050	1.787	MgO
Aluminum	5.671	0.201	4.979	10.715	Al ₂ O ₃
Silicon	9.730	0.243	8.207	20.816	SiO ₂
Phosphorus	1.137	0.163	0.869	2.605	P ₂ O ₅
Sulfur	3.962	0.194	2.928	9.894	SO ₃
Chlorine	2.882	0.181	1.926	0.000	
Calcium	31.797	0.416	18.795	44.490	CaO
Titanium	1.346	0.203	0.666	2.246	TiO ₂
Iron	1.076	0.315	0.456	1.384	FeO
Oxygen	38.960	0.481	57.690		

Fonte: Equipamento de EDS- Análise Química- laboratório de Saneamento-UFC