



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

BÁRBARA HILLARY DE ALMEIDA PINTO

**ESTUDO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE CINZAS DO
PROCESSO DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
DOS SERVIÇOS DE SAÚDE**

**NATAL-RN
2018**

Bárbara Hillary de Almeida Pinto

Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza

Natal-RN
2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Pinto, Bárbara Hillary de Almeida.

Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde / Bárbara Hillary de Almeida Pinto. - 2018.

24 f.: il.

Artigo científico (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil.

Orientador: Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza.

1. Argamassa - TCC. 2. Incineração - TCC. 3. Resíduos sólidos - TCC. 4. Cinzas residuais - TCC. 5. Serviços de saúde - TCC. I. Souza, Paulo Alysson Brilhante Faheina de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 666.97

Bárbara Hillary de Almeida Pinto

Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 21 de junho de 2018:

Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza – Orientador

Prof.^a Dr.^a Diana Carla Secundo da Luz – Examinador interno

Eng. Gilbrando Medeiros Trajano Junior – Examinador externo

Natal-RN
2018

RESUMO

ESTUDO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE CINZAS DO PROCESSO DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOS SERVIÇOS DE SAÚDE

Um dos materiais de grande utilização na indústria da construção civil é a argamassa, principalmente para assentamento de alvenarias e revestimento de paredes. Assim, o presente trabalho objetivou estudar a viabilidade da incorporação de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde em argamassas, visando reduzir a extração e modificação de matérias-primas naturais para produção das mesmas, além de proporcionar destinação adequada para os rejeitos provenientes da destruição térmica dos resíduos, prolongando a vida útil dos aterros industriais utilizados para sua disposição. Para desenvolvimento do estudo, foram produzidas argamassas de cimento e areia na proporção de 1:3, em massa, com adição de variados teores de cinzas, tanto com sua granulometria natural como beneficiadas com o processo de moagem. Também se produziu a argamassa de referência, sem adição de cinzas. Para cada proporção de adição, foram estudadas as propriedades no estado fresco, através da determinação do índice de consistência, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado, e no estado endurecido, através dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, densidade de massa aparente, absorção de água e índice de vazios. Em geral, as misturas com adição de até 30% de cinzas moídas apresentaram discreta melhoria nas propriedades em relação à argamassa de referência. As misturas com cinzas naturais apresentaram queda no comportamento para a maioria dos parâmetros avaliados, porém até um teor de adição de 20% não houve divergências substanciais em relação à argamassa de referência. Dessa forma, o estudo aponta para a possibilidade de incorporação das cinzas, tanto naturais como moídas, em argamassas, na proporção de até 20% de adição, provendo um meio eficiente de destinação desse rejeito. Acima desse percentual, as misturas com cinzas incorporadas apresentaram fissuração e alta expansão volumétrica, tornando-as inutilizáveis para suas aplicações mais comuns.

Palavras-chave: Argamassa. Incineração. Adição. Cinzas naturais e moídas.

ABSTRACT

STUDY OF MORTARS WITH ADDITION OF ASHES OF THE PROCESS OF INCINERATION OF SOLID WASTE FROM HEALTH SERVICES

One of the materials of great using in the civil construction industry is the mortar, mainly for laying of masonry and wall cladding. Therefore, the present task aimed to study the feasibility of incorporating ashes from the solid waste incineration process of the health services in mortars, aiming to reduce the extraction and modification of natural raw materials for their production, as well as to provide adequate disposal for the rejects from the thermal destruction of waste, extending the useful life of the industrial landfills used for disposal. For the development of the study, cement and sand mortars were produced in a ratio of 1:3, by mass, with the addition of various ashes contents, both with their natural granulometry and benefited by the grinding process. Also produced the reference mortar, without addition of ashes. For each proportion of addition, the properties in the fresh state were studied by determination of the consistency index, water retention, mass density and air content, and in the hardened state, by tensile strength tests in flexion and to compression, bulk density, water absorption and void index. Generally, mixtures containing up to 30% of ground ashes showed a slight improvement in properties relative to the reference mortar. The mixtures with natural ashes showed a decrease in behavior for most of the evaluated parameters, but until an addition content of 20% there were no substantial differences in relation to the reference mortar. Thus, the study points to the possibility of incorporating ashes, both natural and ground, in mortars, in the proportion of up to 20% of addition, providing an efficient means of destination of this waste. Above this percentage, the mixtures with incorporated ashes presented cracking and high volumetric expansion, rendering them unusable for their most common applications.

Keywords: Mortar. Incineration. Addition. Natural and ground ashes.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e social da população propiciou, além do aumento no consumo dos recursos naturais, o surgimento da problemática da maior geração de resíduos sólidos dos mais diversos tipos, acarretando em riscos sanitários, ambientais e econômicos.

Os problemas da grande geração de resíduos começaram a se agravar, segundo Andrade (2012), na segunda metade do século XX devido à necessidade de definição da tecnologia de tratamento e da disponibilidade física de áreas apropriadas para destinação final dos mesmos. Atualmente, a disposição em aterros sanitários ainda é o processo mais utilizado no Brasil, porém, com o processo acelerado de urbanização há uma diminuição na oferta de áreas relativamente grandes onde possam ser executadas essas instalações de disposição final dos resíduos. Dessa forma, Barros (2012a) afirma que a incineração mostra-se atraente porque, nos quesitos de transporte e de disponibilidade de áreas, apresenta necessidades relativamente pequenas, diminuindo os custos totais da gestão dos resíduos.

Segundo Andrade (2012), o processo de incineração ainda é pouco empregado no Brasil, sendo restrito apenas aos resíduos dos serviços de saúde (RSS) e a alguns tipos de resíduos industriais (normalmente os perigosos), devido ao potencial em causar impactos ambientais. Além disso, a incineração ainda requer aterros para disposição final adequada dos rejeitos produzidos (cinzas e escórias, em sua totalidade). No entanto, de acordo com Corsini (2013), parte desses rejeitos pode ser utilizada na construção civil como material inerte.

O setor da construção civil, conforme afirmam Agopyan e John (2011), é essencial para atender às necessidades e anseios da sociedade, no entanto é um dos grandes responsáveis pelos impactos ambientais, aparecendo como um dos principais geradores de resíduos sólidos e emissores de gases do efeito estufa, além de ser grande consumidor de recursos naturais. Com o indício de escassez de recursos, as empresas financiam cada vez mais pesquisas incentivando a procura de soluções que unam o desenvolvimento econômico ao sustentável por meio da tecnologia (MOREIRA; VERMELHO; ZANI, 2017).

Um dos materiais de largo emprego na construção civil é a argamassa, definida pela norma NBR 13281 (ABNT, 2005) como uma “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada)”, sendo os seus principais usos, segundo Carasek (2007), para assentamento de alvenarias e para as etapas de revestimentos. De acordo com Guimarães, Gomes e Seabra (2004), uma argamassa na proporção de 1:3 em volume consome cerca de 434 kg de cimento e 1,08 m³ de areia, gerando um custo de R\$ 222,20 por metro quadrado. Dessa forma, percebe-se que a argamassa demanda grande quantidade de insumos para sua produção, além de gerar um grande montante de resíduos devido aos desperdícios nos canteiros de obra.

Aliando-se os benefícios da redução no consumo de materiais através da incorporação de diferentes tipos de resíduos na cadeia produtiva da construção com a atual dificuldade de disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, o presente trabalho se propôs a estudar a possibilidade de inserção, na indústria da construção civil, das cinzas provenientes do processo de incineração de RSS, através da incorporação dessas em argamassas, com duas granulometrias diferentes e variados teores de adição em relação à massa de cimento, de forma a avaliar a sua influência sob distintos aspectos. Dessa forma, o trabalho justifica-se pela tentativa de redução dos impactos ambientais gerados pelo setor da construção civil, principalmente pela economia de recursos naturais devido a um aumento no volume de argamassa produzido sem acréscimo de quantidades adicionais de aglomerantes ou agregados comumente utilizados, e, ainda, contribui para uma minimização da quantidade de cinzas a serem dispostas em aterros industriais, prolongando, conseqüentemente, sua vida útil.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ARGAMASSA

Por argamassa entende-se o material de construção obtido a partir da mistura de uma pasta com um agregado miúdo, podendo haver ainda o emprego de aditivos e adições (RECENA, 2012). A pasta é obtida da mistura entre um ou mais aglomerantes de origem mineral com a água e, segundo Verçoza (1975), a pasta é o elemento responsável por ligar os grãos do agregado entre si, a fim de se obter um material homogêneo. É bastante comum o uso de mais de um aglomerante, como no caso das composições de cal e areia com adição de cimento ou gesso (VERÇOZA, 1975).

Segundo a norma americana C 270 (ASTM, 2003), os agregados para argamassa consistem em areias naturais ou manufaturadas, as quais compõem a maior proporção de volume e peso constituinte da argamassa, agindo como um enchimento inerte. De acordo com Verçoza (1975), na argamassa a areia separa os grãos dos aglomerantes, facilitando o endurecimento, diminuindo a contração, e também facilitando o seu manuseio.

As argamassas podem ser classificadas quanto a vários aspectos, alguns dos quais são propostos por Carasek (2007) em relação à natureza ou tipo do aglomerante, número de aglomerantes, consistência, plasticidade ou densidade de massa da argamassa, bem como forma de preparo ou fornecimento da mistura. Além disso, as argamassas podem ser classificadas quanto à sua função ou aplicação na construção.

As argamassas mais utilizadas na construção civil são as empregadas para o assentamento de alvenarias e para o revestimento de paredes. De acordo com Carasek (2007), as funções das argamassas estão diretamente associadas às suas aplicações, assim como estão relacionadas às principais propriedades para cada tipo de uso. Segundo Santos (2017), o desempenho de uma argamassa depende de suas características no estado fresco (plástico) e no estado endurecido.

No estado fresco, a argamassa deve apresentar boa trabalhabilidade para facilitar sua mistura, transporte, aplicação, consolidação e acabamento, em uma condição homogênea. Ademais, deve proporcionar uma adequada retenção de água para garantir sua aderência aos substratos, bem como para garantir que as reações químicas de endurecimento dos aglomerantes se efetuem de maneira apropriada. Segundo Carasek (2007), ainda no estado fresco, após aplicação da argamassa, é importante controlar a retração plástica, propriedade relacionada à fissuração do revestimento.

No estado endurecido a argamassa deve apresentar boa resiliência, garantindo adequada capacidade de absorver pequenas deformações, propriedade que, segundo Carasek (2007), está associada à sua resistência mecânica e ao seu módulo de elasticidade. Dessa forma, a argamassa poderá se deformar sem comprometer a sua aderência, estanqueidade ou durabilidade. A argamassa também deve apresentar boa resistência de aderência ou ao cisalhamento e baixa permeabilidade e absorção de água, garantido, assim, a sua durabilidade.

As propriedades das argamassas dependerão tanto da natureza dos seus elementos constituintes como da proporção entre os mesmos. Portanto, segundo Verçoza (1975) deve-se ter, para cada argamassa, uma faixa de composição ideal.

Diferentemente do que ocorre atualmente com o concreto, para o qual existem vários métodos racionais de dosagem, para as argamassas ainda não se dispõe, no contexto nacional, de métodos totalmente consagrados e difundidos com essa finalidade. Por essa razão, ainda é comum, para preparo de argamassas de assentamento e revestimento em obra, o emprego de traços pré-fixados, baseados em normas e documentos elaborados por instituições técnicas (CARASEK, 2007). Guimarães, Gomes e Seabra (2004) afirmam que as proporções ou medidas dos componentes das argamassas variam de acordo com as suas aplicações,

sugerindo alguns traços de acordo com o uso o qual será dado à argamassa, tanto para revestimento (Tabela 2.1) como para assentamento (Tabela 2.2), mostrados a seguir.

Tabela 2.1 - Proporções (ou traços) dos componentes de argamassas para revestimento.

Usos	Paredes			Teto
	Externas acima do solo	Externas abaixo do solo	Internas	
Chapisco	1:0:3	1:0:3	1:0:3	1:0:3
Emboço	1:2:8 a 10 ou 1:1:6	1:1:6 ou 1:1/4:3	1:2:8 a 10	1:2:8 a 10
Reboco	0:1:3 ou 1:2:8 a 10 ou 1:1:6	1:1:6	0:1:3 ou 1:2:8 a 10	0:1:3 ou 1:2:8 a 10

A relação numérica é definida por cimento:cal:areia.

Fonte: Adaptado de Guimarães, Gomes e Seabra (2004).

Tabela 2.2 - Proporções (ou traços) dos componentes de argamassas para assentamento.

Usos	Proporção da argamassa	Tipo de bloco construtivo
Alvenaria estrutural e muros de arrimo	1:1/4:3 ou 1:1/2:4 ou 1:1:6	Todos
Alvenarias externas (paredes no solo e entre beirais)	1:1:6 a 1:2:9	Todos
Alvenarias internas	1:2:9 a 1:3:12	Todos
Casas (interno e externo)	1:2:9 a 1:3:12	Todos

A relação numérica é definida por cimento:cal:areia.

Fonte: Adaptado de Guimarães, Gomes e Seabra (2004).

Pode-se observar nas tabelas acima que a maioria dos traços têm em comum uma relação aglomerante/agregado miúdo igual ou próxima a 1:3. Por exemplo, os traços 1:2:9 ou 1:1:6 representam uma relação (cimento + cal)/areia igual a 3:9 ou 2:6, que correspondem a uma proporção aglomerante/agregado miúdo igual a 1:3. Dessa forma, considerando-se o emprego dessa proporção para diversos usos, as argamassas utilizadas para desenvolvimento do presente trabalho apresentaram traço de 1:3 (uma parte de cimento para três de areia).

2.2 INCINERAÇÃO

Atualmente, uma das principais preocupações de governos e agências ambientais tem sido a questão da destinação de resíduos, que crescem de acordo com a evolução das atividades produtivas e de consumo da população (GÓIS, 2016). Nesse contexto, a incineração se mostra uma prática bastante vantajosa, já que é um processo de redução acentuada do peso (até 70%) e do volume (até 90%) dos resíduos sólidos através de combustão controlada, reduzindo, dessa forma, o volume a ser destinado aos aterros.

A incineração é uma tecnologia de tratamento (térmico) dos resíduos sólidos, a qual ocorre na presença do oxigênio com um combustível auxiliar, em um sistema fechado, do qual resultam sólidos (escórias e cinzas), gases (CO_2 , SO_2 , N_2 e O_2) e líquidos.

Conforme Barros (2012a), a incineração não dispensa a utilização de um aterro (do tipo industrial, neste caso), onde os rejeitos provenientes desse processo sejam dispostos de maneira ambientalmente adequada. Ainda segundo este autor, essa tecnologia é indicada para resíduos sólidos perigosos, como de unidades de serviços de saúde e industriais, ou para os casos em que as distâncias de transporte dos resíduos dos locais de produção até os de tratamento ou de disposição final são muito grandes.

Os resíduos de serviços de saúde (RSS) são os restos provenientes de todo tipo de operações e atividades, oriundas da prestação de assistência médica, sanitária, farmacêuticas, enfermagens, odontológicas, análises clínicas e áreas de atuação congêneres, no desenvolvimento normal de seus profissionais (FUNASA, 2006). De acordo com a Resolução nº 358 (CONAMA, 2005), os RSS estão reunidos em cinco grupos: A (infectantes), B

(químicos), C (radioativos), D (resíduos comuns) e E (perfurocortantes). Segundo Andrade (2012), os resíduos de serviços de saúde devem ser processados em sua origem, separando o que é contaminado e o que não é para posterior destinação. O tratamento mais usado para este tipo de resíduos é a incineração (PHILIPPI JR; ROMÉRIO; COLLET, 2004-b *apud* ANDRADE, 2012). No entanto, além de gerar impactos ambientais e riscos à saúde da população, quando operada com práticas insuficientes, a incineração é um processo com custos de instalação e de operação de medianos a altos. Portanto, os procedimentos de segregação dos RSS na fonte geradora são os mais recomendados, visando à redução dos custos com gerenciamento e tratamento dos mesmos, além de reduzir os impactos ambientais.

A empresa Cril Soluções Ambientais, fornecedora das cinzas utilizadas para desenvolvimento do presente trabalho, incinera os RSS a temperaturas médias variando entre 700 e 1000°C, visando à destruição térmica dos resíduos aliada à eliminação de patógenos. A empresa incinera os RSS do grupo A, B e E, incluindo medicamentos vencidos, frascos de vidro, ampolas, peças anatômicas do ser humano, seringas, agulhas, bisturis, trapos contaminados, entre outros. As cinzas resultantes do processo são dispostas em diques de resíduos sólidos Classe II-A do aterro industrial, destinados à disposição dos resíduos não perigosos e não inertes. A seguir, estão apresentados o incinerador da empresa (Figura 2.1) e os diques do aterro industrial (Figura 2.2).

Figura 2.1 - Incinerador de RSS da empresa Cril Soluções Ambientais.



Fonte: Cril Soluções Ambientais (2018).

Figura 2.2 - Diques do aterro industrial para disposição final das cinzas geradas pela empresa Cril.



Fonte: Cril Soluções Ambientais (2018).

Segundo Barros (2012a), as quantidades de RSS vêm aumentando, pois o uso de descartáveis é cada vez maior, sendo, neste caso, reforçado pelo argumento da segurança sanitária. A quantidade média de RSS recebida pela empresa não foi fornecida, porém informou-se que o padrão médio de geração de cinzas em relação à quantidade de RSS incinerada é de 1:10 (10 kg de RSS gera 1 kg de cinzas). Sabendo-se que a empresa opera principalmente com incineração de RSS da região Nordeste e, de acordo com dados da Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016), no ano de 2016 o total de RSS coletados na região foi de 36.874 toneladas, tendo 56,8% desses a incineração como destinação final. Dessa forma, infere-se que foi gerado, apenas no Nordeste, um montante de 2.094,44 toneladas de cinzas em 2016.

Segundo informações fornecidas pela empresa Cril Soluções Ambientais, as cinzas resultantes do processo são não inertes, não podendo, portanto, ser empregadas como material inerte, conforme sugerido por Corsini (2013). Andrade (2012) afirma que os elementos constituintes das cinzas de incineração de RSS são compatíveis com os elementos da escória de alto forno, que é amplamente utilizada como matéria prima do cimento Portland, de forma que este autor substituiu parcialmente o cimento pelas cinzas da incineração dos RSS na produção de concreto convencional e concreto leve. No entanto, a composição química das cinzas varia bastante de acordo com os resíduos que são incinerados, estando em função dos

materiais e quantidades recebidas pela empresa. Neste trabalho, não foram realizados ensaios para análise da composição química e microestrutura das cinzas, as quais foram adicionadas à argamassa com o intuito de verificar a modificação em suas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido, sem haver a substituição de qualquer material.

3. MATERIAS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para desenvolvimento do estudo, foi utilizado o cimento CP II-Z-32 RS (cimento Portland composto com adição de pozolana, resistente a sulfatos) da marca Poty. A escolha por esse tipo de cimento se deu pelo fato de o mesmo ser facilmente encontrado no mercado local de materiais de construção e por ser largamente utilizado nas obras de construção civil do município de Natal/RN. Além disso, para o ensaio de determinação do índice de desempenho, aos 28 dias, de materiais pozolânicos com cimento Portland foi utilizado o cimento CP II-F-40 (cimento Portland composto com adição de fíler calcário) da marca Poty, com resistência à compressão média de 34,21 MPa aos sete dias, determinada de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT, 1996), atendendo ao intervalo de $(33 \pm 3 \text{ MPa})$ definido pela norma NBR 5752 (ABNT, 2014).

A areia também foi obtida no comércio local da cidade de Natal/RN e, antes de sua utilização, foi submetida ao peneiramento na peneira com abertura de 4,75 mm da série Normal, com o objetivo de eliminar pedregulhos e demais grãos e detritos superiores a esse diâmetro. Além disso, foi submetida à secagem ao ar, em temperatura ambiente, ou secagem em estufa a 105 °C por 24 horas, dependendo da finalidade de sua utilização (para preparo das argamassas ou para ensaios de caracterização, respectivamente).

As cinzas utilizadas foram fornecidas pela empresa Cril Soluções Ambientais, e são provenientes da incineração dos RSS feita no município de Belém de Brejo Cruz/PB. Antes de sua utilização, as cinzas foram submetidas ao peneiramento na peneira com abertura de 2,36 mm da série Normal a fim de eliminar ampolas, pedaços de vidro e agulhas não incineradas. Para preparo de alguns traços de argamassa e para o ensaio de determinação do índice de desempenho, aos 28 dias, de materiais pozolânicos com cimento Portland, as cinzas passantes na peneira de 2,36 mm da série Normal foram submetidas à moagem no moinho de bolas durante um período de 12 horas, com bolas de variados diâmetros, até atingir a finura exigida pela norma NBR 5752 (ABNT, 2014). Durante as atividades que exigiram manuseio das cinzas, utilizou-se máscara, óculos de proteção, luvas e botas como equipamentos de proteção individual.

Para preparo das argamassas, foi utilizada água potável fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN).

3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

As argamassas foram confeccionadas adotando-se o traço, em massa, de 1:3. Para avaliação da incorporação de cinzas na argamassa, foram adicionadas as porcentagens, em relação à massa de cimento, de 10, 20, 30, 40 e 50% de cinzas passantes na peneira de 2,36 mm da série Normal (cinzas naturais) e as mesmas porcentagens de cinzas após 12 horas de moagem (cinzas moídas). O traço de referência foi constituído apenas de cimento Portland, areia e água, servindo como base para as análises sobre o comportamento dos demais traços. Sendo assim, o presente trabalho se constitui na avaliação de onze misturas de argamassa.

Antecedendo o preparo das misturas, foram feitos ensaios de caracterização dos materiais. Também realizaram-se ensaios para cada mistura de argamassa, tanto no estado fresco como endurecido. Para cada traço, foram moldados seis corpos de prova (CPs)

prismáticos utilizados para os ensaios no estado endurecido. Além disso, foi preparado material suficiente para os ensaios da argamassa no estado fresco.

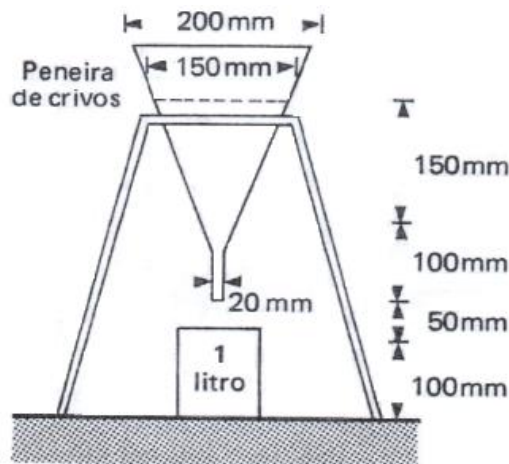
3.2.1 Ensaios de caracterização dos materiais

3.2.1.1 Aglomerante (cimento)

A caracterização do cimento se deu através de ensaios de determinação dos seguintes parâmetros: resistência à compressão, finura, expansibilidade e massas específicas real e unitária. A resistência à compressão do cimento foi determinada conforme preconiza a norma NBR 7215 (ABNT, 1996), moldando-se seis corpos de prova cilíndricos de dimensões (5x10) cm utilizando-se areia padrão para ensaios de cimento, especificada conforme a NBR 7214 (ABNT, 2015). O índice de finura foi determinado conforme a norma NBR 11579 (ABNT, 2012), por meio da peneira com abertura de 75 μm (n° 200). A expansibilidade do cimento foi verificada a frio através do ensaio de expansibilidade Le Chatelier, preconizada pela norma NBR 11582 (ABNT, 1991), com determinação da consistência normal da pasta feita seguindo-se procedimento recomendado pela norma NBR 16606 (ABNT, 2017).

Para os ensaios de massa específica, o cimento foi seco em estufa por um período de 24 horas a uma temperatura de 105 °C. A massa específica real foi determinada com auxílio do frasco volumétrico de Le Chatelier, através de procedimento definido pela norma NM 23 (AMN, 2000). Já a massa específica unitária (ou aparente) foi determinada através de procedimento sugerido por Verçoza (1975), consistindo em um funil a partir do qual se lança o pó de uma altura fixa, em um recipiente de um litro, conforme esquema mostrado na Figura 3.1 abaixo. O recipiente utilizado possui volume de 1.210 cm³ (1,21 l). Os demais parâmetros foram seguidos, conforme mostra a Figura 3.2.

Figura 3.1 - Esquema do procedimento sugerido por Verçoza (1975) para determinação da massa unitária do cimento.



Fonte: Adaptado de Verçoza (1975).

3.2.1.2 Agregado miúdo (areia)

Para todos os ensaios de caracterização da areia, realizou-se secagem da mesma em estufa a 105 °C por um período de 24 horas. Foi feito ensaio de distribuição granulométrica conforme prescrito na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), utilizando-se peneiras da série normal. Para esse ensaio, inicialmente promoveu-se agitação mecânica do conjunto de peneiras por um período de 10 minutos e, posteriormente, procedeu-se ao peneiramento manual.

Figura 3.2 - Equipamento utilizado para ensaio da massa unitária de materiais em pó.



Fonte: Autor (2018).

As massas específicas real e unitária foram averiguadas conforme preconiza a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009), sendo determinadas, respectivamente, através do Frasco de Chapman e por meio do caixote com volume de 10.623 cm³.

3.2.1.3 Resíduo (cinzas)

A caracterização das cinzas variou de acordo com a condição das mesmas. As cinzas, conforme recebidas, foram sujeitas ao ensaio de distribuição granulométrica, em analogia à norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) para o ensaio em agregados miúdos. Para isso, foram secas em estufa a 105 °C por 24 horas. Inicialmente, promoveu-se agitação mecânica do conjunto de peneiras por um período de 10 minutos e, posteriormente, procedeu-se ao peneiramento manual.

Para os demais ensaios, as cinzas foram submetidas à secagem em estufa e peneiramento na peneira de 2,36 mm da série Normal. Para determinação da massa específica real das cinzas, utilizou-se o frasco volumétrico de Le Chatelier, conforme procedimento definido pela norma NM 23 (AMN, 2000). A massa específica unitária também foi determinada através do procedimento sugerido por Verçoza (1975), já citado anteriormente, e o ensaio para determinação do índice de finura foi realizado por meio da peneira de nº 200, em analogia à norma NBR 11579 (ABNT, 1991). Os mesmos ensaios foram realizados para as cinzas moídas.

Para as cinzas moídas, também foi realizado o ensaio de determinação do índice de desempenho, aos 28 dias, de materiais pozolânicos com cimento Portland, conforme procedimento recomendado pela norma NBR 5752 (ABNT, 2014). A areia padrão utilizada para esse ensaio foi preparada conforme a norma NBR 7214 (ABNT, 2015).

3.2.2 Ensaios em argamassa no estado fresco

As misturas de argamassa foram preparadas conforme preconiza a NBR 13276 (ABNT, 2016), tendo suas quantidades de água determinadas empiricamente de forma a atender ao índice de consistência pré-estabelecido em norma, para que, assim, fossem consideradas trabalháveis.

No estado fresco, além da averiguação do índice de consistência das argamassas, foram realizados os ensaios de determinação da retenção de água, conforme norma NBR 13277 (ABNT, 2005), e determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, conforme procedimentos estabelecidos pela norma NBR 13278 (ABNT, 2005).

3.2.3 Ensaios em argamassa no estado endurecido

Para as argamassas no estado endurecido, foram moldados seis corpos de prova prismáticos com dimensões de (40 x 40 x 160) mm, sendo três utilizados para determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, com idade de 28 dias, conforme procedimento descrito na norma NBR 13279 (ABNT, 2005), após cura a seco. Para o ensaio de tração na flexão, foi aplicada carga uniforme de (50 ± 10) N/s até ruptura do corpo de prova. Para o ensaio de compressão foram utilizadas as metades de cada corpo-de-prova, resultantes da ruptura no ensaio anterior, os quais foram submetidos a uma carga uniforme de (500 ± 10) N/s, aplicada a uma área de (40 x 40) mm, até a ruptura.

Os demais CPs também foram ensaiados com a idade de 28 dias e foram utilizados para determinação da absorção de água e índice de vazios das amostras, conforme procedimento preconizado na norma NBR 9778 (ABNT, 2005). Além disso, foram utilizados para determinação da densidade de massa aparente, conforme a norma NBR 13280 (ABNT, 2005), com auxílio do paquímetro.

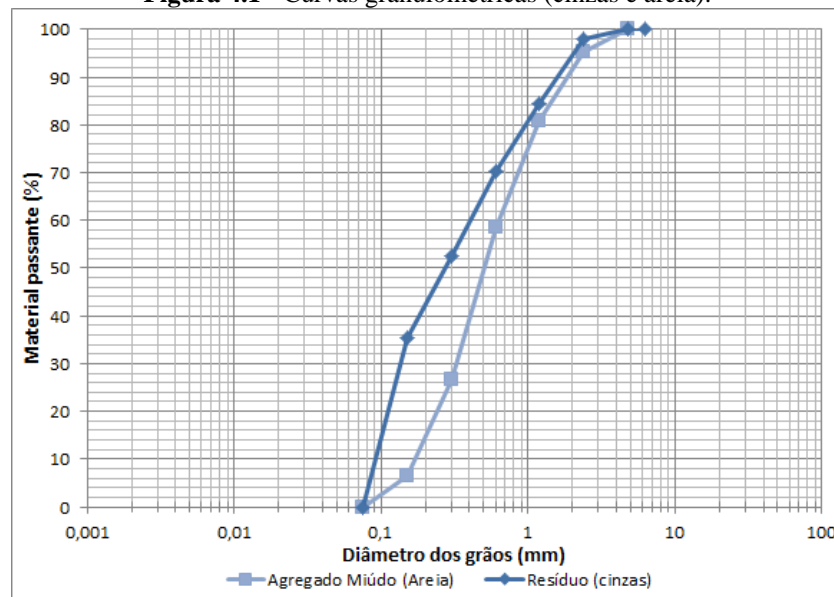
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria foi feito apenas para o agregado miúdo (areia) e para as cinzas na forma em que foram recebidas, ou seja, sem realizar peneiramento na peneira de diâmetro 2,36 mm da série Normal. As curvas granulométricas desses materiais estão apresentadas na Figura 4.1 a seguir.

Figura 4.1 - Curvas granulométricas (cinzas e areia).



Fonte: Autor (2018).

Através da análise granulométrica, foi possível determinar os parâmetros de módulo de finura (MF) e diâmetro máximo dos grãos de ambos os materiais, além do coeficiente de não uniformidade (CNU) e coeficiente de curvatura (CC) da curva do agregado miúdo. Os resultados estão expressos na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 - Parâmetros obtidos a partir da análise granulométrica das cinzas e do agregado miúdo.

Materiais	Módulo de finura	Diâmetro máximo (mm)	Coefficiente de não uniformidade	Coefficiente de curvatura
Agregado miúdo (areia)	2,32	2,4	3,61	0,93
Resíduo (cinzas)	1,60	4,8	-	-

Fonte: Autor (2018).

Em relação ao módulo de finura, a areia está localizada na zona ótima, segundo classificação da norma NBR 7211 (ABNT, 2009), ($2,2 \leq MF \leq 2,9$), podendo ser definida como areia média. Também pode-se inferir, a partir do resultado do CNU e CC, que a areia possui grãos uniformes ($CNU < 5,0$) e é um solo mal graduado ($CC < 1$), apresentando uma curva não contínua, o que indica que há falta de grãos com um certo diâmetro.

A areia não possui excesso de materiais finos, apresentando apenas 6,45% de material passante na peneira com diâmetro de 0,15 mm (materiais pulverulentos), o que a torna um material adequado para a produção de argamassas, já que quantidades excessivas de finos aumenta o teor de água de amassamento, podendo acarretar em resistências abaixo do adequado para o emprego das argamassas, além de causar maior retração por secagem. No entanto, como a areia apresenta composição granulométrica uniforme, a compacidade e o

empacotamento da argamassa podem ser afetados, já que materiais com granulometrias descontínuas apresentam maior volume de vazios.

Analisando a granulometria das cinzas, pode-se perceber que as mesmas possuem uma distribuição bastante uniforme e possuem um teor de finos considerável, apresentando 35,33% de material passante na peneira com diâmetro de 0,15 mm, o que pode acarretar em um maior consumo da água de amassamento, comprometendo o desempenho e algumas propriedades da argamassa. No entanto, segundo Andrade (2012), a granulometria ideal para interatividade das cinzas com a argamassa é inferior a 0,15 mm, pois quanto menor o tamanho das partículas maior a sua superfície específica e maior a reatividade química na massa de cimento e água.

4.1.2 Massa específica real e unitária

Os resultados das massas específicas real e unitária dos materiais destinados à produção das argamassas estão apresentados na Tabela 4.2 abaixo, bem como os equipamentos utilizados para suas determinações.

Tabela 4.2 - Resultados de massas específicas real e unitária dos materiais componentes das argamassas.

Materiais	Massa específica real		Massa específica unitária	
	Resultado (g/cm ³)	Equipamento utilizado	Resultado (g/cm ³)	Equipamento utilizado
Cimento	2,96	Frasco de Le Chatelier	1,03	Caixote de 1.210 cm ³
Areia	2,63	Frasco de Chapman	1,39	Caixote de 10.623 cm ³
Cinzas naturais	2,06	Frasco de Le Chatelier	0,41	Caixote de 1.210 cm ³
Cinzas moídas	2,19	Frasco de Le Chatelier	0,71	Caixote de 1.210 cm ³

Fonte: Autor (2018).

A partir da análise dos dados, percebe-se que há uma boa compatibilidade das massas específicas da areia e do cimento com os valores previstos na literatura. Segundo Verçoza (1975), a areia apresenta massa específica real entre 2,60 e 2,65 g/cm³ e massa unitária entre 1,25 e 1,70 g/cm³ e o cimento apresenta massa específica real superior a 3,05 g/cm³ e massa unitária variando normalmente entre 1,00 e 1,40 g/cm³. Também pode-se perceber que para as cinzas há uma relação direta entre a massa específica real e unitária.

Observa-se que as cinzas naturais são mais leves que as cinzas moídas, o que pode ser devido a um menor entrosamento dos grãos quando não submetidos à moagem, acarretando em menor preenchimento dos espaços vazios existentes entre si. Conseqüentemente, as cinzas naturais produziram argamassas mais leves do que as preparadas com as cinzas moídas.

4.1.3 Finura

O ensaio para determinação do índice de finura através de peneiramento na peneira de abertura de 75 mm (nº 200) foi feito apenas para o cimento e para as cinzas naturais e moídas. Na Tabela 4.3 a seguir, estão apresentados os resultados encontrados.

Tabela 4.3 - Resultados do índice de finura dos materiais.

Materiais	Amostra inicial (g)	Amostra retida na peneira #200 (g)	Índice de finura (%)	Especificação para CP II-Z-32 (%)*
Cimento	50,00	0,43	0,86%	
Cinzas naturais	50,00	32,22	64,44%	≤ 12,00%
Cinzas moídas	50,00	3,00	6,00%	

*Especificação segundo a norma NBR 11578 (ABNT, 1991).

Fonte: Autor (2018).

Percebe-se, a partir da análise dos dados, que o cimento e as cinzas moídas atendem ao limite especificado pela NBR 11578 (ABNT, 1991), porém as cinzas naturais o superam bastante. De acordo com Mohammed (2017), para melhorar os efeitos químicos e físicos dos

materiais pozolânicos, esses materiais devem ter pelo menos a mesma finura que o cimento Portland (apud ARAÚJO, 2017). As cinzas não atestaram atividade pozolânica, porém as cinzas moídas se apresentaram com finura mais adequada para preencher os espaços vazios existentes na argamassa.

4.1.4 Expansibilidade do cimento Portland

A pasta de consistência normal apresentou uma distância de penetração da sonda de Tetmajer de 6,5 mm para um fator água/cimento de 0,288. A expansibilidade do cimento foi determinada considerando-se a média da abertura de cada uma das três agulhas após sete dias imersas em água. Apenas uma das agulhas abriu, apresentando abertura de 0,9 mm. Dessa forma, considerou-se que a expansibilidade do cimento foi de 0,3 mm, sendo bastante inferior ao limite recomendado pela norma NBR 11578 (ABNT, 1991), que é de 5 mm, no máximo.

4.1.5 Resistência à compressão do cimento Portland

A resistência média do cimento à compressão está apresentada na Tabela 4.4 abaixo, bem como os desvios relativos máximos, em módulo, após tratamento estatístico dos resultados de resistência de cada corpo de prova individual.

Tabela 4.4 - Resultados de resistência à compressão do CP II-Z-32.

Idade	Resist. média (MPa)	Desvio relativo máximo (%)	Especificação para CP II-Z-32*
03 dias	23,77	3,59	≥ 10,0 MPa
07 dias	31,68	0,48	≥ 20,0 MPa
28 dias	34,11	1,23	≥ 30,0 MPa

*Especificação segundo a norma NBR 11578 (ABNT, 1991).

Fonte: Autor (2018).

O aglomerante influi nas propriedades da argamassa pela sua natureza, qualidade, resistência, idade e pureza, conforme afirma Verçoza (1975). No entanto, a contribuição do cimento está voltada, sobretudo, para a resistência mecânica. Percebe-se, a partir da análise dos dados, que o cimento atende aos limites especificados pela NBR 11578 (ABNT, 1991), não comprometendo, portanto, a resistência das argamassas estudadas.

4.1.6 Atividade pozolânica das cinzas

Os materiais pozolânicos são, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), “materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes”.

Para verificar a pozolanicidade das cinzas com o cimento Portland aos 28 dias, foi necessário realizar moagem até que as mesmas obtivessem a finura recomendada para o ensaio. Após a moagem, o percentual de resíduo retido na peneira com abertura de malha de 45 µm (nº 325) foi de 12,7%, atendendo ao exigido na norma NBR 5752 (ABNT, 2014), que preconiza que esse percentual deve ser inferior a 20%, estando preferencialmente entre 10% e 15%. Ainda segundo esta norma, o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias é dado pela razão entre as resistências médias, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25% de material pozolânico (argamassa B) e dos corpos de prova moldados apenas com cimento (argamassa A).

A resistência à compressão média da argamassa A foi de 40,59 MPa e da argamassa B foi de 12,73 MPa, resultando em um índice de desempenho com cimento Portland de 31,37%. A norma NBR 12653 (ABNT, 2014) especifica que o índice de desempenho com cimento

Portland deve ser superior a 90% para que se considere que o material possua atividade pozolânica. Dessa forma, a partir do resultado obtido, infere-se que a cinza não atua como um material com propriedades aglomerantes.

4.2 ARGAMASSA

4.2.1 Estado fresco

A quantidade de água adicionada no preparo de cada mistura foi determinada empiricamente de forma a se atender ao índice de consistência requerido pela norma NBR 13276 (ABNT, 2016), de (260 ± 5) mm. Portanto, variou-se o fator água/cimento (fator a/c) de cada mistura a fim de se obter argamassas trabalháveis sem necessitar da utilização de aditivos plastificantes. Na Tabela 4.5 a seguir estão apresentadas as misturas utilizadas, indicando-se a porcentagem de adição de cinzas, o fator a/c, o fator água/argamassa anidra (ou relação água/materiais secos) e o índice de consistência obtido através de medição dos espalhamentos das argamassas.

Tabela 4.5 - Informações acerca das misturas de argamassas estudadas.

Misturas	Adição de cinzas (%)	Fator a/c	Fator água/argamassa anidra	Índice de consistência (mm)
REF	0	0,58	0,15	255
1	10	0,63	0,15	262
2	20	0,69	0,16	262
3	30	0,73	0,17	257
4	40	0,76	0,17	261
5	50	0,83	0,18	263
6	10*	0,59	0,14	261
7	20*	0,61	0,14	257
8	30*	0,62	0,14	263
9	40*	0,67	0,15	263
10	50*	0,69	0,15	256

*Porcentagem de cinzas moídas após 12 horas de moagem.

Fonte: Autor (2018).

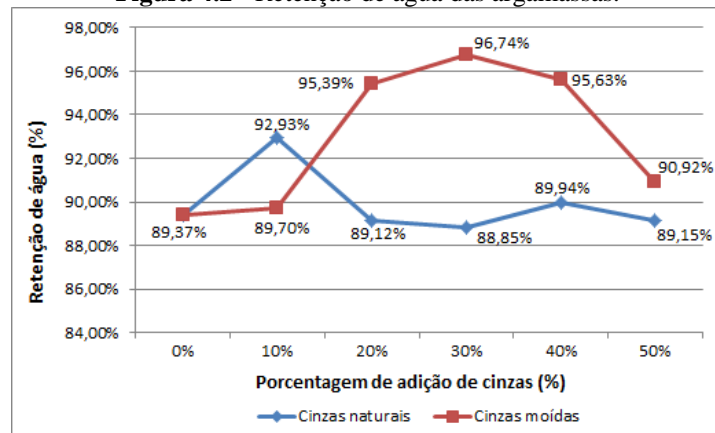
Percebe-se, a partir da Tabela 4.5 acima, que a relação água/materiais secos se manteve praticamente semelhante para todas as misturas, no entanto o fator a/c aumentou com o acréscimo de cinzas, principalmente naturais. Conforme já citado, quantidades excessivas de finos aumenta o teor de água de amassamento, o que não foi observado nos resultados acima. Infere-se que essa característica tenha se dado em função de uma diminuição na resistência de escoamento das misturas com cinzas moídas, acarretada devido à maior capacidade dos finos de reter água em seu entorno, aumentando as fluidez das argamassas.

Os resultados de retenção de água (Figura 4.2), densidade de massa no estado fresco (Figura 4.3) e teor de ar incorporado (Figura 4.4) estão apresentados a seguir. No geral, verificou-se que as argamassas com cinzas moídas apresentaram retenção de água superior à argamassa de referência, para todos os percentuais, fator ocasionado pelo maior teor de finos em sua composição, os quais retêm maior quantidade de água em torno de suas partículas. Também é possível observar que há uma tendência crescente de retenção de água até a proporção de 30%, seguida por uma diminuição para teores acima desse percentual.

As argamassas com cinzas de granulometria natural apresentaram retenção de água sem grandes variações em relação à argamassa de referência, excetuando-se o traço com 10% de cinzas, que a superou discretamente. Segundo Carasek (2007), a retenção de água está associada à capacidade da argamassa fresca manter a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda da água de amassamento (evaporação e/ou absorção de água

pelo substrato). Dessa forma, as argamassas com cinzas moídas apresentam maior capacidade em manter-se trabalháveis, além de serem mais favoráveis para a hidratação do cimento.

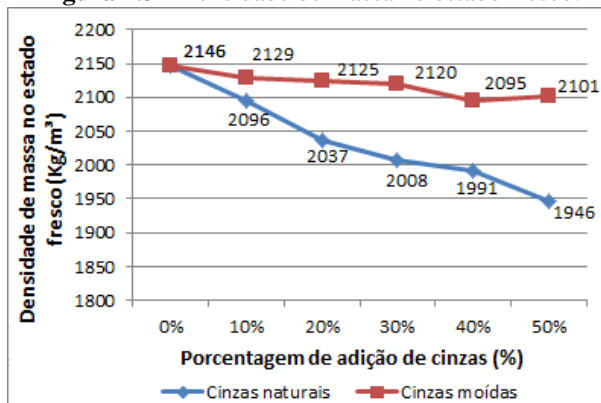
Figura 4.2 - Retenção de água das argamassas.



Fonte: Autor (2018).

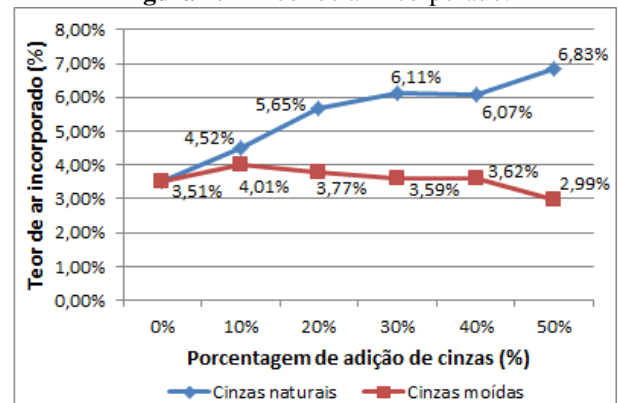
A densidade de massa no estado fresco é uma propriedade intimamente relacionada ao teor de ar incorporado na argamassa, pois quanto maior o teor de ar incorporado, menor é a densidade de massa e vice-versa, conforme pode-se observar nas Figuras 4.3 e 4.4 abaixo.

Figura 4.3 - Densidade de massa no estado fresco.



Fonte: Autor (2018).

Figura 4.4 - Teor de ar incorporado.



Fonte: Autor (2018).

Percebe-se, em geral, que o teor de ar incorporado aumenta com o acréscimo do percentual de incorporação de cinzas, principalmente com a adição de cinzas na granulometria natural. O aumento do teor de ar incorporado, e consequente diminuição da densidade de massa, está relacionado tanto à granulometria uniforme das partículas das cinzas, que causam um pior arranjo da mistura, como à baixa massa específica do material.

O excesso de ar incorporado pode resultar na queda da resistência mecânica, no entanto, segundo Carasek (2007), quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será a longo prazo e, de acordo com Araújo (2017), a melhoria da trabalhabilidade leva a uma melhor compactação da mistura, podendo aumentar a resistência em compósitos com alta relação água/cimento, como é o caso das argamassas com adição de cinzas naturais.

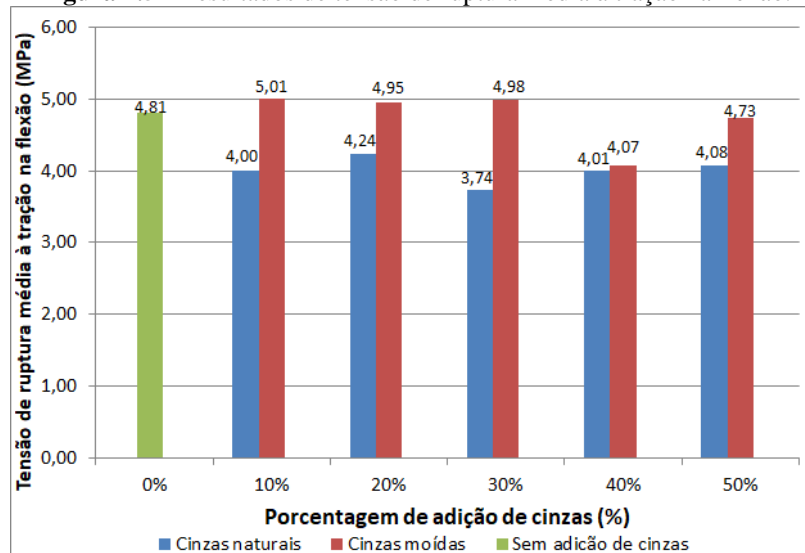
4.2.2 Estado endurecido

Nas primeiras horas após moldagem, as argamassas com porcentagens de 30, 40 e 50% de adição de cinzas, principalmente moídas, apresentaram uma expansão volumétrica proporcional ao aumento do teor de adição, ocasionando fissuras na superfície devido aos esforços de tração gerados. As causas da expansão, bem como a quantificação da variação volumétrica não foram verificadas. No entanto, infere-se que o efeito esteja associado a um

inchamento das cinzas, já que não se observou nenhuma expansão e/ou fissuração nos corpos de prova do traço de referência ou com baixa adição de cinzas (até 20% de adição, para ambas as granulometrias).

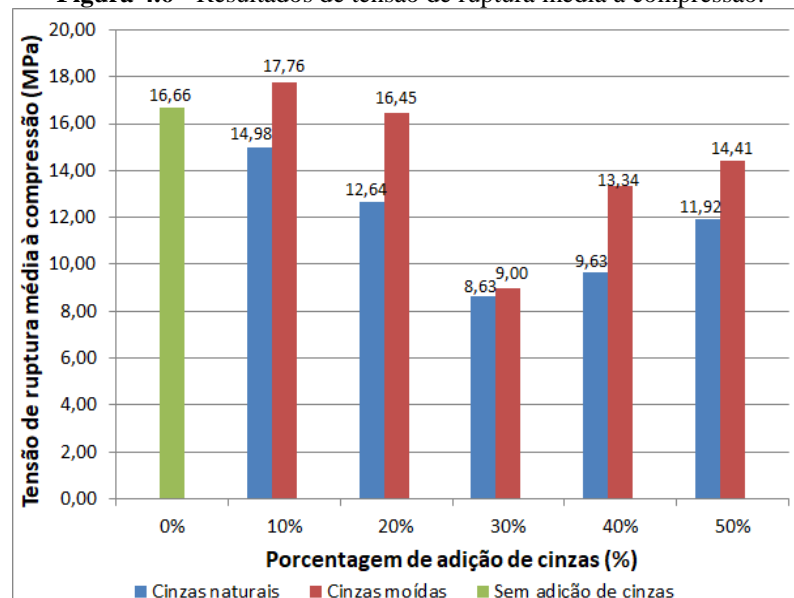
Na análise da resistência, as tensões médias de ruptura apresentaram uma dispersão considerável em seus valores, superando, na maioria dos casos, os desvios absolutos máximos preconizados pela NBR 13279 (ABNT, 2005). No entanto, essa dispersão não foi considerada nos resultados mostrados nas Figura 4.5 e Figura 4.6 abaixo.

Figura 4.5 - Resultados de tensão de ruptura média à tração na flexão.



Fonte: Autor (2018).

Figura 4.6 - Resultados de tensão de ruptura média à compressão.



Fonte: Autor (2018).

A partir da análise dos gráficos acima pode-se perceber que, em geral, as argamassas apresentaram um melhor comportamento à tração na flexão do que à compressão, quando comparado aos resultados em relação à argamassa de referência (sem adição de cinzas). Na tração à flexão, os traços com 10, 20 e 30% de cinzas moídas apresentaram tensões de ruptura superiores à tensão da argamassa de referência, superando-a em até 4,2% com adição de 10% de cinzas. Com as cinzas moídas, o pior desempenho se deu com 40% de adição, resultando em uma argamassa com redução de 15,4% da resistência. Ainda considerando-se os

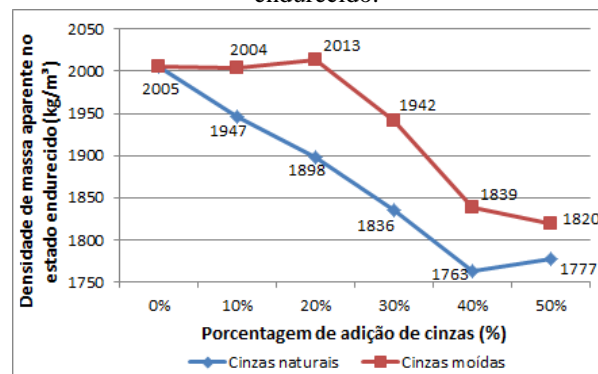
resultados de tração na flexão, percebe-se que todos os traços de argamassa com cinzas naturais apresentaram tensões de ruptura inferiores à da argamassa de referência, sendo o pior desempenho com 30% de cinzas, reduzindo 22,2% da resistência, e o melhor com 20%, que gerou uma redução de apenas 11,9% da resistência da argamassa de referência.

Na compressão, apenas a argamassa com adição de 10% de cinzas moídas superou o valor da tensão de ruptura da argamassa de referência. Os demais valores foram inferiores a essa tensão, sendo o pior desempenho com adição de 30% de cinzas, tanto naturais como moídas, apresentando reduções de resistência em 48,2% e 46,0%, respectivamente. Para ambas as granulometrias das cinzas, os melhores desempenhos à compressão se deram com 10% de adição, proporcionando um aumento de 6,6% com as cinzas moídas e redução de apenas 10,1% com as cinzas naturais.

As densidades de massa aparentes no estado endurecido, propriedade que indica o grau de compactidade das argamassas, estão apresentadas na Figura 4.7 abaixo. Consta-se que, em geral, há uma diminuição nas densidades com o aumento da quantidade de cinzas adicionada, principalmente com a granulometria natural, acarretada por um mau entrosamento dos grãos e pela baixa massa específica das mesmas. Observa-se que a granulometria mais fina das cinzas moídas proporcionou a produção de argamassas mais densas do que com as cinzas naturais, devido a um melhor empacotamento de seus materiais constituintes.

Além disso, pode-se perceber que as densidades de massa no estado endurecido são menores que no estado fresco (Figura 4.3), fator ocasionado devido à evaporação da água de amassamento.

Figura 4.7 - Densidades de massa aparentes no estado endurecido.

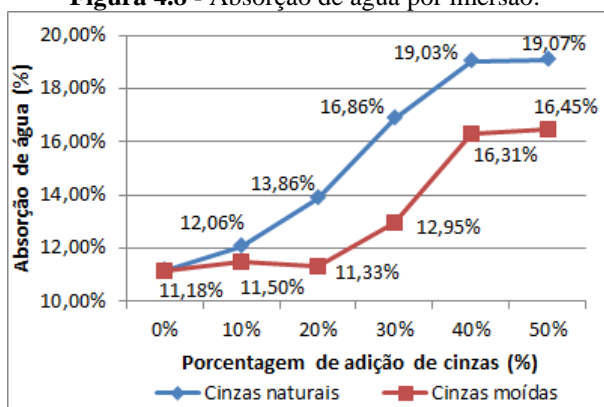


Fonte: Autor (2018).

Nas figuras a seguir, apresentam-se os resultados da absorção de água por imersão (Figura 4.8) e do índice de vazios (Figura 4.9) dos corpos de prova das argamassas. Observa-se que ambos os parâmetros aumentaram com o aumento do teor de cinzas adicionado, para as duas granulometrias. Porém, para as argamassas com cinzas naturais esse aumento foi mais considerável, apresentando acréscimo, em relação à argamassa de referência, de até 48,5% na absorção de água e 70,6% no índice de vazios, para os teores de 40 e 50% de adição, respectivamente. Já as argamassas com adição de cinzas moídas sofreram acréscimos de até 33,2% na absorção de água e 47,3% no índice de vazios, ambas com os teores de adição de 50%. Isso se deu pelo fato de as cinzas moídas apresentarem um maior teor de finos em relação às cinzas naturais, os quais melhoram a capacidade de preenchimento dos espaços vazios, reduzindo a porosidade e permeabilidade das argamassas.

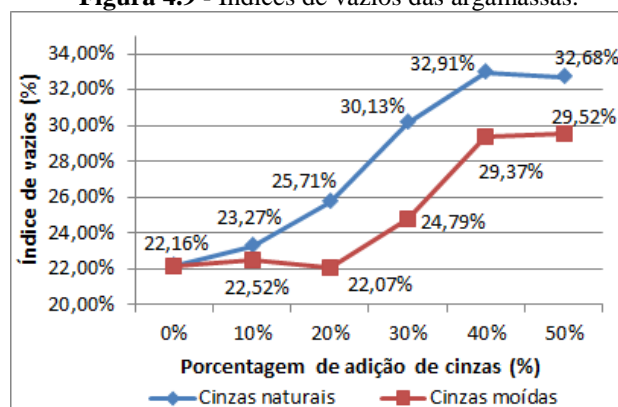
Também é possível constatar que a absorção por imersão e o índice de vazios aumentaram com o aumento do teor de ar incorporado e do fator água/cimento. Os traços com maiores adições de cinzas, principalmente na granulometria natural, exigiram um maior fator água/cimento que, conseqüentemente, propiciou uma maior quantidade de água livre na mistura, a qual evaporou-se dando origem a uma maior quantidade de poros.

Figura 4.8 - Absorção de água por imersão.



Fonte: Autor (2018).

Figura 4.9 - Índices de vazios das argamassas.



Fonte: Autor (2018).

5. CONCLUSÃO

Para a maioria das propriedades, o melhor desempenho das argamassas se deu com a adição de cinzas moídas, pelo fato de que estas, por possuírem granulometria reduzida, preenchem melhor os espaços vazios, aumentando a compacidade e conseqüentemente a resistência do material, além de possuir um alto teor de finos, os quais auxiliam na maior capacidade de retenção de água. No entanto, com o aumento gradativo da adição desse material há um conseqüente aumento de sua superfície específica, o que exige uma maior quantidade de aglomerante para envolver todas as partículas, o qual não foi fornecido, gerando uma redução do seu desempenho para teores acima de 30%.

Já as cinzas naturais não produziram argamassas com desempenhos favoráveis em relação à argamassa de referência por não proporcionarem uma alta compacidade do material. Isso se deu em função da maior quantidade de espaços vazios originados pela maior uniformidade na distribuição das partículas e por suas dimensões mais graúdas. O maior volume de vazios também pode comprometer a durabilidade da argamassa devido à diminuição de sua capacidade estanque. Porém, as argamassas com adição de até 20% de cinzas naturais não apresentaram propriedades com grandes divergências em relação à argamassa de referência, tendo os piores desempenhos apenas para a resistência mecânica e o índice de vazios. No entanto, a resistência não é uma propriedade extremamente requerida para as aplicações mais comuns das argamassas, sendo de fundamental importância apenas para assentamento de blocos em alvenaria estrutural. O aumento do índice de vazios também pode ser benéfico para as argamassas, principalmente para usos em revestimentos, por aumentar o isolamento térmico de ambientes. Ademais, as cinzas naturais produziram argamassas com alto teor de ar incorporado, deixando-as mais trabalháveis, o que pode acarretar em melhoria de suas propriedades a longo prazo se comparado com argamassas menos trabalháveis.

Para teores a partir de 30% de adição de cinzas, tanto naturais como moídas, as argamassas apresentaram uma alta expansão volumétrica, gerando fissuras, o que compromete totalmente a sua utilização, principalmente em revestimentos. Portanto, para ambas as granulometrias, adições de até 20% de cinzas conferem bons resultados à argamassa. As cinzas moídas, em geral, produziram argamassas com melhor desempenho nas propriedades, porém não foram extremamente consideráveis. Dessa forma, para reduzir os custos na utilização das cinzas provenientes da incineração de RSS, recomenda-se utilizá-las com a granulometria natural, sem beneficiá-las com o processo de moagem.

Sendo assim, o presente trabalho evidencia que as cinzas são uma alternativa viável para melhorar as propriedades das argamassas, provando-se que sua incorporação é um modo eficaz de destinação desse material.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2018.

AGOPYAN, Vahan; JONH, Vanderley M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. São Paulo: Blucher, 2011.

AGUIAR, Amanda Lorena Dantas de. **Estudo das propriedades tecnológicas da argamassa de revestimento com incorporação da vermiculita expandida**. 2017. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 270**: Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. Philadelphia, 2003.

ANDRADE, Carlos Eduardo Silva. **Análise e caracterização de cinzas do processo de incineração de resíduos de serviço de saúde para reaproveitamento**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ARAÚJO, Rísia Amaral. **Influência da utilização de resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Revestimentos de Argamassa**. Disponível em: <<http://www.comunidadeconstrucao.com.br/upload/ativos/279/anexo/ativosmanu.pdf>>. Acesso em: 31 maio 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 23**: Cimento portland - Determinação e massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

BARROS, Raphael Tobias de Vasconcelos. **Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos**. Belo Horizonte: Tessitura, 2012a. 424 p.

BARROS, Regina Mambeli. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2012b. 374 p.

BRASIL, Resolução CONAMA nº358, de 29 de abril de 2005. Publicado no D.O.U. nº 84, de 4 de maio de 2005, Seção I, p. 63-65.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. Cap. 26. p. 863-904.

CORSINI, Rodnei. **Usina para incineração de resíduos sólidos**. 2013. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/28/3-geracao-de-energia-por-incineracao-de-lixo-saiba-291153-1.aspx>>. Acesso em: 17 maio 2018.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (Brasil) (Org.). **Manual de saneamento**. 4. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006. 408 p.

GÓIS, Elder Santos de. **Análise de argamassa de assentamento com incorporação de resíduos de placas de circuito impresso (PCI)**. 2016. 22 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

GUIMARÃES, José Epitácio Passos; GOMES, Rubens Donizeti; SEABRA, Mauro Adamo. **GUIA DAS ARGAMASSAS NAS CONSTRUÇÕES: Construindo para sempre com Cal Hidratada**. 8. ed. Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 2004.

MOREIRA, André Araujo Amato; VERMELHO, Lázaro Colodette; ZANI, Matheus Carreiro. Estudo da Argamassa Polimérica de Assentamento de Blocos e Tijolos Segundo Aspectos Técnicos, Econômicos, Mercadológicos e de Clima Organizacional. **Espacios**, v. 38, n. 53, p.14-28, jul. 2017.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Conhecendo argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: ediPUCRS, 2012. 188 p.

SANTOS, Martha Maria Bezerra. **Preparo da mistura e índice de consistência da argamassa**. Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2017.

VARELA, Marcio. **Granulometria**. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/marciovarela/disciplinas/materiais-de-construcao/granulometria-1/granulometria>>. Acesso em: 11 maio 2018.

VERÇOZA, Enio José. **Materiais de Construção**. Porto Alegre: SAGRA S.A., 1975.

AGRADECIMENTOS

Expresso os meus sinceros agradecimentos à empresa Cril Soluções Ambientais, por fornecer o material necessário ao desenvolvimento do estudo, e ao pessoal do Laboratório de Materiais de Construção da UFRN, em especial ao técnico Sandro Ricardo da S. Andrade e à bolsista Andréia N. Sallaberry, por todo o apoio dado no desenvolvimento das atividades laboratoriais. Por fim, agradeço ao meu orientador Paulo Alysson B. F. de Souza, por todo o aprendizado repassado durante a elaboração do presente trabalho.