



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

KALIL NOBREGA HISSA SAMPAIO

AVALIAÇÃO TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE COMBUSTÃO DO
CARVÃO MINERAL PROVENIENTES DE TERMELÉTRICA EM ARGAMASSAS
DE REVESTIMENTO

FORTALEZA

2017

KALIL NOBREGA HISSA SAMPAIO

AVALIAÇÃO TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE COMBUSTÃO DO
CARVÃO MINERAL PROVENIENTES DE TERMELÉTRICA EM ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil: Estruturas e
Construção Civil da Universidade
Federal do Ceará, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo
Bezerra Cabral.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S183a Sampaio, Kalil Nobrega Hissa.
Avaliação técnica da utilização de cinzas de combustão do carvão mineral provenientes de termelétrica em argamassas de revestimento / Kalil Nobrega Hissa Sampaio. – 2017.
89 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

1. Cinzas de carvão mineral. 2. Materiais Sustentáveis. 3. Argamassas com cinzas. I. Título.

CDD 624.1

KALIL NOBREGA HISSA SAMPAIO

AVALIAÇÃO TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE COMBUSTÃO DO
CARVÃO MINERAL PROVENIENTES DE TERMELÉTRICA EM ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil: Estruturas e
Construção Civil da Universidade
Federal do Ceará, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de concentração: Construção Civil

Aprovada em 14/06/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, Dr. (Orientador)

Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.

Universidade Federal do Ceará – UFC

Profa. Andrea Parisi Kern, Dra.

Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

A Deus e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por abençoar minha vida e estar sempre comigo em todos os momentos, me provendo amor, saúde e paz e me dando forças para continuar nessa jornada da vida, me tornando a cada dia uma pessoa melhor perante Ele.

Aos meus pais, por todo o amor e suporte dado a mim por todos esses anos, onde sempre pude contar e sempre tive apoio a todas as minhas escolhas. A todas as oportunidades providas a mim que com muita persistência as agarrei, ensinando-me a nunca desistir.

Aos meus avós, pelo amor incondicional dados a mim, me ensinando e moldando meu caráter, me tornando a pessoa que sou hoje.

À Yânika Castelo Branco Girão, que me ajudou nesse processo desde o início da graduação até o final do Mestrado, ajudando-me a superar todas as dificuldades que tive durante o curso e me apoiando até sua conclusão.

Aos meus familiares, que me incentivaram e torceram por mim durante toda minha vida.

Aos meus colegas de mestrado, pela ajuda e companheirismo nesses últimos anos.

Aos profissionais do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) pela ajuda na realização dos ensaios.

À ENEVA e a EDP, pelo suporte, ajuda e acompanhamento durante a coleta das cinzas e o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu professor e orientador Antônio Eduardo Bezerra Cabral, pela orientação e dedicação dado a mim durante essa dissertação e todas as disciplinas lecionadas por ele durante o curso.

“Criamos a época da velocidade, mas nos sentimos enclausurados dentro dela. A máquina, que produz abundância, tem-nos deixado em penúria. Nossos conhecimentos fizeram-nos céticos; nossa inteligência, empedernidos e cruéis. Pensamos em demasia e sentimos bem pouco. Mais do que de máquinas, precisamos de humanidade. Mais do que de inteligência, precisamos de afeição e doçura. Sem essas virtudes, a vida será de violência e tudo será perdido.”

Charles Chaplin (1940)

RESUMO

No Brasil, 65% dos empreendimentos de geração de energia são usinas termelétricas. No Ceará as mesmas são responsáveis por 61,11% da produção de energia do estado, destacando-se as usinas termelétricas de Pecém I e Pecém II, que juntas possuem a capacidade instalada de 1085MW. Contudo, as usinas termelétricas possuem um grande passivo ambiental pela sua geração de resíduos, dentre os quais se destacam as cinzas da combustão do carvão mineral (CCCM). Para dar uma destinação adequada a esse resíduo, busca-se incorporá-lo em matérias-primas. O presente trabalho propõe aplicar essas cinzas na confecção de argamassas mistas de cimento e cal, substituindo a cal por CCCM nos teores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, analisando assim suas características tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Com relação aos ensaios no estado fresco, foi fixado o índice de consistência e a partir do mesmo foi quantificada a quantidade de água necessária para cada mistura atingi-lo, em seguida foi avaliada a perda de consistência da argamassa após cinco e dez minutos. Por fim, foi investigada a reologia pelo método do *Squeeze-flow*. Com relação aos ensaios no estado endurecido, foram avaliadas as resistências à tração na flexão e à compressão e a resistência de aderência à tração. Finalmente, a durabilidade foi analisada através dos ensaios de permeabilidade pelo método do cachimbo e a taxa de abertura de fissuras. Os resultados foram analisados por uma análise de variância (ANOVA) e o comparativo múltiplo de médias pelo teste de Duncan, utilizando o *software Statistica 7.0*. Os mesmos indicaram que a substituição é viável tecnicamente conferindo um melhor desempenho na sua trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade. Todas as argamassas com CCCM mostraram melhoras em suas características quando comparadas ao traço de referência, sendo a argamassa com teores acima de 75% de CCCM as que mais se destacaram em resistência, consistência e durabilidade.

Palavras-chave: Cinzas de carvão mineral. Materiais Sustentáveis. Argamassas com cinzas.

ABSTRACT

In Brazil, 65% of the power generation projects are thermal plants. In the state of Ceará they are responsible for 61.11% of the energy production, highlighting the thermal plants of Pecém I and Pecém II which together have an installed capacity of 1085MW. However, the thermal plants have a major environmental liability for its waste generation, among which stands out the ashes from the combustion of coal (ACC). In order to give a more suitable destination to this waste, its incorporation into raw materials may generate sustainable materials. This thesis proposes to apply those thermal plants' ashes in mixed mortar of cement and lime, replacing lime by ACC in contents of 0%, 25%, 50%, 75% and 100%, analyzing the characteristics in fresh state and hardened states, as well as its durability. Regarding the fresh state's tests, the consistency index was fixed and it was quantified the amount of water necessary for each mixture to reach it. Afterwards, the loss of consistency of each mortar was evaluated after five and ten minutes. Finally, the rheology was investigated by the Squeeze-flow method. Regarding the hardened state's tests, the tensile strength in flexion, the compressive strength and the tensile strength were evaluated. In the end, the durability was analyzed through the permeability test by the pipe method and the cracking aperture lengths. The results were analyzed by an analysis of variance (ANOVA) and the multiple comparisons of means by the Duncan's test, using the software Statistica 7.0. They indicate that its replacement is technically feasible, as giving a better performance in its workability, resistance and durability. All of the mortars with ACC have shown an improvement in its characteristics compared to the reference mortar, and the mortars with more than 75% of ACC stood out among in resistance, in consistency, and in durability.

Keywords: Coal Ash. Sustainable Materials. Mortars with ashes.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupo de elementos residuais no carvão.....	20
Tabela 2 - Resistência de aderência à tração com os respectivos coeficientes de variação.....	28
Tabela 3 - Características do cimento CP V utilizado.....	31
Tabela 4 - Caracterização do agregado miúdo	31
Tabela 5 - Dados granulométricos das cinzas	36
Tabela 6 - Resultado ensaio de massa específica das CCCM	37
Tabela 7 - Fluorescência de raios x (FRX) das cinzas	37
Tabela 7 - Fluorescência de raios x (FRX) das cinzas - continuação.....	38
Tabela 8 - Ensaio de índice de atividade pozolânica.....	38
Tabela 9 - Consumo de materiais por m ³ de argamassa	40
Tabela 10 - Percentual de perda de água	44
Tabela 12 - Índice de consistência das argamassas produzidas.....	52
Tabela 13 - ANOVA fator duplo sem repetição da perda da consistência.....	53
Tabela 14 - ANOVA <i>Squeeze-flow</i>	55
Tabela 15 - Comparação da caracterização química com demais trabalhos	58
Tabela 16 - Comparação dos resultados do ensaio de resistência de aderência à tração	61
Tabela 17 - Resultado da avaliação do somatório de abertura de fissuras	62
Tabela 18 - Resultado do ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas de revestimentos de paredes.....	16
Figura 2 - Ensaio de <i>Squeeze-flow</i>	18
Figura 3 - Tipos de ruptura no ensaio de aderência.....	19
Figura 4 - Limites de resistência de aderência à tração.....	19
Figura 5 - Processo de queima do carvão mineral.....	21
Figura 6 - Termogravimetria da cinza volante	22
Figura 7 - Relação entre o teor de cinzas e a resistência à compressão	24
Figura 8 - Relação entre o tempo e a resistência à compressão para os diferentes traços	25
Figura 9 - Resistência à compressão após 28 dias.....	26
Figura 10 - Relação da absorção (a) e Resistência à compressão (b) com o teor de cinzas	27
Figura 11 - Valores de resistência à compressão nas idades indicadas.....	28
Figura 12 - Trabalhabilidade das diferentes misturas.....	29
Figura 13 - Resistência à compressão das diferentes misturas.....	30
Figura 14 - Granulometria do agregado miúdo	32
Figura 15 - Área de depósito das cinzas	33
Figura 16 - Pátio de depósito das CCCM.....	33
Figura 17 - Coleta das cinzas.....	34
Figura 19 - Granulometria a laser - cinza Pecém I.....	35
Figura 18 - MEV da CCCM a) 2000x Pecém II; b) 2000x Pecém I; c) 6000x Pecém II;	35
Figura 20 - Granulometria a laser - cinza Pecém II.....	36
Figura 21 - Fluxograma do método de pesquisa	39
Figura 22 - Comparação do traço de referência	40
Figura 23 - Ensaio de índice de consistência da argamassa produzida	42
Figura 24 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de <i>Squeeze-flow</i>	43
Figura 25 - Corpo de prova após o ensaio (vista superior).....	43
Figura 26 - Moldagem dos corpos de prova prismáticos.....	45
Figura 27 - Corpos de prova prismáticos.....	45
Figura 28 - Confeção dos painéis de argamassa sobre a alvenaria.....	46

Figura 29 - Fissuras no painel de argamassa	47
Figura 30 - Ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo.....	48
Figura 31 - Execução dos furos nos painéis	48
Figura 32 - Pastilhas coladas no revestimento	49
Figura 33 - Corpos de provas ensaiados à aderência à tração	50
Figura 34 - Ensaio de resistência de aderência à tração em blocos cerâmicos.....	50
Figura 35 - Resultado do ensaio de <i>Squeeze-flow</i>	54
Figura 36 - Resultado do ensaio de resistência à tração na flexão	56
Figura 37 - Resultado do ensaio de resistência à compressão	57
Figura 38 - Resultado do ensaio de resistência de aderência à tração	59
Figura 39 - Comparação da resistência média de aderência à tração entre os painéis e os blocos.....	61
Figura 40 - Taxa de abertura de fissuras	62
Figura 41 - Taxa média de permeabilidade do revestimento.....	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Justificativa	11
1.2 Objetivos	14
<i>1.2.1 Objetivo geral</i>	14
<i>1.2.2 Objetivos específicos</i>	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Argamassas	15
<i>2.1.1 Propriedades das argamassas de revestimento</i>	16
2.2 Cinzas da combustão do carvão mineral	20
2.3 Argamassas com cinzas da combustão do carvão mineral	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Materiais	31
3.2 Método de pesquisa	39
<i>3.2.1 Preparo da argamassa de revestimento</i>	39
<i>3.2.2 Ensaio estado fresco</i>	41
<i>3.2.3 Ensaio estado endurecido</i>	44
3.3 Análise estatística	51
4. RESULTADOS	52
4.1 Resultados no Estado Fresco	52
<i>4.1.1 Perda do índice de consistência e quantidade de água</i>	52
<i>4.1.2 Reologia pelo método do Squeeze-flow</i>	54
4.2 Resultados no Estado Endurecido	55
<i>4.2.1 Ensaio de resistência à tração na flexão</i>	55
<i>4.2.2 Ensaio de resistência à compressão</i>	56

<i>4.2.3 Ensaio de resistência de aderência à tração</i>	59
<i>4.2.4 Comparação dos resultados do ensaio de resistência de aderência à tração nos painéis de argamassa e nos blocos cerâmicos</i>	60
4.3 Durabilidade	62
<i>4.3.1 Somatório de abertura de fissuras</i>	62
<i>4.3.2 Permeabilidade pelo método do cachimbo</i>	63
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5.1 Conclusões	65
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	67
REFERÊNCIAS	68
APÊNDICES	75
APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE <i>SQUEEZE-FLOW</i>	76
APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS	77
APÊNDICE C – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS	79
APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	81
APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	82
APÊNDICE F – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	82
APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	87
APÊNDICE H – RESULTADOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE PELO MÉTODO DO CACHIMBO	89

1. INTRODUÇÃO

No panorama brasileiro, as usinas termelétricas são responsáveis por causarem grandes impactos ambientais devido ao alto volume de resíduo gerado. Tais resíduos, onde o principal é a cinza da combustão de carvão, caso dispostos imprópriamente, podem causar contaminações e perigos à saúde pública. Portanto, é necessário dá-los uma destinação adequada. Para tal, as usinas encontraram na indústria da construção civil a utilização de tais resíduos como matéria prima. Suas aplicações vão desde a adição no próprio cimento até a substituição de agregados miúdos ou aglomerantes na fabricação de concretos e argamassas. Entretanto, essas aplicações dependem das características físico-químicas das cinzas, podendo até conferir um maior desempenho para concretos e argamassas, justificando sua utilização para além do fator ambiental.

Assim, a utilização das cinzas de carvão mineral mostra-se promissora na confecção de compostos cimentícios, além de possibilitar uma destinação mais adequada a esse resíduo da indústria energética. Para tal, o presente trabalho irá focar no estudo de argamassas mistas com a utilização das cinzas em substituição à cal, buscando, por meio de um teor ótimo de substituição, melhorar as propriedades destas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

1.1 Justificativa

Para que haja desenvolvimento humano, seja no aspecto econômico, social, tecnológico ou industrial, é necessária a geração de energia. A humanidade procura formas diferentes de produzi-las a partir da natureza e do desenvolvimento tecnológico. Entretanto, há uma grande preocupação com os impactos ambientais e a sustentabilidade na sua utilização, iniciando a busca por fontes de energias renováveis (IZIDORO e FUNGARO, 2007).

Atualmente o Brasil possui 4.245 empreendimentos em operação para a geração de energia elétrica gerando mais de 138 milhões de kW, sendo as usinas hidrelétricas responsáveis por 61,55% de toda a potência instalada. Contudo, existem 2.769 usinas termelétricas, correspondendo a 65% dos empreendimentos e 28,57% da potência instalada. Nos próximos anos está prevista a adição de mais de 41 milhões de kW na capacidade de geração, sendo que 24% destas é referente a novas usinas termelétricas. No estado do Ceará,

as usinas termelétricas correspondem a 61,11% de toda a geração de energia do estado (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

As usinas termoelétricas utilizam combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica, destacando-se dentre esses combustíveis o petróleo, o gás natural e o carvão mineral. Devido à alta de preços do petróleo e do gás natural, o carvão mineral como combustível é utilizado como uma alternativa para a alimentação das termelétricas. Apesar da intensa pressão ambientalista contra o seu uso devido ao controle e redução da emissão de poluentes à atmosfera, o carvão mineral ainda é amplamente utilizado como combustível graças aos investimentos tecnológicos para amenizar seus danos ambientais (BORBA, 2001).

Durante o processo da queima do carvão mineral são geradas cinzas, denominadas de cinzas de combustão do carvão mineral (CCCM). Existem três tipos de cinzas: as cinzas de fundo, as quais correspondem à parte mais pesada que logo se precipita em um reservatório com água abaixo da caldeira; as cinzas de combustível pulverizado, que são capturadas nos precipitadores eletrostáticos que são filtrados; e as cinzas volantes, que são as carreadas pelos gases (SWAINE e GOODARZI, 1995).

As CCCM são um dos resíduos sólidos mais significativos em termos de volume no Brasil. Assim, existe a necessidade de que haja uma destinação para as mesmas a baixo custo e que não seja imprópria, pois as suas disposições sem medidas de proteção adequadas podem causar contaminação das águas subterrâneas e superficiais por lixiviação de substâncias tóxicas (FUNGARO, IZIDORO e ALMEIDA, 2005).

Devido a esse passivo ambiental, busca-se um aproveitamento das CCCM, uma vez que grande parte delas possuem propriedades pozolânicas. Esse tipo de propriedade é muito valorizado nas indústrias de cimento para a fabricação do cimento CP-II-Z, que utiliza de 6% a 14% de pozolanas e do cimento CP IV que utiliza de 15% a 50% (ISAIA, BATTAGIN e HELENE, 2011). Desse modo, as usinas buscam verificar se as cinzas geradas possuem essas propriedades para que possam ser destinadas a esse fim (CHERIAF, ROCHA e PÉRA, 1999).

Segundo a NBR 5736 (ABNT, 1999), o material pozolânico é definido com aquele material silicoso ou silicoaluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades

cimentícias. O mesmo pode ser natural, de origem vulcânica ou sedimentar, ou pode ser artificial, proveniente de tratamento térmico ou subproduto industrial, como no caso da CCCM.

Entretanto, não é só na fabricação do cimento que essas cinzas podem ser utilizadas. A adição das cinzas em substituição ao cimento na confecção de concretos e argamassas confere um aumento na resistência à compressão, desde que a mesma apresente propriedades pozolânicas. Essa substituição do cimento por cinzas é da ordem de 10% a 30% em massa, e o aumento da resistência é da ordem de 5% ao final de 90 dias (JATURAPITAKKUL; CHEERAROT, 2003).

Para tal, é necessária a caracterização das cinzas utilizadas. O ensaio fluorescência de raios X (FRX) é importante para determinar a composição química das cinzas. Além da sua composição, outro aspecto importante é o tamanho das partículas das cinzas. Quanto mais finas as partículas (inferior a 45 μm), o seu compósito possuirá um maior resultado quanto à resistência a compressão (ERDOĞDU; TÜRKER, 1998).

No contexto brasileiro, as argamassas são amplamente utilizadas nas construções de edifícios, onde sua principal função é de revestimento do substrato em questão, seja parede, piso ou teto. Segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013), a argamassa consiste na união de aglomerantes com um agregado miúdo. Comumente esses aglomerantes são cimento, gesso e/ou cal. À utilização de mais de um aglomerante dá-se a denominação de argamassa mista, onde a mais utilizada é a mistura de cimento com cal, para melhorar propriedades da argamassa que somente com um deles não se conseguiria.

A utilização de argamassas data de milhares de anos atrás para a construção e revestimentos de muros e paredes. Registros mostram que civilizações como as Gregas, Fenícias e Romanas já as utilizavam. Entretanto, ao invés de cimento, os mesmos utilizavam cinzas vulcânicas como um material aglomerante junto com materiais inertes. Além desses materiais, eram utilizados aditivos naturais para melhorar a trabalhabilidade da argamassa. Os Romanos utilizavam sangue, banha ou leite para conseguir o desempenho esperado, onde os mesmos atuavam como incorporadores de ar (MIRANDA, 2009).

A durabilidade das construções está diretamente ligada com a qualidade dos materiais utilizados nas mesmas, junto com a sua correta composição e aplicação. As argamassas de revestimento, além da sua funcionalidade estética, atuam também como barreira para a

entrada de água através dos painéis de fachadas. Os principais danos ocorridos nas mesmas são os deslocamentos que resultam em fissuração e infiltração. Além do quesito estético, as fissurações comprometem a integridade da alvenaria, favorecendo a infiltração e outras manifestações patológicas. Já as infiltrações, além dos danos causados pela passagem da água, comprometem também o desempenho térmico (VEIGA, 1998).

As adições nas argamassas podem ser feitas em substituição aos aglomerantes, quando o material adicionado possui características pozolânicas ou ao agregado miúdo, quando o material adicionado é um material inerte e tenha compatibilidade granulométrica. Dependendo da reatividade e da granulometria desse material, podem-se conseguir argamassas com desempenho superior às com materiais convencionais.

Assim a indústria da construção civil tem um papel importante para a sustentabilidade mundial devido à sua capacidade de absorver os resíduos de diferentes indústrias e incorporá-los em suas matérias primas. Para isso, o desenvolvimento de materiais sustentáveis é encarado como uma solução para os passivos ambientais gerados por tais indústrias, e quando é possível utilizá-los em materiais com amplo uso, como no caso das argamassas, têm-se uma contribuição expressiva para a sustentabilidade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a utilização de cinzas de combustão do carvão mineral (CCCM) proveniente de termelétrica como aglomerante em argamassas de revestimento.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- ✓ Avaliar as características tanto no estado fresco quanto no estado endurecido da argamassa com adição de CCCM em comparação ao traço de referência.
- ✓ Avaliar a durabilidade da argamassa com adição de CCCM com base nos ensaios de permeabilidade à água e de abertura de fissuras.
- ✓ Verificar qual o teor ótimo de substituição de aglomerante (cal) por CCCM com base nos resultados de resistência de aderência e de durabilidade.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Argamassas

Existem diversos tipos de argamassa, a depender de cada função que exercem. Para a construção de alvenarias, utiliza-se a argamassa de assentamento, responsável pela elevação da alvenaria e a argamassa de fixação, ou encunhamento, responsável pela fixação da alvenaria de vedação com o elemento estrutural, evitando que os esforços estruturais sejam distribuídos para as alvenarias (ISAIA; BATTAGIN; HELENE, 2011).

Entretanto, a função mais utilizada para argamassa é para revestimento. Dentre as principais funções das argamassas de revestimento destacam-se a regularização das imperfeições do substrato, quando a mesma é aplicada para criar uma superfície uniforme sobre o mesmo, e o acabamento, onde a argamassa é o acabamento final ou pode estar preparada para recebê-lo, como pinturas ou cerâmicas (VEIGA, 1998).

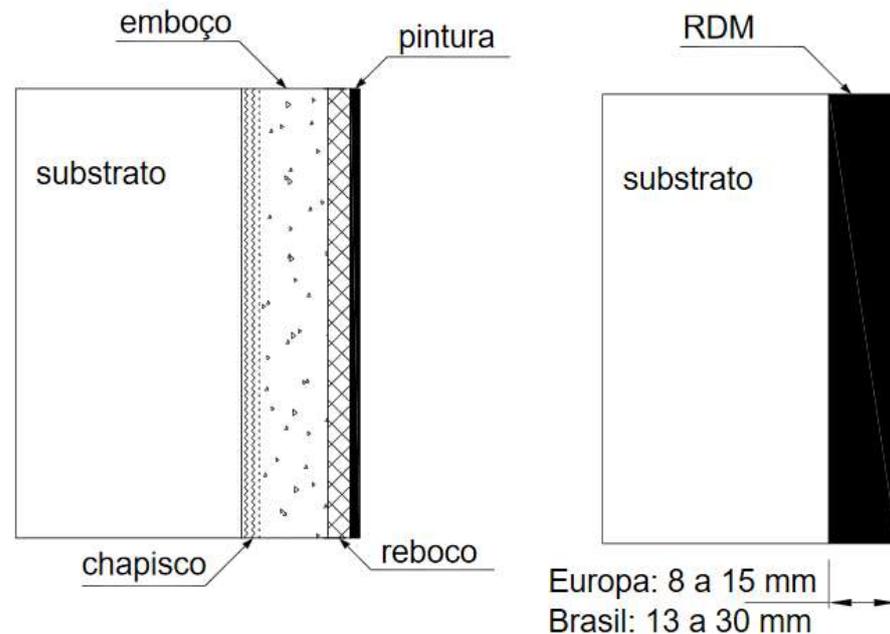
Se o objeto a ser revestido for um piso, tem-se a argamassa de contrapiso, cuja função é regularizar o piso para posterior revestimento ou acabamento. Caso o objeto a ser revestido for uma parede ou teto, existe uma série de argamassas aplicadas em formas de camadas, sendo denominadas camadas de revestimento (ISAIA; BATTAGIN; HELENE, 2011).

A NBR 13529 (ABNT, 2013) classifica as camadas de revestimento como:

- Chapisco: camada de preparo do substrato, aplicada de forma contínua ou descontínua, com a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento.
- Emboço: camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo, ou que se constitua no acabamento final.
- Reboco: camada de revestimento utilizada para cobrimento do emboço, propiciando uma superfície que permita receber o revestimento decorativo ou que se constitua no acabamento final.
- Acabamento decorativo: material para acabamento decorativo aplicado sobre o revestimento de argamassa, como pintura, materiais cerâmicos, pedras naturais, placas laminadas, têxteis e papel.

Além dessas camadas existem também os revestimentos industrializados chamados de revestimento decorativo monocamada (RDM), ou monocapa, que consiste em uma camada única para suprir todas as camadas supracitadas, podendo o mesmo já vir pigmentado ou não, como acabamento decorativo. A Figura 1 ilustra a aplicação das camadas.

Figura 1 - Camadas de revestimentos de paredes



Fonte: (ISAIA; BATTAGIN; HELENE, 2011)

Caso o acabamento decorativo seja um revestimento cerâmico, existem as argamassas de assentamento de peças cerâmicas, também chamadas de argamassa colante, e a argamassa de rejuntamento, responsável por proporcionar as juntas para dilatações ou deformações.

2.1.1 Propriedades das argamassas de revestimento

Para que a argamassa de revestimento cumpra suas funções, existe uma série de características e propriedades, tanto para o seu estado fresco quanto para o estado endurecido, que deverão ser verificadas de modo a prever o comportamento do material nas diferentes condições de uso (MORAIS, 2011).

Para o estado fresco a principal propriedade das argamassas de revestimento é a sua trabalhabilidade, a qual é a facilidade que a argamassa tem de ser aplicada, de modo a obter uma boa aderência, compacidade e rendimento, para que o aspecto final do revestimento seja satisfatório. Esta característica é muito importante, pois o comportamento do

revestimento depende diretamente da sua aplicação, que por sua vez só é possível se a mesma tiver uma boa trabalhabilidade. Para melhorá-la pode-se aumentar o teor de finos, ou teor de ligante, ou a quantidade de água. Entretanto, essas técnicas podem causar consequências quanto à durabilidade do revestimento, sendo preferível a adição de cal à mistura ou de aditivos plastificantes ou incorporadores de ar para melhorar a trabalhabilidade. Para tal, é necessário que a argamassa tenha consistência, coesão e plasticidade (VEIGA, 1998).

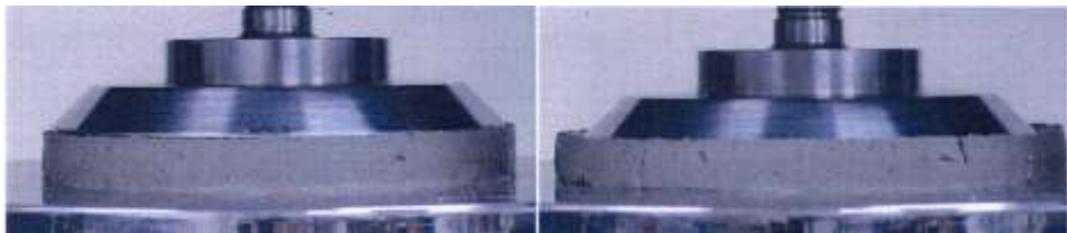
A consistência é a propriedade pela qual a argamassa tende a resistir à deformação, sendo responsável diretamente pela trabalhabilidade, podendo a mesma ser classificada como seca, onde a pasta preenche os vazios entre os grãos; plástica, onde há a formação de uma fina película na superfície dos grãos ou fluida, onde os grãos ficam imersos na pasta (CINCOTTO; SILVA; CASCUDO, 1995). Para a determinação do índice de consistência, a NBR 13276 (ABNT, 2016) apresenta o procedimento de preparo da mistura para a realização do ensaio e como determinar este índice.

A coesão refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa no estado fresco e às ligações químicas da pasta aglomerante. A influência da cal nas propriedades de trabalhabilidade e consistência vem do fato de que a mesma proporciona condições de coesão interna, em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão ao agregado. A plasticidade é a propriedade a qual a pasta no estado fresco tende a conservar-se deformada após a retirada da tensão aplicada, sendo que a plasticidade e a consistência refletem diretamente na trabalhabilidade. A retenção de água é a propriedade de a argamassa manter-se no estado fresco com sua consistência e trabalhabilidade esperada quando sujeita a situações que provocam perda de água, como evaporação, sucção do substrato, hidratação do cimento ou carbonatação da cal (CINCOTTO; SILVA; CASCUDO, 1995).

Outro comportamento avaliado no estado fresco é a reologia. Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, avaliando as relações entre a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação em determinado período de tempo. Assim, o comportamento reológico dos materiais é representado pela relação do fluxo, ou deformação, com a força aplicada sobre o mesmo (GLATTHOR; SCHWEIZER, 1994).

Para a avaliação da reologia é utilizado o método do *squeeze-flow*, que consiste na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, onde a superior é de diâmetro igual ao do corpo de prova e a inferior com o diâmetro duas vezes maior do que o do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 2. O mesmo pode ser medido através da aplicação de uma força pré-determinada e o deslocamento registrado, ou através de um deslocamento a uma velocidade constante e a força é medida. Com relação à força pré-determinada, quanto maior for o deslocamento registrado, menor a viscosidade da argamassa, sendo a mesma mais fluida e mais trabalhável. Já com o deslocamento constante, quanto menor a força necessária para impor o deslocamento, mais fluída e trabalhável será a argamassa. Para a execução do ensaio recomenda-se a utilização de um corpo de prova cilíndrico de 100 mm de diâmetro e 10 mm de altura. (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010)

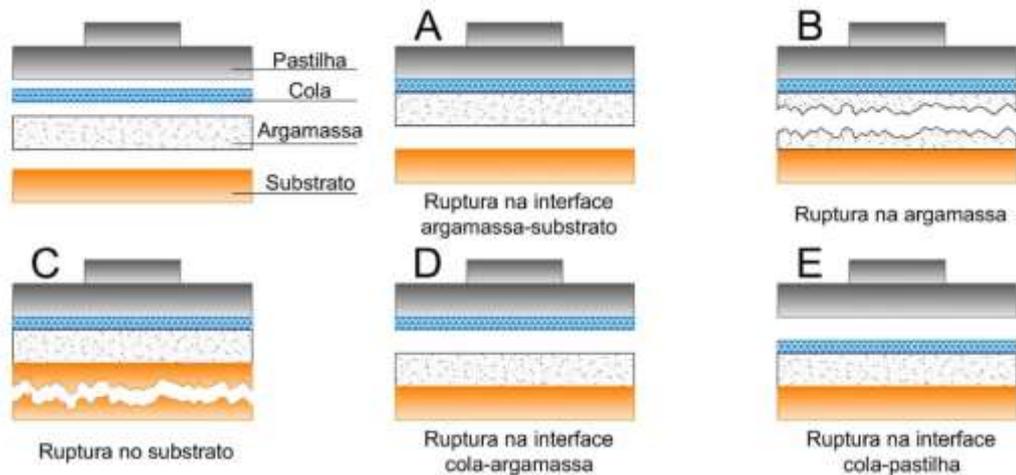
Figura 2 - Ensaio de *Squeeze-flow*



Fonte: (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010)

Já para o estado endurecido, a principal propriedade das argamassas de revestimento é a sua aderência ao substrato. A resistência de aderência à tração no estado endurecido é a capacidade que a interface substrato/argamassa possui de resistir a tensões de cisalhamento e de tração, na qual a mesma depende mais das características do substrato do que da sua própria composição para uma melhor aderência (SABBATINI, 1984). A NBR 15258 (ABNT, 2010) apresenta o procedimento de ensaio de aderência salientando para o modo de ruptura do ensaio, se o mesmo ocorre no substrato, na interface substrato/revestimento ou no revestimento. Dependendo do local de ruptura pode-se caracterizar o revestimento como aderente ou não, como mostrado na Figura 3, onde apenas se a ruptura ocorrer no caso E da figura que o valor da ruptura é inválido.

Figura 3 - Tipos de ruptura no ensaio de aderência



Fonte: (ISAIA; BATTAGIN; HELENE, 2011)

A NBR 13749 (ABNT, 2013) estabelece os limites de resistência de aderência à tração (R_a) para as argamassas de emboço ou camada única de acordo com a sua aplicação, conforme mostrado na Figura 4, onde é necessário que para cada grupo de 12 amostras, pelo menos oito sejam superiores aos limites estabelecidos. Além da aderência existem outras propriedades para o estado endurecido, tais como a durabilidade, resistência à tração na flexão e resistência à compressão.

Figura 4 - Limites de resistência de aderência à tração

Local	Acabamento	R_a (MPa)
Interna	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$
	Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
Externa	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,30$
	Cerâmica	$\geq 0,30$

Fonte: NBR 13749 (ABNT, 2013)

2.2 Cinzas da combustão do carvão mineral

O carvão mineral é um combustível fóssil sólido formado a partir da matéria orgânica de vegetais depositados em bacias sedimentares. Devido à pressão e à temperatura ambiente junto com a ausência de contato com o ar, devido ao soterramento e atividades orogênicas, os restos vegetais ao longo do tempo geológico se solidificam, perdem oxigênio e hidrogênio, e se enriquecem de carbono, processo esse chamado de carbonificação. Quanto maior a influência da pressão externa e da temperatura ambiente, e quanto mais tempo esse processo ocorrer, maior será o grau de carbonificação do carvão mineral (BORBA, 2001).

A constituição básica do carvão mineral é principalmente carbono, hidrogênio e oxigênio, e por nitrogênio e enxofre em menor escala. Além disso, dependendo do grau calorífico do mesmo, estão usualmente presentes quantias de impurezas incombustíveis na faixa de 10% a 40%, em forma de argila, xisto, quartzo, feldspato e rocha calcária (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Segundo Swayne e Goodarzi (1995), inerente à formação do carvão mineral, existem vestígios de elementos químicos que afetam a qualidade e o uso. Estes elementos foram divididos em quatro grupos. Os do chamado Grupo I são os elementos perigosos em alguns casos. Entretanto, sua concentração na maioria dos carvões tende a ser baixa. Os do Grupo IIA possuem concentrações superiores aos do Grupo I e tendem a se lixiviar dos resíduos. Os do Grupo IIB dificilmente causarão problemas, a exceção do Tório e do Urânio, devido ao seu potencial radioativo. Os do Grupo III não são esperados causar problemas. A Tabela 1 exemplifica quais os elementos em cada grupo.

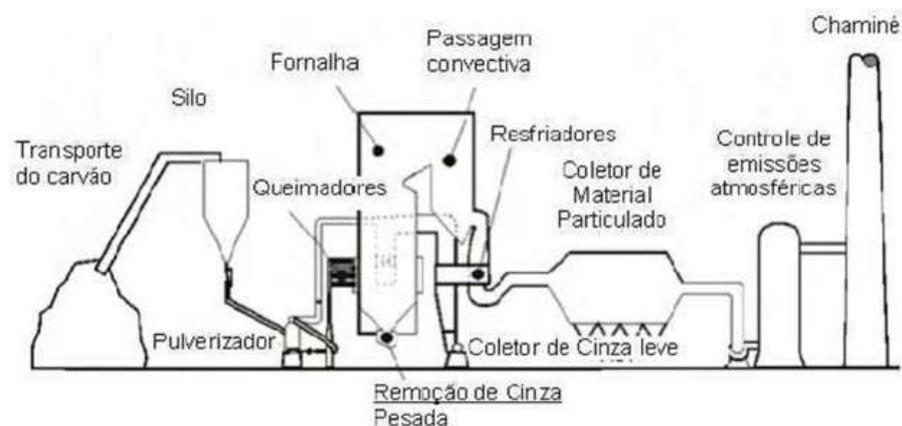
Tabela 1 - Grupo de elementos residuais no carvão

I	IIA	IIB	III
Arsênio	Boro	Berílio	Bário
Cádmio	Cloro	Cobre	Cobalto
Crômio	Flúor	Fósforo	Antimônio
Mercúrio	Manganês	Tório	Estanho
Selênio	Molibdênio	Urânio	Tálio
	Níquel	Vanádio	
	Chumbo	Zinco	

Fonte: Adaptado de (SWAINE; GOODARZI, 1995)

O processo de combustão do carvão mineral nas usinas termelétricas é denominado de gaseificação. A gaseificação consiste em utilizar-se de um combustível sólido, no caso o carvão mineral, e submetê-lo, juntamente com ar ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica, e vapor d'água, a uma fonte de calor com o objetivo de formar gases que podem ser utilizados como fonte de energia térmica e elétrica. O principal produto da gaseificação são os gases: monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), e traços de gás sulfídrico (H₂S), além das cinzas de combustão do carvão mineral (CCCM) (ABCM, 2016).

Figura 5 - Processo de queima do carvão mineral



Fonte: (FARIAS, 2005)

Dentre as CCCM, destaca-se a cinza volante, que é o material sólido extraído por meios elétricos ou mecânicos dos gases liberados pelos fornos movidos a carvão mineral. É o maior subproduto da combustão do carvão, e é nela que se encontra o maior potencial de elementos residuais, os quais dependendo da sua composição podem inviabilizar a sua aplicação (SWAINE, 1990).

O seu uso pode apresentar efeitos muito diversos, especialmente pelo fato de que o seu teor de utilização pode variar muito. Desse modo, não é possível apresentar informações sobre uma cinza volante típica ou “padrão”, dificultando a apresentação de uma diretriz específica para o uso da cinza como um material genérico (NEVILLE, 1997).

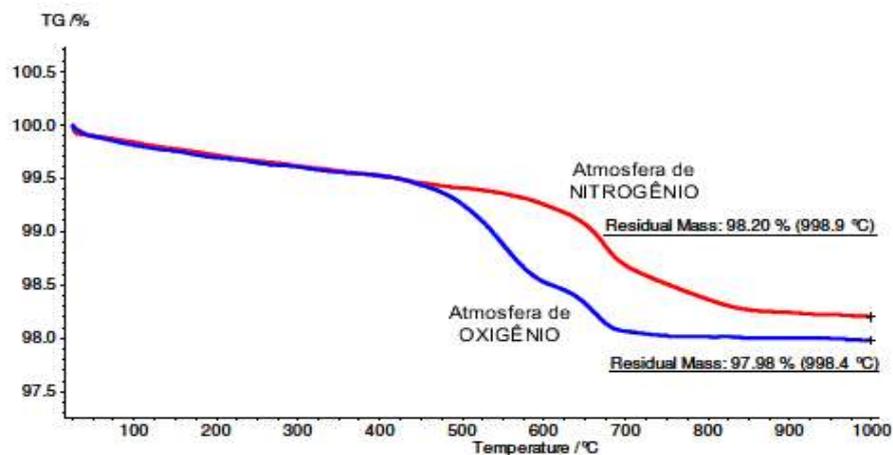
As cinzas com baixos teores de cálcio (<10% de CaO total) geralmente são produtos da combustão de antracito e de carvões betuminosos. Já as cinzas com altos teores de cálcio (entre 15% e 30% de CaO total) são geralmente produtos da combustão de lignito e de carvões sub-betuminosos. Em geral, as cinzas com altos teores de cálcio são mais reativas,

pois contêm a maior parte do cálcio na forma de compostos cristalinos reativos, e também há evidências de que o principal constituinte (fase não cristalina) contém íons de cálcio suficientes para aumentar a reatividade do vidro de aluminossilicato (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A utilização da cinza volante como adição mineral depende da sua caracterização e de suas propriedades físico-químicas, onde a mesma pode atuar como aglomerante hidráulico, interagindo com o hidróxido de cálcio para a formação de hidratos ou como material inerte, exercendo a função de enchimento (fíler), e de ponto de nucleação na formação de compostos hidratados, acelerando a hidratação do cimento, aumentando o calor máximo liberado no período de reação. A cinza volante reage com o hidróxido de cálcio na presença de umidade, formando compostos com propriedades cimentícias. Segundo Hoppe Filho (2008), as principais técnicas utilizadas para a caracterização química da cinza volante são a análise química por FRX, Termogravimetria, e atividade pozolânica. Já a caracterização física é feita a partir da morfologia, a qual consiste em estudar a forma das partículas, distribuição granulométrica, a qual verifica o tamanho das partículas, e massa específica.

Na caracterização química, a análise é feita por meio do ensaio de fluorescência de raios X (FRX), que determina a composição química da cinza pelos óxidos percentuais, bem como a termogravimetria, que indica a massa residual de carbono após a queima, determinando sua perda ao fogo. Por se tratar de uma cinza, ou seja, material já queimado, sua massa residual percentual será alta, conforme mostrado na Figura 6 (HOPPE FILHO, 2008).

Figura 6 - Termogravimetria da cinza volante



Fonte: (HOPPE FILHO, 2008).

Com relação à caracterização física, a morfologia é feita através de microscopia eletrônica de varredura, cujo objetivo é verificar a forma e textura superficial das partículas de CCCM (HOPPE FILHO, 2008).

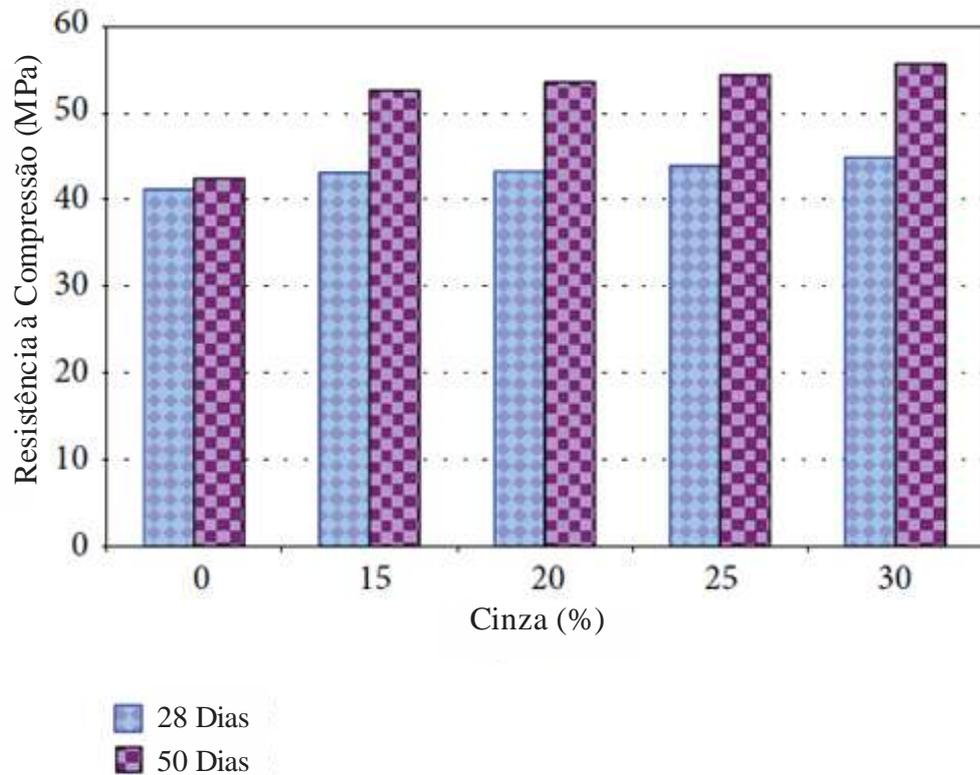
Outro fator importante para o desempenho na utilização da cinza é a sua granulometria. Um estudo realizado por Jaturapitakkul e Cheerarot (2003) na usina Mae Moh na Tailândia mostrou o efeito da cinza após a mesma passar pelo ensaio de abrasão Los Angeles, com o objetivo de deixar a cinza original com uma granulometria mais próxima com a do cimento. Tal cinza, após sua moagem para readequar a granulometria, obteve um aumento de resistência da mistura de 12% aos 90 dias, indicando que a quantidade de substituição ótima de cimento foi de 30% (JATURAPITAKKUL; CHEERAROT, 2003).

A indústria da construção civil é de longe o setor mais importante para a utilização das cinzas de combustão do carvão mineral. As indústrias cimenteiras brasileiras utilizam as cinzas volantes em grandes quantidades, a ponto de esta matéria prima ser alvo de disputa entre as mesmas, desde que as cinzas possuam características adequadas ao mercado. Devido ao acirramento da disputa por cinzas volantes, verificou-se o interesse por parte das indústrias por cinzas pesadas, cuja composição apresente baixa quantidade de carvão incombusto, como principal característica. Além da indústria cimenteira, as cinzas pesadas possuem uso potencial também nas indústrias cerâmicas, filtros, blocos e pavimentação (SABEDOT *et al.*, 2011).

2.3 Argamassas com cinzas da combustão do carvão mineral

Diversos estudos mostram a utilização de cinzas de combustão do carvão mineral (CCCM) como adição às argamassas. Um deles utilizou a cinza proveniente da usina termelétrica de Kahalgaon, onde a mesma substituiu o cimento nas proporções de 0%, 15%, 20%, 25% e 30%, na confecção de argamassas. Nos ensaios de estado fresco, o autor apresentou que a cinza utilizada reduziu a quantidade de água necessária, bem como a retração por secagem. Com relação aos ensaios no estado endurecido, aos 50 dias, o traço com 30% de substituição de cinzas obteve um aumento de 30% na resistência à compressão e de 37% na resistência à tração na flexão. O autor atribui o sucesso da utilização da cinza devido à sua finura e sua atividade pozolânica, a qual começou a se manifestar de forma mais efetiva após os 50 dias, conforme exemplificado na Figura 7 (RAI; KUMAR; SATISH, 2014).

Figura 7 - Relação entre o teor de cinzas e a resistência à compressão



Fonte: Adaptado de (RAI; KUMAR; SATISH, 2014).

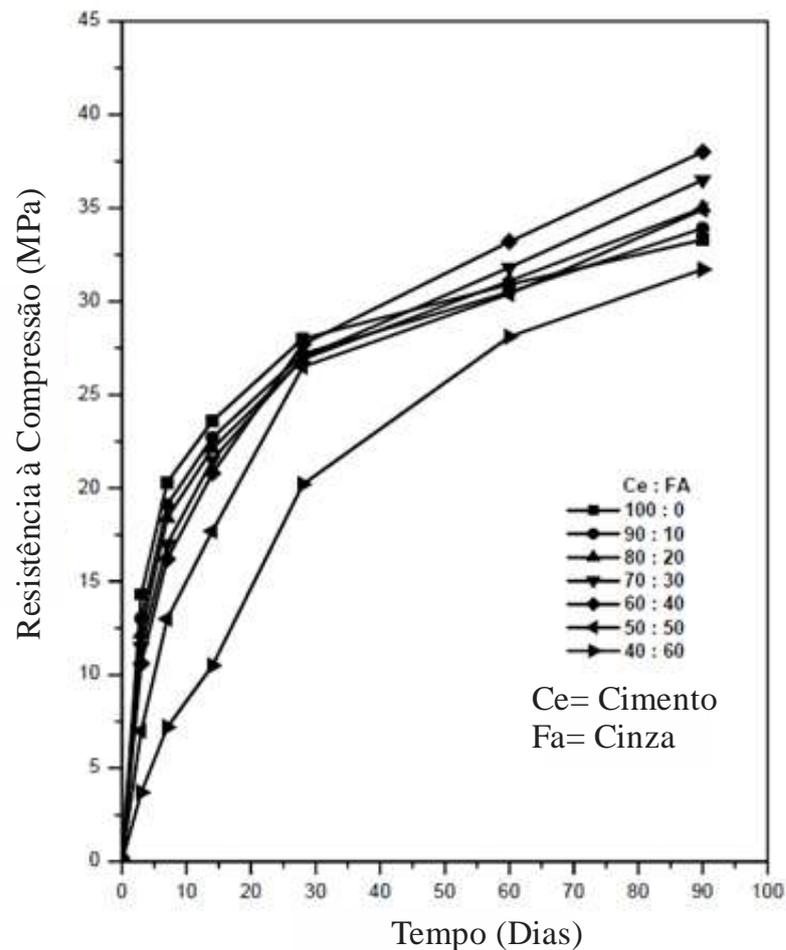
Outro autor também utilizou as CCCM para a realização de argamassa na substituição de cimento nas proporções de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, onde foram verificadas as propriedades no estado endurecido de resistência à compressão e à tração na flexão. Foi observado que até os 28 primeiros dias os traços de até 40% não distaram mais de 3% da resistência à compressão do traço de referência, entretanto, aos 90 dias, o traço com 40% obteve um aumento de 15%, como mostrado na Figura 8. Na resistência a tração na flexão os resultados foram similares, mas com um aumento também de 15% para o traço com 40% de cinzas (ISLAM; ISLAM, 2010).

Lenzi (2001) analisou 15 argamassas mistas de revestimento de traço 1:2:9 em volume, nos quais utilizou a substituição de cimento por cinza leve nos teores de 0%, 20%, 30%, 40% e 50%, e o teor de areia por cinza pesada em 0%, 50% e 100%. O mesmo concluiu que a cinza leve manteve a mesma demanda de água do cimento em todos os teores de substituição; não influenciou significativamente na retenção de água e teor de ar incorporado; reduziu a exsudação quando utilizada sem a cinza pesada; influenciou

significativamente na trabalhabilidade da argamassa; superou a resistência da argamassa de referência após o 60º dia, caracterizando a atividade pozolânica e não influenciou no resultado de resistência de aderência à tração.

Já a cinza pesada aumentou demanda de água do cimento e o teor de ar incorporado reduziu a exsudação quando utilizada sem a cinza leve; influenciou significativamente na trabalhabilidade da argamassa; aumentou significativamente a resistência à compressão das argamassas. Assim, o traço considerado ótimo encontrado foi o com 50% de cinza pesada e 30% de cinza leve, pois o mesmo obteve os melhores desempenhos nas propriedades estudadas (LENZI, 2001).

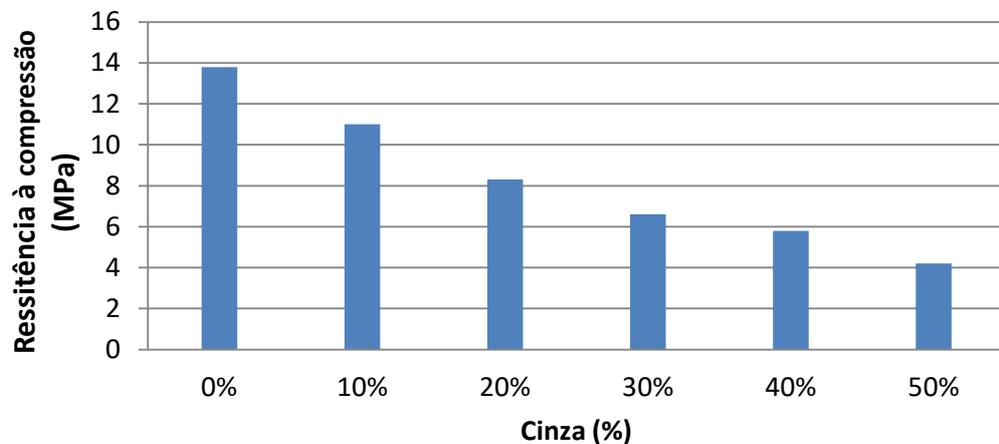
Figura 8 - Relação entre o tempo e a resistência à compressão para os diferentes traços



Fonte: Adaptado de (ISLAM; ISLAM, 2010).

Entretanto, não é toda CCCM que irá conferir maiores resistências no estado endurecido à argamassa. O principal fator de influência é se a mesma possui uma atividade pozolânica, caso contrário, a mesma pode reduzi-las expressivamente. Um estudo mostrou que a utilização das CCCM de uma usina no estado do Pará, com substituição de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% obteve resistências à compressão menores que o traço de referência, variando de 21% menor para o traço de 10% até 71% menor para o traço de 50%, conforme Figura 9. Foi concluído que quanto maior a adição da cinza, menor era a resistência da argamassa (SIQUEIRA; SOUZA; SOUZA, 2012).

Figura 9 - Resistência à compressão após 28 dias



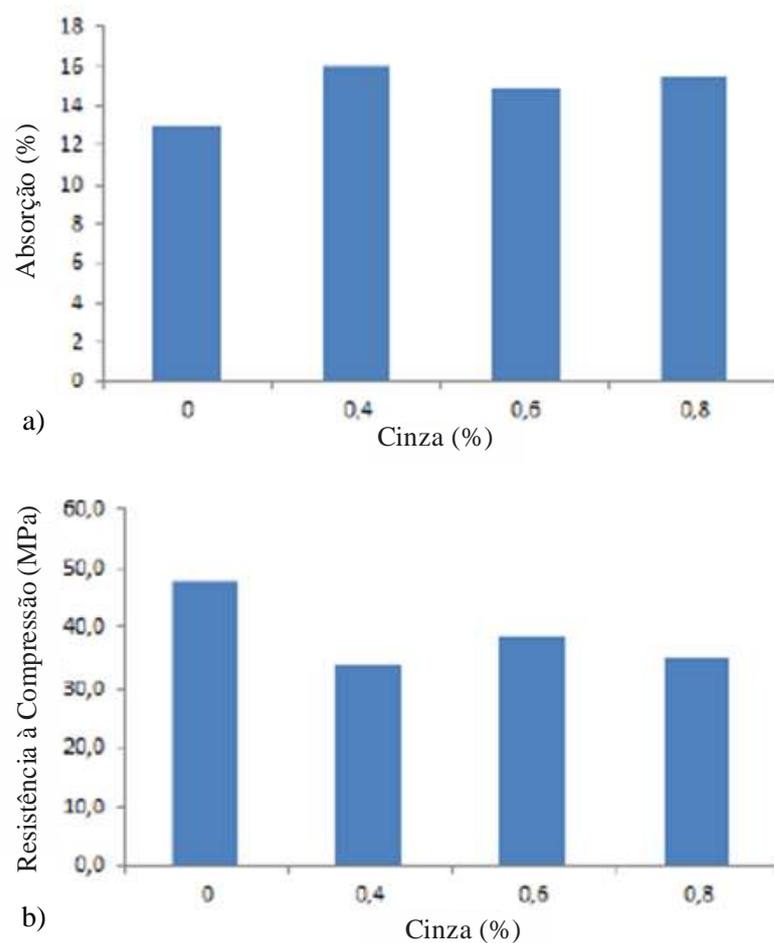
Fonte: Adaptado de (SIQUEIRA; SOUZA; SOUZA, 2012)

Chindaprasirt e Rukzon (2008) utilizaram cinza volante proveniente da usina de Mae Moh na Tailândia nos teores de 0%, 10%, 20% e 40% na substituição de cimento. O estudo concluiu que a utilização da cinza volante aumentou a resistência à compressão e diminuiu a porosidade da argamassa, quando comparada ao traço de referência, onde o teor ótimo encontrado de substituição foi o de 20%.

Outro estudo utilizou a cinza volante proveniente da refinaria de alumina Hydro, localizada no município de Barbacena – PA, e a utilizou na substituição de cimento nos teores de 0%, 40%, 60% e 80%, para a confecção de argamassas mistas com cimento e cal. Nesse estudo foi avaliado principalmente absorção e a resistência à compressão dessas argamassas, onde a adição de cinza piorou essas características, conforme apresentado na Figura 10. Entretanto, para o teor de 60%, tal piora não foi muito significativa quando comparada aos

demais traços, sendo sua utilização considerada viável para a redução de cimento na produção de argamassas mistas de baixo custo (FERREIRA *et al.*, 2014).

Figura 10 - Relação da absorção (a) e Resistência à compressão (b) com o teor de cinzas

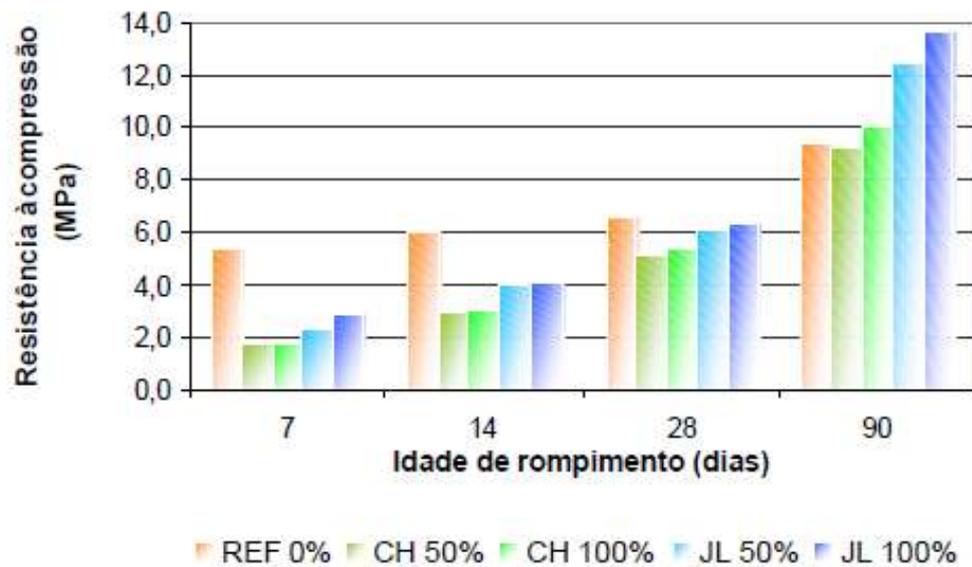


Fonte: (FERREIRA *et al.*, 2014)

Margon (2002) utilizou CCCM de duas usinas diferentes, a do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (JL), localizado no município de Capivari do Baixo – SC e da Usina Termelétrica de Charqueadas (CH), localizada no município de Charqueadas – RS, onde as mesmas substituíram o agregado miúdo nos teores de 0%, 50% e 100%, totalizando cinco traços. Com relação à resistência à compressão aos 28 dias, os traços com a cinza proveniente de Jorge Lacerda, obtiveram resistências semelhantes ao traço de referência, e superiores ao de Charqueadas. Já aos 90 dias todos os traços superaram o de referência, com exceção ao de 50% de Charqueadas, que obteve resistência inferior, conforme indicado na Figura 11. Com

relação à resistência de aderência à tração todos os traços obtiveram resultados inferiores ao traço de referência, conforme indicado na Tabela 2.

Figura 11 - Valores de resistência à compressão nas idades indicadas



Fonte: (MARGON, 2002)

Tabela 2 - Resistência de aderência à tração com os respectivos coeficientes de variação.

Argamassa	Sem tratamento estatístico			Com tratamento estatístico		
	Nº de amostras	Resistência média (MPa)	Coefficiente de variação (%)	Nº de amostras	Resistência média (MPa)	Coefficiente de variação (%)
REF 0%	7	0,296	25	3	0,344	7
CH 50%	6	0,103	33	3	0,076	7
CH 100%	7	0,141	38	3	0,191	3
JL 50%	6	0,206	37	3	0,220	9
JL 100%	5	0,161	37	4	0,135	7

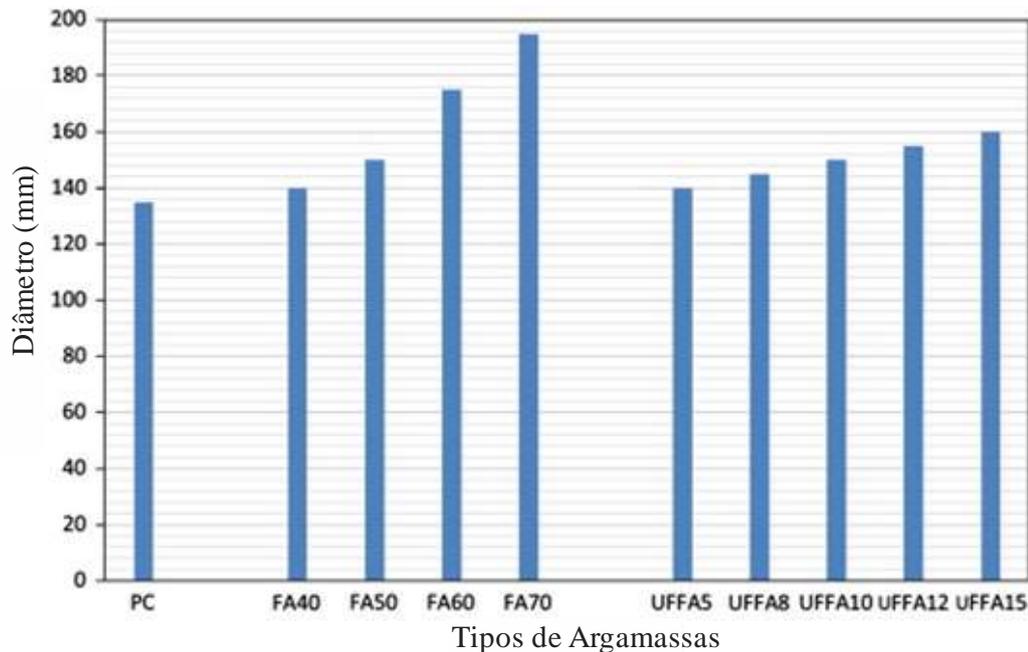
Fonte: Adaptado de (MARGON, 2002)

Supit *et al* (2014) utilizaram dois tipos diferentes de CCCM sendo uma grossa (FA), com 40% dos grãos de diâmetro na ordem de 10 μ m, e uma fina (UFFA), com diâmetro médio de 3,4 μ m, em substituição do cimento para a confecção de argamassas nas proporções de 40%, 50%, 60% e 70% para a cinza grossa, e 5%, 8%, 10%, 12% e 15% para a cinza fina.

Inicialmente, foi avaliada a trabalhabilidade dessas argamassas segundo a norma C1437 (ASTM, 2012) a qual foi avaliado o diâmetro de escoamento. A Figura 12 mostra o resultado desse ensaio evidenciando que a utilização das cinzas, seja a grossa (FA) ou a fina

(UFFA) melhoraram a trabalhabilidade em comparação ao traço de referência (PC) (SUPIT; SHAIKH; SARKER, 2014).

Figura 12 - Trabalhabilidade das diferentes misturas

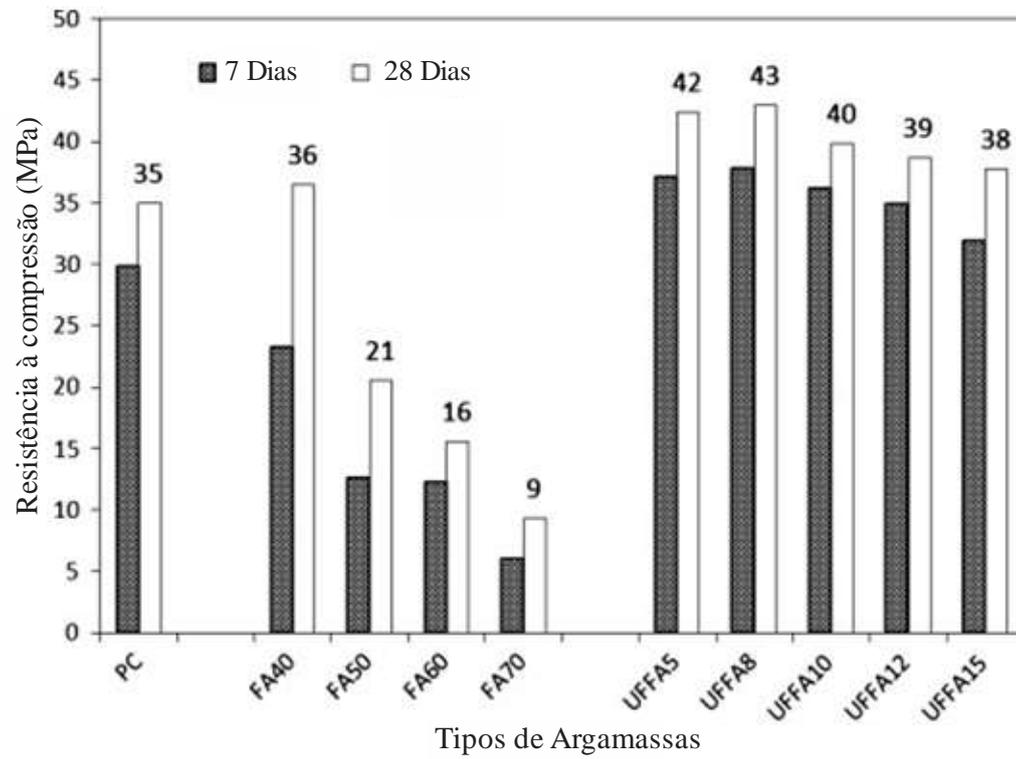


Fonte: (SUPIT; SHAIKH; SARKER, 2014)

Em seguida foi analisada a resistência à compressão das argamassas. A Figura 13 mostra que aos 28 dias, todos os traços com a UFFA aumentaram a resistência em relação ao traço de referência, em particular o traço com 8% que obteve aumento de 23%. Para os traços com a FA, apenas o traço com 40% que obteve resistência 3% maior que o de referência, os demais obtiveram resistências menores (SUPIT; SHAIKH; SARKER, 2014).

Assim, ficou evidenciado que apesar de ambas as cinzas possuírem caracterização química similar, a granulometria das mesmas e o teor de substituição influenciaram diretamente no resultado do ensaio de resistência à compressão (SUPIT; SHAIKH; SARKER, 2014).

Figura 13 - Resistência à compressão das diferentes misturas



Fonte: (SUPIT; SHAIKH; SARKER, 2014)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O cimento utilizado foi o CP-V-ARI, do fabricante Mizu, pois como o objetivo do trabalho é avaliar a utilização das cinzas de carvão mineral, foi escolhido um cimento com o mínimo de adições minerais vendido comercialmente. As características do mesmo, segundo o fabricante, estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características do cimento CP V utilizado

Características	CP-V-ARI
Massa Específica	3140 kg/m ³
Área Específica	4,06 cm ² /g

Fonte: (Mizu, 2016)

A cal utilizada no experimento foi a cal hidratada CH I fabricada pela empresa Carbomil S/A. A sua massa específica, segundo o fabricante, é de 2700 kg/m³ (CARBOMIL SA, 2015).

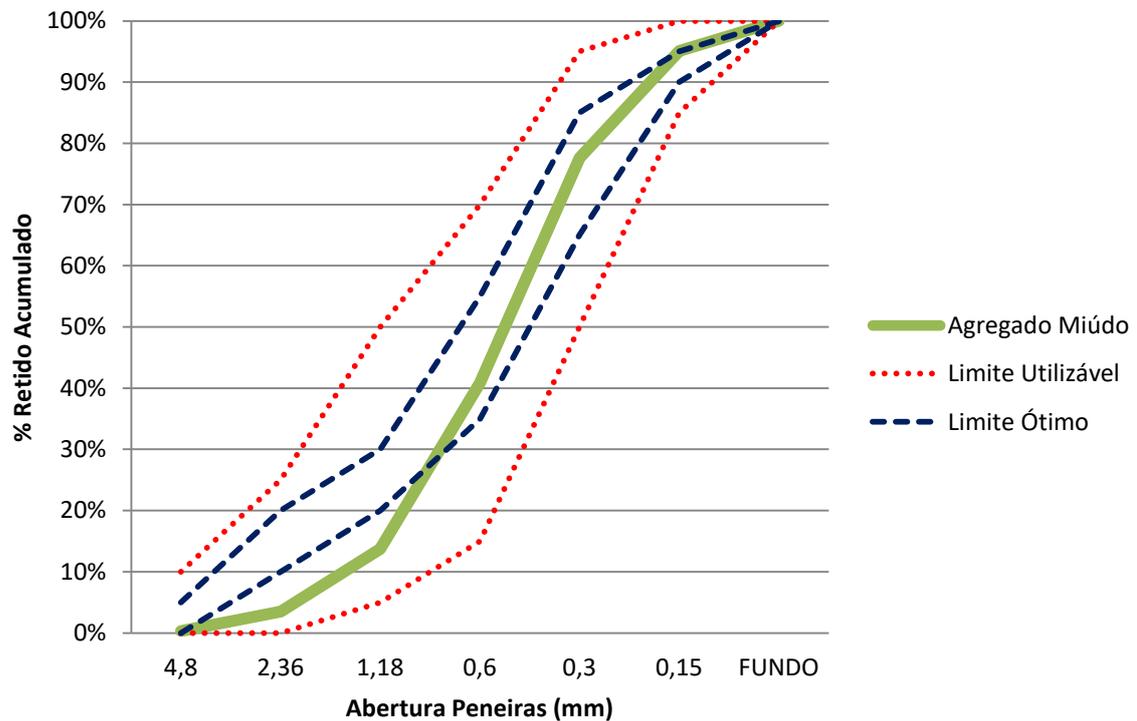
O agregado miúdo utilizado foi uma areia fina proveniente de um depósito de materiais de construção da cidade de Fortaleza/CE. Os ensaios realizados para a caracterização do mesmo foram os seguintes: determinação da composição granulométrica segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), determinação da massa específica segundo a NM 52 (ABNT, 2003), determinação da massa unitária segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2003) e absorção de água segundo a NBR NM 30 (ABNT, 2003). Os resultados obtidos na caracterização estão apresentados na Tabela 4. A curva granulométrica do agregado miúdo está mostrada na Figura 14.

Tabela 4 - Caracterização do agregado miúdo

Ensaio	Agregado miúdo	Norma
DMC (mm)	2,36	NM 248 (2003)
MF	2,31	NM 248 (2003)
Massa Específica (kg/dm ³)	2680	NM 52 (2003)
Massa Unitária (kg/dm ³)	1500	NM 45 (2003)
Absorção de Água (%)	1,0	NM 30 (2003)

Fonte: (Autor, 2016)

Figura 14 - Granulometria do agregado miúdo



Fonte: (Autor, 2016)

A NBR NM 248 (ABNT, 2003) estabelece os limites superiores e inferiores utilizáveis e ótimos para a curva granulométrica de um agregado miúdo. Desse modo, a curva granulométrica deve estar inteiramente dentro da faixa utilizável, em vermelho pontilhado na Figura 14, e que de preferência esteja em grande parte dentro da faixa ótima, em azul tracejado na Figura 14. Isso se faz necessário para que o agregado possua grãos de todos os diâmetros nas proporções adequadas de modo a conseguir um maior empacotamento dos grãos, obtendo um menor número de vazios do que um agregado com curva granulométrica fora da faixa utilizável.

A cinza de combustão do carvão mineral é proveniente do Complexo Termelétrico do Pecém composto por duas usinas termelétricas, a Pecém I, com capacidade de 720 MW e a Pecém II com capacidade de 365 MW. O complexo está localizado no município de São Gonçalo do Amarante (CE). A usina gera energia a partir da queima do carvão mineral, e os seus resíduos gerados, da ordem de 900 toneladas por dia, são depositados em uma área específica conforme mostrado na Figura 15, do lado direito o depósito das cinzas de fundo e no lado esquerdo o depósito das cinzas de combustão do carvão mineral (CCCM), onde a mais escura é proveniente da usina Pecém II e a mais clara da usina Pecém I.

Figura 15 - Área de depósito das cinzas



Fonte: (GOOGLE MAPS, 2015)

A Figura 16 apresenta o local de onde foi coletada a amostra da CCCM para a elaboração do estudo. A coleta foi feita de forma manual e as amostras foram colocadas em sacos de rafia, conforme Figura 17.

Figura 16 - Pátio de depósito das CCCM



Fonte: (Autor, 2016)

Figura 17 - Coleta das cinzas

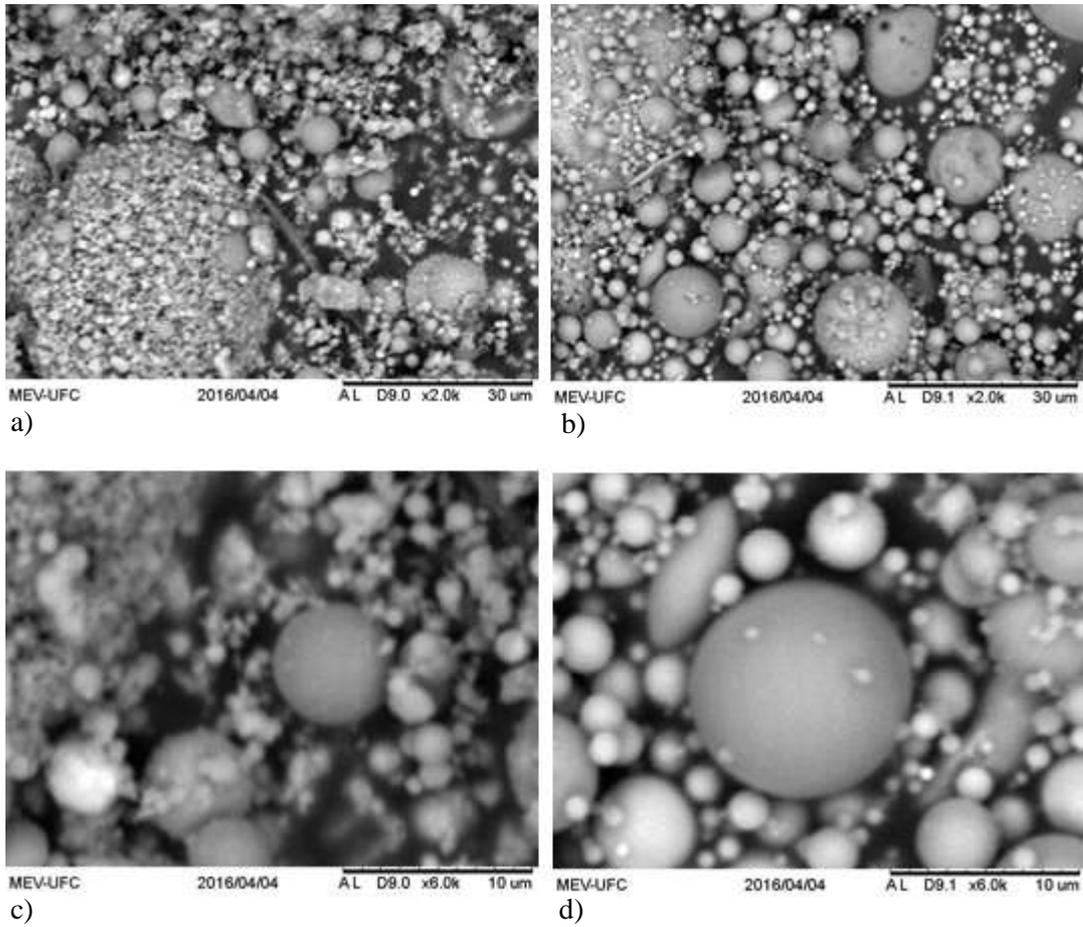


Fonte: (Autor, 2016)

Após a coleta da amostra, as CCCM foram caracterizadas. Foi realizada a caracterização física da morfologia pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), no laboratório de central analítica da Universidade Federal do Ceará (UFC), conforme mostrado na Figura 18. A MEV mostra que ambas as cinzas são compostas por diferentes tamanhos de grãos, e que ambas possuem formas circulares. Nota-se também, na ampliação de 2000 vezes, que existe a formação de grãos maiores a partir da aglomeração de grãos menores. Por fim, a ampliação de 6000 vezes evidencia que os grãos da cinza de Pecém I possuem diâmetros maiores que as da cinza de Pecém II.

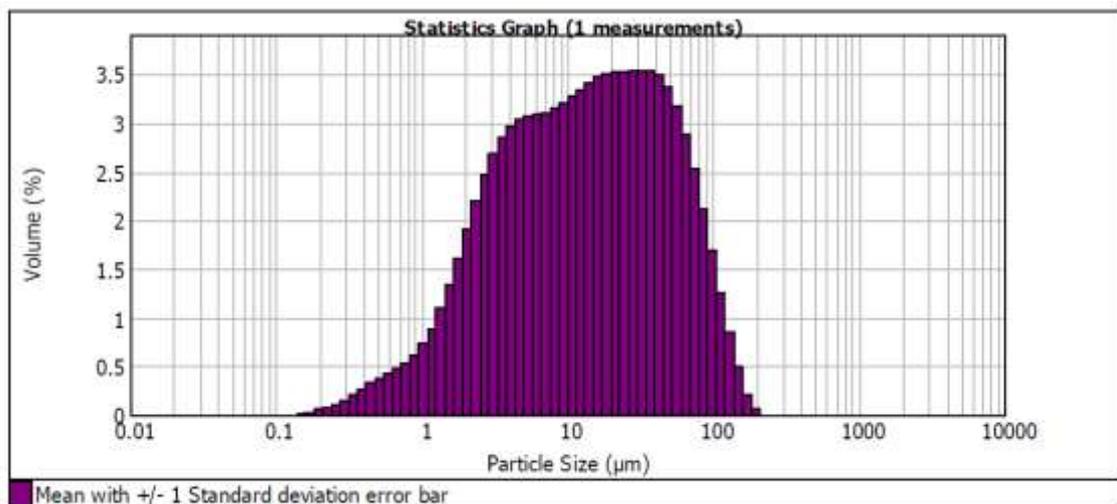
Foi realizada a granulometria a laser nas duas cinzas na Companhia Industrial de Cimentos Apodi, com o objetivo de verificar a distribuição dos grãos das mesmas e também de verificar qual a cinza mais fina. A Figura 19 apresenta o resultado da granulometria a laser da cinza de Pecém I e a Figura 20 a da cinza de Pecém II.

Figura 18 - MEV da CCCM a) 2000x Pecém II; b) 2000x Pecém I; c) 6000x Pecém II;
d) 6000x Pecém I



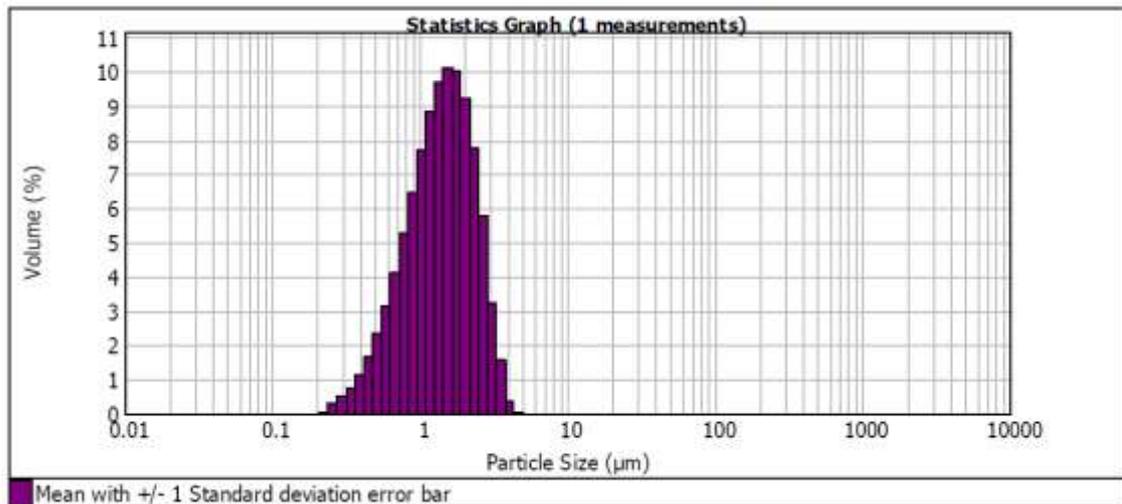
Fonte: (Autor, 2016)

Figura 19 - Granulometria a laser - cinza Pecém I



Fonte: (Autor, 2016)

Figura 20 - Granulometria a laser - cinza Pecém II



Fonte: (Autor, 2016)

A Tabela 5 apresenta o tamanho das partículas das cinzas, evidenciando que a cinza de Pecém II possui um diâmetro máximo de 5,012 μm e metade dos seus grãos possuem diâmetro igual ou inferior a 1,445 μm . Já a cinza de Pecém I possui um diâmetro máximo de 209 μm e metade dos seus grãos possuem diâmetro igual ou inferior a 13,19 μm . Desse modo, pode-se inferir que a cinza de Pecém II é mais fina que a de Pecém I, sendo a mesma ideal para a substituição de aglomerante, pois segundo Erdoğan e Türkera (1998), quanto mais fina a cinza, maiores as chances da mesma possuir atividades pozolânicas e maiores serão suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

Tabela 5 - Dados granulométricos das cinzas

Cinza	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	D _{max} (μm)
Pecém I	1,91	13,19	69	209
Pecém II	0,631	1,445	2,52	5,012

Fonte: (Autor, 2016)

A massa específica foi determinada de acordo com os procedimentos da NBR NM 23 (ABNT, 2001). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da UFC e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultado do ensaio de massa específica das CCCM

Cinza	Massa Específica (kg/m ³)
Pecém I	2330
Pecém II	2360

Fonte: (Autor, 2016)

Para a caracterização química das cinzas foi realizada a fluorescência de raios x (FRX), no laboratório de raios x da UFC, com o objetivo de identificar os óxidos componentes de cada amostra. O resultado está apresentado na Tabela 7. A quantidade de óxidos foi analisada de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015) para a verificação de atividade pozolânica. Após essa análise foi verificada que a cinza referente à usina de Pécem I não se enquadra nos requisitos da norma, como nos critérios de que a somatória dos óxidos de silício, alumínio e ferro devem ser maiores ou iguais a 70%, onde a cinza de Pecém I possui 52% nesse quesito enquanto a de Pecém II possui 84%. Outro requisito é que a concentração de óxido de enxofre seja inferior a 5%, atendido pela cinza de Pecém II, mas não atendida pela cinza de Pecém I.

Tabela 7 - Fluorescência de raios x (FRX) das cinzas

Óxidos	CCCM PEC I (%)	CCCM PEC II (%)
CaO	31,06	6,76
SiO ₂	29,97	50,44
Fe ₂ O ₃	11,06	14,97
Al ₂ O ₃	10,97	18,62
SO ₃	10,78	1,64
K ₂ O	1,32	2,27
TiO ₂	1,11	1,41
MgO	1,00	1,24
Na ₂ O	0,75	1,37
In ₂ O ₃	0,61	0,00
Sb ₂ O ₃	0,46	0,04
BaO	0,34	0,43
SrO	0,18	0,22
Ag ₂ O	0,08	0,12
MnO	0,05	0,05
V ₂ O ₅	0,05	0,07
ZrO ₂	0,04	0,05

Tabela 8 - Fluorescência de raios x (FRX) das cinzas - continuação

Óxidos	CCCM PEC I (%)	CCCM PEC II (%)
Eu2O3	0,03	0,04
ZnO	0,03	0,04
CuO	0,02	0,02
SeO2	0,02	0,02
As2O3	0,02	0,03
Rb2O	0,01	0,02
Cr2O3	0,01	0,02
MoO3	0,01	0,02
NiO	<0,01	0,02
Yb2O3	<0,01	0,00
Y2O3	<0,01	0,01
Ga2O3	<0,01	<0,01
GeO2	<0,01	<0,01
PbO	<0,01	<0,01
P2O5	0,00	0,01
RuO2	0,00	0,00
IrO2	0,00	0,00

Fonte: (Autor, 2016)

O ensaio de atividade pozolânica foi realizado de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014) com cimento e a NBR 5751 (ABNT, 2015) com cal. Evidenciou-se que ambas as cinzas cumpriram os requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2015) como mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Ensaio de índice de atividade pozolânica

Argamassa	IAP Cimento (MPa)	IAP Cal (MPa)
Referência	26,76 – 100%	-
Arg - Pecém I	26,90 – 101%	6,6
Arg - Pecém II	28,31 – 106%	7,6

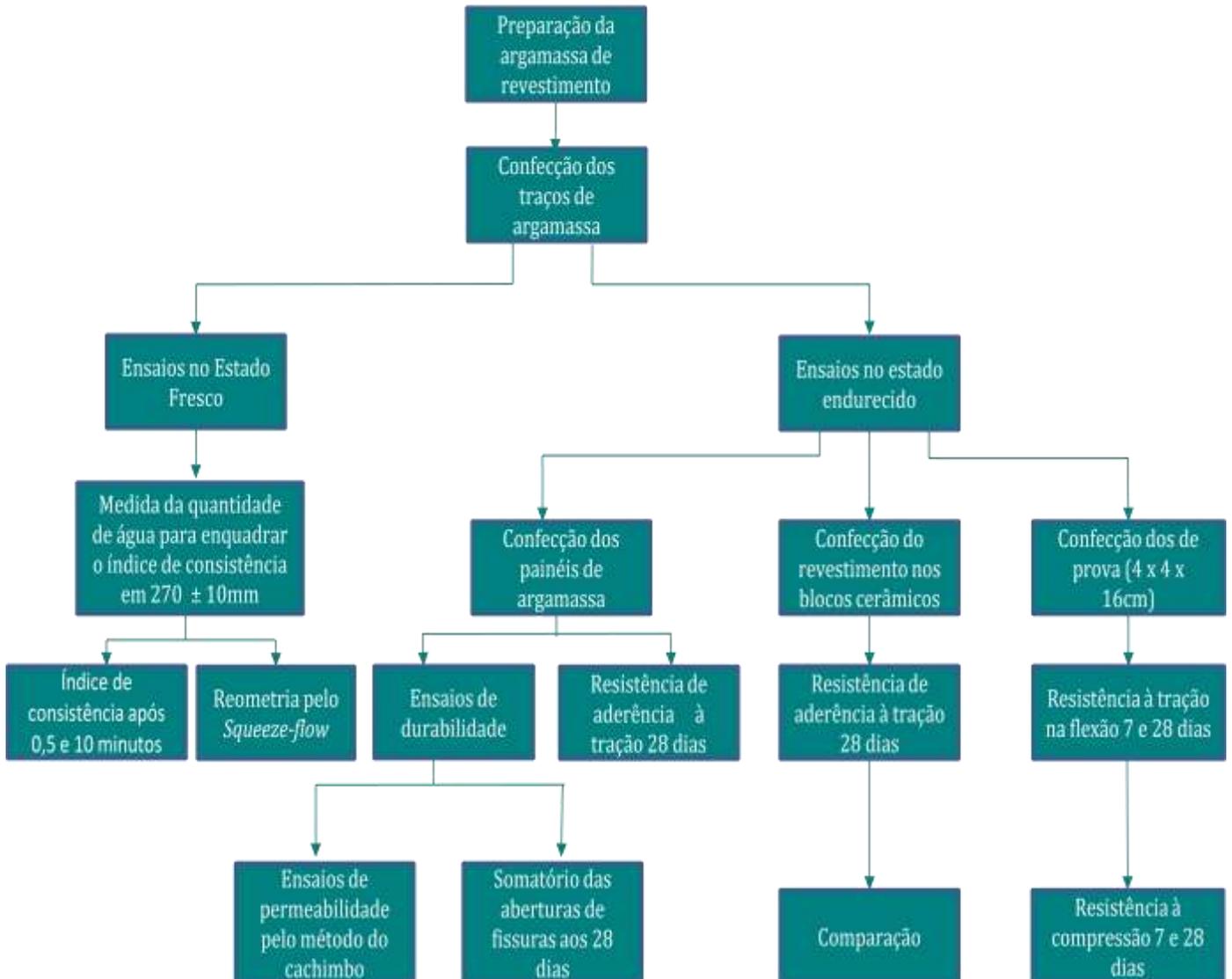
Fonte: (Autor, 2016)

Desse modo, buscou-se substituir a reação de carbonatação proveniente da cal pela reação pozolânica proveniente da cinza de Pecém II, sendo que a mesma se comporta como aglomerante, de maneira semelhante à cal. Caso fosse utilizado a cinza de Pecém I, a mesma acarretaria em um efeito de fíler e não de aglomerante. Assim, para a substituição de cal por cinza volante, foi escolhida a cinza de Pecém II.

3.2 Método de pesquisa

A Figura 21 mostra em resumo o fluxograma do método de pesquisa apresentado.

Figura 21 - Fluxograma do método de pesquisa



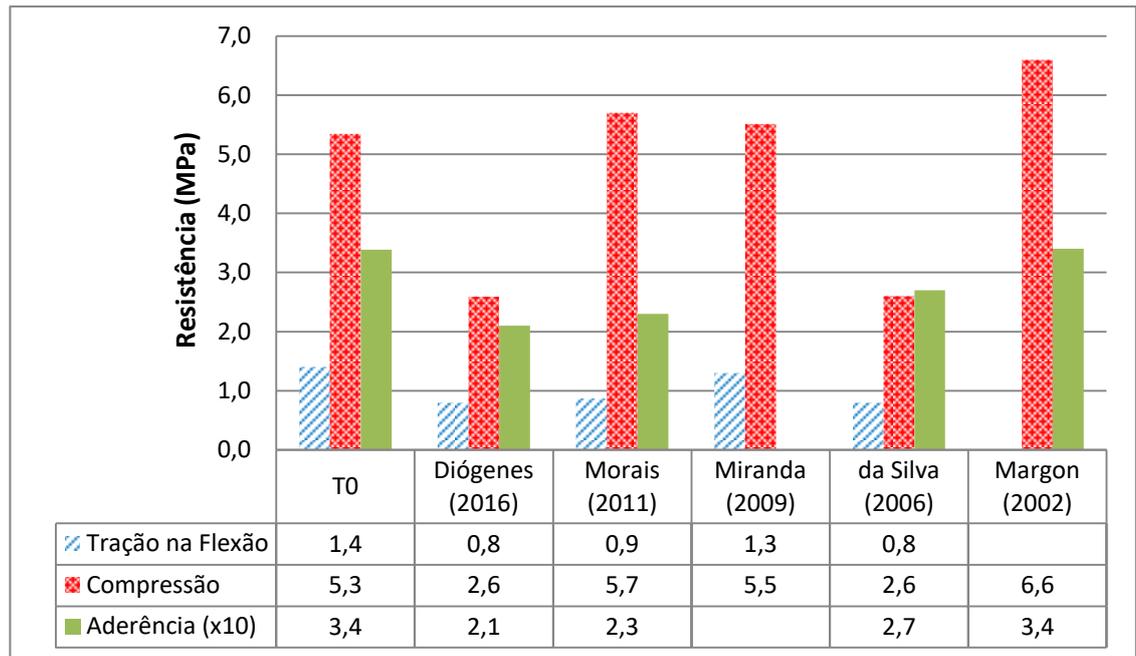
Fonte: (Autor, 2016)

3.2.1 Preparo da argamassa de revestimento

Foi produzida uma argamassa de revestimento de referência, de traço de 1:1:6 (cimento: cal: agregado miúdo) em volume. Tal traço foi escolhido por ser o traço utilizado para argamassa de revestimento de paredes em sete obras de cinco diferentes construtoras da cidade de Fortaleza.

Com a finalidade de se verificar os valores das propriedades no estado endurecido do traço de referência, fez-se a moldagem de corpos de prova e os ensaios de tração na flexão, compressão e aderência à tração. Para essa comparação foram escolhidos os trabalhos de Diógenes (2016), Morais (2011), Miranda (2009), da Silva (2006) e Margon (2002), onde os resultados estão apresentados no gráfico da Figura 22.

Figura 22 - Comparação do traço de referência



Fonte: (Autor, 2016).

Conforme gráfico da Figura 22, os resultados da argamassa de referência utilizada neste trabalho estão coerentes com as dos demais trabalhos, justificando o seu uso. Em seguida foram produzidas as argamassas com a cinza do carvão mineral de Pecém II em substituição à cal nos teores de substituição de 25%, 50%, 75% e 100% em volume.

Tabela 10 - Consumo de materiais por m³ de argamassa

TRAÇO	TEORES DE AGLOMERANTE (VOLUME)			CONSUMO DE MATERIAL POR M ³ DE ARGAMASSA (kg)				
	% Cimento	% Cal	% Cinza	Cimento	Cal	Cinza	Areia	Água
T0	50	50	0	257,47	222,81	-	1.327,21	339,81
T25	50	37,5	12,5	259,35	168,33	49,04	1.336,88	335,00
T50	50	25	25	261,25	113,04	98,81	1.346,69	330,12
T75	50	12,5	37,5	261,25	56,52	148,21	1.346,69	330,12
T100	50	0	50	271,20	-	205,14	1.397,96	304,62

Fonte: (Autor, 2016)

Devido à diferença entre as massas específicas da CCCM e da cal, a substituição de uma pela outra foi feita em volume, onde a massa da cinza a ser adicionada no traço foi corrigida de acordo com a Equação (1) abaixo, com o objetivo de manter o mesmo volume de material aglomerante.

$$m_{cinza} = m_{cal} \frac{\gamma_{cinza}}{\gamma_{cal}} \quad (1)$$

Onde m é a massa do material e γ a massa específica.

A produção da argamassa foi feita seguindo os procedimentos prescritos na NBR 13276 (ABNT, 2016), onde foi misturado inicialmente a cal hidratada com água e os agregados miúdos. Após a mistura, a argamassa com cal ficou em maturação por 24 horas em um recipiente fechado, onde foram medidos o seu peso inicial e ao final de 24 horas. A diferença entre os pesos foi resultante da perda de água por evaporação. Desse modo, essa massa de água foi novamente acrescida junto com o cimento e a cinza volante, sendo misturada por mais quatro minutos.

Para o traço com 100% de CCCM, onde não há presença de cal, foi adicionado inicialmente água e em seguida o cimento, a cinza volante e os agregados miúdos, sendo misturados por 90 segundos. Em seguida, a argamassa ficou em repouso por um período de 15 minutos e ao término desse período foi homogeneizada manualmente por mais 20 segundos, conforme explicado na NBR 13276 (ABNT, 2016).

Após a mistura final da argamassa, foi utilizada uma parte da mesma para a realização dos ensaios em estado fresco, para enquadrar no índice de consistência pré-estabelecido. Finalmente, o procedimento acima foi refeito, só que em uma maior quantidade para a confecção dos painéis de argamassa aplicados sobre uma alvenaria como revestimento, e sobre blocos cerâmicos individuais.

3.2.2 Ensaios no estado fresco

O índice de consistência das argamassas produzidas foi mantido constante no intervalo de 260mm à 280mm, pois o mesmo foi utilizado por outros autores para fins de comparação (MORAIS, 2011). Determinou-se a quantidade de água para chegar ao índice estabelecido através do ensaio de consistência, de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016), bem como a perda de consistência após 5 e 10 minutos de mistura, com o objetivo de verificar a influência da CCCM sobre tal característica. Por fim, foi avaliada a reologia pelo método do

Squeeze-flow. A Figura 23 mostra como foi realizado o ensaio de consistência e os equipamentos utilizados.

Figura 23 - Ensaio de índice de consistência da argamassa produzida



Fonte: (Autor, 2016)

É importante ressaltar que, com a fixação do índice de consistência, foi variada a quantidade de água em cada traço para obter o índice de consistência dentro do intervalo pré-estabelecido, a fim de comparar os traços entre si.

Para o ensaio de reologia pelo método do *Squeeze-flow*, foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 10 mm, com auxílio de um anel de PVC como forma, para cada traço, conforme a Figura 24.

Após 1 hora, foi aplicada uma pressão de 0,02 MPa sobre os corpos de prova distribuída igualmente pela sua área e foi verificada a deformação do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 25. O tempo foi escolhido segundo recomendação de Cardoso, *et al.* (2010) para que a mistura possa ter um aumento de sua viscosidade de modo a manter sua coesão. Já a carga foi escolhida de modo que a deformação final seja inferior a 9 mm para todas as amostras (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010).

Assim, foram medidos os espalhamentos de cada corpo de prova, utilizando a média de três medidas, sendo possível verificar que quanto maior o espalhamento, menor a

viscosidade da argamassa, de modo que a mesma será por consequência mais fluida e trabalhável.

Figura 24 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de *Squeeze-flow* (vista superior)



Fonte: (Autor, 2016)

Figura 25 - Corpo de prova após o ensaio (vista superior)



Fonte: (Autor, 2016)

Para a realização dos ensaios no estado endurecido foram definidos os traços com base nos resultados dos ensaios de estado fresco. Assim, a partir das quantidades em massa apresentadas na Tabela 10, foram confeccionados os traços com o volume suficiente para conseguir realizar todos os ensaios propostos.

Para a confecção dos traços com cal, não foi feita a sua maturação e sim corrigida a água com o percentual perdido nos ensaios de consistência, apresentado na Tabela 11. Tal prática foi adotada de modo a representar melhor a realidade da construção civil, onde é misturado a cal, cimento, areia e água e não é deixado maturar. A qual foi verificada em sete obras de cinco diferentes construtoras da cidade de Fortaleza.

Tabela 11 - Percentual de perda de água

TRAÇO	% Perda água
T0	10
T25	20
T50	20
T75	13
T100	-

Fonte: (Autor, 2016).

A importância da correção da água perdida dá-se pelo fato de evitar que esse percentual de água, absorvido pela cal, comprometa a água disponível para as reações de hidratação do cimento e da reação pozolânica da cinza. Além disso, segundo estudo realizado por (ARAÚJO; OLIVEIRA; CARASEK, 2011), a maturação da cal não influencia na trabalhabilidade da argamassa, sendo, portanto, desnecessária.

3.2.3 Ensaios estado no endurecido

Para cada traço foram moldados seis corpos de prova prismáticos (4cm x 4cm x 16cm), sendo três para cada idade de ensaio (7 e 28 dias). Os corpos de prova ficaram em processo de cura ao ar dentro dos moldes por 24 horas, conforme mostrado na Figura 26. Em seguida foram armazenados à temperatura ambiente e identificados até atingir a idade para a realização dos ensaios, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 26 - Moldagem dos corpos de prova prismáticos



Fonte: (Autor, 2016)

Figura 27 - Corpos de prova prismáticos



Fonte: (Autor, 2016)

Esses corpos de prova foram ensaiados à resistência à tração na flexão, rompendo o corpo de prova no meio e em seguida, cada metade do corpo de prova foi ensaiada à compressão, seguindo os procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005).

Em paralelo, foram executados cinco painéis de argamassa, sendo um referente a cada traço, em uma alvenaria de tijolos cerâmicos. Os painéis foram confeccionados do lado da alvenaria onde havia a maior incidência dos raios solares, de modo a submeter os painéis a pior situação possível. A Figura 28 mostra os painéis confeccionados com os traços T0, T25, T50, T75 e T100.

Figura 28 - Confeção dos painéis de argamassa sobre a alvenaria



Fonte: (Autor, 2016)

Com o passar do tempo, os painéis apresentaram fissuras superficiais, conforme indicado na Figura 29. Assim, para analisar esse comportamento, após o período de 28 dias, foi realizado o ensaio de somatório do comprimento de abertura de fissuras visíveis em cada placa de argamassa produzida. O ensaio consiste na utilização de um fio de nylon para mapear as fissuras visíveis superficiais, de modo em que cada painel foi obtido um comprimento total correspondente ao alinhamento de todas as fissuras do mesmo, onde o mesmo foi dividido pela área do painel para encontrar a sua taxa de fissuras (m/m^2). Também foi analisada, com a ajuda de um fissurômetro, a abertura da maior fissura encontrada no painel. Tal ensaio contribui para avaliar a durabilidade do revestimento.

Figura 29 - Fissuras no painel de argamassa



Fonte: (Autor, 2016)

Outro ensaio para avaliar a durabilidade do revestimento foi o ensaio de permeabilidade utilizando o método do cachimbo. Esse ensaio, apesar de não ser normalizado no Brasil, é importante para verificar a permeabilidade do revestimento à água. O procedimento do ensaio é proposto pelo *Centre Scientifique et Technique de la Construction* (CSTC, 1982) e pela *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et lés Construction* (RILEM, 1982). Os ensaios foram realizados na idade de 28 dias e o mesmo consiste na colocação de dois cachimbos fixados nos painéis com silicone e massa de calafetar, conforme mostrado na Figura 30. Cada cachimbo foi cheio com 5 ml de água e foram tiradas as leituras a cada minuto por um período de 15 minutos e calculada a taxa de absorção de água (ml/min) de cada painel. Para esse ensaio é necessário ter cuidado no local de fixação do cachimbo, pois o mesmo pode ficar em uma fissura, visível ou não, aumentando assim a sua absorção. Desse modo, foi calculada a média entre os dois valores de absorção de cada painel. Assim, quanto menor a taxa média de absorção, melhor a qualidade do revestimento.

Após a execução dos ensaios de durabilidade, os painéis de argamassa de revestimento, executados sobre a alvenaria, foram ensaiados aos 28 dias quanto à resistência de aderência à tração, segundo a NBR 15258 (ABNT, 2010). Inicialmente, foram feitos os furos com uma furadeira acoplada de um serra-copo perpendicular ao painel, de acordo com

a Figura 31. O furo foi feito de modo que penetrasse inteiramente na camada de revestimento até chegar ao substrato. O substrato era alcançado quando a poeira gerada pelo furo ficava vermelha.

Figura 30 - Ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo



Fonte: (Autor, 2016)

Figura 31 - Execução dos furos nos painéis



Fonte: (Autor, 2016)

Foram executados doze furos em cada painel, tomando cuidado de não ensaiar pontos sobre fissuras ou muito próximos um dos outros e dos limites do painel. Após a execução dos furos, foram coladas as pastilhas de 50 mm de diâmetro com a utilização de massa plástica, de acordo com a Figura 32. As mesmas ficaram secando por 24 horas antes da execução do ensaio por recomendação do fabricante.

Figura 32 - Pastilhas coladas no revestimento



Fonte: (Autor, 2016)

Após a execução do ensaio foram avaliados três aspectos. O primeiro foi a força, em kN, necessária para arrancar a pastilha, o segundo foi o comprimento do corpo de prova arrancado e por último o local do rompimento do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 33. Com relação ao local do rompimento, foram encontradas quatro situações distintas. A primeira foi o rompimento entre o chapisco e o substrato, a segunda no chapisco, a terceira no revestimento e a última na interface da revestimento/cola. Também ocorreram situações intermediárias, as quais foram atribuídas percentuais referentes à área aproximada de cada rompimento.

Para efeito de comparação, o mesmo procedimento foi repetido em seis blocos cerâmicos que foram individualmente revestidos para cada traço para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração, conforme apresentado na Figura 34. Esse procedimento elimina a possibilidade de que um corpo de prova fique localizado na junta dos blocos

cerâmicos. O objetivo desse ensaio é comparar com o procedimento anterior, avaliando a consistência dos resultados, de modo a verificar qual obteve resultados com uma menor variabilidade.

Figura 33 - Corpos de provas ensaiados à aderência à tração



Fonte: (Autor, 2016)

Figura 34 - Ensaio de resistência de aderência à tração em blocos cerâmicos



Fonte: (Autor, 2016)

3.3 Análise estatística

Para analisar a significância dos resultados obtidos, foi feita a análise estatística através da análise de variância (ANOVA), com um grau de confiança de 95%, para verificar se os parâmetros analisados influenciaram significativamente nos resultados obtidos. A ANOVA utiliza-se do Teste F, que é a probabilidade bi-caudal de que as variâncias das amostras analisadas possuam diferenças significativas. Se o valor do $F_{\text{crítico}}$ encontrado for menor que o valor do F_{tabelado} , significa que a variável analisada influencia significativamente no seu resultado, para o grau de confiança estabelecido. Quanto maior for a diferença entre o F_{tabelado} e o $F_{\text{crítico}}$, maior a influência da variável no resultado.

Após a ANOVA, foi feito o teste de Duncan para verificar se as diferenças entre os parâmetros analisados são significantes. Esse teste é baseado no teste de amplitudes múltiplas, onde é comparada a amplitude de cada conjunto com uma amplitude mínima significativa calculada, onde se a mesma for excedida, o conjunto é considerado significativamente diferente.

4. RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios laboratoriais descritos no capítulo anterior, para as argamassas de revestimento nos estados fresco e endurecido, bem como a análise estatística desses resultados.

4.1 Resultados dos ensaios no estado fresco

4.1.1 Perda do índice de consistência e quantidade de água

Os resultados dos índices de consistência e de quantidade de água estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Índice de consistência das argamassas produzidas

TRAÇO	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA 260 a 280mm					Qtd Água / m ³ de argamassa (m ³)	Redução de água (%)	
	INICIAL	5 min		10 min				a/agl
	Média	Média	%	Média	%			
T0	274	272	0,7 %	260	5,1 %	1,49	339,8	-
T25	262	251	4,2 %	249	5,0 %	1,47	335,0	1,4
T50	264	260	1,5 %	260	1,5 %	1,45	330,1	2,9
T75	275	275	0,0 %	270	1,8 %	1,45	330,1	2,9
T100	277	275	0,7 %	275	0,7%	1,33	304,6	10,4

Fonte: (Autor, 2016).

Inicialmente foi verificado que todas as argamassas atingiram o intervalo de espalhamento pré-estabelecido de 270 ± 10 mm. A repetição do ensaio com o tempo indicou a perda de consistência da argamassa, conforme apresentado na Tabela 12. Observa-se também que o traço T25 foi o único em que o seu índice de consistência saiu do intervalo pré-determinado após cinco minutos de mistura. Além disso, pode-se constatar que à medida que se aumenta o teor de CCCM na mistura, foi necessária uma menor quantidade de água para que a mistura obtivesse a consistência desejada, caracterizando um efeito lubrificante da cinza na mistura.

Conforme dados da Tabela 12 verifica-se que, com a adição da cinza volante, a perda de consistência diminui. Isto é mais evidente ao se observar os dados do índice de consistência após dez minutos. Conforme dados da Tabela 12, foi apresentado que a argamassa de traço T100 praticamente não perdeu sua consistência inicial, reduzindo apenas 0,7% da mesma após dez minutos.

O traço de referência (T0) foi o que teve maior perda de consistência, principalmente após os cinco primeiros minutos. Isto ocorreu de forma brusca, saindo de uma perda inicial de 0,7% em cinco minutos até 5,1% em dez minutos. Já o traço T25, apesar de possuir a maior perda inicial, 4,1%, a perda final ficou em 5,0%.

O traço T50 obteve uma perda de 1,5% após cinco minutos e a mesma se manteve constante após dez minutos. Já o T75 foi o que manteve sua perda inicial constante. Entretanto, ao fim dos dez primeiros minutos, obteve perda de 1,8%. Assim, o aumento da concentração de cinza na mistura diminuiu a perda de consistência da argamassa após dez minutos.

Outro fator importante é a quantidade de água utilizada para a realização do traço. Conforme dados da Tabela 12, o traço T0 foi o que mais utilizou água para a sua confecção. A utilização de água na argamassa contribui diretamente para o aumento do espalhamento para que o mesmo se enquadre no intervalo pré-determinado, entretanto, após os dez minutos o traço T0 ficou no limite inferior do intervalo, o que nos leva a crer que se o tempo de espera fosse superior aos dez minutos o mesmo sairia do intervalo escolhido.

O traço T100 também se destacou por obter as menores perdas de espalhamento, após dez minutos, em relação aos outros traços utilizando a menor quantidade de água que os demais. Isso mostra que à medida que se aumenta o teor cinza presente na mistura, a mesma reduz o consumo de água além de diminuir a redução do índice de consistência após dez minutos. Essa característica da cinza leva a crer que a sua utilização possui uma característica plástica superior a da cal.

Utilizou-se ainda da análise de variância (ANOVA) com duplo fator para determinar a significância do teor de cinzas e a influência do tempo analisado. Tais resultados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - ANOVA fator duplo sem repetição da perda da consistência

ANOVA							
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	Significância
Teor de cinza	2847,333	4	711,8333	61,98839	1,29E-14	2,668437	S
Tempo	477,2	8	59,65	5,194485	0,00033	2,244396	S
Erro	367,4667	32	11,48333				
Total	3692	44					

Fonte: (Autor, 2016).

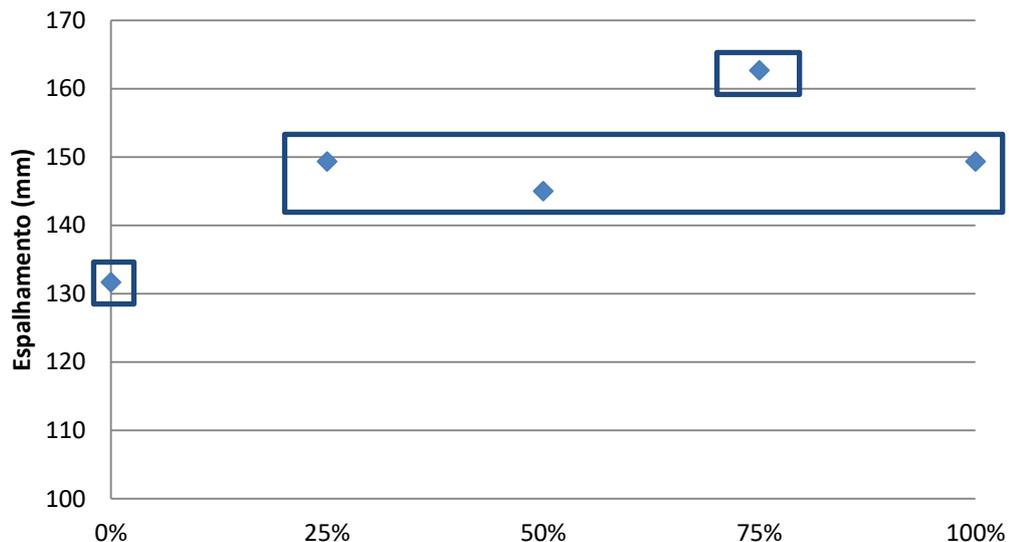
Tal análise mostra que o aumento da utilização da cinza influencia significativamente diminuindo a perda de consistência. O tempo analisado também influencia significativamente

umentando a perda de consistência. Entretanto, o teor de cinzas exerce uma influência maior sobre a perda de consistência do que o tempo.

4.1.2 Reologia pelo método do *Squeeze-flow*

Os valores médios do ensaio de *Squeeze-flow* estão apresentados na Figura 35. Os dados completos estão apresentados no **Apêndice A**.

Figura 35 - Resultado do ensaio de *Squeeze-flow*



Fonte: (Autor, 2016).

Esse resultado mostra que o espalhamento de todos os traços com a adição da cinza foi maior que o espalhamento do traço de referência. Desse modo, de acordo com Cardoso *et al.* (2010), os traços que obtiveram o maior espalhamento serão os mais fluidos e trabalháveis. Assim, a trabalhabilidade de todos os traços aumentou com a adição da cinza, mesmo com a redução de água, conforme mostrado na Tabela 12. Dentre elas, destacou-se o desempenho da argamassa com 75% da cinza de combustão do carvão mineral (CCMM), que obteve o maior espalhamento no ensaio de *Squeeze-flow*, de maneira similar com o ensaio de perda de consistência, a qual nos primeiros 10 minutos, perdeu apenas 1,7% do seu espalhamento original.

Utilizou-se a análise de variância (ANOVA) com único fator para determinar a significância do teor de cinzas. Tais resultados estão apresentados na Tabela 14, demonstrando que a mudança do teor de cinzas influencia significativamente de forma positiva no seu resultado. O teste de Duncan evidenciou que entre os traços de 25%, 50% e

100% não há diferenças significativas, entretanto, há diferença entre esse grupo e o traço de referência, que foi o menor da série, e o traço com 75%, que foi o maior da série.

Tabela 14 - ANOVA *Squeeze-flow*

ANOVA							Significância
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre grupos	1480,933	4	370,2333	8,928457	0,002458	3,47805	S
Dentro dos grupos	414,6667	10	41,46667				
Total	1895,6	14					

Fonte: (Autor, 2016).

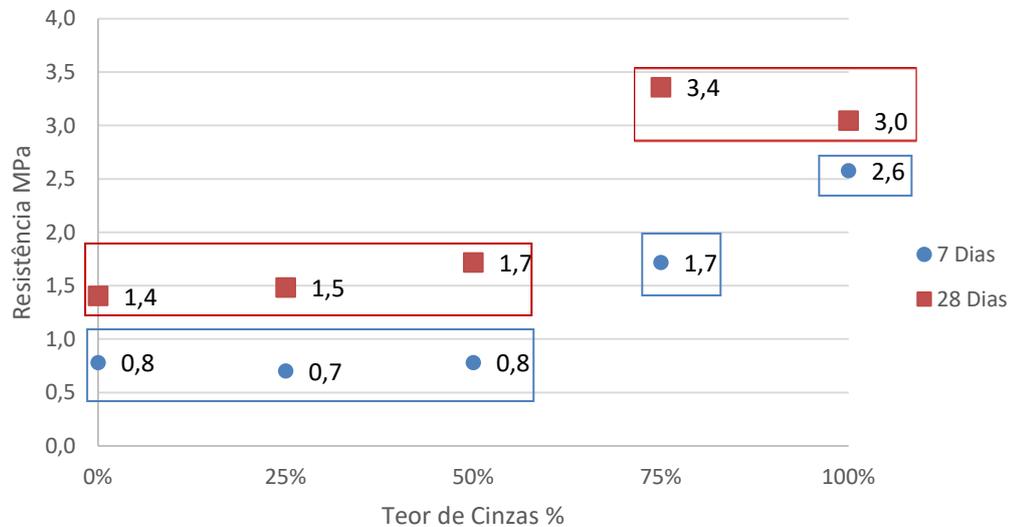
Os resultados dos ensaios no estado fresco demonstraram que com o aumento do teor de cinza na argamassa melhora a sua trabalhabilidade e reduz o consumo de água. Comportamento semelhante foi encontrado nos trabalhos de Supit *et al.* (2014), Margon (2002), Jaturapitakkul e Cheerarot (2003) e Andrade *et al.* (2009), onde o aumento da concentração da cinza melhorou suas propriedades no estado fresco. Esse comportamento pode ser justificado por um efeito lubrificante que a cinza confere à mistura devido ao seu tamanho e formato circular, conforme apresentado na Figura 18, a qual tende a diminuir o atrito da mistura sem a necessitar do aumento de água.

4.2 Resultados no Estado Endurecido

4.2.1 Ensaio de resistência à tração na flexão

Foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão gerando um gráfico, apresentado na Figura 36, com o resultado do ensaio para ambas as idades. Com base nele, pode-se ver que, após os 28 dias, todos os traços com cinzas obtiveram resistências superiores às do traço de referência, sendo que a maior resistência encontrada foi a do traço com 75% de cinza. O traço de referência e os traços com 25% e 50% de cinzas obtiveram resultados similares, tanto na sua resistência inicial aos 7 dias, entretanto, os traços com cinzas obtiveram ganhos maiores de resistência aos 28 dias quando comparado ao traço de referência. O traço com 100% de cinzas, que obteve a maior resistência inicial aos 7 dias, obteve um pequeno aumento de sua resistência aos 28 dias, sendo ultrapassado pelo traço com 75%, o qual obteve um aumento de 100% da sua resistência inicial. Assim, analisando esse quesito, todos os traços obtiveram desempenho satisfatório, quando comparados ao traço de referência, sendo os teores a partir de 75% os que mais se destacaram.

Figura 36 - Resultado do ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: (Autor, 2016).

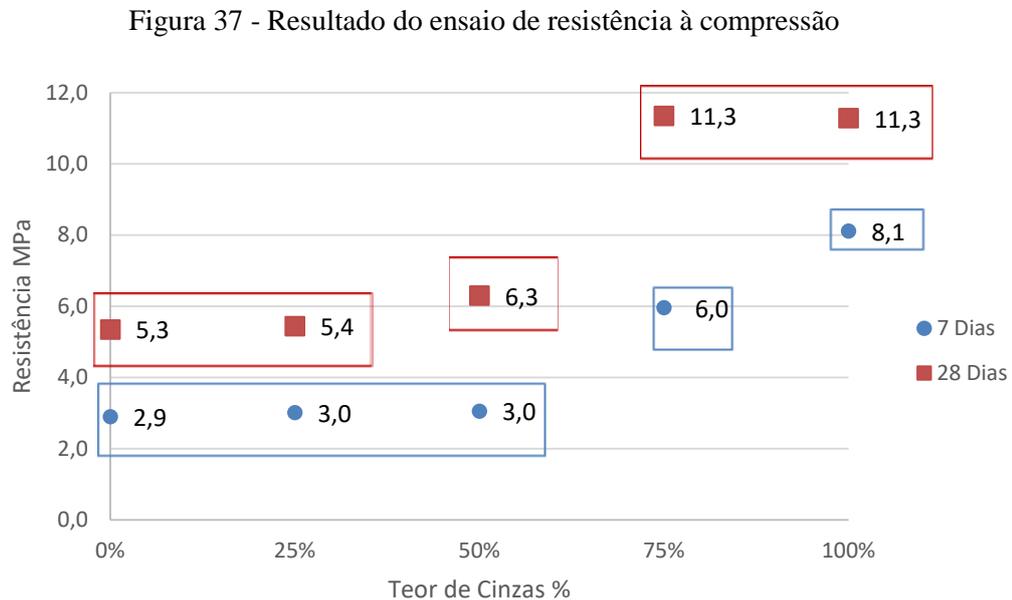
Os dados completos do ensaio estão apresentados no **Apêndice B**, para a idade de 7 dias, e no **Apêndice C**, para a idade de 28 dias. Utilizou-se ainda da análise de variância (ANOVA) para determinar a significância do teor de cinzas e a influência do tempo analisado. Tais resultados estão demonstrados no **Apêndice D**, demonstrando que a mudança do teor de cinzas influencia significativamente no seu resultado para ambas as idades. O teste de Duncan mostrou que só há diferenças significativas a partir do teor de 75%, para sete dias, e aos 28 dias, não há diferenças significativas entre os teores de 75% e 100%.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão demonstraram que o aumento do teor de cinza na argamassa aumenta a sua resistência mecânica. Comportamento semelhante foi encontrado nos trabalhos de Rai *et al.* (2014) e Islam e Islam (2010) onde o aumento da concentração da cinza na mistura aumentou suas resistências mecânicas. Esse comportamento pode ser justificado pela reação pozolânica da cinza superar nesse quesito a reação de carbonatação da cal.

4.2.2 Ensaio de resistência à compressão

Foi realizado o ensaio de resistência à compressão gerando um gráfico, apresentado na Figura 37, com o resultado do ensaio para ambas as idades. Com base nele, pode-se ver que o seu resultado foi compatível com o do ensaio de resistência à tração na flexão, de modo que, da mesma forma do ensaio anterior, o traço que obteve a maior resistência foi o com

75% de cinzas. Assim, as mesmas observações obtidas no ensaio de resistência à tração na flexão se aplicam ao ensaio de resistência à compressão.



Fonte: (Autor, 2016).

Os dados completos do ensaio estão apresentados no **Apêndice B**, para a idade de 7 dias, e no **Apêndice C**, para a idade de 28 dias. Para analisar esse resultado, utilizou-se de análise de variância (ANOVA) para determinar a significância do teor de cinzas e a influência do tempo analisado. Tais resultados estão demonstrados no **Apêndice E**, demonstrando que a mudança do teor de cinzas influencia significativamente no seu resultado para ambas as idades. O teste de Duncan mostrou que só há diferenças significativas a partir do teor de 50% aos 28 dias, sendo que se destacaram os traços com teores acima de 75% onde não há diferenças significativas entre os teores de 75% e 100%.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão demonstraram que o aumento do teor de cinza na argamassa aumenta a sua resistência mecânica, de maneira similar ao ensaio de resistência à tração na flexão. Comportamento semelhante foi encontrado nos trabalhos de Rai, *et al.* (2014), Islam e Islam (2010), Chindaprasirt e Rukzon (2008) e Jaturapitakkul e Cheerarot (2003), onde o aumento da concentração da cinza na mistura aumentou suas resistências mecânicas. Esse comportamento, semelhante ao ensaio de resistência à tração na flexão, pode também ser justificado pela reação pozolânica da cinza superar nesse quesito a reação de carbonatação da cal.

Outro fator relacionado a esse comportamento é a composição química da cinza. A Tabela 15 apresenta um comparativo desse comportamento com diversos autores, indicando que as cinzas com composição química semelhante à de Pecém II obtiveram um aumento da resistência mecânica a medida que se aumenta o teor de cinzas. Já as cinzas com composição química que não se enquadraram na NBR 12653 (ABNT, 2015) obtiveram comportamento contrário, diminuindo a resistência mecânica à medida que se aumentou o teor de cinzas.

Tabela 15 - Comparação da caracterização química com demais trabalhos

Cinzas	Pecém II		Chindaprasirt e Rukzon (2008)		RAI; KUMAR; SATISH (2014)		Supit <i>et al.</i> (2014) Cinza Fina	
Óxidos Mais Presentes (%)	SiO ₂	50,4	SiO ₂	41,1	SiO ₂	42,0	SiO ₂	73,4
	Al ₂ O ₃	18,6	Al ₂ O ₃	21,6	Al ₂ O ₃	33,6	Al ₂ O ₃	17,7
	Fe ₂ O ₃	15,0	CaO	14,4	CaO	12,7	Fe ₂ O ₃	4,4
	CaO	6,76	Fe ₂ O ₃	11,3	Fe ₂ O ₃	4,4	CaO	0,9
Σ (Si, Fe, Al) %	84,0		74,0		80,0		95,5	
Resistência mecânica x Teor de cinzas	Aumentou		Aumentou		Aumentou		Aumentou	
Cinzas	Islam e Islam (2010)		SIQUEIRA; SOUZA; SOUZA (2012)		Lenzi (2001) (cinza leve)		Ferreira <i>et al.</i> (2014)	
Óxidos Mais Presentes (%)	SiO ₂	59,3	SiO ₂	33,8	SiO ₂	57,3	SiO ₂	42,5
	Al ₂ O ₃	23,4	Al ₂ O ₃	13,7	Al ₂ O ₃	29,0	Al ₂ O ₃	16,4
	CaO	8,6	CaO	14,1	Fe ₂ O ₃	4,5	CaO	19,0
	Fe ₂ O ₃	4,8	Fe ₂ O ₃	5,03	CaO	1,3	Fe ₂ O ₃	7,1
Σ (Si, Fe, Al) %	87,5		52,52		90,8		66,0	
Resistência mecânica x Teor de cinzas	Aumentou		Diminuiu		Aumentou		Diminuiu	
Cinzas	Margon (2002) (Jorge Lacerda)		Margon (2002) (Charqueadas)					
Óxidos Mais Presentes (%)	SiO ₂	56,8	SiO ₂	51,7				
	Al ₂ O ₃	26,6	Al ₂ O ₃	22,7				
	Fe ₂ O ₃	6,6	Fe ₂ O ₃	5,6				
	CaO	1,1	CaO	2,8				
Σ (Si, Fe, Al) %	90,0		80,0					
Resistência mecânica x Teor de cinzas	Aumentou		Aumentou					

4.2.3 Ensaio de resistência de aderência à tração

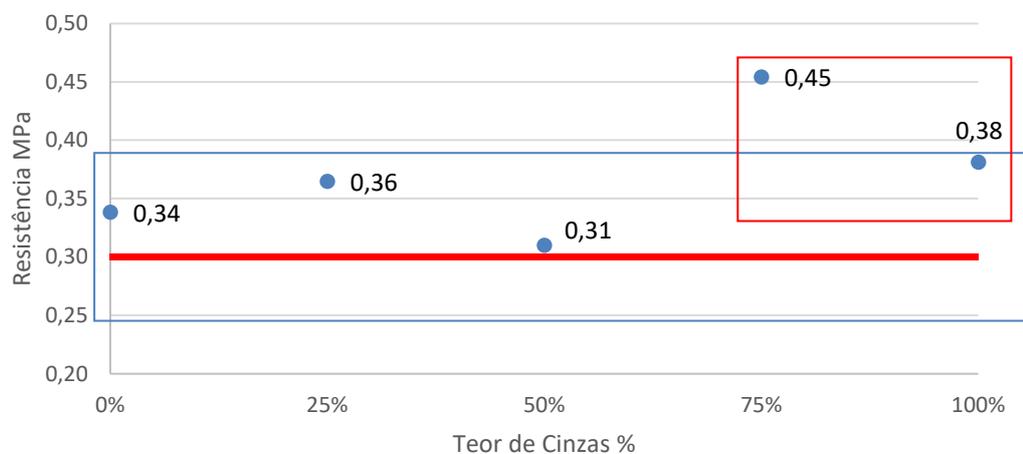
O ensaio de resistência de aderência à tração é o ensaio mais importante para o estado endurecido para este tipo de argamassa, pois a principal finalidade da argamassa de revestimento é aderir-se ao substrato. Para cada traço, foram obtidos 18 corpos de prova, sendo 12 na alvenaria e 6 no bloco cerâmico individual. Com exceção do traço T75, o qual foi elaborado apenas quatro blocos cerâmicos, totalizando 16 corpos de prova.

Para validar o ensaio, os resultados foram analisados pela NBR 13749 (ABNT, 2013), onde foram verificados os oitos maiores resultados de cada grupo para compor a resistência média após tratamento de cada traço.

Segundo a NBR 15258 (ABNT, 2010), a resistência real de aderência à tração no revestimento é quando o rompimento acontece na interface entre o revestimento e o chapisco, quaisquer situações em que o revestimento ocorra em um local diferente, a resistência será maior que o resultado encontrado. A exceção é quando o rompimento ocorre entre a cola e a pastilha, sendo nesse caso o resultado descartado.

Assim, foi gerado um gráfico, apresentado na Figura 38, demonstrando que todos os traços obtiveram resistência superior ao limite (em vermelho) pré-estabelecido pela NBR 13749 (ABNT, 2013), sendo que a maior resistência encontrada foi a do traço com 75% de cinza. De maneira similar aos demais ensaios no estado endurecido, o traço que obteve a maior resistência foi o com 75% de cinza. Os dados completos do ensaio estão apresentados no **Apêndice F**.

Figura 38 - Resultado do ensaio de resistência de aderência à tração



Fonte: (Autor, 2016).

Para analisar esse resultado, utilizou-se de uma sequência de análises de variância (ANOVA), para determinar a significância do teor de cinzas e a influência do local de ensaio. Tais resultados estão demonstrados no **Apêndice G**, onde a mudança do teor de cinzas influenciou significativamente no seu resultado. Entretanto, o local de ensaio para um mesmo traço, seja no painel ou no bloco cerâmico não influenciou significativamente no resultado médio após o tratamento. O teste de Duncan mostrou que apenas o traço com 75% que obteve diferenças significativas com relação ao traço de referência.

O resultado do ensaio de aderência à tração demonstrou que com o aumento do teor de cinza na argamassa a sua resistência de aderência a tração também aumentou. Comportamento semelhante foi encontrado nos trabalhos de Marques (2014), Yu *et al.* (2017), Aguiar *et al.* (2002) e da Costa (2014). Yu *et al.* (2017) justificam esse comportamento pela cinza proporcionar um aumento da coesão entre a pasta e o agregado, devido ao aumento do atrito entre os mesmos com o acréscimo da quantidade de finos na mistura, aderindo-se ao substrato.

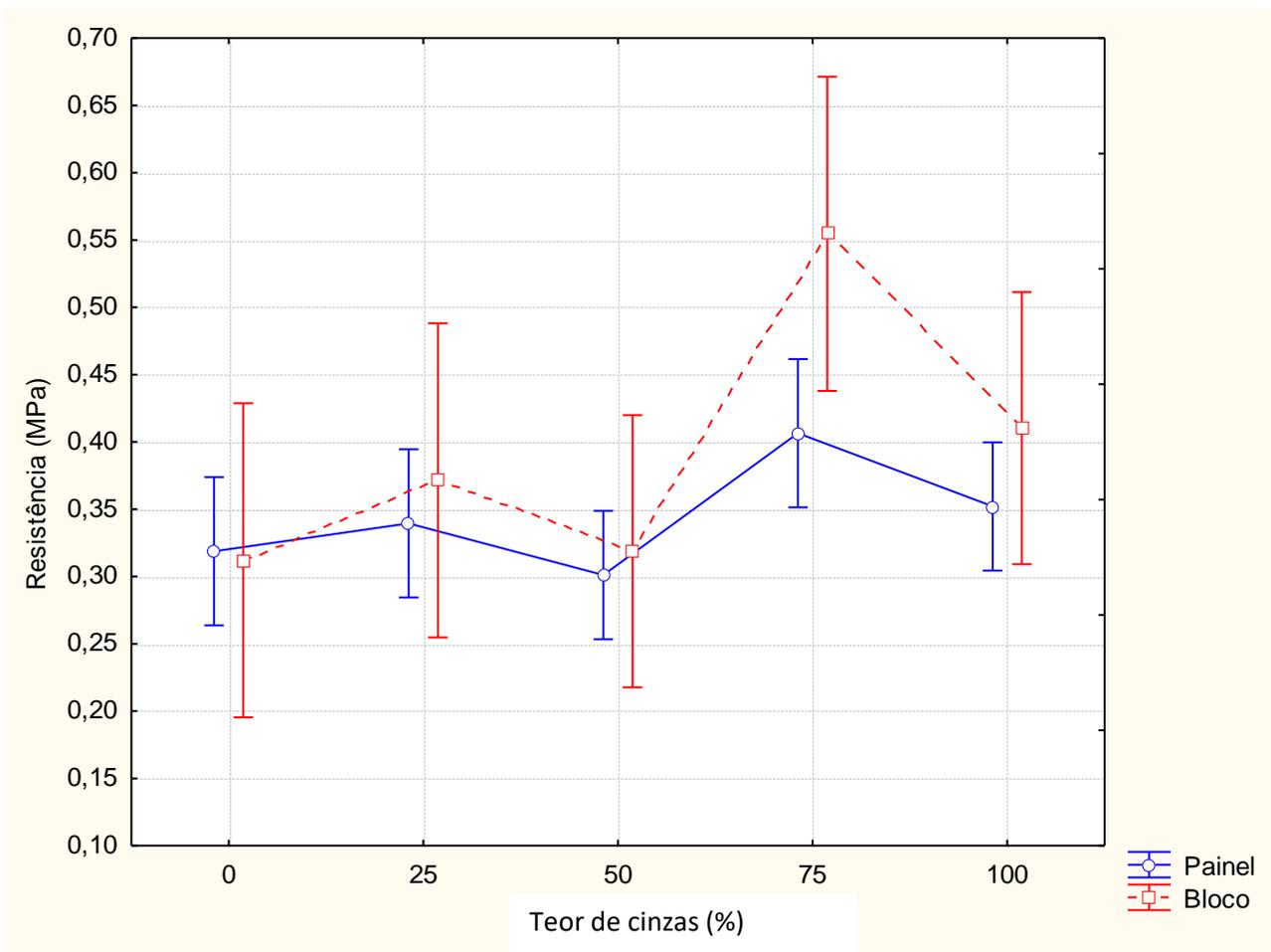
4.2.4 Comparação dos resultados do ensaio de resistência de aderência à tração nos painéis de argamassa e nos blocos cerâmicos

Com os oito maiores resultados para cada traço, foram verificados quais pertenciam aos painéis e quais pertenciam aos blocos, assim foi gerado um gráfico, conforme mostrado na Figura 39, evidenciando que os resultados individuais, tanto nos painéis quanto nos blocos, seguiram o mesmo formato do gráfico da Figura 38, além de que o local de aplicação não contribui significativamente para o seu resultado.

Entretanto, ao analisar todos os resultados, foi verificado que as amostras nos painéis apresentaram alta variabilidade nos resultados obtidos, conforme apresentado na Tabela 16. Nela, pode-se notar que a variação entre o maior resultado do painel e do bloco foi pequena se comparado com a variação do menor resultado entre os mesmos. Quando comparado o coeficiente de variação de cada traço para cada tipo de corpo de prova, pode-se notar uma maior variação nos corpos de prova provenientes dos painéis de argamassa em comparação aos dos blocos cerâmicos.

Esta alta variabilidade pode ser justificada pelo fato de que nos painéis o local do ensaio influencia no seu resultado. Diferente do bloco, onde os mesmos foram ensaiados no centro, os painéis podem ser ensaiados em cima das juntas de assentamento, ou em alguma área de fragilidade, diminuindo a resistência da amostra.

Figura 39 - Comparação da resistência média de aderência à tração entre os painéis e os blocos



Fonte: (Autor, 2016).

Tabela 16 - Comparação dos resultados do ensaio de resistência de aderência à tração

Traço	Resistência de aderência à tração (MPa)				Coeficiente de Variação	
	Painel		Bloco		Painel (%)	Bloco (%)
	Maior	Menor	Maior	Menor		
0%	0,34	0,05	0,50	0,26	53	26
25%	0,40	0,05	0,48	0,22	56	30
50%	0,30	0,09	0,36	0,21	39	19
75%	0,51	0,09	0,72	0,30	52	41
100%	0,36	0,01	0,47	0,28	73	16

Fonte: (Autor, 2016).

Os coeficientes de variação encontrados para os painéis estão coerentes com os mesmos encontrados nos trabalhos de Diógenes (2016), Morais (2011) e Margon (2002) onde foram encontrados coeficientes entre 30% e 70%.

4.3 Durabilidade

4.3.1 Somatório de abertura de fissuras

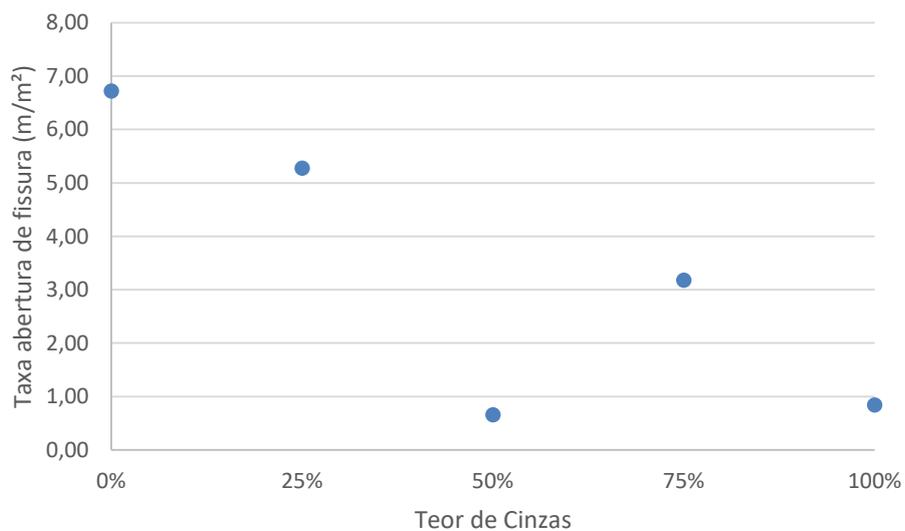
A Tabela 17 apresenta o resultado do ensaio verificando que todos os traços com adição de cinza apresentaram uma diminuição da taxa de abertura de fissuras. Assim, para esse quesito, os traços que apresentaram um melhor resultado foram os com 50% e 100% de cinzas, conforme Figura 40, obtendo uma redução de 90% e 87% respectivamente. Já o traço com 75%, que mais se destacou nos ensaios no estado endurecido, obteve uma redução de 53% da taxa. Pode-se notar também que à medida que é aumentado o teor de cinza, o tamanho das fissuras tende a diminuir.

Tabela 17 - Resultado da avaliação do somatório de abertura de fissuras

Traço	Somatório de Abertura de Fissuras			
	Comp. Total (cm)	Maior Fissura (mm)	Área (m ²)	Taxa (m/m ²)
T0	270	0,4	0,40	6,75
T25	182	0,4	0,35	5,20
T50	22	0,2	0,33	0,67
T75	139	0,35	0,44	3,16
T100	36	0,2	0,43	0,84

Fonte: (Autor, 2016).

Figura 40 - Taxa de abertura de fissuras



Fonte: (Autor, 2016).

Para esse ensaio não foi utilizada a análise de variância pelo fato de que cada painel resultou em apenas um dado, impossibilitando tal análise.

4.3.2 Permeabilidade pelo método do cachimbo

Os resultados do ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo estão apresentados na Tabela 18. Os dados completos estão apresentados no **Apêndice H**.

Tabela 18 - Resultado do ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo

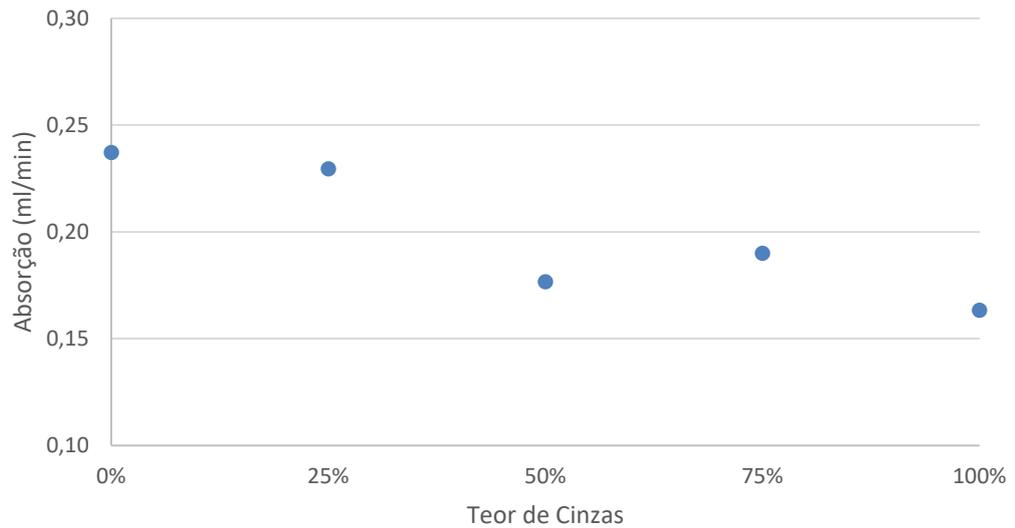
Traço	CP	Taxa de absorção (ml/min)	Taxa média absorção (ml/min)
T0	1	0,17	0,24
	2	0,31	
T25	1	0,17	0,23
	2	0,29	
T50	1	0,21	0,18
	2	0,15	
T75	1	0,15	0,19
	2	0,23	
T100	1	0,19	0,16
	2	0,13	

Fonte: (Autor, 2016).

Com base nela, foi gerado o gráfico apresentado na Figura 41, mostrando que o revestimento praticamente manteve a taxa média de absorção do traço de referência para o traço com 25% de cinzas. A redução expressiva da taxa média de permeabilidade ocorreu apenas a partir do teor de 50%, com uma redução de 25,5%. Entretanto, o aumento desse teor para os demais traços obtiveram um coeficiente de variação de apenas 7,5% na permeabilidade. Assim, todos os traços com cinzas obtiveram resultados satisfatórios com relação à permeabilidade, por obterem valores inferiores aos do traço de referência. Comparando com o resultado do traço de referência de (DA SILVA, 2006), a taxa média do traço T0 sofreu uma redução de 15%, de 0,28 para 0,24, validando o ensaio.

Semelhante ao ensaio anterior, não foi utilizada a análise de variância pelo fato de que cada painel resultou em apenas dois dados, não correspondendo a uma amostra significativa para tal análise.

Figura 41 - Taxa média de permeabilidade do revestimento



Fonte: (Autor, 2016).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Com relação às propriedades no estado fresco, a substituição de cal pela CCCM mostrou uma menor necessidade de água para a mistura obter a consistência estabelecida, além de obterem menores perdas percentualmente desse parâmetro nos primeiros 10 minutos. O ensaio de reologia das argamassas mostrou resultados similares para todas as argamassas com a adição da CCCM, demonstrando uma melhor trabalhabilidade quando comparada ao traço de referência.

A análise de variância (ANOVA) indicou que para todos os ensaios realizados no estado fresco o percentual de CCCM incorporado à argamassa influi significativamente no resultado apresentado, de modo que o teor ótimo de substituição de cal por CCCM encontrado foi de 75% a 100%. O traço com 100% inicialmente possuiu menor perda de trabalhabilidade nos primeiros 10 minutos, entretanto na reologia após uma hora, o traço com 75% manteve-se mais trabalhável que o mesmo.

Com relação às propriedades no estado endurecido, os ensaios de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão, seja nas idades de 7 ou 28 dias, ocasionaram em resultados semelhantes. A substituição de cal pela CCCM não mostrou diferenças significativas até o teor de 50%, sendo o aumento significativo a partir do teor de 75%, onde aos 7 dias, o traço com 100% de CCCM obteve maior resistência para ambos os parâmetros. Entretanto, aos 28 dias, o traço com 75% obteve um maior ganho de resistência do que o traço com 100%, não havendo diferenças significantes com o resultado do mesmo para a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão. A análise de variância (ANOVA) mostrou que para esses ensaios o percentual de CCCM incorporado à argamassa influi significativamente no resultado apresentado, em ambas as idades.

No ensaio de resistência de aderência à tração, os resultados médios de todos os traços após o tratamento foram maiores do que o requisitado pela norma NBR 15278 (ABNT, 2010), validando que a adição de CCCM à argamassa é tecnicamente viável. O traço que mais se destacou nesse parâmetro foi o com 75% de CCCM. Além disso, a comparação dos resultados obtidos nos painéis na alvenaria e no bloco cerâmico evidenciou que os resultados obtidos nos blocos cerâmicos foram mais consistentes e possuíram uma menor variação do que os

resultados obtidos nos painéis. Essa característica é explicada pelo fato de que os valores máximos em cada um foram similares, enquanto os valores mínimos nos painéis divergiram.

Apesar das divergências do coeficiente de variação e das médias individuais de cada amostra nos painéis e nos blocos cerâmicos, a análise de variância (ANOVA) mostrou que apenas o percentual de CCCM incorporado à argamassa influi significativamente na média obtida, enquanto o local, seja no painel ou no bloco, não influi. Por causa desse aspecto é possível utilizar ambos os resultados para compor a média da resistência de aderência à tração. Assim, devido a menor variabilidade, é aconselhável a utilização dos blocos cerâmicos para esse ensaio ao invés dos painéis de argamassa, já que o que está sendo avaliado é a influência de um material específico na mistura.

Com relação aos resultados dos ensaios de durabilidade, os mesmos apresentaram resultados similares para os quesitos de permeabilidade e abertura de fissuras. Os traços que mais se destacaram em termos de durabilidade foram os traços com 50% e 100% de CCCM que obtiveram desempenho semelhante. O traço com 75% de CCCM, que mais se destacou nas propriedades do estado fresco e endurecido, obteve um desempenho satisfatório em comparação ao traço de referência, estando assim aprovado nesse quesito. Já o traço com 25% reduziu a taxa de abertura de fissuras, mas pouco contribuiu para a redução da taxa média de permeabilidade.

As argamassas com CCCM apresentaram um melhor desempenho nas características do estado fresco e endurecido se comparadas à argamassa de referência. Entretanto, tal melhora foi somente visível para os teores a partir de 75%, desse modo, os traços com 25% e 50% não obtiveram diferenças significantes nesses quesitos. Contudo, o traço com 50% foi o que apresentou melhores resultados quando analisada a durabilidade do revestimento, sendo assim viável sua substituição.

O traço com 75% foi o que mais se destacou nas propriedades de estado fresco e endurecido, obtendo maiores resistências finais em todos os parâmetros analisados. Analisando a sua durabilidade, o mesmo obteve desempenho satisfatório quando comparado ao traço de referência, mas inferior quando comparado aos traços com 50% e 100%. O traço com 100% possuiu resultados bem próximos aos do traço com 75% chegando a não diferenciar significativamente em diversos quesitos

Assim, conclui-se que a sua substituição é tecnicamente viável e os teores de utilização acima de 75% da cinza de Pecém II, confere a mistura um aumento de desempenho nas propriedades analisadas. Assim, recomenda-se a substituição de 100% da cal pela cinza de Pecém II, já que a mesma também confere resultados de durabilidade e resistência satisfatórios.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O presente estudo experimental contribuiu para aprofundar os conhecimentos acerca da incorporação de cinzas de combustão do carvão mineral em argamassas de revestimento, em substituição à cal. Porém, ao longo da realização deste estudo, bem como após uma análise dos resultados realizados, surgiram alguns pontos que merecem ser estudados no futuro.

- Avaliar o desempenho termoacústico das argamassas com CCCM.
- Analisar a microestrutura das argamassas com CCCM.
- Verificar a resistência à carbonatação das argamassas com CCCM
- Analisar a substituição do cimento pela CCCM de Pecém II na utilização de argamassas mistas de revestimento.
- Utilizar a CCCM de Pecém I como fíler em concretos autoadensáveis.

REFERÊNCIAS

- ABCM. **Gaseificação do carvão mineral**. Associação Brasileira do Carvão Mineral. Criciúma - SC. 2016.
- ABNT. **NBR 7219: Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados - Método de Ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1982.
- _____. **NBR 5736: Cimento Portland pozolânico**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 6. 1999.
- _____. **NBR NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 5. 2001.
- _____. **NBR 7175: Cal Hidratada para argamassas - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 4. 2003.
- _____. **NBR NM 248: Determinação da composição granulométrica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2003.
- _____. **NBR NM 30: Determinação da absorção de água dos agregados miúdos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2003.
- _____. **NBR NM 45: Determinação da massa unitária dos agregados**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2003.
- _____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2003.
- _____. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- _____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 9. 2009.
- _____. **NBR 15258: Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2010.

____. **NBR 13529: Revestimento de Paredes e Tetos de Argamassas Inorgânicas - Terminologia**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 13. 2013.

____. **NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 8. 2013.

____. **NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 4. 2014.

____. **NBR 12653: Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 6. 2015.

____. **NBR 5751: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 4. 2015.

____. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 7. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Capacidade de Geração do Brasil**. Brasília. 2015.

AGUIAR, B. et al. Utilização de cinzas volantes na incineração de RSU. **Betão para a construção sustentável**. Lisboa, Portugal, p. 23. 2002.

ANDRADE, L. B.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 609-614, February 2009.

ARAÚJO, J.; OLIVEIRA, A. M.; CARASEK, H. Influência da maturação da cal hidratada na trabalhabilidade de argamassas. **SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, p. 13, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Perguntas Frequentes. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2009. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/colaborativo-portal/perguntas-frequentes.php?id=29>>. Acesso em: 19 Outubro 2015.

ASTM. **C1437: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar**. [S.l.]. 2012.

BORBA, R. F. **Balanço Mineral Brasileiro 2001**. Brasília. 2001.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland à substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 26. 1997.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. **Anais Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, Brasília, v. IV, p. 43-67, 2001.

CARBOMIL SA. Hidróxido de Cálcio. **Carbomil SA**, 2015. Disponível em: <<http://www.carbomil.com.br/portfolio-item/hidroxido-de-calcio/>>. Acesso em: Dezembro 2015.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização**. Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, p. 36. 2010. (ISSN 0103-9830).

CHERIAF, M.; ROCHA, J. C.; PÉRA, J. Pozzolanic Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash. **Cement and Concrete Research**, Vol 29, Issue 9, 1999. 1387–1391.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S. Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. **Construction and Building Materials**, n. 22, p. 1601-1606, 2008.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo. 1995.

CSTC. **Hydrofugue de surface: choix et mise en oeuvre**. CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION. Bruxelles, p. 24 (Note D'Information Technique - NIT n. 140). 1982.

DA COSTA, F. M. S. **Estudo da Viabilidade da Utilização de Cinza de Lodo de Esgoto Como Adição em Argamassa de Cimento Portland**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Dissertação de Mestrado. Natal, p. 122. 2014.

DA SILVA, N. G. **Argamassa de revesitamento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná. PARANÁ. 2006.

DIÓGENES, A. G. **Estudo do comportamento de argamassas de revestimento com areia de britagem da região metropolitana de Fortaleza**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Ceará. FORTALEZA, p. 159. 2016.

EN 450. **Fly ash for concrete. Definition, specification and conformit criteria**. [S.l.], p. 34. 2012.

ERDOĞDU, K.; TÜRKER, P. Effects of Fly Ash Particle Size on Strenght of Portland Cement Fly Ash Mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 9, p. 1217-1222, 1998.

FARIAS, E. R. **A utilização de Misturas Solos/Cinza Pesada na Pavimentação – Análise de Aspectos de Comportamento Mecânico e Ambiental**. Florianópolis: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 2005.

FERREIRA, K. C. et al. Estudo do Efeito Pozolânico da Cinza Volante na Produção de Argamassas Mistas: Cal Hidratada, Rejeito de Contrução Civil e Cimento Portland. **XX COBEQ (Congresso Brasileiro de Engenharia Química)**, Florianópolis, p. 7, Outubro 2014.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C.; ALMEIDA, R. S. Remoção de Compostos Tóxicos de Solução Aquosa por Adsorção com Zeólita Sintetizada a partir de Cinzas de Carvão. **Eclética Química, Vol. 30, Nº 2**, 2005. 31-35.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D. Rheological Lab Testing of Building Formulations. **ConChem Conference**, Düsseldorf, Alemanha, 1994.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios-x e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.

GOOGLE MAPS, 2015. Disponível em:
<<https://www.google.com.br/maps/place/Energia+Pecem+++UTE+pecem+II/@-3.5883816,->

38.8749547,492m/data=!3m1!1e3!4m5!1m2!2m1!1sUsina+PECEM+I!3m1!1s0x7c0c4f0d3eb2ce3:0x9c77bd694a001fab!6m1!1e1>. Acesso em: 19 Novembro 2015.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas Cimento, Cinza Volante e Cal Hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 247. 2008.

ISAIA, G. C.; BATTAGIN, I. L. S.; HELENE, P. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais Volume 1**. São Paulo: Ibracon, 2011.

ISLAM, M.; ISLAM, S. Strength Behaviour of Mortar Using Fly Ash as Partial Replacement of Cement. **Concrete Research Letters**, v. 1 (3), September 2010.

IZIDORO, J. C.; FUNGARO, D. A. Utilização De Resíduos De Usinas Termelétricas A Carvão Na Síntese De Zeólitas E Sua Aplicação Na Remoção De Zn^{2+} E Cd^{2+} Em Água. **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento vol.9 nº.3**, 2007. 101-106.

JATURAPITAKKUL, C.; CHEERAROT, R. Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 15, n. 1, February 2003. 48-53.

LENZI, E. J. **Influência do uso de cinza da combustão de carvão mineral em argamassas de revestimento**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 153. 2001.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Ottawa - Canada: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MARGON, P. V. **Influência do uso das cinzas de carvão mineral de termelétricas em argamassas de revestimento: Dosagem por curvas granulométricas**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina. FLORIANÓPOLIS, p. 149. 2002.

MARQUES, L. F. D. A. **Avaliação do desempenho de argamassas com incorporação de resíduos**. Instituto Politécnico de Viseu - Dissertação de Mestrado. Viseu, Portugal, p. 126. 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MINEROPAR. **Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Curitiba.** MINERAIS DO PARANÁ S.A. Curitiba, p. 288. 2004.

MIRANDA, L. M. C. C. **Estudo Comparativo entre Argamassa de Revestimento à Base de Cimento com Adição da Cal Hidráulica e da Cal Hidratada.** Vila Real, Portugal: Dissertação de Mestrado - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2009.

MORAIS, T. A. **Estudo do uso do agregado miúdo reciclado de concreto na produção de argamassa de revestimento vertical.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 135. 2011.

NEVILLE, A. M. **Proriedades do concreto.** São Paulo: Pini, 1997.

RAI, B.; KUMAR, S.; SATISH, K. Effect of Fly Ash on Mortar Mixes with Quarry Dust as Fine Aggregate. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2014, p. 7, March 2014.

RILEM. **Recomendations MR1-21: Testing methods of mortar and rendering.** RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES D'ESSAIS ET RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LÈS CONSTRUCTION. France, p. 1st ed. 1982.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 298. 1984.

SABEDOT, S. et al. **Caracterização e Aproveitamento de Cinza da Combustão de Carvão Mineral Geradas em Usinas Termelétricas.** Copelmi Mineração Ltda. Porto Alegre, p. 15. 2011.

SIQUEIRA, J.; SOUZA, C.; SOUZA, J. Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas. **Cerâmica**, São Paulo, v. Vol. 58, n. n° 346, Abril/Junho 2012.

SUPIT, S. W. M.; SHAIKH, F. U. A.; SARKER, P. K. Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar. **Construction and Building Materials**, Perth, Austrália, v. 51, p. 278-286, Janeiro 2014.

SWAINE, D. J. **Trace Elements in Coal.** United Kingdom: Butterworth & Co, 1990.

SWAINE, D. J.; GOODARZI, F. **Enviromental Aspects of Trace Elements in Coal.** Dordrecht, Holanda: KluwerAcademic Publishers, 1995.

VEIGA, M. R. S. **Comportamento de Argamassas de Revestimento de Paredes: Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação.** Lisboa: LNEC, 1998.

YU, Y.; CHENG, K.; PANG, B. Influence of content of coal ash on performance of cement-coal ash slurry. **AIP Conference Proceedings**, v. 1794, n. 1, January 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE *SQUEEZE-FLOW*

APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS

APÊNDICE C – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS

APÊNDICE D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

APÊNDICE E – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

APÊNDICE F – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

APÊNDICE H – RESULTADOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE PELO MÉTODO DO CACHIMBO

APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE *SQUEEZE-FLOW*

TRAÇO	SQUEEZE FLOW			
	60 min; $\sigma=0,02$ MPa			
	1	2	3	Média
T0	125	130	140	132
T25	140	155	153	149
T50	140	155	140	145
T75	165	160	163	163
T100	150	150	148	149

Análise estatística – Teste de Duncan

Duncan test; variable Diâmetro Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 41,467, df = 10,000						
	Traço	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,010468	0,029722	0,000308	0,009169
2	25	0,010468		0,449866	0,029722	1,000000
3	50	0,029722	0,449866		0,010468	0,429251
4	75	0,000308	0,029722	0,010468		0,035634
5	100	0,009169	1,000000	0,429251	0,035634	

Resultados em vermelho demonstram diferenças significativas

APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS

TRAÇO	Tração na flexão 7 dias		Compressão (1) 7 dias		Compressão (2) 7 dias	
	Força (kN)	Resist. (MPa)	Força (kN)	Resist. (MPa)	Força (kN)	Resist. (MPa)
T0-1	0,3	0,70	4,8	3,00	4,6	2,88
T0-2	0,4	0,94	4,3	2,69	4,7	2,94
T0-3	0,3	0,70	4,6	2,88	4,8	3,00
T25-1	0,3	0,70	4,7	2,94	5,2	3,25
T25-2	0,3	0,70	4,7	2,94	4,4	2,75
T25-3	0,3	0,70	5,1	3,19	4,8	3,00
T50-1	0,4	0,94	4,9	3,06	5,2	3,25
T50-2	0,3	0,70	5,0	3,13	4,2	2,63
T50-3	0,3	0,70	5,1	3,19	3,4	2,13
T75-1	0,7	1,64	8,9	5,56	10,4	6,50
T75-2	0,8	1,88	9,9	6,19	9,4	5,88
T75-3	0,7	1,64	9,0	5,63	9,6	6,00
T100-1	0,8	1,88	14,5	9,06	13,3	8,31
T100-2	1,1	2,58	9,7	6,06	12,2	7,63
T100-3	1,1	2,58	13,7	8,56	12,7	7,94

Resultados em vermelhos foram descartados para a composição do resultado médio, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Traço	Resistência à Tração na flexão 7 dias	
	Média (MPa)	Desvio Máx. (MPa)
T0	0,8	0,2
T25	0,7	0,0
T50	0,8	0,2
T75	1,7	0,2
T100	2,3	-0,5

Fonte: (Autor, 2016).

Entretanto, a NBR 13279 (ABNT, 2005) estabelece o desvio absoluto máximo de 0,3 MPa, sendo constituído da média de no mínimo dois corpos de prova. Desse modo, foi feito o tratamento no resultado do traço T100.

Traço	Resistência à Tração na flexão 7 dias (Após Tratamento)	
	Média (MPa)	Desvio Máx. (MPa)
T0	0,8	0,2
T25	0,7	0,0
T50	0,8	0,2
T75	1,7	0,2
T100*	2,6	0,0

Traço	Resistência à compressão 7 dias	
	Média (MPa)	Desvio Máx. (MPa)
T0	2,9	-0,2
T25	3,0	-0,3
T50	2,9	-0,8
T75	6,0	0,5
T100	7,9	-1,9

Entretanto, a NBR 13279 (ABNT, 2005) estabelece o desvio absoluto máximo de 0,5 MPa, sendo constituído da média de no mínimo de quatro corpos de prova. Desse modo, foi feito o tratamento no resultado dos traços T50 e T100.

Traço	Resistência à compressão 7 dias (Após Tratamento)	
	Média (MPa)	Desvio Máx. (MPa)
T0	2,9	-0,2
T25	3,0	-0,3
T50*	3,1	-0,4
T75	6,0	0,5
T100*	8,1	-0,5

**APÊNDICE C – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA
FLEXÃO E À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS**

TRAÇO	Tração na flexão 28 dias		Compressão (1) 28 dias		Compressão (2) 28 dias	
	Força (kN)	Resist. (MPa)	Força (kN)	Resist. (MPa)	Força (kN)	Resist. (MPa)
T0-1	0,5	1,17	9,0	5,63	9,0	5,63
T0-2	0,7	1,64	8,0	5,00	8,1	5,06
T0-3	0,6	1,41	8,7	5,44	8,5	5,31
T25-1	0,7	1,64	8,9	5,56	8,5	5,31
T25-2	0,7	1,64	10,1	6,31	8,5	5,31
T25-3	0,5	1,17	8,4	5,25	9,2	5,75
T50-1	0,6	1,41	9,5	5,94	10,4	6,50
T50-2	0,7	1,64	8,0	5,00	10,5	6,56
T50-3	0,9	2,11	9,9	6,19	13,0	8,13
T75-1	1,4	3,28	18,2	11,38	18,1	11,31
T75-2	1,5	3,52	18,4	11,50	20,4	12,75
T75-3	1,4	3,28	16,8	10,50	17,9	11,19
T100-1	1,3	3,05	14,7	9,19	14,8	9,25
T100-2	1,3	3,05	18,0	11,25	18,8	11,75
T100-3	1,3	3,05	17,8	11,13	17,6	11,00

Resultados em vermelhos foram descartados para a composição do resultado médio, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Traço	Resistência à Tração na flexão 28 dias	
	Média (MPa)	Desvio Máx. (MPa)
T0	1,4	0,2
T25	1,5	-0,1
T50	1,7	-0,3
T75	3,4	0,2
T100	3,0	0,0

Traço	Resistência à compressão 28 dias	
	Média (MPa)	Desvio Máx. (MPa)
T0	5,3	-0,3
T25	5,6	0,7
T50	6,4	1,7
T75	11,4	1,3
T100	10,6	-1,3

Entretanto, a NBR 13279 (ABNT, 2005) estabelece o desvio absoluto máximo de 0,5 MPa, sendo constituído da média de no mínimo de quatro corpos de prova. Desse modo, foi feito o tratamento no resultado dos traços T25, T50, T75 e T100.

Traço	Resistência à compressão 28 dias (Após tratamento)	
	Média (MPa)	Desvio Máx. (MPa)
T0	5,3	-0,3
T25*	5,4	0,3
T50*	6,3	-0,4
T75*	11,3	-0,2
T100*	11,3	0,5

APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

ANÁLISE DE VARIÂNCIA - 7 DIAS

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,4599609	4	1,6149902	36,75	5,956E-06	3,478049691
Dentro dos grupos	0,4394531	10	0,0439453			Significância
						S
Total	6,8994141	14				

TESTE DE DUNCAN - 7 DIAS

Duncan test; variable ft7 Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,04395, df = 10,000						
	Teor de cinza	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,672547	1,000000	0,000425	0,000101
2	25	0,672547		0,657989	0,000286	0,000046
3	50	1,000000	0,657989		0,000437	0,000071
4	75	0,000425	0,000286	0,000437		0,004609
5	100	0,000101	0,000046	0,000071	0,004609	

Resultados em vermelho demonstram diferenças significativas

ANÁLISE DE VARIÂNCIA - 28 DIAS

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	610,9629727	4	152,7407	751,4198	2,39896E-12	3,47805
Dentro dos grupos	2,032695313	10	0,20327			Significância
						S
Total	612,995668	14				

TESTE DE DUNCAN - 28 DIAS

Duncan test; variable ft28 Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,03560, df = 9,0000						
	Teor de cinza	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,640465	0,505410	0,000045	0,000072
2	25	0,640465		0,814537	0,000070	0,000094
3	50	0,505410	0,814537		0,000092	0,000212
4	75	0,000045	0,000070	0,000092		0,085289
5	100	0,000072	0,000094	0,000212	0,085289	

Resultados em vermelho demonstram diferenças significativas

APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

ANÁLISE DE VARIÂNCIA - 7 DIAS

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	127,3809896	4	31,85	110,1871959	1,70039E-15	2,8
Dentro dos grupos	7,225260417	25	0,289			Significância
						S
Total	134,60625	29				

TESTE DE DUNCAN - 7 DIAS

Duncan test; variable Fc7 Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,06622, df = 17,000

	Traço	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,478792	0,482481	0,000059	0,000037
2	25	0,478792		0,972569	0,000080	0,000059
3	50	0,482481	0,972569		0,000152	0,000080
4	75	0,000059	0,000080	0,000152		0,000152
5	100	0,000037	0,000059	0,000080	0,000152	

Resultados em vermelho demonstram diferenças significativas

ANÁLISE DE VARIÂNCIA - 28 DIAS

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	203,7638021	4	50,94	84,34877754	3,85601E-14	2,759
Dentro dos grupos	15,09830729	25	0,604			Significância
						S
Total	218,8621094	29				

TESTE DE DUNCAN - 28 DIAS

Duncan test; variable Fc28 Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,11168, df = 17,000

	Traço	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,170794	0,001045	0,000059	0,000037
2	25	0,170794		0,015774	0,000080	0,000059
3	50	0,001045	0,015774		0,000152	0,000080
4	75	0,000059	0,000080	0,000152		0,894350
5	100	0,000037	0,000059	0,000080	0,894350	

Resultados em vermelho demonstram diferenças significativas

APÊNDICE F – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Corpo de Prova						Forma de Ruptura (%) NBR 13528:2010						
Traço	Nº	Força (kN)	Resistência (MPa)	Tamanho (mm)	Local	Substrato	Sub/Chap	Chapisco	Chap/Arg	Argamassa	Arg/Cola	Cola/Pastilha
T0	1	9,3	>	0,05	22	Parede			50%		50%	
	2	27,3	>	0,14	13	Parede			5%		95%	
	3	22,4	>	0,11	20	Parede			5%		95%	
	4	59,1	>	0,30	18	Parede					100%	
	5	23,1	>	0,12	5	Parede					100%	
	6	30,8	>	0,16	20	Parede					100%	
	7	31,55	>	0,16	22	Parede			20%		80%	
	8	43,8	>	0,22	5	Parede			0%		100%	
	9	17,3	>	0,09	22	Parede					100%	
	10	26,6	>	0,14	18	Parede			80%		20%	
	11	61,2	>	0,31	5	Parede			100%			
	12	67,5	>	0,34	22	Parede					100%	
	13	58,2	>	0,30	3	Bloco						100%
	14	58,3	>	0,30	3	Bloco						100%
	15	67,3	>	0,34	18	Bloco					100%	
	16	61,1	>	0,31	20	Bloco					100%	
	17	50,6	>	0,26	20	Bloco					100%	
	18	98,7	>	0,50	20	Bloco					100%	
Resistência Média (MPa) (sem tratamento)			>	0,23	Desvio Padrão Parede (MPa)	0,10	Desvio Padrão Bloco(MPa)	0,09	Resistência Média (MPa) (após tratamento)		>	0,34

Corpo de Prova						Forma de Ruptura (%) NBR 13528:2010						
Traço	Nº	Força (kN)	Resistência (MPa)	Tamanho (mm)	Local	Substrato	Sub/Chap	Chapisco	Chap/Arg	Argamassa	Arg/Cola	Cola/Pastilha
T25	1	29,5	>	0,15	30	Parede			100%			
	2	60,2	>	0,31	30	Parede			100%			
	3	37,8	>	0,19	30	Parede			100%			
	4	15,7	>	0,08	23	Parede			50%		50%	
	5	43,7	>	0,22	25	Parede			100%			
	6	42,6	>	0,22	24	Parede			80%		20%	
	7	61,2	>	0,31	24	Parede					100%	
	8	14,7	>	0,07	26	Parede			95%		5%	
	9	20	>	0,10	22	Parede			95%		5%	
	10	9,4	>	0,05	30	Parede			100%			
	11	78,6	>	0,40	25	Parede			50%		50%	
	12	54,3	>	0,28	25	Parede			5%		95%	
	13	61,3	>	0,31	22	Bloco					100%	
	14	62,5	>	0,32	18	Bloco					100%	
	15	44	>	0,22	15	Bloco					100%	
	16	95	>	0,48	15	Bloco					100%	
	17	59,6	>	0,30	15	Bloco					100%	
	18	94,5	>	0,48	15	Bloco					100%	
Resistência Média (MPa) (sem tratamento)			>	0,25	Desvio Padrão Parede (MPa)	0,11	Desvio Padrão Bloco(MPa)	0,11	Resistência Média (MPa) (após tratamento)		>	0,36

Corpo de Prova						Forma de Ruptura (%) NBR 13528:2010						
Traço	Nº	Força (kN)	Resistência (MPa)	Tamanho (mm)	Local	Substrato	Sub/Chap	Chapisco	Chap/Arg	Argamassa	Arg/Cola	Cola/Pastilha
T50	1	59,7	>	0,30	23	Parede			70%		30%	
	2	53,8	>	0,27	30	Parede			90%		10%	
	3	34,1	>	0,17	18	Parede			90%		10%	
	4	58,3	=	0,30	20	Parede				100%		
	5	28,3	>	0,14	28	Parede			100%			
	6	42,4	>	0,22	25	Parede					100%	
	7	31,3	>	0,16	2	Parede						100%
	8	52,1	>	0,27	30	Parede			100%			
	9	59,5	>	0,30	25	Parede				100%		
	10	16,9	>	0,09	22	Parede					100%	
	11	17,3	>	0,09	26	Parede			100%			
	12	59	>	0,30	28	Parede			100%			
	13	71,4	>	0,36	18	Bloco					100%	
	14	58,5	>	0,30	2	Bloco						100%
	15	41,1	>	0,21	16	Bloco					100%	
	16	61,4	>	0,31	16	Bloco					100%	
	17	48,2	>	0,25	18	Bloco					100%	
	18	59,1	>	0,30	2	Bloco						100%
Resistência Média (MPa) (sem tratamento)			>	0,24	Desvio Padrão Parede (MPa)	0,08	Desvio Padrão Bloco (MPa)	0,05	Resistência Média (MPa) (após tratamento)		>	0,31

Corpo de Prova						Forma de Ruptura (%) NBR 13528:2010						
Traço	Nº	Força (kN)	Resistência (MPa)	Tamanho (mm)	Local	Substrato	Sub/Chap	Chapisco	Chap/Arg	Argamassa	Arg/Cola	Cola/Pastilha
T75	1	73,3	>	0,37	2	Parede					100%	
	2	99,6	>	0,51	2	Parede					100%	
	3	39,7	>	0,20	15	Parede				100%		
	4	66,5	>	0,34	18	Parede				100%		
	5	62,1	>	0,32	2	Parede					100%	
	6	77,8	>	0,40	2	Parede					100%	
	7	64,1	>	0,33	20	Parede				100%		
	8	19,9	>	0,10	25	Parede			95%		5%	
	9	69,4	>	0,35	2	Parede						100%
	10	16,8	>	0,09	25	Parede			100%			
	11	19,9	>	0,10	15	Parede			25%		85%	
	12	24,6	>	0,13	20	Parede			80%		20%	
	13	67,8	>	0,35	2	Bloco						100%
	14	58,6	>	0,30	15	Bloco					100%	
	15	117,4	>	0,60	2	Bloco						100%
	16	141,5	>	0,72	26	Bloco	70%	30%				
	17		>	0,00		Bloco						
	18		>	0,00		Bloco						
Resistência Média (MPa) (sem tratamento)			>	0,32	Desvio Padrão Parede (MPa)	0,14	Desvio Padrão Bloco (MPa)	0,20	Resistência Média (MPa) (após tratamento)		>	0,45

Corpo de Prova						Forma de Ruptura (%) NBR 13528:2010						
Traço	Nº	Força (kN)	Resistência (MPa)	Tamanho (mm)	Local	Substrato	Sub/Chap	Chapisco	Chap/Arg	Argamassa	Arg/Cola	Cola/Pastilha
T100	1	2,1	>	0,01	25	Parede			100%			
	2	3,1	>	0,02	25	Parede			100%			
	3	6,7	>	0,03	30	Parede			100%			
	4	62,5	>	0,32	25	Parede			100%			
	5	71,4	>	0,36	23	Parede			80%		20%	
	6	25,5	>	0,13	28	Parede			100%			
	7	20,9	>	0,11	28	Parede			90%		10%	
	8	70,2	=	0,36	23	Parede				100%		
	9	31,1	>	0,16	23	Parede			100%			
	10	69,8	=	0,36	25	Parede				100%		
	11	65,1	>	0,33	25	Parede			100%			
	12	31,7	>	0,16	25	Parede			100%			
	13	83,8	>	0,43	2	Bloco						100%
	14	55,7	>	0,28	2	Bloco						100%
	15	72,5	>	0,37	2	Bloco						100%
	16	73,5	>	0,37	2	Bloco						100%
	17	92,4	>	0,47	2	Bloco						100%
	18	60,8	>	0,31	2	Bloco						100%
Resistência Média (MPa) (sem tratamento)			>	0,24	Desvio Padrão Parede (MPa)	0,14	Desvio Padrão Bloco (MPa)	0,06	Resistência Média (MPa) (após tratamento)		>	0,38

APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Análise de variância - Influência do teor de cinzas na composição do resultado médio de cada traço.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,094663	4	0,023666	3,529325	0,016029	2,641465
Dentro dos grupos	0,234692	35	0,006705			Significância
						S
Total	0,329355	39				

Teste de Duncan

Duncan test; variable Aderência (Spreadsheet34) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,00671, df = 35,000						
	Traço	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,523097	0,493696	0,012472	0,331565
2	25	0,523097		0,215572	0,045169	0,690873
3	50	0,493696	0,215572		0,002548	0,120588
4	75	0,012472	0,045169	0,002548		0,083567
5	100	0,331565	0,690873	0,120588	0,083567	

Influência do local de aplicação para o traço T0

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,001822	1	0,001822	0,346415664	0,577618	5,987378
Dentro dos grupos	0,03155	6	0,005258			Significância
						NS
Total	0,033371	7				

Influência do local de aplicação para o traço T25

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,003046	1	0,003046	0,447412571	0,528448	5,987378
Dentro dos grupos	0,040842	6	0,006807			Significância
						NS
Total	0,043887	7				

Influência do local de aplicação para o traço T50

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,000626	1	0,000626	1,328116766	0,292979	5,987378
Dentro dos grupos	0,00283	6	0,000472			<i>Significância</i>
						NS
Total	0,003456	7				

Influência do local de aplicação para o traço T75

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,048503	1	0,048503	3,19027496	0,124316	5,987378
Dentro dos grupos	0,09122	6	0,015203			<i>Significância</i>
						NS
Total	0,139722	7				

Influência do local de aplicação para o traço T100

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,006771	1	0,006771	5,429773553	0,058626	5,987378
Dentro dos grupos	0,007483	6	0,001247			<i>Significância</i>
						NS
Total	0,014254	7				

APÊNDICE H – RESULTADOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE PELO MÉTODO DO CACHIMBO

Traço	CP	Absorção de água (ml) em função do tempo (min) 28 dias																Taxa de absorção (ml/min)	Taxa média absorção (ml/min)
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
T0	1	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	0,17	0,24
		Taxa	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2		
	2	0,0	0,2	0,6	1,1	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	2,9	3,2	3,5	3,7	4,0	-	-	0,31	
		Taxa	0,2	0,4	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	-		
T25	1	0,0	0,1	0,4	0,6	0,8	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,1	2,3	2,4	2,5	2,6	0,17	0,23
		Taxa	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1		
	2	0,0	0,2	0,6	1,0	1,3	1,5	1,8	2,2	2,6	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	4,0	-	0,29	
		Taxa	0,2	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	-		
T50	1	0,0	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,0	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	0,21	0,18
		Taxa	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2		
	2	0,0	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	1,1	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	0,15	
		Taxa	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
T75	1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	0,15	0,19
		Taxa	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1		
	2	0,0	0,2	0,4	0,7	0,9	1,2	1,5	1,7	1,9	2,2	2,4	2,6	2,7	2,9	3,2	3,4	0,23	
		Taxa	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2		
T100	1	0,0	0,2	0,3	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	0,19	0,16
		Taxa	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2		
	2	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	0,13	
		Taxa	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1		