



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Fellipe César Andrade Costa de Melo

**ANÁLISE DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO PORTLAND POR CINZA RESIDUAL DE LENHA DE
ALGAROBA**

**Natal
2012**

Fellipe César Andrade Costa de Melo

ANÁLISE DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO PORTLAND POR CINZA RESIDUAL DE LENHA DE
ALGAROBA

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia Civil, da
Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
como requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

Natal
2012

Fellipe César Andrade Costa de Melo

**ANÁLISE DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO
PORTLAND POR CINZA RESIDUAL DE LENHA DE ALGAROBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Presidente e Orientadora (UFRN)

Dr^ª. Andreza Kelly Costa Nóbrega – Examinadora Externa (UFRN)

Prof^ª. Dr^ª. Ana Cecília Vieira da Nóbrega – Examinadora Externa (UFPE)

Natal, 27 de dezembro de 2012.

ANÁLISE DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA RESIDUAL DE LENHA DE ALGAROBA

Fellipe César Andrade Costa de Melo

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

RESUMO

Com o aumento do seu consumo, o cimento se tornou rapidamente um dos insumos mais consumidos pela humanidade no último século. Isso desencadeou um aumento das emissões de CO₂, uma vez que a produção do cimento libera na atmosfera grandes quantidades deste gás. Somando este fato ao crescente pensamento da preservação ambiental, passou-se a buscar alternativas ao cimento, na forma de resíduos, para complementar os seus derivados, sendo uma delas as cinzas. Este trabalho teve como objetivo analisar as propriedades, no estado fresco e endurecido, de argamassas com substituição parcial do cimento Portland pela cinza residual de lenha de algaroba (CRLA) produzida pelas olarias do RN. A CRLA foi recolhida e peneirada, onde parte dela foi moída e caracterizada em comparação com a apenas peneirada, sendo caracterizadas quanto a sua composição química, granulometria, finura, massa específica, massa unitária e Índice de Atividade Pozolânica. Avaliou-se que a cinza não atua como pozolana e que ela moída pouco variou em relação a apenas peneirada, injustificando seu uso. Adotou-se para este trabalho dois traços, sendo 1:3 (cimento : areia fina) e 1:2:8 (cimento : cal : areia média), ambos em volume, usando-se como materiais a CRLA apenas peneirada, o cimento Portland CP II F-32, a cal hidratada CH-I, areia de rio e água da concessionária local. Para cada traço foram adotados percentuais de substituição parcial do cimento pela cinza, sendo eles 0% (referência), 5%, 7%, 10%, 12% e 15%. No estado fresco, as argamassas foram ensaiadas com relação ao seu índice de consistência e à densidade de massa. No estado endurecido, foram ensaiadas com relação à sua resistência à tração na flexão, à compressão e de aderência à tração, e à sua densidade de massa no estado endurecido. Elas foram também analisadas por microscopia eletrônica de varredura e por difração de Raios-X. Além disso, as argamassas foram classificadas conforme a NBR 13281 (2005). Os resultados encontrados mostraram que, até um teor de 5% de substituição e para ambos os traços, pode-se substituir o cimento pela cinza residual de lenha de algaroba sem comprometer as argamassas microestruturalmente e no seu estado fresco e endurecido.

Palavras-chave: argamassa, resíduo, cinza, algaroba.

ANALYSIS OF MORTARS WITH PARTIAL REPLACEMENT OF PORTLAND CEMENT BY RESIDUAL ALGAROBA WOOD ASH

Fellipe César Andrade Costa de Melo

Adviser: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

ABSTRACT

With the increase in cement consumption, it has quickly become one of the inputs most consumed by mankind over the last century. This has caused an increase in CO₂ emissions, as cement production releases large quantities of this gas into the atmosphere. Adding this fact to the growing consciousness of environmental preservation, it has led to a search for alternatives to cement to complement its derivatives, in the form of waste materials like the ashes. This research aimed to analyze the properties of mortars in fresh and hardened state with partial replacement of Portland cement by residual algaroba wood ash (CRLA) potteries produced by the state of Rio Grande do Norte. The CRLA was collected and sieved, where part of it was ground and characterized in comparison with that just sifted, being characterized according to its chemical composition, grain size, fineness, density, bulk density and index of pozzolanic activity. It was found that the wood ash does not act as pozzolan, and grinding it has not changed its characteristics compared to those just sifted, not justifying its use. Two traces were adopted for this research: 1:3 (cement: fine sand) and 1:2:8 (cement: hydrated lime: medium sand); both in volume, using as materials the CRLA just sifted, CP II F-32 Portland cement, CH-I hydrated lime, river sand and water from the local utility. For each trace were adopted six percentages of partial replacement of cement for wood ash: 0% (control) 5%, 7%, 10%, 12% and 15%. In the fresh state, the mortars were tested towards their consistency index and mass density. In the hardened state, they were tested towards their tensile strength in bending, compressive strength and tensile adhesion strength, and its mass density in the hardened state. The mortar was also analyzed by scanning electron microscopy and X-ray diffraction. Furthermore, it was classified according to NBR 13281 (2005). The results showed that up to a content of 5% substitution and for both traces, the residual algaroba wood ash can replace Portland cement without compromising the mortars microstructure and its fresh and hardened state.

Keywords: mortar, waste materials, wood ash, algaroba.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me conceder forças para seguir em frente.

Aos meus pais, cujos conselhos me instruíram nos momentos mais complicados e pelo incentivo constante e determinado.

Ao meu irmão, pela amizade verdadeira e incondicional.

À minha noiva, por todo amor, compreensão e paciência nos momentos mais difíceis.

A todos os meus familiares e amigos, pelos votos sempre otimistas.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá, pelas palavras de apoio, instruções, cobranças, paciência, amizade e por ter aceitado o desafio de me ter como seu orientando.

À pesquisadora Dr.^a Andreza Kelly Costa Nóbrega, cuja orientação foi indispensável para a realização de boa parte desta pesquisa.

À Prof.^a Dr.^a Ana Cecília Vieira da Nóbrega, da UFPE, pela contribuição a este trabalho e pela avaliação em época tão desfavorável.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) que participaram direta e indiretamente desta empreitada.

Ao prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza e aos bolsistas e técnicos do Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UFRN pelo tempo e esforço emprestado a esta pesquisa.

Ao prof. Dr. Moacir Guilhermino da Silva por ter nos cedido a cal utilizada nesta pesquisa e espaço no Laboratório de Asfalto da UFRN para o preparo de amostras.

Aos bolsistas e professores responsáveis pelo Laboratório de Metais e Ensaios Mecânicos, Laboratório de Cimento e Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais pelo tempo, maquinário e espaço cedido para a realização dos ensaios de resistência.

Ao REUNI – Programa de Apoio ao Plano de Reestruturação e Expansão das Universidades Federais – e à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pelas bolsas de estudo e apoio a esta pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas das argamassas de revestimento	9
Figura 2 - Fluxograma do processo de produção do cimento Portland via seca.....	12
Figura 3 - Representação esquemática da microestrutura do cimento hidratado (a) sem adições e (b) com adição de pozolana.....	22
Figura 4 - Efeito fíler dos aditivos minerais.....	24
Figura 5 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental.....	38
Figura 6 - Fases do peneiramento da CRLA, indicando (a) a cinza bruta, (b) depois de peneirada e (c) seu material descartado.....	42
Figura 7 - Moinho utilizado para a obtenção da CRLA-B	43
Figura 8 - Determinação da massa específica através do Frasco Le Chatellier.....	44
Figura 9 - Argamassadeira para o preparo das argamassas	48
Figura 10 - Determinação do índice de consistência por meio dos seus (a) equipamentos e (b) medição dos diâmetros ortogonais.....	49
Figura 11 - Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos preenchidos	52
Figura 12 - Aspecto dos CPs prismáticos da argamassa T1A0 após desmoldagem	53
Figura 13 - Procedimentos dos ensaios de resistência, iniciando pela (a) solicitação à tração na flexão e (b) mostrando o estado dos CPs após a ruptura, seguindo da (c) solicitação à compressão e (d) o estado dos CPs após a compressão	54
Figura 14 - Procedimentos para a execução das faixas de argamassa para o ensaio de aderência, sendo (a) sua base previamente revestida com chapisco, (b) sua execução e (c) seu aspecto final.....	55
Figura 15 - Procedimentos do ensaio de resistência de aderência à tração, sendo (a) a colagem das pastilhas identificadas, (b) corte do entorno das pastilhas, (c) extração e (d) aspecto final dos corpos-de-prova	56
Figura 16 - Curvas granulométricas das CRLA-A e CRLA-B	59
Figura 17 - Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas para a determinação do índice de atividade pozolânica.....	61
Figura 18 - Quantidade de água das argamassas	65
Figura 19 - Fator água/cimento das argamassas	65
Figura 20 - Densidade de massa das argamassas no estado fresco.....	66
Figura 21 - Teor de ar incorporado das argamassas	67

Figura 22 - Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas.	68
Figura 23 - Resistência à tração na flexão das argamassas do traço T1	70
Figura 24 - Resistência à tração na flexão das argamassas do traço T2.....	70
Figura 25 - Resistência à compressão das argamassas do traço T1	72
Figura 26 - Resistência à compressão das argamassas do traço T2.....	72
Figura 27 - Resistência de aderência à tração das argamassas do traço T1.....	73
Figura 28 - Amostras de 100 mm x 100 mm retiradas das faixas de argamassas ensaiadas com teor de (a) 0%, (b) 5%, (c) 7%, (d) 10%, (e) 12%, e (f) 15% de substituição, para determinação da resistência de aderência à tração.....	74
Figura 29 - MEV em modo SE para a argamassa de referência T1A0 com aproximação de (a) x1000 e (b) x5000	75
Figura 30 - MEV em modo SE (5000x) para as argamassas (a) T1A5 e (b) T1A15 .	76
Figura 31 - MEV em modo SE para a argamassa de referência T2A0 com aproximação de (a) x1000 e (b) x5000	76
Figura 32 - MEV em modo SE (5000x) para as argamassas (a) T2A5 e (b) T2A15 .	77
Figura 33 - Difratoograma apresentando as fases identificadas para o traço T1A0....	78
Figura 34 - Difratoograma apresentando as fases identificadas para o traço T2A15..	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das argamassas	6
Tabela 2 - Componentes do cimento Portland	12
Tabela 3 - Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil	14
Tabela 4 - Exigências químicas para os cimentos Portland compostos	15
Tabela 5 - Exigências físicas para os cimentos Portland compostos	15
Tabela 6 - Exigências químicas para a cal hidratada	16
Tabela 7 - Exigências físicas para a cal hidratada	16
Tabela 8 - Exigências químicas para os materiais pozolânicos	21
Tabela 9 - Exigências físicas para os materiais pozolânicos.....	21
Tabela 10 - Limites de resistência de aderência à tração	30
Tabela 11 - Propriedades químicas do CP II F-32	39
Tabela 12 - Propriedades físicas do CP II F-32.....	39
Tabela 13 - Propriedades mecânicas do CP II F-32.....	39
Tabela 14 - Propriedades físicas da cal CH-I.....	40
Tabela 15 - Propriedades químicas da cal CH-I.....	40
Tabela 16 - Caracterização granulométrica e física da areia fina.....	41
Tabela 17 - Caracterização granulométrica e física da areia média.....	41
Tabela 18 - Formulação das argamassas	47
Tabela 19 - Caracterização química da CRLA-A.....	58
Tabela 20 - Caracterização química da CRLA-B.....	58
Tabela 21 - Finura dos componentes das argamassas.....	60
Tabela 22 - Massas específicas e unitárias dos componentes das argamassas	60
Tabela 23 - Traços, em massa, adotados para o ensaio de atividade pozolânica	61
Tabela 24 - Traço, em massa, para a confecção dos corpos-de-prova prismáticos .	63
Tabela 25 - Massa total e relações de massa entre as argamassas estudadas	63
Tabela 26 - Traço, em massa, para a confecção das faixas de argamassa	64
Tabela 27 - Classificação das argamassas segundo sua densidade de massa no estado fresco.....	66
Tabela 28 - Classificação das argamassas segundo sua densidade de massa aparente no estado endurecido.....	69

Tabela 29 - Classificação das argamassas segundo sua resistência à tração na flexão.....	71
Tabela 30 - Classificação das argamassas segundo sua resistência à compressão	73
Tabela 31 - Classificação das argamassas segundo sua resistência potencial de aderência à tração	75

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCP	Associação Brasileira de cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DRX	Difração de Raios-X
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CPs	Corpos-de-prova
CRLA	Cinza residual de lenha de algaroba
CTGÁS-ER	Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
GEF	Fundo Global para o meio ambiente (<i>Global Environment Facility</i>)
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
PIB	Produto Interno Bruto
RN	Rio Grande do Norte
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
T1A0	Argamassa de traço 1:3 sem adição de cinza (referência)
T1A5	Argamassa de traço 1:3 com substituição de 5% do cimento por cinza
T1A7	Argamassa de traço 1:3 com substituição de 7% do cimento por cinza
T1A10	Argamassa de traço 1:3 com substituição de 10% do cimento por cinza
T1A12	Argamassa de traço 1:3 com substituição de 12% do cimento por cinza
T1A15	Argamassa de traço 1:3 com substituição de 15% do cimento por cinza
T2A0	Argamassa de traço 1:2:8 sem adição de cinza (referência)
T2A5	Argamassa de traço 1:2:8 com substituição de 5% do cimento por cinza
T2A7	Argamassa de traço 1:2:8 com substituição de 7% do cimento por cinza
T2A10	Argamassa de traço 1:2:8 com substituição de 10% do cimento por cinza
T2A12	Argamassa de traço 1:2:8 com substituição de 12% do cimento por cinza
T2A15	Argamassa de traço 1:2:8 com substituição de 15% do cimento p/ cinza

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Argamassa	5
2.1.1 Classificação das argamassas	5
2.1.1.1 Argamassa de assentamento de alvenaria	7
2.1.1.2 Argamassa de revestimento	8
2.1.1.3 Argamassas quanto ao tipo de aglomerante.....	9
2.1.2 Materiais constituintes das argamassas	10
2.1.2.1 Aglomerantes.....	10
2.1.2.1.1 Cimento Portland	11
2.1.2.1.1.1 Produção do cimento.....	11
2.1.2.1.1.2 Hidratação do cimento.....	13
2.1.2.1.1.3 Tipos de cimento	14
2.1.2.1.2 Cal.....	15
2.1.2.2 Agregado miúdo.....	17
2.1.2.2.1 Classificação dos agregados	17
2.1.2.2.2 Agregados nas argamassas	18
2.1.2.3 Água.....	19
2.1.2.4 Adições Minerais.....	19
2.1.2.4.1 Material Pozolânico.....	20
2.1.2.4.2 Escória granulada de alto-forno	23
2.1.2.4.3 Adições inertes ou quase inertes (fíler).....	23
2.1.3 Propriedades das argamassas	25
2.1.3.1 Propriedades no estado fresco	25
2.1.3.1.1 Trabalhabilidade.....	25
2.1.3.1.2 Consistência e Plasticidade	25
2.1.3.1.3 Retenção de água.....	26
2.1.3.1.4 Densidade de massa	27
2.1.3.1.5 Aderência inicial.....	27
2.1.3.1.6 Retração por secagem.....	28
2.1.3.2 Propriedades no estado endurecido	28

2.1.3.2.1 Resistência mecânica	28
2.1.3.2.2 Aderência	29
2.1.3.2.3 Retração	30
2.1.3.2.4 Permeabilidade	31
2.1.3.2.5 Durabilidade	31
2.2 Cinzas como adições minerais aos produtos do cimento.....	32
2.2.1 Cinzas volantes	32
2.2.2 Cinza de casca de arroz (CCA)	33
2.2.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	34
2.2.4 Cinza residual de lenha	34
CAPÍTULO 3: PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	37
3.1 Caracterização dos componentes das argamassas.....	38
3.1.1 Cimento Portland.....	38
3.1.2 Cal	39
3.1.3 Agregados Miúdos.....	40
3.1.4 Água	41
3.1.5 Cinza residual de lenha de algaroba (CRLA)	42
3.1.5.1 Obtenção, armazenagem e beneficiamento	42
3.1.5.2 Análise química.....	43
3.1.5.3 Granulometria à laser.....	43
3.1.5.4 Ensaio de finura	44
3.1.5.5 Massa específica e massa unitária	44
3.1.5.6 Determinação do Índice de Atividade Pozolânica das cinzas	45
3.2 Formulação e preparo das argamassas.....	46
3.2.1 Definição dos traços das argamassas.....	46
3.2.2 Conversão dos traços em volume para em massa.....	47
3.2.3 Preparo das argamassas.....	48
3.3 Métodos de ensaios para a caracterização das argamassas.....	49
3.3.1 Argamassas no estado fresco	49
3.3.1.1 Determinação do Índice de Consistência.....	49
3.3.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado	50
3.3.2 Argamassas no estado endurecido	51
3.3.2.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido.....	51
3.3.2.2 Resistência à tração na flexão e à compressão.....	52

3.3.2.3 Resistência de aderência à tração.....	54
3.3.2.4 Caracterização microestrutural das argamassas e DRX.....	56
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1 Cinza residual de lenha de algaroba (CRLA).....	57
4.1.1 Análise química	57
4.1.2 Granulometria à laser	58
4.1.3 Ensaio de finura.....	59
4.1.4 Massa específica e massa unitária.....	60
4.1.5 Determinação do Índice de Atividade Pozolânica das cinzas.....	60
4.2 Argamassas	62
4.2.1 Conversão dos traços em volume para em massa.....	62
4.2.2 Propriedades no estado fresco.....	64
4.2.2.1 Índice de consistência e quantidade de água dos traços.....	64
4.2.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado	66
4.2.3 Propriedades no estado endurecido	67
4.2.3.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido.....	67
4.2.3.2 Resistência à tração na flexão e à compressão.....	69
4.2.3.3 Resistência de aderência à tração.....	73
4.2.3.4 Caracterização microestrutural e DRX.....	75
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES	79
CAPÍTULO 6: RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

CAPÍTULO 1

Introdução

O cimento Portland é o aglomerante hidráulico mais utilizado pela construção civil mundial, devido a sua facilidade de execução e possibilidade de moldagem em diversas formas. Sua produção aumentou em mais de 10 vezes durante a segunda metade do século XX, reativada pela reconstrução da Europa e do Japão no pós-guerra e depois estimulada pela tendência de urbanização global (COLEMAN, 2011). Estima-se que, em 2011, foram consumidos mundialmente cerca de 3,3 bilhões de toneladas de cimento (CIMENTO.ORG, 2011-1), enquanto que no Brasil foram 69 milhões de toneladas (CIMENTO.ORG, 2011-2), onde no país a tendência é aumentar ainda mais tendo em vista as obras para a Copa do Mundo de 2014. Tudo isso culminou para que o cimento Portland seja hoje considerado um dos insumos mais consumidos pela humanidade.

O consumo do cimento representa uma parcela significativa no orçamento final da obra, devido ao seu elevado custo, principalmente em locais onde o seu acesso é limitado, como na região Norte do país. Segundo Teixeira (2011), ele pode representar cerca de 7% a 9% do custo de uma obra residencial, sendo um valor muito alto para apenas um insumo. O consumo de argamassas nas obras brasileiras, por exemplo, segundo Souza e Franco (1997), citado por Santos (2008), chega a 0,145 m³ de argamassa por m² de construção, sendo a maior parte utilizada em revestimentos internos e externos e para o assentamento de alvenaria.

A elevação do consumo de cimento Portland desencadeou problemas ambientais, devido sua produção ter um alto consumo de energia e de matéria-prima, e responder por cerca de 5% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂), uma vez que a produção de cada tonelada de clínquer (produto de estrutura complexa que compõe a base do cimento) libera a mesma quantidade de CO₂ na atmosfera (CAPELLO, 2011), resultando na elevação da poluição ambiental causada pelo gás, considerado diretamente responsável pelo efeito estufa e por contribuir para o aceleração do aquecimento global. Assim, tornou-se comum a busca por alternativas para substituir o cimento, mesmo que parcialmente, em concretos e

argamassas. Esta procura intensificou-se ainda mais com o aumento da preocupação sobre os impactos ambientais causados pela eliminação de resíduos minerais gerados por diversos setores da indústria e da própria construção civil.

Devido a importância de se preservar o meio ambiente, a reciclagem dos resíduos minerais gerados pela indústria como matéria-prima alternativa tem crescido significativamente. A reciclagem é uma prática que data da antiguidade, mas, segundo Almeida (2006), foi apenas após a Conferência de Estocolmo, em 1972, onde se estabeleceu a Declaração dos Direitos do Meio Ambiente, que o mundo despertou para a causa ambiental. Hoje, cada vez mais a reciclagem e a reutilização dos resíduos vêm sendo pesquisada.

Os bens minerais têm grande importância para a sociedade, principalmente quando se pensa em qualidade de vida, uma vez que as necessidades básicas do ser humano são atendidas essencialmente por estes recursos. Buscando atender a necessidade pela reciclagem dos resíduos minerais, constatou-se que a construção civil é um dos ramos da atividade tecnológica com um enorme potencial para absorvê-los. A adição destes resíduos aos concretos e argamassas como aditivos, cargas ou aglomerantes influencia positivamente as propriedades químicas e mecânicas das matrizes cimentícias, além de promover a redução dos problemas ambientais causados pelo descarte deles no meio ambiente. Segundo Mehta e Monteiro (2008), e Netto (2006), para que a interação entre o cimento e o resíduo mineral adicionado desenvolva melhorias nas propriedades da matriz cimentícia, esse deve ter uma finura semelhante ou inferior ao do cimento e apresentar alguma reatividade pozolânica, onde esta ocorre quando o material possui significativa quantidade de sílica ativa (SiO_2) na sua fase amorfa.

O setor mineral tem destaque na economia do Rio Grande do Norte (RN), envolvendo a extração e o beneficiamento de cerca de 25 bens minerais, segundo avaliação feita em 2005 pelo governo do Estado, citado em notícia publicada pela Tribuna do Norte (2009), onde eles respondem por uma parcela expressiva na composição do produto interno bruto (cerca de 20% do PIB). Dentre os resíduos dos passivos minerais mais produzidos no Estado está a cinza residual de lenha proveniente da queima em fornos de olarias, onde, entre as lenhas mais utilizadas, pode-se citar a algaroba. Também conhecida como algarobeira, Silva (2011) a descreve como uma espécie vegetal arbórea muito comum no semi-árido

Nordestino, sendo originária dos Andes, no Peru. Além de utilizada como lenha, ela é usada para a confecção de móveis, portas, pisos e alimentos.

No Nordeste, segundo o GEF-Caatinga (programa desenvolvido na região pelo Fundo Global para o Meio Ambiente), citado por Bedinelli (2007), são consumidos pelas indústrias cerca de 13,5 milhões de metros cúbicos de lenha anualmente, o que representa 29% do consumo de madeira do país. As olarias são grandes consumidoras de madeira para uso em seus fornos de queima. Já o RN consome cerca de 1,2 milhões de metros cúbicos de lenha por ano, concentrando a maior quantidade de olarias na região do Seridó (JORNAL DE FATO, 2007). Isso indica uma elevada quantidade de cinza produzida, sendo muitas vezes descartada em valas abertas dentro do próprio terreno das olarias e sem uso comercial, gerando poluição atmosférica enquanto aguardam pelo descarte e podendo, num futuro próximo, prejudicar o meio ambiente.

As cinzas são resíduos minerais com grande potencial para serem adicionadas a concretos e argamassas em substituição parcial do cimento, uma vez que a maior parte delas apresenta em sua composição química Ca, Si, Fe e Al, que são os principais componentes do clínquer.

Estudos com diversas cinzas são realizados no Brasil (BORLINI *et al.*, 2005; CAMELO *et al.*, 2005; CORDEIRO *et al.*, 2007; CORDEIRO *et al.*, 2009; LIMA; ROSSIGNOLO, 2009; PAULA *et al.*, 2009; SOUZA *et al.*, 2007; MELO, 2012) e no mundo (CRUZ-YUSTA *et al.*, 2011; NAIK *et al.*, 2001; NAIK *et al.*, 2003; SANI *et al.*, 2011; SIDDIQUE, 2008; YANG *et al.*, 2009), para comprovar tal potencial e avaliar a adição destas aos materiais cimentícios. A mais analisada é a cinza da casca de arroz (KIELING; CAETANO, 2009; RODRIGUES; BERALDO, 2010; POUHEY *et al.*, 2007). Muitas cinzas podem atuar como elementos reativos que, quando associados ao cimento Portland, propiciam um melhor desempenho à matriz cimentícia, resultando em melhoria nas suas propriedades. E mesmo as menos reativas podem ser adicionadas como cargas.

A substituição parcial do cimento Portland em concreto e argamassas promove a diminuição do seu consumo e, conseqüentemente, do custo final da obra e da sua produção, reduzindo parcialmente as enormes emissões de CO₂ que seu processo de produção emite na atmosfera. Além disso, a incorporação de resíduos nos derivados do cimento, como a cinza residual de lenha de algaroba (CRLA), promove

a reutilização destas, evitando seu descarte no meio ambiente e possíveis consequências poluidoras.

Este trabalho tem como objetivo principal analisar as propriedades, no estado fresco e endurecido, de argamassas com substituição parcial do cimento Portland, em volume e percentuais definidos na análise, pela CRLA produzida pelas olarias do RN, visando minimizar os possíveis impactos ambientais causados pelo acúmulo do resíduo no meio ambiente, promovendo a sua integração na construção civil e, assim, tentar melhorar as propriedades e o desempenho das argamassas.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Caracterizar a CRLA;
- Definir diferentes percentuais de substituição da CRLA para a produção de argamassas;
- Analisar, através de ensaios, o comportamento no estado fresco e endurecido de argamassas produzidas com diferentes percentuais de substituição do cimento Portland pelo resíduo;
- Analisar a microestrutura da argamassa com a adição do resíduo.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

2.1 Argamassa

Segundo a NBR 13281 (2005), argamassa é uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria. Os seus traços e características dependem do tipo de aplicação para a qual será utilizada.

2.1.1 Classificação das argamassas

A NBR 13281 (2005) classifica as argamassas de acordo com a sua aplicação:

a) Argamassas para assentamento:

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

b) Argamassas para revestimento de paredes e tetos:

- Argamassa para revestimento interno: indicada para revestimento de ambientes internos da edificação, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única);
- Argamassa para revestimento externo: indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos da edificação em contato com o

meio externo, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).

- c) Argamassa de uso geral: indicada para assentamento de alvenaria sem função estrutural e revestimento de paredes e tetos internos e externos.
- d) Argamassa para reboco: indicada para cobertura de emboço, propiciando uma superfície fina que permita receber o acabamento; também denominada de massa fina.
- e) Argamassa decorativa em camada fina: argamassa de acabamento indicada para revestimento com fins decorativos, em camada fina.
- f) Argamassa decorativa em monocamada: argamassa de acabamento indicada para revestimentos de fachadas, muros e outros elementos de edificações em contato com o meio externo, aplicada em camada única e com fins decorativos.

Segundo a NBR 13530 (1995), elas ainda podem ser classificadas com relação a vários critérios, sendo alguns deles citados na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das argamassas

Critério	Tipo
Quanto à natureza do aglomerante	Argamassa aérea Argamassa hidráulica
Quanto ao tipo do aglomerante	Argamassa de cal Argamassa de cimento Argamassa de cimento e cal
Quanto ao número de aglomerantes	Argamassa simples Argamassa mista
Propriedades especiais	Argamassa Aditivada Argamassa de aderência melhorada Argamassa colante Argamassa redutora de permeabilidade Argamassa de proteção radiológica Argamassa hidrófuga Argamassa termoisolante
Função no revestimento	Argamassa de chapisco Argamassa de emboço Argamassa de reboco
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	Argamassa preparada em obra Mistura semipronta para argamassa Argamassa industrializada Argamassa dosada em central

Fonte: NBR 13530, 1995.

As argamassas mais utilizadas na construção civil são as empregadas para o assentamento de alvenaria e as argamassas de revestimento. No Rio Grande do Norte, é comum a utilização de revestimentos prontos (argamassa industrializada) para o acabamento e pintura de fachadas, sendo preparados sobre superfícies planas com revestimentos de cimento (reboco). Soma-se a isso a larga utilização de tijolos cerâmicos para alvenaria de vedação, assentados com argamassas mistas de cal e cimento.

2.1.1.1 Argamassa de assentamento de alvenaria

As argamassas de assentamento são utilizadas para a elevação de paredes de tijolos ou blocos. De acordo com Carasek (2007), as principais funções das juntas de argamassas de alvenaria são:

- Unir as unidades da alvenaria numa única estrutura, contribuindo na resistência aos esforços laterais;
- Distribuir uniformemente todas as cargas que atuam sobre a parede;
- Selar as juntas garantindo a estanqueidade da parede;
- Absorver as deformações naturais, como de origem térmica e de retração, que a alvenaria estiver sujeita.

Para cumprir com tais funções e obter um bom desempenho, elas devem apresentar as seguintes propriedades (SABBATINI, 1986):

- Trabalhabilidade;
- Capacidade de retenção de água;
- Aderência à base;
- Resistência mecânica inicial;
- Durabilidade;
- Capacidade de absorver deformações.

A escolha do tipo de argamassa poderá, também, ser baseada no tipo de elemento a ser assentado, ou em normas construtivas ou, ainda, de acordo com os esforços a serem suportados pela alvenaria (FIORITO, 2003).

2.1.1.2 Argamassa de revestimento

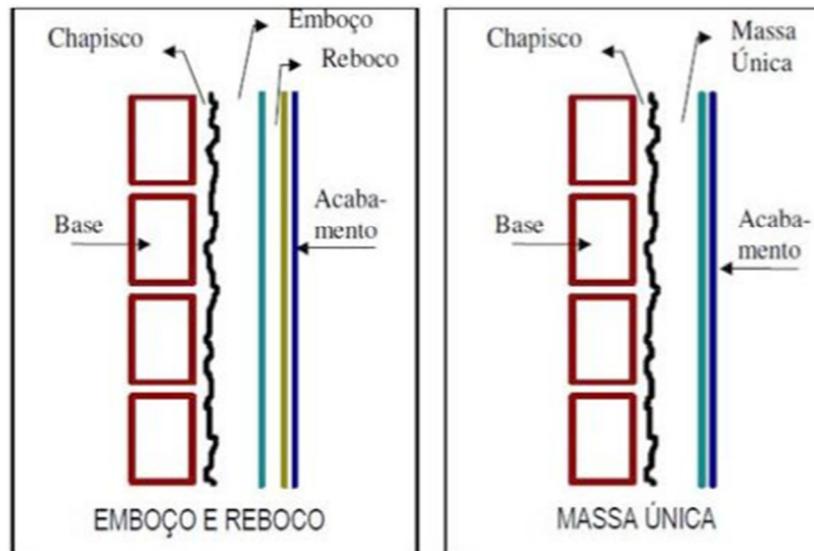
As argamassas de revestimento são utilizadas para revestir paredes e tetos, onde os quais podem receber posterior acabamento como pintura, revestimentos cerâmicos, papéis de parede, laminados, etc.

A NBR 13529 (1995) define o sistema de revestimento como um conjunto formado pela argamassa de revestimento e o acabamento decorativo, compatível com a natureza da base sobre a qual será aplicada, as condições de exposição, o acabamento final e o desempenho, seguindo o previsto em projeto.

Os revestimentos de argamassas podem ser classificados com relação ao seu número de camadas de duas formas: única camada, sendo denominado de massa única ou “reboco paulista”; e duas camadas, denominado emboço e reboco (BAÍA; SABBATINI, 2000). Cada camada do revestimento tem as suas características e funções, sendo descritos abaixo (CARASEK, 2007) e esquematizados na Figura 1:

- Chapisco: camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou não, com o fim de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência. O chapisco ainda pode ser usado como acabamento, onde para tal é aplicado sobre a superfície utilizando-se uma tela a fim de obter um acabamento mais homogêneo;
- Emboço: camada executada para cobrir e regularizar a base, propiciando uma superfície que possa receber outra camada, seja de reboco ou revestimento decorativo;
- Reboco: camada executada para o cobrimento do emboço, propiciando uma superfície que possa receber revestimento decorativo ou acabamento final;
- Camada única: revestimento de um único tipo de argamassa aplicado à base, sobre o qual é aplicada uma camada decorativa, como a pintura. Também é popularmente chamada “massa única” ou “reboco paulista”.

Figura 1 - Camadas das argamassas de revestimento



Fonte: BAÍA; SABBATINI, 2000.

As argamassas de revestimento devem apresentar as seguintes características (CINCOTTO *et al.*, 1995):

- Estabilidade mecânica e dimensional, e resistência ao fogo;
- Contribuir para a estanqueidade da parede, constituindo-se em uma barreira à penetração da água;
- Contribuir para o conforto higrotérmico e acústico do ambiente;
- Regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo com a estética da edificação;
- Verificar a contribuição da base para o desempenho antes da aplicação;
- Apresentar compatibilidade entre os seus materiais constituintes e os da base onde será aplicada.

2.1.1.3 Argamassas quanto ao tipo de aglomerante

Como apresentado na Tabela 1, a NBR 13530 (1995) classifica as argamassas com relação ao tipo de aglomerante em:

- Argamassa com cal: é composta por cal, agregado miúdo e água, que formam uma mistura pastosa capaz de penetrar nos vazios e reentrâncias dos blocos construtivos, cimentando-os pelo processo de recristalização dos hidróxidos e de sua reação com o anidrido carbônico do ar. A cal dá à argamassa uma boa trabalhabilidade e uma melhor capacidade de retenção de água, entretanto apresenta baixa resistência mecânica (GUIMARÃES, 2002);
- Argamassa com cimento: é composta por cimento Portland, agregado miúdo e água, tendo como características a baixa trabalhabilidade e retenção de água, estando mais propensa à retração, mas possui alta resistência mecânica inicial. É usada principalmente para a confecção do chapisco ou reboco, mas sendo pouco usada para revestimentos (SILVA, 2006);
- Argamassa mista com cimento e cal: é composta pelo cimento, a cal, o agregado miúdo e água, tendo as características dos dois aglomerantes. A cal contribui para a plasticidade e retenção de água da argamassa, enquanto que o cimento contribui com uma maior resistência.

2.1.2 Materiais constituintes das argamassas

As argamassas usadas em obra geralmente são compostas por areia natural lavada com granulometrias que variam dependendo da sua aplicação, e usam como aglomerantes o cimento Portland e a cal hidratada. Elas ainda podem ter adições na forma de aditivos ou adições minerais.

2.1.2.1 Aglomerantes

Segundo Araújo *et al.* (2000), aglomerantes são materiais ativos, ligantes, em geral pulverulentos, cuja principal função é formar uma pasta que promove a união entre os grãos do agregado. São utilizados para a obtenção das argamassas e dos concretos, na forma da própria pasta e também na confecção de natas.

Os aglomerantes podem ser classificados, quanto ao seu princípio ativo, em:

- **Aéreos:** são aglomerantes inorgânicos que, após o acréscimo de água, endurecem pela ação química do CO_2 no ar, tendo-se como exemplo a cal e o gesso;
- **Hidráulicos:** são aglomerantes inorgânicos que endurecem pela ação exclusiva da água através das reações de hidratação, apresentando boa resistência final. Tem como principal representante o cimento Portland.

2.1.2.1.1 Cimento Portland

De acordo com Neville (1997), cimento pode ser considerado todo material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compactado. Já para Mehta e Monteiro (2008), o cimento é um material seco, finamente pulverizado, que por si só não é um aglomerante, mas desenvolve propriedades aglomerantes como resultado da sua hidratação.

O cimento mais utilizado hoje pelo mercado é o do tipo Portland, que consiste essencialmente de silicatos reativos de cálcio, alumina e óxido de ferro. Eles são os responsáveis pela característica adesiva e estabilidade do cimento em meio aquoso, quando hidratado. O calcário e argila são as principais matérias-primas do cimento, sendo as fontes de cálcio e sílica necessárias para a formação de seus compostos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

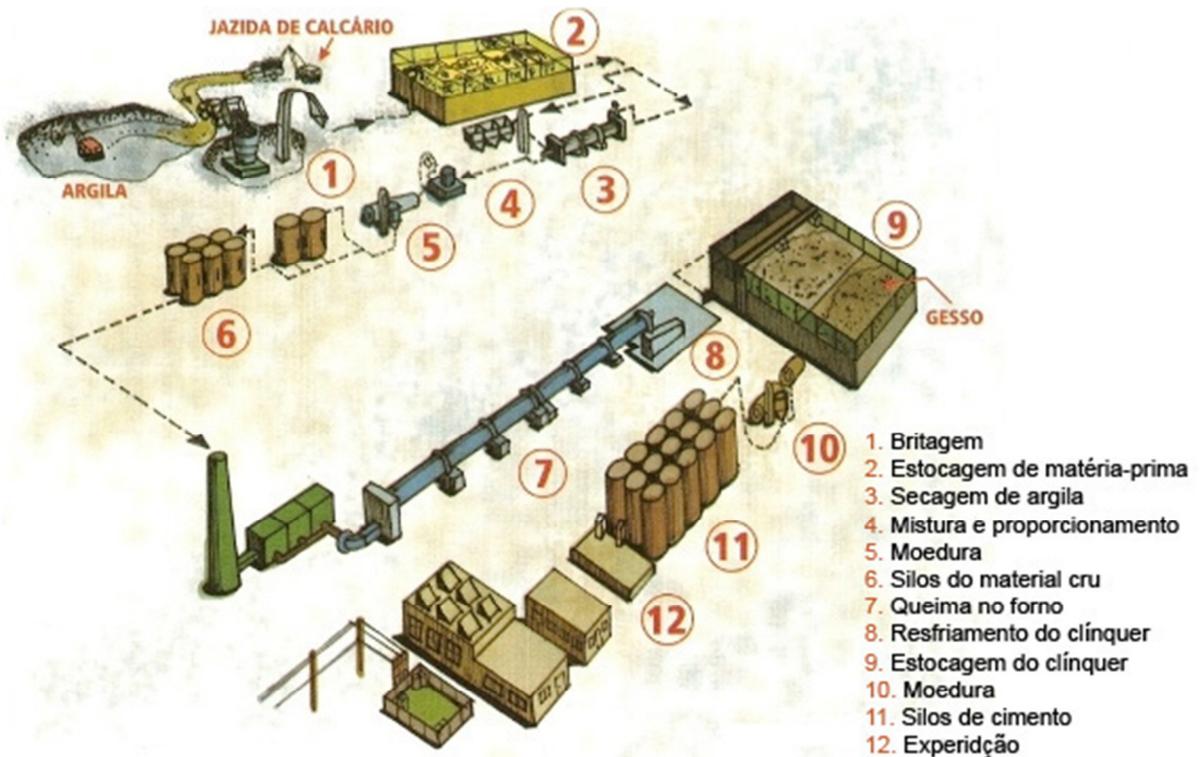
2.1.2.1.1.1 Produção do cimento

O processo de fabricação do cimento Portland pode ser feito de duas formas: por via úmida ou seca; sendo a mais usada a por via seca, pois é a que possui a melhor eficiência energética. O processo em si consiste essencialmente em moer as matérias-primas, misturá-las intimamente nas proporções adequadas e queimar sua mistura em um grande forno rotativo até alcançar temperaturas de cerca de 1450°C , resultando num subproduto de estrutura complexa, denominado clínquer (NEVILLE, 1997). A este procedimento dá-se o nome de clinquerização.

O clínquer é composto por nódulos de 5 mm a 25 mm de diâmetro de material sintetizado (BAUER, 2000).

Após o resfriamento do clínquer, ele é moído até se tornar um pó bem fino, de diâmetro entre 10 e 15 μm , sendo então adicionado um pouco de gesso, resultando no cimento Portland comercial utilizado em todo o mundo. A Figura 2 apresenta um esquema deste processo.

Figura 2 - Fluxograma do processo de produção do cimento Portland via seca



Fonte: adaptado de CONSTRUFÁCIL, 2009.

A Tabela 2 apresenta as principais matérias-primas do cimento Portland, na forma de óxidos, e os compostos formados durante o seu processo de produção.

Tabela 2 - Componentes do cimento Portland

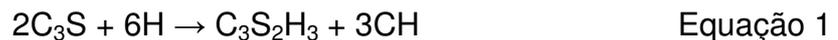
Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
SiO_2	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Al_2O_3	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Fe_2O_3	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
MgO	M	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$
SO_3	S	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
H_2O	H	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2

Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008.

2.1.2.1.1.2 Hidratação do cimento

O cimento Portland só atua como aglomerante quando misturado à água, onde ocorre a sua hidratação. Metha e Monteiro (2008) explicam que há dois mecanismos de hidratação, sendo o primeiro o de dissolução-precipitação, que predomina nos primeiros momentos da hidratação e onde ocorre a dissolução dos compostos anidros em seus constituintes iônicos e a formação de hidratos na solução; já o segundo mecanismo é o da hidratação no estado sólido, onde as reações ocorrem diretamente na superfície dos compostos do cimento anidro sem entrarem em solução.

Como resultado da hidratação do cimento, são formados principalmente dois compostos, conforme apresentado na Equação 1 e Equação 2.



- $C_3S_2H_3$ ou C-S-H (silicatos de cálcio hidratados): são pequenos cristais fibrilares de composição química variada e que representam cerca de 50 a 60% do volume dos sólidos da pasta de cimento, sendo o principal produto para a determinação das propriedades da pasta e por sua resistência quando endurecida;
- C-H (hidróxido de cálcio): constitui cerca de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada e apresenta uma estrutura bem definida. Sua contribuição para resistência mecânica é limitada devido a sua grande superfície específica e ainda contribui negativamente na estabilidade química do composto.

A hidratação do aluminato tricálcico (C_3A) e do ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) produzem praticamente os mesmos compostos, quando hidratados na presença de sulfatos. Dependendo da concentração de aluminato e de íons sulfato na solução, o produto cristalino de precipitação pode ser o trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita), que se cristaliza em pequenas agulhas prismáticas ou o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm), que se cristaliza em placas hexagonais (TAYLOR, 1997).

A etringita é geralmente o primeiro hidrato a cristalizar-se e contribui para o endurecimento, pega e desenvolvimento da resistência inicial da pasta. Após o sulfato na solução ter sido consumido, a concentração de aluminato se eleva novamente e a etringita torna-se instável, sendo gradativamente convertida para AFm e impedindo a formação de C-S-H. Esta instabilidade torna o sistema frágil e provoca o surgimento de poros (TAYLOR, 1997).

2.1.2.1.1.3 Tipos de cimento

Há diversos tipos de cimento Portland comercializados hoje. No Brasil, existem oito tipos básicos normalizados e que são comercializados com diferentes subtipos, totalizando mais de duas dezenas de opções e com várias aplicações (BATTAGIN, 2011). A escolha do melhor tipo de cimento para determinado serviço requer o bom conhecimento das suas características. A Tabela 3 apresenta um resumo dos diversos tipos de cimento vendidos no mercado.

Tabela 3 - Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil

Nome técnico do cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário
Comum	CP I	25, 32, 40	100		0	
Comum com adição	CP I-S	25, 32, 40	99-95		1-5	
Composto com escória	CP II-E	25, 32, 40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com pozolana	CP II-Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Fíler	CP II-F	25, 32, 40	94-90	0	0	6-10
Alto-forno	CP III	25, 32, 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CP IV	25, 32	85-45	0	15-50	0-5
Alta resistência inicial	CP V-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a sulfatos	RS	25, 32, 40	A composição depende do tipo original do qual é derivado			
Baixo calor de Hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Fonte: BATTAGIN, 2011, p. 207.

Entre os cimentos Portland mais utilizados no país destacam-se os compostos (CP II-E, CP II-Z, CP II-F). A NBR 11578 (1991) especifica as exigências físicas e químicas destes cimentos, conforme apresentado nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Exigências químicas para os cimentos Portland compostos

Propriedades	Limites		
	CP II-E	CP II-Z	CP II-F
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 2,5	≤ 16,0	≤ 2,5
Perda ao fogo (PF)	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 6,5
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 4,0
Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 5,0	≤ 5,0	≤ 5,0

Fonte: NBR 11578, 1991.

Tabela 5 - Exigências físicas para os cimentos Portland compostos

Propriedades		Unid.	Limites de classe		
			25	32	40
Finura	Peneira 0,075 mm	%	≤ 12	≤ 12	≤ 10
(%retida acumulada)	Área específica	m ² /kg	≥ 240	≥ 260	≥ 260
	Tempo de início de pega	h	≥ 1	≥ 1	≥ 1
	Expansibilidade a quente	mm	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	≥ 8	≥ 10	≥ 15
	7 dias de idade	MPa	≥ 15	≥ 20	≥ 25
	28 dias de idade	MPa	≥ 25	≥ 32	≥ 40

Fonte: NBR 11578, 1991.

2.1.2.1.2 Cal

A cal é o aglomerante mais antigo utilizado pela humanidade, sendo o único usado, combinado ou não com pozolanas, na construção exposta às intempéries antes da invenção do cimento Portland.

Trata-se de um aglomerante aéreo, produzido a partir de rochas calcárias, composto basicamente de cálcio e magnésio e se apresentado na forma de um pó esbranquiçado muito fino. Ela possui baixa resistência à exposição continuada à água. A construção civil basicamente utiliza dois tipos: a cal virgem e a hidratada (CINCOTTO *et al.*, 2007).

A NBR 6453 (2003) explica que a cal virgem é o produto obtido da calcinação de carbonatos de cálcio e/ou magnésio, constituído essencialmente de uma mistura de óxidos de cálcio e óxidos de magnésio, ou ainda uma mistura de óxido de cálcio, óxido de magnésio e hidróxido de cálcio. Segundo Guimarães (2002), ela nasce com uma estrutura cristalina, em cristais isolados ou conglomerados cristalinos, de dimensões e espaços intercristalinos variados, observáveis só por microscopia.

A cal hidratada, segundo a NBR 7175 (2003), é um pó seco obtido pela hidratação de cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio e

hidróxido de magnésio, ou, ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. Guimarães (2002) explica que a reação química que produz a cal hidratada em presença da água é uma reação de fases sólido-líquida. Dependendo do volume de água usada para a areação, o produto final pode ser seco ou com aspectos de creme, lama, leite ou solução saturada.

A cal hidratada é mais comumente usada na construção civil que a cal virgem, principalmente para a confecção de argamassas (CINCOTTO *et al.*, 2007). No Brasil há três tipos de cal hidratada, normatizadas pela NBR 7175 (2003) e apresentadas nas Tabelas 6 e 7 conforme suas exigências químicas e físicas.

Tabela 6 - Exigências químicas para a cal hidratada

Propriedades	Limites		
	CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂) Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis	≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: NBR 7175, 2003.

Tabela 7 - Exigências físicas para a cal hidratada

Propriedades	Limites		
	CH-I	CH-II	CH-III
Finura			
Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
(%retida acumulada) Peneira 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água	≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia	≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade	Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade	≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: NBR 7175, 2003.

No estado fresco, a cal propicia uma maior plasticidade para a argamassa, permitindo melhor trabalhabilidade e, conseqüentemente, maior produtividade na sua aplicação. Outra propriedade é a retenção de água, importante no desempenho da argamassa por não permitir a sucção excessiva de água pela alvenaria. No estado endurecido, a cal atua contendo a retração provocada pela hidratação do cimento, nas argamassas mistas, gerando menor variação dimensional, além de carbonatar lentamente ao longo do tempo, tamponando eventuais fissuras ocorridas no endurecimento (GUIMARÃES, 2002).

2.1.2.2 Agregado miúdo

A NBR 7225 (1993) define o agregado como um material de propriedades adequadas, natural ou obtido por fragmentação artificial de rochas, de dimensão nominal máxima inferior a 100 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm. Dentro dessa faixa de graduação, eles ainda podem ser divididos em agregados graúdos e miúdos, sendo 4,8 mm o limite de graduação entre esses dois grupos. Entre os agregados graúdos estão as britas e entre os miúdos as areias, sendo estes últimos os utilizados nas argamassas.

O agregado miúdo é definido pela NBR 7211 (1983) como sendo uma areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,8 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm.

2.1.2.2.1 Classificação dos agregados

Quanto a sua origem mineralógica, os agregados são divididos em (FARIAS; PALMEIRA, 2007):

- Rochas ígneas ou magmáticas: são formadas pela consolidação do magma através do resfriamento, sendo chamadas de extrusivas quando resfriadas na superfície (basalto), ou intrusivas quando o resfriamento ocorre em grandes profundidades (granito). Podem apresentar estrutura cristalina ou amorfa, onde quanto mais rápido o resfriamento menos cristalina será sua estrutura;
- Rochas sedimentares: são formadas a partir da sedimentação de outras rochas erodidas (sendo chamadas de clássicas ou detríticas), ou pela precipitação de substâncias em solução (sendo as rochas sedimentares químicas), ou através da deposição de materiais de origem orgânica (não sendo interessantes para a construção civil). Entre as rochas mais utilizadas deste tipo estão a areia (agregado miúdo), o silte e a argila;
- Rochas metamórficas: são formadas a partir de outros tipos de rochas, quando submetidas a elevadas temperaturas e pressão no interior da terra, num processo denominado metamorfismo. As suas características

dependem das rochas que a formaram. Como maior representante está o mármore.

Quanto à sua origem, os agregados são classificados em (SILVA, 2006):

- Naturais: já encontrados na natureza sob a forma definitiva de utilização (provenientes de leitos de rios e de cava);
- Artificiais: são os que necessitam de modificação textual para chegar à condição adequada para sua utilização, como é o caso da areia de origem da britagem das rochas como basalto, calcário, dentre outras.

Com relação as suas dimensões, a NBR 7225 (1993) as diferencia em areias em três tipos de graduação:

- Areia grossa: aquela compreendida entre 2,4 e 1,2 mm de diâmetro;
- Areia média: aquela compreendida entre 1,2 e 0,42 mm de diâmetro;
- Areia fina: aquela compreendida entre 0,42 e 0,075 mm de diâmetro;

2.1.2.2.2 Agregados nas argamassas

O agregado miúdo é a parte inerte das argamassas, não participando de suas reações químicas de endurecimento, mas interfere, no estado fresco, a composição granulométrica e formato dos grãos na trabalhabilidade e retenção de água e, no estado endurecido, nas resistências mecânicas, na capacidade de deformação e na permeabilidade (CARNEIRO; CINCOTTO, 1999). Em argamassas de cal, ele pode facilitar a penetração do CO_2 , necessário para a recarbonatação do hidróxido de cálcio (ISHIKAWA, 2003).

Na produção de argamassas podem ser usadas areias naturais e artificiais, sendo esta última mais utilizada para a produção das argamassas industrializadas. Sugere-se que a escolha de uma areia deva ser baseada em uma granulometria contínua, com uma dimensão máxima característica adequada ao tipo de argamassa a qual será utilizada (TRISTÃO, 1995).

Segundo Carneiro e Cincotto (1999), se o agregado miúdo for muito uniforme, independente do formato de seus grãos, a trabalhabilidade da argamassa pode ser comprometida, havendo um enrijecimento e impedindo o deslizamento dos grãos de areia entre si, demandando maior consumo de pasta.

2.1.2.3 Água

A água é responsável por promover a hidratação dos aglomerantes das argamassas e influencia diretamente a sua trabalhabilidade. A sua quantidade deve garantir uma boa trabalhabilidade e que toda a mistura seja hidratada, evitando a segregação dos seus constituintes.

2.1.2.4 Adições Minerais

A indústria do cimento é atualmente considerada uma das maiores poluidoras do meio ambiente, devido seu grande consumo de jazidas de matéria-prima e suas altas taxas de liberação de CO₂ na atmosfera. Estima-se que para cada tonelada de clínquer a mesma quantidade de CO₂ seja produzida (CAPELLLO, 2011).

Segundo o SNIC e a ABCP, citados pela CETESB (2010), em escala mundial, aproximadamente 90% das emissões de CO₂ oriundas da fabricação do cimento ocorrem durante a produção do clínquer, seja na calcinação ou descarbonatação da matéria-prima, seja na queima de combustíveis no interior dos fornos. A Equação 3 mostra como ocorre a descarbonatação do calcário (CaCO₃), matéria-prima utilizada para a produção do cálcio (CaO) necessário à produção do clínquer.



Equação 3

Desta forma, não é incomum pensar em alternativas para substituir o cimento de seus derivados, a fim de diminuir o seu consumo e produção, sendo as adições minerais a alternativa mais utilizada hoje em dia.

Adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, sendo materiais que apresentam atividade pozolânica ou propriedades cimentantes, que podem ser adicionados às argamassas ou aos concretos visando melhorar suas propriedades (METHA; MONTEIRO, 2008). Sob a perspectiva ambiental, elas atuam reduzindo a

produção do cimento e as suas emissões específicas de gases de efeito estufa na atmosfera, como o CO_2 , e o consumo prematuro das jazidas de calcário, além de contribuírem para a reciclagem de rejeitos industriais (BATTAGIN, 2011).

As adições minerais usadas hoje geralmente são resíduos provenientes de outras indústrias, que normalmente seriam descartados em grandes quantidades e sem fim algum, gerando riscos de poluição do meio ambiente. Suas incorporações aos produtos do cimento resultam na produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas (DAL MOLIN, 2011). Ainda segundo a autora, as adições minerais, quanto a sua ação físico-química, podem ser classificadas como:

- Material pozolânico: materiais silicosos ou silico-aluminosos finamente divididos que, quando e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes;
- Material cimentante: não necessita de hidróxido de cálcio presente no cimento para formar produtos como o C-S-H. Entretanto, a sua auto-hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para a aplicação do material com fins estruturais. É representado pela escória granulada de alto forno;
- Fíler: material finamente dividido sem atividade química, com sua ação resumindo-se a efeito físico de empacotamento granulométrico e como pontos de nucleação para a hidratação do cimento.

2.1.2.4.1 Material Pozolânico

De acordo com Netto (2006), a pozolana é um material natural ou artificial que contém sílica (SiO_2) em forma reativa (sílica em estado amorfo). Numa definição mais formal, dado pela NBR 12653 (1992), as pozolanas são materiais silicosos ou silico-aluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos de propriedades aglomerantes, sendo esta sua principal propriedade.

A mesma norma classifica estes materiais segundo três classes:

- Classe N: são as pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico, *cherts* silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- Classe C: são as cinzas volantes, produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas;
- Classe E: é qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido na mesma norma.

A divisão nestas três classes depende de características químicas e físicas pré-estabelecidas e que definem parâmetros mínimos para o material ser considerado pozolânico, conforme apresentado pelas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Exigências químicas para os materiais pozolânicos

Propriedades	Classe do material		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + CaO (% mínima)	70	70	50
SO ₃ (% máxima)	4	4	5
Teor de umidade (% máxima)	3	3	3
Perda ao fogo (% máxima)	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O (% máxima)	1,5	1,5	1,5

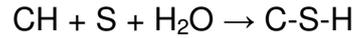
Fonte: NBR 12653, 1992.

Tabela 9 - Exigências físicas para os materiais pozolânicos

Propriedades	Classe do material		
	N	C	E
Material retido na peneira #325	34	34	34
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias (% mínima)	75	75	75
Índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias (MPa)	6	6	6
Água requerida (% máxima)	115	110	110

Fonte: NBR 12653, 1992.

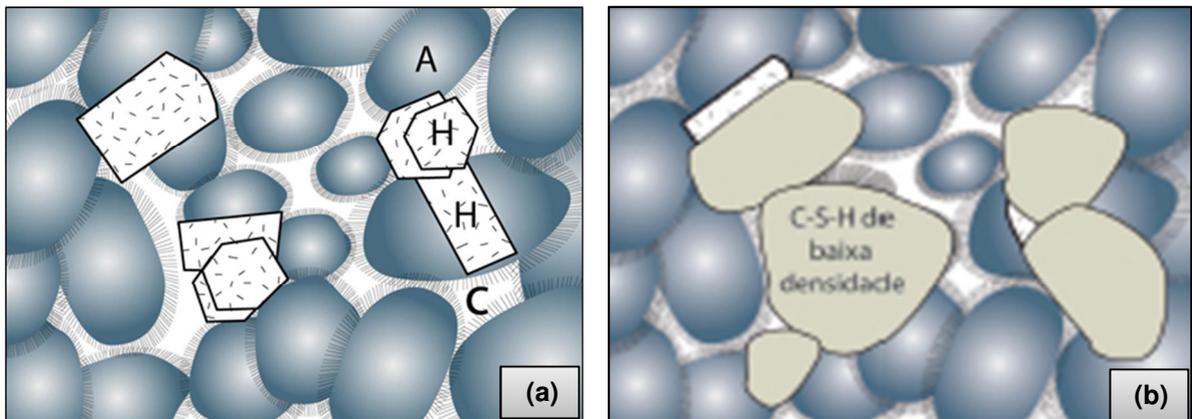
A reação pozolânica ocorre devido à reação entre a cal (básica) e os óxidos (ácidos) da pozolana, que são os maiores responsáveis pela melhoria das características técnicas no material cimentício. Sua principal reação, que ocorre lentamente, envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), similar ao produzido pela hidratação dos silicatos de cálcios do cimento Portland, apresentados nas Equações 1 e 2, sendo descrita na Equação 4 (METHA; MONTEIRO, 2008):



Equação 4

Pode-se visualizar na Figura 3 um esquema de duas pastas de cimento bem hidratadas, onde: (3a) cimento sem adições e (3b) com adição de pozolana. Em 3a, “A” representa a agregação de partículas de C-S-H pouco cristalinas, “H” representa produtos cristalinos hexagonais na forma de grandes cristais, com largura característica de 1 µm, e “C” representa cavidades capilares e vazios, que variam de 10 nm a 1 µm, e que ocorrem quando os espaços originalmente ocupados com água não estão completamente preenchidos com os produtos da hidratação do cimento. Em 3b, mostra-se que, como resultado da reação pozolânica, os vazios capilares foram eliminados ou reduzidos em tamanho, e os cristais de hidróxido de cálcio foram substituídos por C-S-H adicional de baixa densidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 3 - Representação esquemática da microestrutura do cimento hidratado (a) sem adições e (b) com adição de pozolana



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 28 (a), p. 238 (b).

As reações pozolânicas possuem três aspectos relevantes. Primeiro, elas são lentas, liberando calor (sendo assim exotérmicas) e desenvolvendo sua resistência também lentamente, chegando ao seu valor final aos 91 dias, diferentemente das pastas apenas com cimento, que obtêm 90 a 96% da sua resistência final aos 28 dias. Segundo, a sua reação consome o CaOH ao invés de produzi-lo, aumentando a durabilidade da pasta. Terceiro, os produtos da reação são eficientes em fechar os poros capilares, como apresentado na Figura 3b, melhorando a resistência e impermeabilidade final da pasta, e fortalecendo a zona de transição na interface (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Entretanto, Netto (2006) afirma que, mesmo com as vantagens citadas, o uso deste material apresenta também certas desvantagens. Exemplo disso é a exigência do uso de aditivos redutores de água em função do aumento da demanda de água nas misturas e a necessidade de cura adequada para que a reação pozolânica aconteça em sua plenitude.

2.1.2.4.2 Escória granulada de alto-forno

Escória de alto forno é um resíduo não-metálico proveniente da produção do ferro-gusa (REPETTE, 2007). A NBR 5753 (1991) define a escória de alto forno como um subproduto do tratamento de minério de ferro sob a forma granulada por resfriamento brusco, constituído em sua maior parte de silicatos e aluminosilicatos de cálcio. Estes componentes são os mesmos do cimento Portland, porém estão em proporções diferentes na escória.

A escória é formada pela fusão de impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes, como o calcário e a dolomita, e a cinza do coque. Ela acaba sobrenada no ferro-gusa, devido a sua insolubilidade e menor densidade, e é conduzida por canais até o local de resfriamento, saindo do forno a temperaturas de 1350 e 1500°C. Ela é então resfriada bruscamente, formando assim um material de fase amorfa e potencialmente reativo, se tornando a escória granulada de alto forno usada após ser finamente moída (DAL MOLIN, 2011). Repette (2007) explica que quanto mais fina for a escória, mais reativa ela tende a ser, apresentando um melhor desempenho na suas reações de hidratação.

De acordo com Dal Molin (2011), a escória já é tradicionalmente adicionada na fabricação de cimentos. A NBR 5753 (1991) define um tipo de cimento que permite a substituição parcial, em massa, do clínquer pela escória (CP III; cimento Portland de alto forno). Entretanto, ela pode ser usada diretamente com o cimento.

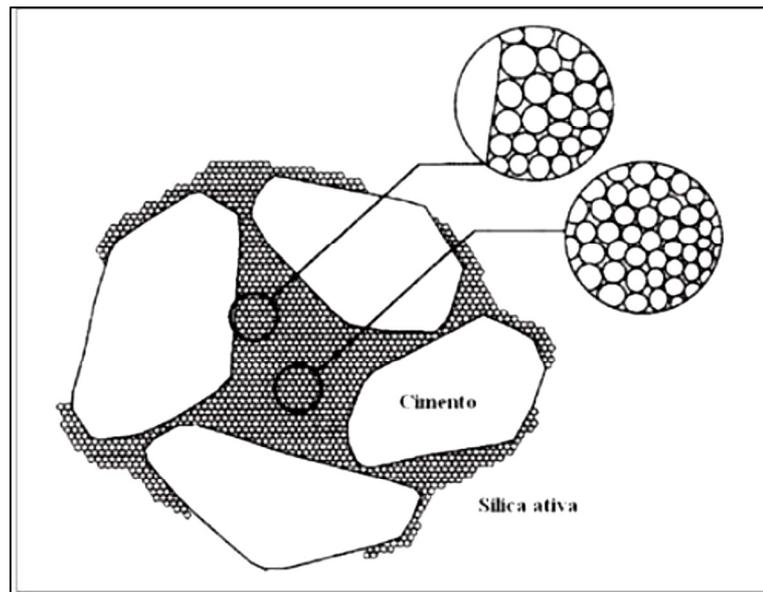
2.1.2.4.3 Adições inertes ou quase inertes (fíler)

O fíler é um material finamente dividido, com diâmetro médio próximo ao do cimento que, em decorrência da sua ação física, melhora algumas características de concretos e argamassas, quando presente em quantidades inferiores a 15% da

massa de cimento. Entre as propriedades melhoradas, cita-se a trabalhabilidade, a massa específica, a permeabilidade e tendência de fissuração (DAL MOLIN, 2011).

Melo (2012) explica que geralmente se utiliza calcário finamente moído como fíler a ser adicionado ao cimento, tendo a capacidade de melhorar a distribuição das partículas e preenchendo os vazios entre os grãos do clínquer, melhorando o empacotamento e resistência do sistema, como pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 - Efeito fíler dos aditivos minerais



Fonte: Aiticin (2008), citado por Melo (2012).

Mesmo sendo usualmente tratado como material inerte, o fíler pode apresentar alguma atividade hidráulica ou participar quimicamente de algumas reações com os compostos do clínquer, como o C_3A . Eles ainda podem atuar como agentes de nucleação e acelerar a hidratação do clínquer (SILVA, 2007). Segundo Taylor (1997), cerca de 3% do calcário adicionado como fíler reage quimicamente durante a hidratação do cimento, acelerando a hidratação do C_3S .

A NBR 11578 (1991) limita a quantidade de fíler em 10% para os cimentos Portland compostos, salientando que o material carbonático usado como fíler deve ter no mínimo 85% de $CaCO_3$.

2.1.3 Propriedades das argamassas

2.1.3.1 Propriedades no estado fresco

2.1.3.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a propriedade que determina o quão fácil às argamassas podem ser misturadas, transportadas e aplicadas, em uma condição homogênea. Trata-se de uma propriedade bastante subjetiva e de definição complexa, dependendo da combinação de outras propriedades, como a consistência, a plasticidade, a retenção de água, a coesão, a exsudação, a massa específica e a adesão inicial (CARASEK, 2007). Em obra, geralmente a única maneira que o pedreiro tem de controlar diretamente a trabalhabilidade das argamassas é pela eventual adição de água, o que facilita sua aplicação e altera a sua consistência e plasticidade.

Uma argamassa é considerada trabalhável quando: se permite penetrar facilmente a colher de pedreiro, sem ser fluida; mantém-se coesa durante o seu transporte, mas não adere à colher ao ser aplicada; distribui-se facilmente e preenche toda a base; e não endurece rapidamente ao ser aplicada (BAÍA; SABBATINI, 2000).

2.1.3.1.2 Consistência e Plasticidade

A consistência da argamassa pode ser definida como a resultante das ações de forças internas, como coesão e ângulo de atrito interno e viscosidade, que condicionam a mudança de forma da mistura. Desta forma, o teor de água, a forma e a textura dos grãos dos agregados e sua granulometria afetam a consistência das argamassas (GOMES, 2008).

Segundo Cincotto *et al.* (1995), a consistência das argamassas pode ser classificada como:

- Argamassa seca: são aquelas às quais é necessária a aplicação de uma energia para conformá-las em sua forma final, onde a pasta preenche os vazios entre os grãos;

- Argamassa plástica: argamassas que com a aplicação de um pequeno esforço atingem a sua forma final, onde a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados;
- Argamassa fluida: são as argamassas que escorrem e se auto-nivelam, dispensando qualquer esforço, além da força de gravidade, para a sua aplicação, neste caso, os grãos ficam imersos na pasta.

Ainda segundo a mesma autora, a plasticidade é a propriedade que permite a argamassa deformar-se e reter certas deformações após a redução das tensões a que foi submetida, estando intimamente ligada à consistência e à trabalhabilidade.

Para a avaliação da consistência, faz-se uso da mesa de consistência (*flow table*), prescrita pelo Anexo B da NBR 7215 (1996), e do procedimento de ensaio para determinação do índice de consistência prescrito pela NBR 13276 (2005).

2.1.3.1.3 Retenção de água

A retenção de água é a capacidade da argamassa em não perder a sua água de amassamento e manter a sua trabalhabilidade diante de ações que visam provocar a perda da sua água, seja pela sucção da base ou por evaporação.

A perda da água de amassamento compromete a aderência, a capacidade de absorver deformações e a resistência mecânica (uma vez que a retenção da água permite que as reações de endurecimento da argamassa ocorram gradativamente, promovendo a adequada hidratação do cimento), e, com isso, a durabilidade e a estanqueidade do revestimento (BAÍA; SABBATINI, 2000).

Entre as formas para garantir ou melhorar a retenção da água, Fiorito (2003) cita que molhar a superfície de aplicação das argamassas garante que elas não absorvam parte da água de amassamento. Já Baía e Sabbatini (2000) explica que a presença de cal, na forma de argamassas simples ou mistas, e de aditivos pode melhorar esta propriedade.

A retenção de água está relacionada com as características e proporções dos materiais constituintes da argamassa, podendo ser medida através dos preceitos da NBR 13277 (1995).

2.1.3.1.4 Densidade de massa

A densidade de massa, ou a massa específica, corresponde à relação entre a massa do material e o seu volume, podendo ser absoluta (desconsiderando-se os vazios existentes) ou relativa. Ela é de fundamental importância para a dosagem das argamassas, onde quanto mais leve mais trabalhável ela será, reduzindo o esforço do operário e contribuindo para o aumento da sua produção.

Carasek (2007) explica que, em relação à densidade de massa, as argamassas podem ser classificadas como leves (densidade de massa menor que $1,40 \text{ g/cm}^3$), normais (densidade entre $1,40 \text{ g/cm}^3$ e $2,30 \text{ g/cm}^3$), e pesadas (densidade acima de $2,30 \text{ g/cm}^3$).

Ela é determinada através do método apresentado pela NBR 13278 (2005), assim como o seu teor de ar incorporado.

2.1.3.1.5 Aderência inicial

A aderência inicial é a propriedade relacionada ao fenômeno mecânico que ocorre em superfícies porosas, pela ancoragem da argamassa na base, através da entrada da pasta nos poros, reentrâncias e saliências, seguida do endurecimento progressivo da pasta (BAÍA; SABBATINI, 2000). Ela será refletida no desempenho da ligação entre a base e o revestimento, quando a argamassa estiver endurecida (GOMES, 2008).

A aderência inicial depende basicamente da trabalhabilidade da argamassa e das características de porosidade e rugosidade da base ou de tratamento prévio que aumente a superfície de contato entre os materiais (CINCOTTO *et al.*, 1995).

Ela também está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta, principalmente sua tensão superficial. A redução desta tensão favorece a “molhagem” do substrato, reduzindo o ângulo de contato entre as superfícies e promovendo a adesão. A tensão superficial pode ser modificada alterando-se a constituição da pasta, sendo ela inversamente proporcional a quantidade de cimento (CARASEK, 2007).

2.1.3.1.6 Retração por secagem

As retrações por secagem podem ocorrer na forma de fissuras prejudiciais ou não (microfissuras), que permitirão a percolação da água pelo revestimento quando estiver endurecido e prejudicando a sua função de estanqueidade. Geralmente elas ocorrem devido à evaporação acelerada da água de amassamento da argamassa e também com as reações de hidratação do cimento (BAÍÁ; SABBATINI, 2000).

Os fatores que influenciam a retração por secagem são: as características e as proporções dos materiais constituintes da argamassa; a espessura e o intervalo de aplicação das camadas; e o respeito ao tempo de sarrafeamento e desempenho (SANTOS, 2008). Em muitos casos, por exemplo, o pedreiro pode adicionar água nas argamassas a fim de facilitar sua aplicação, propiciando o surgimento de fissuras devido à retração.

As argamassas que possuem um baixo teor de cimento (argamassa fraca) estão menos sujeitas às tensões causadoras do aparecimento de fissuras prejudiciais durante a secagem, além de trincas e possíveis descolamentos da argamassa já no estado endurecido (BAÍÁ; SABBATINI, 2000).

2.1.3.2 Propriedades no estado endurecido

2.1.3.2.1 Resistência mecânica

A resistência é a propriedade das argamassas de suportarem ações mecânicas de diferentes tipos. Diferentemente dos concretos, a resistência à compressão não é tratada como uma propriedade de fundamental importância para as argamassas, mas sim o controle da sua água para garantir a trabalhabilidade. Entretanto, Roman *et al.* (1999) explicam que as argamassas devem ser resistentes o suficientes para suportar os esforços aos quais a parede será submetida, mesmo que altos valores de resistência não impliquem necessariamente numa parede mais resistente.

Esta propriedade depende do consumo e da natureza de agregados e aglomerantes da argamassa e da técnica de execução, que busca a compactação da argamassa durante a sua aplicação e acabamento (BAÍÁ; SABBATINI, 2000). Existem ainda outros fatores que interferem na resistência das argamassas, como a energia de amassamento ou o uso de adições (MACIEL *et al.*, 1998).

Para a determinação da resistência mecânica das argamassas, utilizam-se os procedimentos de ensaio apresentados pela NBR 13279 (2005), que define o valor da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão.

2.1.3.2.2 Aderência

A aderência é a propriedade da argamassa em se manter fixa à base devido a sua ancoragem, obtida através da resistência às tensões normais e tangenciais que surgem na interface base-argamassa. Ela é resultante da resistência de aderência à tração, da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa (MACIEL *et al.*, 1998).

Ela depende das propriedades da argamassa no seu estado fresco, dos procedimentos de execução do revestimento, da natureza e características da base e da sua limpeza superficial (BAÍÁ; SABBATINI, 2000).

Segundo Taha e Shrive (2005), citado por Santos (2008), é largamente aceito que a aderência às alvenarias se desenvolve segundo dois mecanismos:

- Aderência química: a resistência de aderência advém de forças covalentes ou forças de Van der Waals, desenvolvidas entre a unidade de alvenaria e os produtos da hidratação do cimento;
- Aderência mecânica: é formada pelo intertravamento mecânico dos produtos da hidratação do cimento, transferidos para a superfície dos poros da unidade de alvenaria.

Segundo Carasek (2007), as argamassas com elevado teor de cimento, em geral, apresentam alta resistência de aderência, mas tendem a ser menos duráveis por facilitar o surgimento de fissuras. Por outro lado, as argamassas mistas com cal possuem alta aderência por propiciarem um melhor “molhamento” e preencher as cavidades da base, sendo as mais indicadas para alcançar bons resultados de aderência.

A autora ainda explica que as areias excessivamente grossas não produzem argamassas com boa aderência, uma vez que prejudicam sua trabalhabilidade e, por consequência, a sua aplicação na base, reduzindo a extensão da aderência. As

areias e as composições inertes com altos teores de finos (principalmente partículas com diâmetros inferiores a 0,075 mm) também podem prejudicar a aderência.

A aderência das argamassas pode ser determinada através da NBR 13528 (1995), que especifica os procedimentos para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração, sendo os seus limites estabelecidos pela NBR 13749 (1996), apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Limites de resistência de aderência à tração

Acabamento	MPa	
Parede interna	Pintura ou base para reboco	≥ 0,20
	Cerâmica ou laminado	≥ 0,30
Parede externa	Pintura ou base para reboco	≥ 0,30
	Cerâmica	≥ 0,30
Tetos	Pintura ou base para reboco	≥ 0,20

Fonte: NBR 13749, 1996.

2.1.3.2.3 Retração

A retração, segundo Kopschitz (1997), citado por Santos (2008), é um processo sofrido pelas argamassas durante, principalmente, suas primeiras idades. Quando no estado endurecido, ela ocorre logo após o endurecimento da argamassa, sendo resultante das reações químicas internas dos aglomerantes (cimento Portland e cal hidratada) e da perda de água devido à absorção dos produtos da hidratação e no processo de secagem.

Estudos realizados por Fiorito (2003) mostram que, aos sete dias já ocorreu 35% a 45% da retração total, aos vinte e oito dias ocorreu de 50% a 60% e aos cento e vinte dias a ocorrência da retração passa a ser de 80% a 95%.

As argamassas estão sujeitas a três tipos de retrações (GOMES, 2008):

- Retração plástica: ocorre antes da pega da pasta de cimento e é resultante da saída de água por evaporação, onde a sua intensidade depende da umidade relativa, temperatura ambiente, velocidade do ar, localização da argamassa, espessura das camadas e dos materiais constituintes. Neville (1997) cita que a retirada da água das argamassas, conservadas em ar saturado, causa sua retração por perda de água;

- Retração hidráulica: ocorre após a pega e na fase de endurecimento, sendo afetada pela dosagem, tipo de material empregado, condições de cura e localização da argamassa;
- Retração autógena ou endógena: é causada devido às reações químicas dos aglomerantes, sendo a hidratação para o cimento e a carbonatação para a cal hidratada. Também é decorrente da diminuição da água livre nos poros capilares, ocorrendo sem troca de umidade com o meio externo (BARBOSA, 2005).

Quando retrai, a argamassa pode chegar a se desprender da superfície com a qual tenha menor aderência, diminuindo a resistência da parede e afetando a sua estanqueidade. A penetração da água nas fissuras que surgem com a retração propicia o surgimento de microrganismos, como os fungos e bolor, que facilitam o destacamento do revestimento e acabamento (GOMES, 2008).

2.1.3.2.4 Permeabilidade

A permeabilidade da argamassa está relacionada à passagem de água pela sua camada, que é um material poroso e permite a percolação da água tanto no estado líquido como no de vapor. A argamassa deve ser estanque à água, mas deve ser permeável ao vapor para oferecer a secagem da umidade de infiltração (chuva) ou decorrente da ação direta de vapor de água (BAÍÁ; SABBATINI, 2000).

Ela depende principalmente da quantidade e do tipo de aglomerante utilizado, da granulometria do agregado e das características da base. O cimento Portland, quando usado em proporções adequadas, pode reduzir bastante a permeabilidade de um revestimento argamassado, porém, se for usado em teores elevados, pode provocar fissuração, comprometendo a permeabilidade da argamassa (SANTOS, 2008).

2.1.3.2.5 Durabilidade

Nenhum material dura indefinidamente. Como resultado de interações ambientais, a microestrutura e, conseqüentemente, as suas propriedades mudam com o tempo. Mehta e Monteiro (2008) diz que um material atingiu o fim de sua vida

útil quando suas propriedades, sob determinadas condições de uso, deterioram de tal forma que a continuação do seu uso é considerada insegura e antieconômica.

Os mesmos autores ainda explicam que a durabilidade pode ser definida como sendo a expectativa de vida de um material sob certas condições ambientais, sendo uma propriedade de grande influência no custo do ciclo de vida da estrutura. Já para Baía e Sabbatini (2000), a durabilidade da argamassa é a propriedade do seu período de uso, resultante de suas propriedades no estado endurecido e que reflete o seu desempenho diante das ações do meio externo ao longo do tempo.

As argamassas podem ter sua integridade comprometida por diversos fatores, dentre os quais se podem citar a retração por secagem, absorção de água de chuva, temperaturas de congelamento, choque térmico, agentes corrosivos atmosféricos e agentes agressivos biológicos (SANTOS, 2008). A espessura excessiva, a falta de manutenção e a alta porosidade também podem comprometer a durabilidade do material (BAÍA; SABBATINI, 2000).

2.2 Cinzas como adições minerais aos produtos do cimento

2.2.1 Cinzas volantes

A NBR 12653 (1992) define cinzas volantes como sendo materiais finamente divididos que resultam da combustão de carvão pulverizado ou granulado em usinas termoelétricas. Elas são produzidas a altas temperaturas, entre 1200 e 1600°C, formando dois tipos de cinza: a pesada e a volante; sendo apenas usada a volante, que corresponde de 15 a 20% das cinzas produzidas (SILVA *et al.*, 1999).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as cinzas volantes apresentam atividade pozolânica, pois contêm silicatos de alumínio metaestáveis (cerca de 60 a 90% de cinza amorfa) que reagem com os íons de cálcio do cimento em presença de água, formando o C-S-H e influenciando as propriedades de argamassas e concretos no estado fresco.

As características químicas e morfológicas que vão determinar as propriedades tecnológicas destas cinzas estão relacionadas com as condições de queima e aos minerais associados ao carvão mineral (TAYLOR, 1997).

As cinzas volantes são tradicionalmente adicionadas na fabricação do cimento Portland Pozolânico (CP IV), substituindo cerca de 15 a 50% da massa de clínquer,

sendo as mais usadas no Brasil as que possui menor teor de cálcio (inferior a 10%). Entretanto, elas também vem sendo usadas como adição ou substituição parcial ao cimento diretamente na obra (DAL MOLIN, 2011).

2.2.2 Cinza de casca de arroz (CCA)

De acordo com Pouey (2006), a cinza de casca de arroz é um resíduo agro-industrial decorrente do processo de queima da casca de arroz, sendo largamente encontrada em regiões onde este cereal é beneficiado. Segundo Dal Molin (2011), a China é considerada hoje o maior produtor mundial do produto e, no Brasil, a região Sul produz cerca de 72% de toda a safra do país.

Devido ao elevado teor de sílica (90 a 95%) presente na sua composição química, como constatou Rodrigues e Beraldo (2010), ela apresenta um grande potencial como pozolana. Dal Molin (2011) complementa explicando que o silício da casca de arroz ocorre na forma amorfa hidratada de sílica, com estrutura em estado similar ao vítreo (opalina), ou na forma de gel.

Entretanto, a eficiência da CCA como material pozolânico depende da forma como ela foi produzida, uma vez que as provenientes de combustão não controlada tendem a gerar sílica na sua forma não reativa (cristalina), e, conseqüentemente, apresentar baixa atividade pozolânica (RODRIGUES; BERALDO, 2010).

Kieling *et al.* (2009) analisou a resistência à aderência de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por CCA, produzida sob queima controlada a 700°C e posteriormente moída, observando que, com baixas substituições, a CCA melhorou a aderência obtida pelas argamassas de referência.

Pouey *et al.* (2007) avaliou o índice de atividade pozolânica de várias CCA que passaram por diversos processos de moagem, concluindo que todas, independente de sua estrutura mineralógica ser mais ou menos cristalina, conseguiram alcançar valores de índice de atividade pozolânica superiores ao mínimo estabelecido por norma, constatando-se que o fator condicionante foi o diâmetro das partículas e reforçando a ideia de que as CCA, para serem melhor empregadas como pozolanas, devem ser submetidas a um processo de moagem.

2.2.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Outras cinzas também vêm sendo estudadas no país, destacando-se a do bagaço da cana-de-açúcar. Como o maior produtor mundial da cana, muitos estudos começaram a ser feitos no Brasil para a reutilização da cinza do seu bagaço em produtos cimentícios, uma vez que ela é descartada inadequadamente.

Segundo Dal Molin (2011), a cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresenta na sua composição uma grande quantidade de sílica (quantidades superiores a 60%), apresentando comportamento semelhante ao da CCA, e seu desempenho depende igualmente da sua temperatura de queima e moagem recebida.

Cordeiro *et al.* (2009) estudou o possível uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material pozolânico, produzida sob diferentes temperaturas de queima e condições controladas em laboratório, caracterizando-a como pozolana a partir da sua perda ao fogo e índice de atividade pozolânica. Observaram que a cinza produzida com queima controlada a 600 °C em forno resistivo e moída em moinho planetário, apresentou atividade pozolânica adequada com vistas aos requisitos propostos na NBR 12653 (1992), atribuindo este resultado à presença de sílica amorfa, ao reduzido tamanho das partículas, à elevada superfície específica e à reduzida perda ao fogo.

Souza *et al.* (2007) analisou aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (sem controle da temperatura de queima, mas moída) substituindo parcialmente o cimento Portland de argamassas com traço previamente definido, verificando que até um teor de substituição de 20% não ocorre o comprometimento da resistência à tração e à compressão das argamassas.

2.2.4 Cinza residual de lenha

A cinza residual de lenha é a cinza proveniente da queima de madeiras em fornos de olarias para o cozimento e a produção de cerâmica vermelha (tijolos e telhas). Segundo Siddique (2008), não há muitos trabalhos divulgados no mundo sobre a aplicação da cinza residual de lenha na construção civil, particularmente voltados aos materiais cimentícios.

Devido aos poucos dados existentes sobre o assunto, Etiégni e Campbell (1991) realizaram estudos sobre as características físicas e químicas de cinzas

residuais de lenha, a fim de desenvolver alternativas para reciclagem do resíduo em função das restrições ambientais. Verificaram que as madeiras produzem cinzas muito alcalinas, com pH variando entre 9 e 13,5, e que o comportamento químico e físico variavam em função da temperatura de combustão.

Nos Estados Unidos, cerca de 70% da cinza residual de lenha são depositadas em aterros, 20% está sendo usada como complemento de solos, e os 10% restantes está sendo utilizada em diversas aplicações (NAIK *et al.*, 2001). No Brasil, o Rio Grande do Norte se destaca como um dos maiores Estados produtores de cerâmica vermelha do país, consumindo cerca 1,2 milhões de metros cúbicos de lenha por ano (DESMATAMENTO, 2007). Nas olarias do Estado, a cinza residual de lenha não possui aplicação alguma, sendo apenas depositada em valas cavadas dentro do terreno da olaria ou deixada ao ar livre, gerando poluição atmosférica quando seus finos são carregados pelo vento.

Entretanto, Naik *et al.* (2003) explica que a cinza residual de lenha apresenta potencial para ser aplicada como material pozolânico, indicando-a para concretos de média a baixa resistência, para produtos de alvenaria (como as argamassas e na fabricação de cerâmicas), para materiais de base ou para pavimentos de concreto compactados com rolo e para cimentos misturados. Melo (2012) acrescenta que elas também podem ser usadas como corretivo de solo e como fíler na construção de pavimentos flexíveis para ruas e estradas.

Misra *et al.* (1993), citado por Melo (2012), estudaram a composição química das cinzas de madeira em função da temperatura de combustão. Em virtude das poucas informações disponíveis sobre as características químicas das cinzas e pela importância da madeira como combustível renovável para a geração de calor e energia, os autores analisaram madeiras de pinus, carvalho e casca do carvalho. Verificaram, principalmente, a presença de cálcio, potássio e magnésio, e ainda observaram percentuais menores de 1% de silício e de alumínio.

Borlini *et al.* (2005) constatou em estudo que a cinza residual de lenha de eucalipto, proveniente da região do município de Campos dos Goytacazes, pode ser praticamente descartada como pozolana, uma vez que apresenta altos teores de carbono na sua composição e sílica cristalina. Entretanto, se for beneficiada para aumentar sua quantidade de sílica amorfa, através de procedimentos similares aos adotados para a cinza de casca de arroz e do bagaço da cana-de-açúcar, como ter sua queima controlada e passar por moagem, ela pode atuar como pozolana.

Maschio *et al.* (2011) avaliaram argamassas com teores de 5, 10, 20 e 30% de substituição do cimento por cinzas leves e pesadas provenientes da queima de madeira de abeto, árvore conífera típica do hemisfério norte. Observaram que cinzas com partículas inferiores a 300 μm modificaram a reologia das argamassas no estado fresco e que para percentuais de 5% de substituição, aos 28 dias, mantiveram a mesma resistência à compressão e absorção com relação a uma argamassa padrão. Com adições maiores, houve redução da performance das argamassas.

Cheah e Ramli (2011) analisaram argamassas com substituição parcial do cimento por cinzas de madeira com alto teor de cálcio em percentuais de 5, 10, 15, 20 e 25% de substituição em relação à massa de cimento, mantendo constante a proporção de água. Verificaram que no estado fresco não houve alteração na trabalhabilidade e que na substituição de 15% obteve-se maior resistência à compressão aos 90 dias.

Melo (2012) avaliou argamassas com a adição de 10, 20, 30 e 40% de cinzas leves e pesadas, em relação à massa de cimento, provenientes da queima de lenha de algaroba nas lavanderias do arranjo produtivo local de confecções da região agreste pernambucano. Os resultados indicaram que, no estado fresco, as argamassas com adição apresentam menor capacidade de retenção de água e menor densidade, e no estado endurecido, menor índice de vazios, maior resistência mecânica, menor absorção de água e que não houve alteração significativa na resistência potencial de aderência a tração, quando comparadas com a argamassa padrão, atribuindo-se as melhoras nas propriedades a ação do efeito fíler.

CAPÍTULO 3

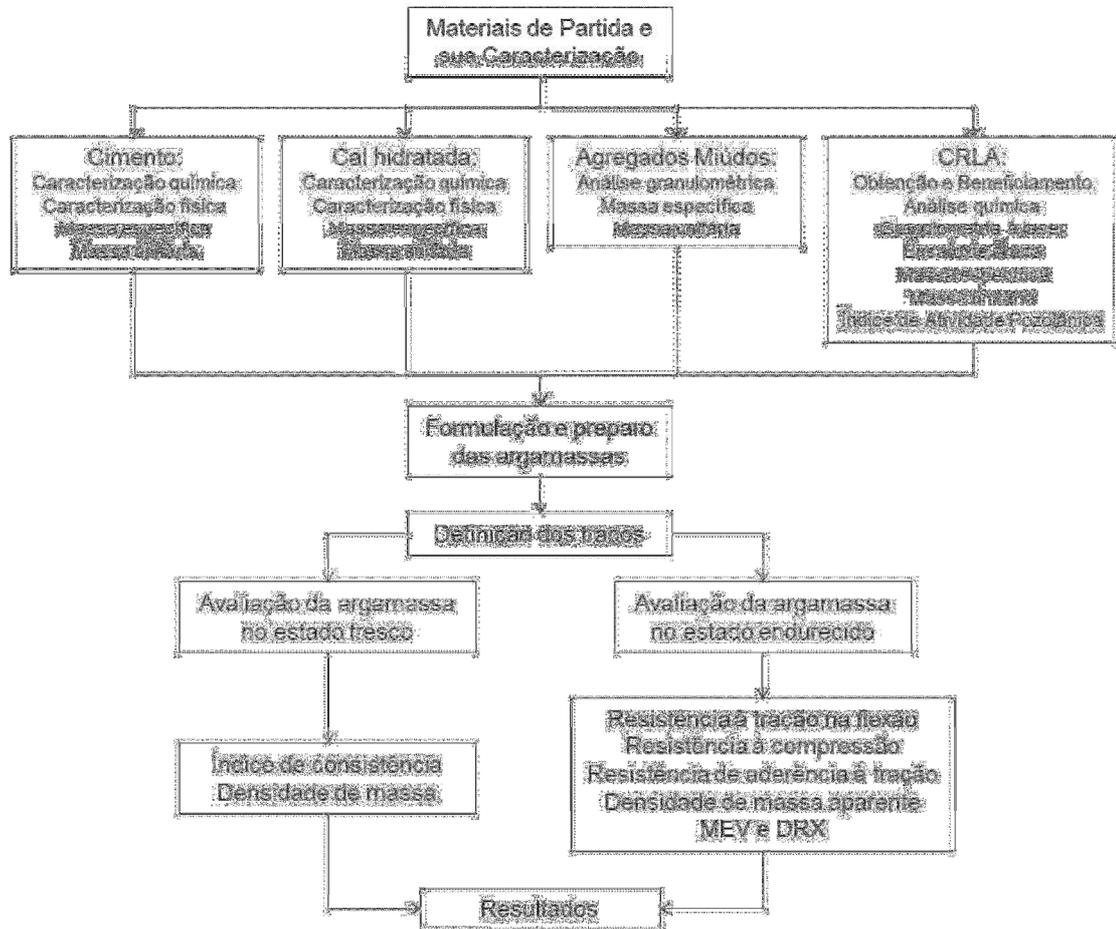
Procedimento Experimental

O procedimento experimental deste estudo, esquematizado no fluxograma exposto na Figura 5, foi elaborado para a avaliação de dois tipos de argamassas: uma delas para atuar como revestimento final (reboco) e a outra para o assentamento de alvenarias de tijolo cerâmico. Ambas as argamassas tiveram seus materiais caracterizados, onde o cimento Portland usado foi substituído parcialmente, em volume, pela cinza residual de lenha de algaroba (CRLA) em cinco percentagens (5%, 7%, 10%, 12% e 15%), com o objetivo de analisar sua influência em características do estado fresco e endurecido das argamassas.

A caracterização dos materiais constituintes das argamassas, a dosagem, o preparo dos corpos-de-prova, os ensaios no estado fresco, a determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido e da resistência da aderência à tração foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil. Os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão dos corpos-de-prova foram feitos no Laboratório de Metais e Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia de Materiais. Ambos os laboratórios fazem parte da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

A análise química da CRLA, assim como a difração de Raios-X (DRX) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) das argamassas no estado endurecido foram realizadas em equipamentos presentes no Laboratório de Ensaios de Materiais (LABEMAT) do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGÁS-ER/RN).

Figura 5 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental



Fonte: autor, 2012.

3.1 Caracterização dos componentes das argamassas

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado em todos os ensaios foi o CP II F-32, da marca CIMPOR, escolhido por não possuir pozolana em sua composição e ser usado em obras da região de Natal. Suas caracterizações química (Tabela 11) e física (Tabela 12) foram fornecidas pelo fabricante mediante solicitação, enquanto que a sua caracterização mecânica (Tabela 13) foi verificada conforme a NBR 7215 (1996). Sua massa específica foi obtida segundo a NBR NM 23 (2000) e sua massa unitária pela NBR NM 45 (2006).

Tabela 11 - Propriedades químicas do CP II F-32

Composição Química	Teor em massa (%)
Perda ao Fogo	5,12
Resíduo insolúvel	2,95
Óxido de Cálcio (CaO)	60,97
Dióxido de Silício (SiO ₂)	18,69
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	5,01
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	2,52
Óxido de Magnésio (MgO)	1,92
Trióxido de Enxofre (SO ₃)	1,81
Óxido de Cálcio livre (CaO livre)	1,45
Óxido de Potássio (K ₂ O)	1,25

Fonte: relatório de ensaio fornecido pelo fabricante, período março/2011.

Tabela 12 - Propriedades físicas do CP II F-32

Ensaio	Método	Unidade	Resultados	Especificação da NBR 11578/1991
Área específica (Blaine)	NBR 7224/96	m ² /kg	3.996	≥ 260
Massa específica	NBR NM 23/00	g/cm ³	3,10	não aplicável
Massa unitária	NBR NM 45/06	g/cm ³	1,40	não aplicável
Finura – retido na peneira de 0,075 mm (#200)	NBR 11579/91	%	4,8	≤ 12,0
Expansibilidade à quente	NBR 11582/91	mm	0,21	≤ 5,0
Início de pega	NBR 11581/91	h:min	2:25	≥ 1
Fim da pega	NBR 11581/91	h:min	3:45	≤ 10

Fonte: relatório de ensaio fornecido pelo fabricante, período março/2011.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas do CP II F-32

Idade (dias)	Mínima	Máxima	Média	Desvio Máximo Relativo	Especificação da NBR 11578/1991
3	25,5	30,1	27,8	4,0%	≥ 10,0
7	30,8	34,5	32,7	3,1%	≥ 20,0
28	37,5	41,8	39,7	4,6%	≥ 32,0

Fonte: autor, 2011.

3.1.2 Cal

Utilizou-se a cal hidratada CH-I, da marca CARBOMIL, cuja produtora está localizada no Ceará. Durante esta pesquisa, manteve-se a cal armazenada em recipiente vedado e impermeável. O fabricante forneceu a sua massa específica e ficha com características físicas (Tabela 14) e químicas (Tabela 15). Sua massa unitária foi obtida através de ensaio prescrito pela NBR NM 45 (2006).

Tabela 14 - Propriedades físicas da cal CH-I

Ensaio	Unidade	Resultado
Finura – retido na peneira de 0,044 mm (#325)	%	1,50
Massa específica	g/cm ³	2,345
Massa unitária	g/cm ³	0,526
Umidade	%	0,30
Diâmetro a 50%	µm	19,00
Diâmetro a 90%	µm	55,00

Fonte: relatório de ensaio fornecido pelo fabricante, período março/2011.

Tabela 15 - Propriedades químicas da cal CH-I

Composição	Unidade	Resultado
Resíduo insolúvel (RI)	%	0,5
Óxido de magnésio (MgO)	%	3,5
Dióxido de silício (SO ₂)	%	0,3
PPC	%	23,0 – 25,0
Ca(OH) _{2d}	%	92,5 – 98,5
R ₂ O ₃	%	1,5

Fonte: relatório de ensaio fornecido pelo fabricante, período março/2011.

3.1.3 Agregados Miúdos

Foram utilizadas duas areias de granulometrias diferentes, sendo uma areia média (empregada na argamassa de assentamento de alvenarias de tijolo cerâmico) e a outra areia fina (empregada na argamassa de revestimento final). Ambas são quartzosas de origem natural, provenientes de leito de rio e utilizadas em obras da região de Natal. As areias foram previamente secas em estufa a uma temperatura de 104°C e durante um período de 24 horas, esfriadas ao ar e peneiradas em malha de 4,75 mm para a retirada de partículas grosseiras antes de serem aplicadas às argamassas.

A caracterização granulométrica e física de ambas foi feita de acordo com o prescrito pela NBR NM 248 (2003), sendo especificadas pela NBR 7211 (1983). A massa específica foi obtida conforme a NBR NM 52 (2009), e a massa unitária conforme a NBR NM 45 (2006).

A caracterização granulométrica e física da areia fina está apresentada na Tabela 16, enquanto que a da areia média está apresentada na Tabela 17.

Tabela 16 - Caracterização granulométrica e física da areia fina

Abertura da peneira ABNT (mm)	%Retida em massa	%Retida em massa acumulada	Método (NBR)
4,8	-	-	NM 248/2003
2,4	-	-	
1,2	2,2	2,2	
0,6	8,6	10,9	
0,3	22,4	33,3	
0,15	55,7	89,0	
< 0,15	11,0	100,0	
TOTAL	100,0		
Módulo de Finura	1,35		NM 248/2003
Massa específica (kg/m ³)	2624		NM 52/09
Massa unitária (kg/m ³)	1444		NM 45/06
Dimensão Máx. Característica (mm)	1,2		NM 248/2003
Graduação (zona)	Zona 2, areia fina		7211/1983

Fonte: autor, 2012.

Tabela 17 - Caracterização granulométrica e física da areia média

Abertura da peneira ABNT (mm)	%Retida em massa	%Retida em massa acumulada	Método (NBR)
4,8	4,5	4,5	NM 248/2003
2,4	7,7	12,2	
1,2	13,5	25,8	
0,6	22,7	48,5	
0,3	29,0	77,5	
0,15	15,5	93,0	
< 0,15	7,0	100,0	
TOTAL	100,0		
Módulo de Finura	2,61		NM 248/2003
Massa específica (kg/m ³)	2625		NM 52/09
Massa unitária (kg/m ³)	1556		NM 45/06
Dimensão Máx. Característica (mm)	4,8		NM 248/2003
Graduação (zona)	Zona 3, areia média		7211/1983

Fonte: autor, 2012.

3.1.4 Água

Foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento local como água de amassamento.

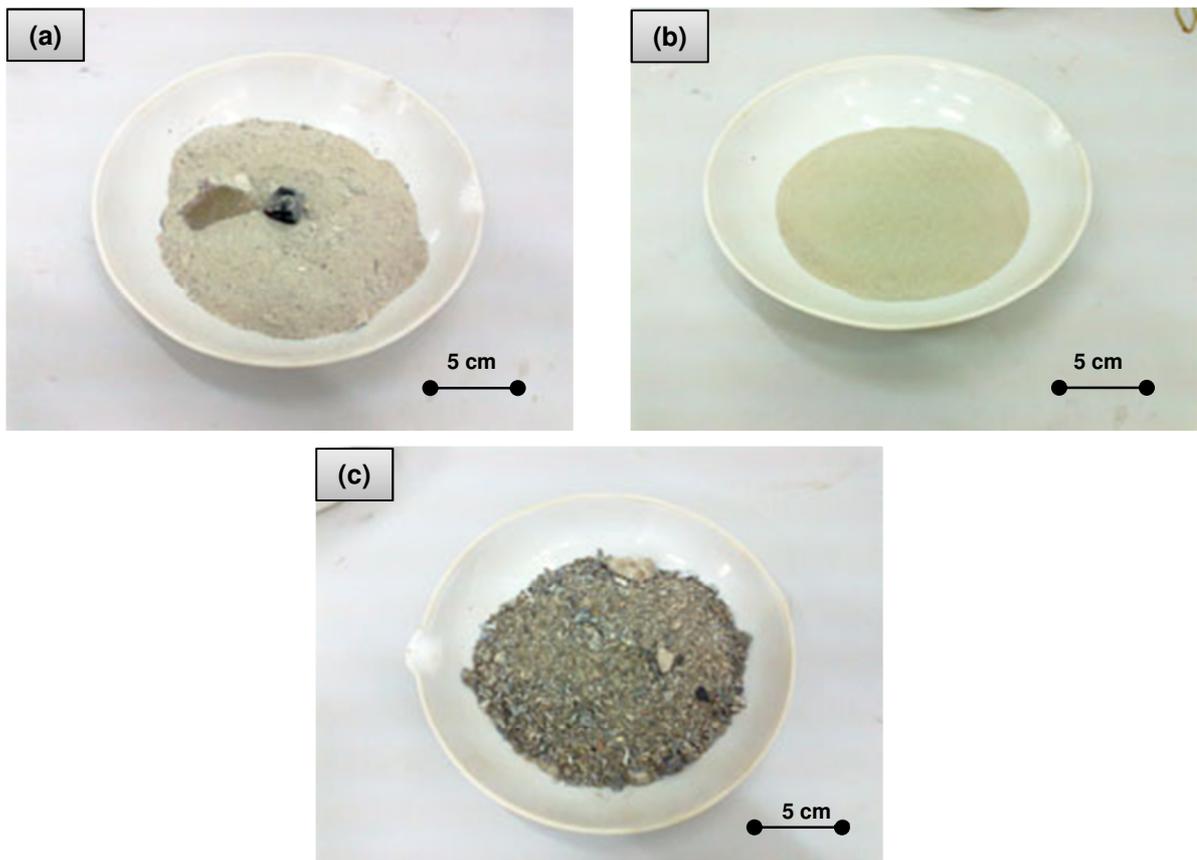
3.1.5 Cinza residual de lenha de algaroba (CRLA)

3.1.5.1 Obtenção, armazenagem e beneficiamento

A CRLA foi fornecida por uma olaria da região de Apodi/Assú, no Estado do Rio Grande do Norte. Ela foi recolhida diretamente do forno, sem controle de queima e após o seu resfriamento natural, tendo sido armazenada em recipiente vedado e impermeável. No Laboratório de Materiais de Construção da UFRN, a cinza foi peneirada, aproveitando-se apenas o material que passou pela peneira de malha 0,15 mm, representando cerca de 50% do seu volume original, com o intuito de eliminar partículas grosseiras e deletérias, como torrões de carvão não totalmente queimados e pedaços de cerâmica, objetivando torná-la mais fina.

Na Figura 6a pode ser visualizado o aspecto da CRLA antes de ser peneirada e na 6b o resultante de seu peneiramento. Já na Figura 6c pode ser observado o rejeito descartado.

Figura 6 - Fases do peneiramento da CRLA, indicando (a) a cinza bruta, (b) depois de peneirada e (c) seu material descartado



Fonte: autor, 2012.

Após o peneiramento, foi realizada a moagem de parte da cinza com o intuito de diminuir a sua granulometria, visando torná-la mais reativa e homogênea, sendo posteriormente avaliada a possível variação de seu índice de atividade pozolânica.

As cinzas receberam as denominações de CRLA-A (para a apenas peneirada) e CRLA-B (para a peneirada e moída). A moagem foi realizada durante 6 horas em moinho de bolas, podendo ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Moinho utilizado para a obtenção da CRLA-B



Fonte: autor, 2012.

3.1.5.2 Análise química

Foi realizada a análise química semi-quantitativa por fluorescência de Raios-X (FRX) com perda ao fogo (PF), em equipamento Shimadzu, modelo EDX 720, para avaliar a composição química da CRLA-A e CRLA-B. Para a análise, o material foi moído, quarteado e prensado em prensa manual em forma de pastilha, com diâmetro de cerca de 15 mm. Por limitação do método, somente os elementos entre Na (11) e U (92) foram analisados. Para a avaliação da perda ao fogo, o material, após seco em estufa por 24 horas em temperatura de 110°C, foi aquecido até 1000°C por 60 minutos.

3.1.5.3 Granulometria à laser

Foi feita a granulometria à laser da CRLA-A e CRLA-B através do aparelho modelo 1064 da marca CILAS, localizado no Laboratório de Engenharia Química da UFRN, para determinar suas curvas granulométricas e definir o diâmetro médio das suas partículas.

3.1.5.4 Ensaio de finura

Após a moagem, foram feitos ensaios de finura, seguindo o método proposto pela NBR 11579 (1991) – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº 200) –, em ambas as cinzas. Os ensaios foram repetidos para a confirmação do resultado e posteriormente comparados à finura do próprio cimento (Tabela 12).

3.1.5.5 Massa específica e massa unitária

A CRLA-A e CRLA-B tiveram suas massas específicas determinadas conforme prescrito pela NBR NM 23 (2000), através do ensaio com o frasco Le Chatellier, que pode ser visto na Figura 8, e suas massas unitárias conforme a NBR NM 45 (2006), em recipiente de volume e dimensões conhecidas.

Figura 8 - Determinação da massa específica através do Frasco Le Chatellier



Fonte: autor, 2012.

O ensaio de massa específica consiste em adicionar uma quantidade de cinza, em gramas, no frasco de Le Chatellier previamente preenchido com um líquido que não reaja quimicamente com a cinza até o nível compreendido entre as marcas correspondentes a zero e 1 cm^3 . Para o ensaio foi usado 2 g de cinza e como líquido a água. Registra-se o volume deslocado e, então, determina-se o valor da massa específica através da Equação 5.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Equação 5

onde:

ρ = massa específica da cinza, em g/cm³;

m = massa da cinza, em g;

V = volume do líquido deslocado pela massa da cinza, em cm³.

Para o ensaio da massa unitária, foi usado um recipiente cilíndrico com volume de 387,96 cm³ e massa de 622,9 g, devidamente calibrado, e cinza suficiente para preencher o volume do recipiente por completo, previamente seca em estufa sob uma temperatura de 104°C e durante 24 horas. Determinou-se a massa unitária do material no seu estado solto, usando o método C descrito pela norma, que consiste em encher o recipiente com a cinza até a borda, rasando e colocando o material de uma altura que não supere 50 mm. Ao fim, registou-se o peso do recipiente com a cinza, determinando-se a massa unitária através da Equação 6.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad \text{Equação 6}$$

onde:

ρ_{ap} = massa unitária da cinza, em g/cm³;

m_{ar} = massa do recipiente mais a cinza, em g;

m_r = massa do recipiente vazio, em g;

V = volume do recipiente, em cm³.

3.1.5.6 Determinação do Índice de Atividade Pozolânica das cinzas

Determinou-se o índice de atividade pozolânica da CRLA-A e CRLA-B, definido pela NBR 5752 (1992), a fim de classificá-las como sendo um material pozolânico ou não. A determinação desta característica foi de essencial importância para verificar a reatividade das cinzas junto ao cimento Portland e avaliar sua reatividade após a diminuição da granulometria.

Para a determinação do índice de atividade pozolânica, foram preparadas 3 (três) argamassas, sendo: uma de referência contendo apenas o cimento Portland CP II F-32; uma com a substituição, em volume, de 35% do cimento pela CRLA-A; e uma com a substituição, na mesma proporção, do cimento pela CRLA-B. Para cada

argamassa foram moldados 3 (três) corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 50 mm de diâmetro de base e 100 mm altura. A quantidade necessária de material para moldar os corpos-de-prova está prescrita na NBR 5752 (1992).

O preparo das argamassas seguiu os procedimentos da NBR 7215 (1996). A quantidade de água adicionada em cada argamassa foi suficiente para produzir um abatimento de 225 ± 5 mm, segundo ensaio de consistência prescrito pela NBR 13276 (2005). Os corpos-de-prova foram curados inicialmente em ambiente úmido e fechado, após 24 horas, em câmara submersa saturada com cal, onde, aos 28 dias, foram rompidos à compressão.

Os índices de atividade pozolânica são, então, definidos pela razão entre a resistência à compressão média dos corpos-de-prova das argamassas contendo as cinzas e dos corpos-de-prova da argamassa de referência, sendo o seu valor em porcentagem. Para que as cinzas sejam classificadas como material pozolânico, a NBR 12653 (1992) estipula que seu índice de atividade pozolânica não deve ser inferior a 75%.

A relação entre a quantidade de água adicionada nas argamassas contendo as cinzas e a argamassa de referência, em porcentagem, também é um fator avaliado pela NBR 12653 (1992), não podendo ser superior a 115% às pozolanas de classe N e a 110% às de classe C e E.

3.2 Formulação e preparo das argamassas

3.2.1 Definição dos traços das argamassas

Para a pesquisa desenvolvida foram escolhidos dois traços, sendo ambos de aplicação comum em obras residenciais no Nordeste. O primeiro foi o traço de 1:3 (cimento e areia fina), em volume, chamado de T1, sendo comumente utilizado para revestimentos de acabamento (reboco). O segundo traço foi o 1:2:8 (cimento, cal hidratada e areia média), em volume, chamado de T2, indicado para o assentamento de alvenarias de tijolo cerâmico.

Ambos os traços usados na pesquisa tiveram parte do cimento substituído, em volume, pela cinza. Entre as CRLA analisadas, utilizou-se apenas a que apresentou melhor viabilidade de aplicação dada a sua caracterização, descartando-se a outra.

Foram definidos 5 (cinco) percentuais de substituição, sendo de 5%, 7%, 10%, 12% e 15%.

Foram formuladas, desta forma, para o traço T1, um total de 5 (cinco) traços de argamassa com a substituição parcial do cimento pela CRLA adotada em diferentes teores, e um traço, sem substituição, considerado de referência e que serviu como parâmetro comparativo. O mesmo foi feito para as argamassas do traço T2, onde a formulação das argamassas pode ser visualizada na Tabela 18.

Tabela 18 - Formulação das argamassas

Traço em volume	Sigla	Traço em volume c/ CRLA	Composição do traço	Teor de cinza (%)	Nomenclatura das Argamassas
1:3	T1	1:3	cimento:areia	0	T1A0
		0,95:0,05:3	cimento:CRLA:areia	5	T1A5
		0,93:0,07:3		7	T1A7
		0,90:0,10:3		10	T1A10
		0,88:0,12:3		12	T1A12
		0,85:0,15:3		15	T1A15
1:2:8	T2	1:2:8	cimento:cal:areia	0	T2A0
		0,95:2:0,05:8	cimento:cal:CRLA:areia	5	T2A5
		0,93:2:0,07:8		7	T2A7
		0,90:2:0,10:8		10	T2A10
		0,88:2:0,12:8		12	T2A12
		0,85:2:0,15:8		15	T2A15

Fonte: autor, 2012.

3.2.2 Conversão dos traços em volume para em massa

Antes do preparo das argamassas foi realizada a conversão dos traços, em volume, para valores em massa. Para a conversão, usou-se a Equação 7.

$$1: \frac{Pv_{CRLA} \cdot \delta_{CRLA}}{\delta_{cim}} : \frac{Pv_{cal} \cdot \delta_{cal}}{\delta_{cim}} : \frac{Pv_{agr} \cdot \delta_{agr}}{\delta_{cim}} : V_a \quad \text{Equação 7}$$

onde:

Pv_{CRLA} = proporção da CRLA no traço da argamassa, em volume;

Pv_{cal} = proporção de cal hidratada no traço da argamassa, em volume;

Pv_{agr} = proporção do agregado miúdo no traço da argamassa, em volume;

δ_{CRLA} = massa unitária do resíduo, no estado solto, em g/cm³;

δ_{cal} = massa unitária da cal hidratada, no estado solto, em g/cm³;

δ_{cim} = massa unitária do cimento, no estado solto, em g/cm³;

δ_{agr} = massa unitária do agregado miúdo, no estado solto e seco, em g/cm³;

V_a = quantidade de água, em ml, utilizada em cada argamassa para alcançar o índice de consistência estipulado.

3.2.3 Preparo das argamassas

Para o preparo das argamassas foi utilizado um misturador mecânico de duas velocidades e movimento planetário (argamassadeira), da marca PAVITEST, com capacidade para 5 litros, conforme pode ser visto na Figura 9 e prescrito pela NBR 7215 (1996). Os procedimentos de mistura adotados foram de acordo com a NBR 13276 (2005). No RN é comum obras de pequeno porte não maturar a cal hidratada para ser usada em argamassas mistas. Preferiu-se, então, para as argamassas do traço T2, não realizar a maturação prévia da cal conforme especificado em norma, aproximando-as com a prática em obra.

Figura 9 - Argamassadeira para o preparo das argamassas



Fonte: autor, 2012.

As argamassas utilizadas para determinar a resistência de aderência à tração foram preparadas de forma diferente. Elas foram misturadas manualmente numa superfície não absorvente e que impedisse a perda de água de amassamento. Todos os materiais foram previamente misturados a seco até a mistura adquirir um aspecto homogêneo, sendo então adicionada água gradualmente para promover um melhor preparo e homogeneização das argamassas.

3.3 Métodos de ensaios para a caracterização das argamassas

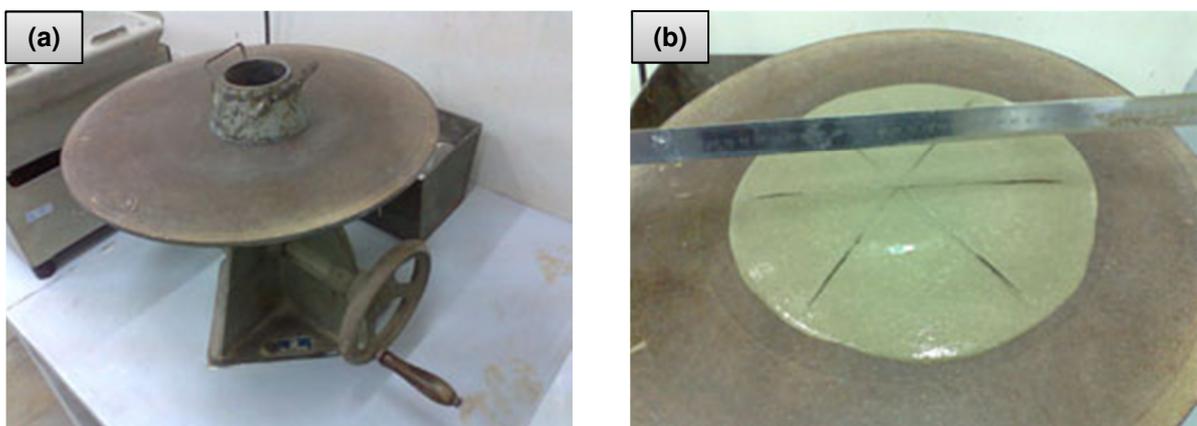
3.3.1 Argamassas no estado fresco

Para sua caracterização no estado fresco, as argamassas tiveram a definição da sua quantidade de água através da obtenção do índice de consistência fixo para cada traço, bem como a determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, seguindo obrigatoriamente esta ordem de ensaios.

3.3.1.1 Determinação do Índice de Consistência

O índice de consistência das argamassas foi determinado conforme prescreve a NBR 13276 (2005). O ensaio consiste em preencher um molde tronco-cônico com três camadas de argamassa de mesma altura, sendo adensadas homogeneamente, respectivamente, com 15, 10 e 5 golpes. Rasa-se e se retira o molde para então aplicar 30 quedas da mesa durante 30 segundos, aproximadamente, equipamentos estes que podem ser vistos na Figura 10a. O índice de consistência será igual à média aritmética de três diâmetros ortogonais após o abatimento, visualizado na Figura 10b.

Figura 10 - Determinação do índice de consistência por meio dos seus (a) equipamentos e (b) medição dos diâmetros ortogonais



Fonte: autor, 2012.

Para cada traço foi fixado um índice de consistência, variando-se, assim, o teor de água de cada argamassa produzida. O índice de consistência adotado para o traço T2 foi igual a 260 ± 5 mm, conforme sugerido pela mesma norma, garantindo

para suas argamassas uma boa trabalhabilidade e consistência. Para o traço T1, o índice foi igual a 270 ± 5 mm, tendo sido um pouco maior por apresentar durante o seu preparo uma maior dificuldade na sua trabalhabilidade para menores teores de água. A quantidade de água necessária para alcançar o índice estabelecido para cada traço foi determinada após sucessivos ensaios.

3.3.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Está preconizado na NBR 13278 (2005) o método para determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado em argamassas no estado fresco, destinadas ao assentamento e revestimento de paredes e tetos. O resultado deste ensaio indica o estado de agregação das moléculas da mistura.

O ensaio consiste em adicionar uma argamassa em um recipiente cilíndrico, devidamente calibrado e de volume conhecido, formando três camadas de alturas aproximadas. Cada camada deve ser adensada com 20 golpes de espátula, inserida e retirada verticalmente. Após o preenchimento do recipiente, deve-se efetuar três quedas dele, com altura próxima a 3 cm, rasá-lo e pesá-lo com a argamassa.

A densidade de massa é calculada a partir da Equação 8:

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \cdot 1000 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

d = densidade de massa no estado fresco, em kg/m^3 ;

m_c = massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa, em g;

m_v = massa do recipiente cilíndrico vazio, em g;

V_r = volume do recipiente cilíndrico, em cm^3 .

Já o teor de ar incorporado é determinado pela Equação 9:

$$A = 100 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

A = teor de ar incorporado na argamassa, em %;

d = densidade de massa no estado fresco, em g/cm^3 ;

d_t = densidade de massa teórica da argamassa, em g/cm³, sendo determinada pela Equação 10.

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \gamma_i} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

m_i = massa seca de cada componente da argamassa mais a água;

γ_i = massa específica de cada componente da água.

3.3.2 Argamassas no estado endurecido

Para caracterizar as argamassas no estado endurecido foram determinadas as resistências à tração na flexão, à compressão, de aderência à tração, bem como a densidade de massa aparente. Também foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a difração de Raios-X (DRX) para caracterizar a microestrutura das argamassas no estado endurecido.

3.3.2.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido

A NBR 13280 (2005) prescreve o método de ensaio para determinação da densidade de massa aparente de argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos, no estado endurecido. Foram utilizados neste ensaio os corpos-de-prova prismáticos moldados para serem rompidos, aos 28 dias, à tração na flexão e à compressão de ambos os traços T1 e T2, totalizando 36 amostras.

A densidade de massa aparente é determinada através da Equação 11:

$$\rho_{m\acute{a}x} = 1000 \cdot \left(\frac{m}{V}\right) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$\rho_{m\acute{a}x}$ = densidade de massa aparente no estado endurecido, em kg/m³;

m = massa do corpo-de-prova prismático, em g;

V = volume do corpo-de-prova prismático, em cm^3 .

3.3.2.2 Resistência à tração na flexão e à compressão

A resistência à tração na flexão e à compressão foram obtidas conforme a NBR 13279 (2005), que permite, primeiramente, a ruptura à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos e, usando suas metades restantes, sendo então rompidos à compressão, solicitando o mesmo corpo-de-prova duas vezes.

Para a moldagem dos corpos-de-prova (CPs), utilizou-se moldes prismáticos com dimensões de 4 x 4 x 16 cm e unidos em placa única, como pode ser visto na Figura 11. Eles foram adensados em 2 (duas) camadas com 30 (trinta) golpes cada, usando a mesa de abatimento (Figura 10), sendo a primeira ocupando cerca da metade da altura do corpo-de-prova.

Figura 11 - Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos preenchidos



Fonte: autor, 2012.

Os CPs foram desmoldados 24 horas após a sua moldagem, apresentando o aspecto visto na Figura 12. Os CPs das argamassas de traço T1 foram submetidos à cura úmida saturada em cal até a ruptura, seguindo as orientações da NBR 7215 (1996) para corpos-de-prova cilíndricos confeccionados apenas com cimento para serem rompidos à compressão. Este método foi adotado devido não se dispor de câmara úmida em laboratório para uma cura mais precisa. Os das argamassas de traço T2 foram curados ao ar até a ruptura, devido à cal hidratada presente na sua formulação necessitar de ar para que esta possa reagir completamente.

Figura 12 - Aspecto dos CPs prismáticos da argamassa T1A0 após desmoldagem



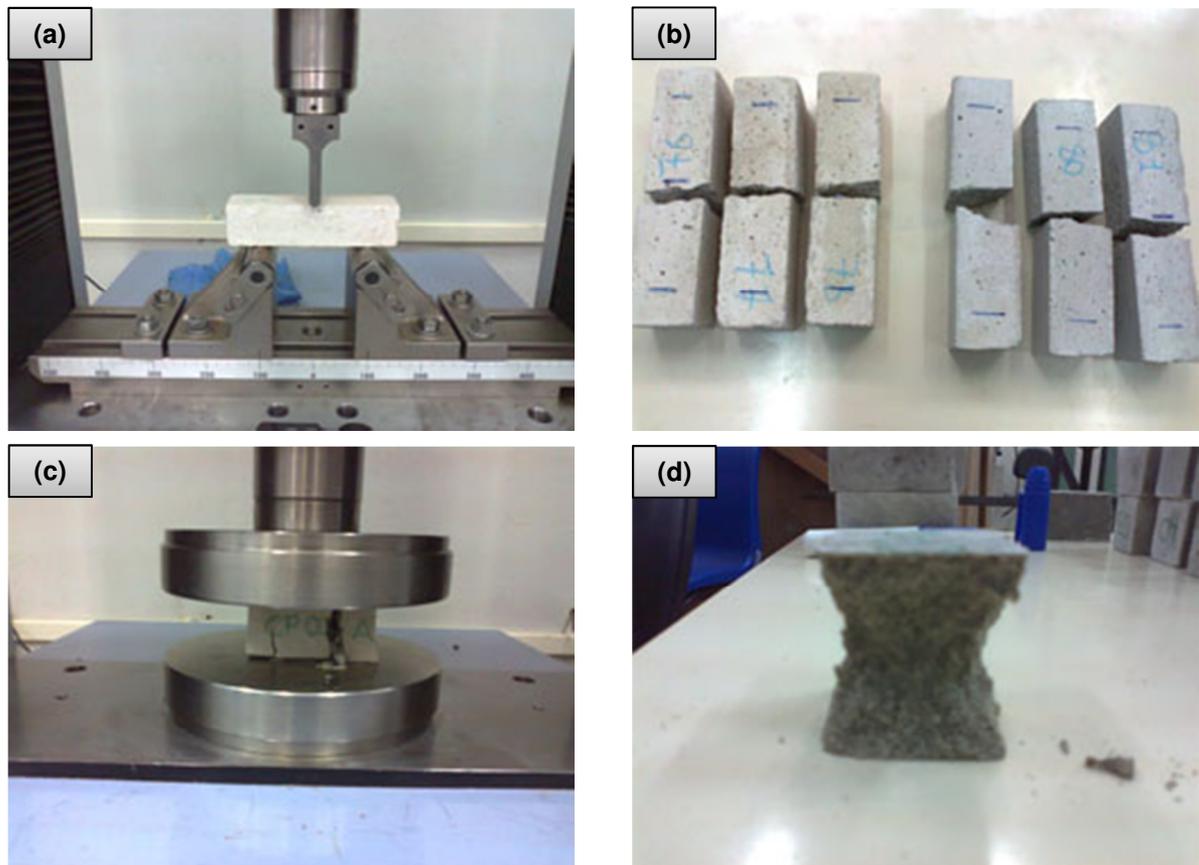
Fonte: autor, 2012.

Foram moldados para cada traço das argamassas 6 (seis) CPs prismáticos (2 moldes preenchidos), sendo 3 (três) rompidos na idade de 3 dias e 3 (três) na idade de 28 dias, totalizando 72 CPs.

Antes da realização do ensaio à tração na flexão, o eixo de cada corpo-de-prova foi devidamente marcado para garantir a aplicação da carga no seu centro. Já antes do ensaio à compressão, cada face o corpo-de-prova recebeu uma pequena placa metálica, de dimensões 40 mm x 40 mm (e 4 mm de espessura), para garantir a área de aplicação da carga solicitada pela norma, devidamente alinhadas para evitar excentricidades.

Os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão foram feitos com os corpos-de-prova nas idades de 3 e 28 dias, na prensa universal da Shimadzu, modelo AG-X 300 kN. As velocidades de aplicação das cargas de cada ensaio são especificadas por NBR 13279 (2005). As etapas envolvidas na realização do ensaio encontram-se expostas na Figura 13, onde se pode visualizar (13a) a solicitação de um corpo-de-prova prismático da argamassa T2A0 à tração na flexão, (13b) CPs de traço T1A0 e T1A5 rompidos após a tração, (13c) a solicitação à compressão de uma metade de corpo-de-prova de traço T1A0, e (13d) o aspecto final dele após sua compressão.

Figura 13 - Procedimentos dos ensaios de resistência, iniciando pela (a) solicitação à tração na flexão e (b) mostrando o estado dos CPs após a ruptura, seguindo da (c) solicitação à compressão e (d) o estado dos CPs após a compressão

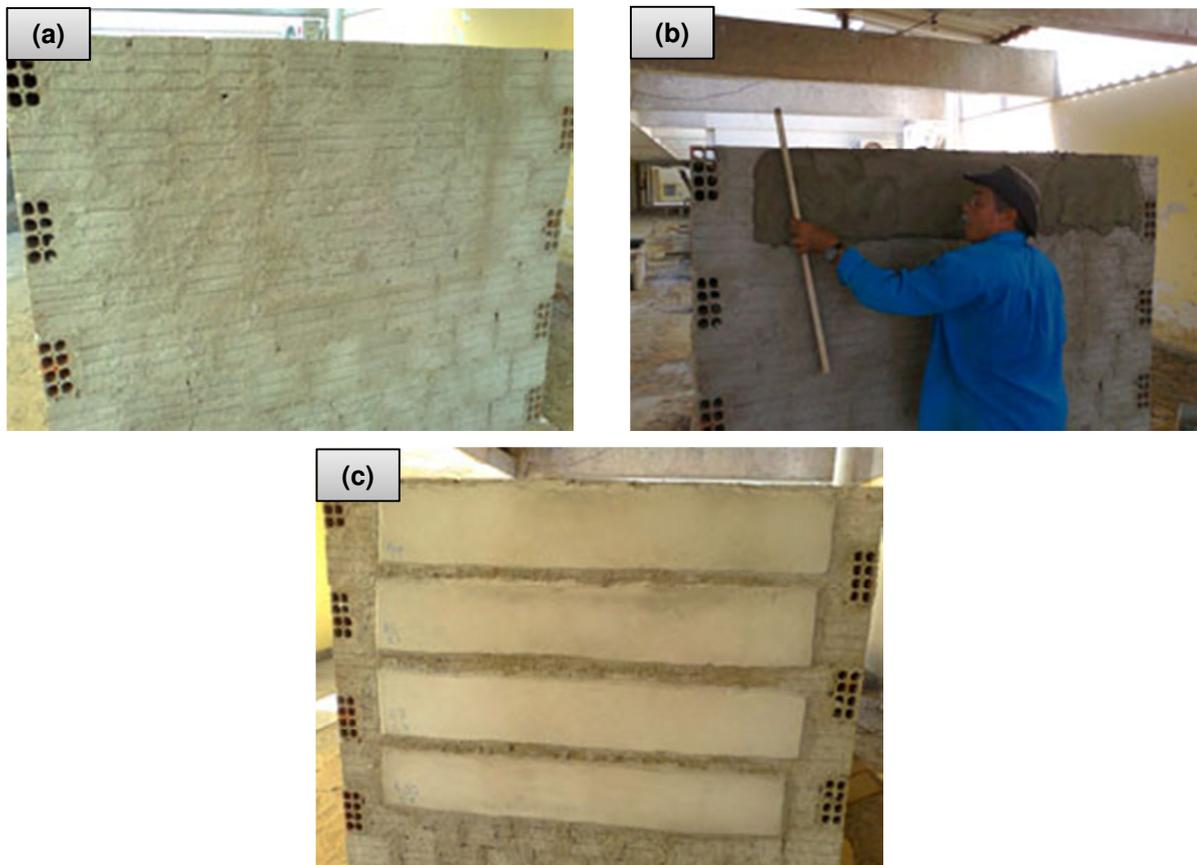


Fonte: autor, 2012.

3.3.2.3 Resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência de aderência à tração foi feito apenas nas argamassas do traço T1, por serem argamassas com aplicações para revestimento, e conforme prescreve a NBR 13528 (1995). Por limitação do método disponível, não foi possível utilizar a versão mais atual da norma (2010). Para a realização do ensaio, foram confeccionadas 6 (seis) faixas de argamassa para cada argamassa do traço T1 com 150 cm x 30 cm, e 2 cm de espessura, sobre uma base de alvenaria de tijolo cerâmico previamente revestido por chapisco com traço de 1:4 (cimento e areia média), como pode ser visto na Figura 14a. Os materiais foram separados em laboratório e misturados *in loco* para o preparo das argamassas. Na Figura 14b vê-se a execução de uma das faixas de argamassa, e na 14c o aspecto final das argamassas para os teores de 0%, 5%, 7% e 10%, respectivamente, do topo para baixo.

Figura 14 - Procedimentos para a execução das faixas de argamassa para o ensaio de aderência, sendo (a) sua base previamente revestida com chapisco, (b) sua execução e (c) seu aspecto final



Fonte: autor, 2012.

O ensaio foi realizado após 28 dias da confecção das faixas. Ele consistiu na colagem de pastilhas metálicas de seção quadrada, com 100 mm de lado e usando uma cola à base de resina epóxi. Em cada faixa de argamassa foram coladas 6 (seis) pastilhas, devidamente identificadas, como pode ser visto na Figura 15a, totalizando 36 corpos-de-prova quadrados.

Após 24 horas da colagem, foi realizado o corte de cada pastilha, como visto na Figura 15b, e só então foi acoplado o equipamento de tração CM EA-01, da marca PAVITEST/RECORD, extraindo-se as pastilhas e registrando-se a carga de ruptura de cada corpo-de-prova, como visualizado na Figura 15c. Com a extração, cada corpo-de-prova apresenta um aspecto áspero, tendo contornos próximos ao do substrato onde fora assentado, como pode ser visto na Figura 15d.

Figura 15 - Procedimentos do ensaio de resistência de aderência à tração, sendo (a) a colagem das pastilhas identificadas, (b) corte do entorno das pastilhas, (c) extração e (d) aspecto final dos corpos-de-prova



Fonte: autor, 2012.

3.3.2.4 Caracterização microestrutural das argamassas e DRX

Para aprofundar a análise das argamassas no seu estado endurecido, realizou-se a análise de sua microestrutura através de microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Shimadzu, modelo SSX-550. Foram usadas 3 (três) argamassas para cada traço, sendo uma de referência (T1A0 e T2A0), outra com substituição de 15% (T1A15 e T2A15), e a última sendo aquela que apresentou os melhores resultados de resistência à tração na flexão e à compressão. Cada amostra foi metalizada com uma fina camada de ouro antes do ensaio, apenas na superfície onde foi feita a análise. Também foi realizada para estas argamassas a análise por difração de Raios-X (DRX), utilizando o equipamento modelo XRD-6000 da marca Shimadzu.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussões

No presente capítulo estão apresentados os resultados obtidos durante a realização desta pesquisa, compreendendo a discussão das seguintes análises: análise química, caracterização física e determinação de atividade pozolânica das cinzas residuais de lenha de algaroba (CRLA-A e CRLA-B); apresentação dos traços, em massa, das argamassas com e sem a substituição do cimento pela cinza; e as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, bem como a sua caracterização microestrutural.

4.1 Cinza residual de lenha de algaroba (CRLA)

4.1.1 Análise química

As análises químicas das cinzas, apresentadas nas Tabelas 19 e 20, revelam teores de 54,78% (CRLA-A) e 53,75% (CRLA-B) de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$, sendo estas quantidades compatíveis com o mínimo de 50% exigido pela NBR 12653 (1992) para as pozolanas de classe E. A quantidade de SO_3 presente também está dentro do tolerável, sendo 5% o máximo exigido para esta classe.

Entretanto, os baixos teores $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$ de 2,09% (CRLA-A) e 2,21% (CRLA-B) sugerem que as cinzas podem apresentar baixa reatividade. Além disso, a perda ao fogo se mostrou bastante elevada, superando o máximo de 10% exigido pela norma, as descaracterizando quimicamente como pozolanas.

Tabela 19 - Caracterização química da CRLA-A

Composição Química	Teor em massa (%)
Perda ao Fogo	29,81
Óxido de cálcio (CaO)	53,19
Óxido de potássio (K ₂ O)	10,11
Óxido de magnésio (MgO)	2,50
Pentóxido de difósforo (P ₂ O ₅)	1,46
Dióxido de silício (SiO ₂)	1,04
Trióxido de dialumínio (Al ₂ O ₃)	0,55
Trióxido de ferro (FeO ₃)	0,50
Óxido de estrôncio (SrO)	0,35
Trióxido de enxofre (SO ₃)	0,35
Óxido de manganês (MnO)	0,14

Fonte: autor, 2012.

Tabela 20 - Caracterização química da CRLA-B

Composição Química	Teor em massa (%)
Perda ao Fogo	28,78
Óxido de cálcio (CaO)	52,13
Óxido de potássio (K ₂ O)	9,98
Óxido de magnésio (MgO)	3,60
Pentóxido de difósforo (P ₂ O ₅)	2,55
Dióxido de silício (SiO ₂)	1,09
Trióxido de dialumínio (Al ₂ O ₃)	0,53
Trióxido de ferro (FeO ₃)	0,59
Óxido de estrôncio (SrO)	0,29
Trióxido de enxofre (SO ₃)	0,31
Óxido de manganês (MnO)	0,15

Fonte: autor, 2012.

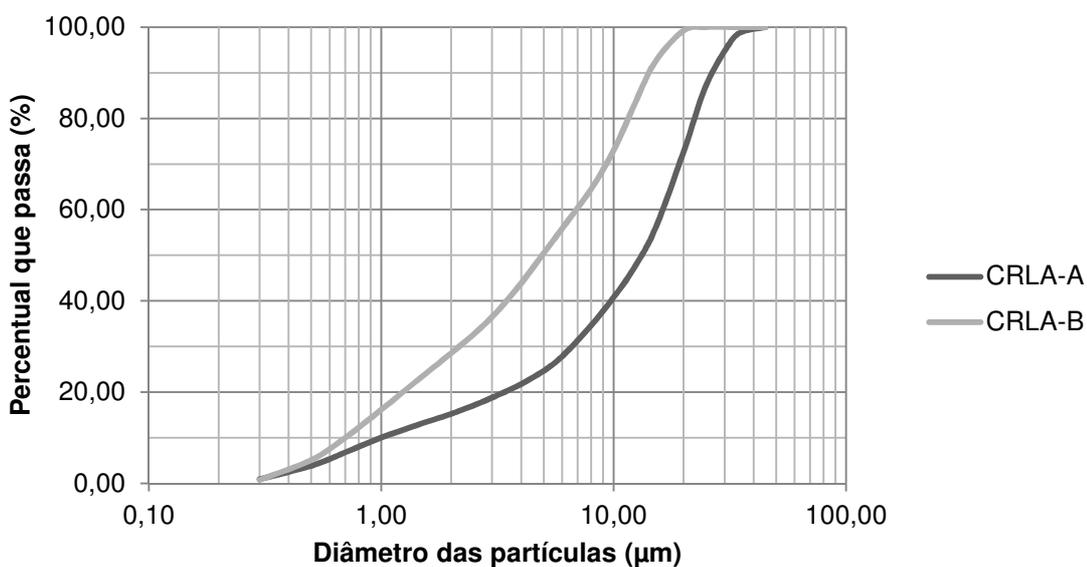
Por outro lado, a sua grande quantidade de CaO sugere a presença de calcita que, em granulometria reduzida, pode proporcionar um melhor empacotamento do sistema, atuando como fíler (MELO, 2012).

4.1.2 Granulometria à laser

As curvas granulométricas da CRLA-A e CRLA-B apresentam os diâmetros das suas partículas em função da porcentagem acumulada passante, podendo ser vistas na Figura 16. Avaliou-se que as partículas da CRLA-A possuem um diâmetro médio próximo a 13,65 μm , enquanto que as da CRLA-B próximo a 6,47 μm , apresentando uma queda de 52% no diâmetro médio com apenas a moagem.

Estes resultados indicam que o diâmetro médio de ambas as cinzas está bem próximo ao do cimento, que varia entre 10 e 15 μm (NEVILLE, 1997), reforçando a possibilidade de se usar as cinzas em substituição ao cimento ou como material fíler da matriz cimentícia. A queda no diâmetro médio entre a CRLA-A e a CRLA-B seria mais significativa caso a CRLA-A já não fosse tão fina e próxima ao cimento, o que pode não justificar a necessidade da moagem.

Figura 16 - Curvas granulométricas das CRLA-A e CRLA-B



Fonte: autor, 2012.

4.1.3 Ensaio de finura

Foi realizado o ensaio de finura para as cinzas CRLA-A e CRLA-B, sendo comparado à do cimento Portland usado na confecção das argamassas, servindo como referência para a análise.

Conforme apresentado na Tabela 21, a CRLA-A apresentou, mesmo que ainda distante da finura do cimento Portland usado, uma finura no limite de uso para o cimento da classe 32, que é de 12% segundo a NBR 11578 (1991). A CRLA-B, mesmo após moagem de 6 (seis) horas, apresentou uma finura pouco inferior a da CRLA-A, implicando numa possível rejeição do seu uso para o restante da análise, devido o gasto de energia para confeccioná-la tender a ser não justificável, dada a possibilidade de não gerar alterações significativas nas propriedades das argamassas produzidas com a mesma.

Tabela 21 - Finura dos componentes das argamassas

Material	Finura (%)
CRLA-A	12,0
CRLA-B	10,4
Cimento Portland CP II F-32	4,8

Fonte: autor, 2012.

Ambas as cinzas tiveram uma finura baixa, reforçando os resultados obtidos na granulometria e tendo a possibilidade de pouco alterar o consumo de água nas argamassas quando usadas em substituição ao cimento.

4.1.4 Massa específica e massa unitária

As massas específicas e unitárias da CRLA-A e CRLA-B estão apresentadas na Tabela 22. A CRLA-B apresenta massa específica e unitária superiores as da CRLA-A, resultando em um material mais denso, confirmado pela sua granulometria. Em comparação aos demais materiais componentes, ambas as cinzas apresentaram massa específica próxima a do cimento, sugerindo que ambos os materiais podem ter granulometria similares, dado o diâmetro médio avaliado.

Espera-se, com estes resultados, que as argamassas produzidas com a cinza, em substituição parcial do cimento, apresentem pequenas variações nas densidades de massa no estado fresco e endurecido.

Tabela 22 - Massas específicas e unitárias dos componentes das argamassas

Material	Massa específica (kg/m ³)	Massa unitária (kg/m ³)
Cimento Portland CP II F-32	3.100	1.406
Cal Hidratada CH-I	2.345	526
CRLA-A	2.857	883
CRLA-B	3.333	1.025
Areia média	2.625	1.556
Areia fina	2.624	1.444

Fonte: autor, 2012.

4.1.5 Determinação do Índice de Atividade Pozolânica das cinzas

Conhecendo a massa específica de cada material das argamassas, foi possível fazer a dosagem para o ensaio de atividade pozolânica. A Tabela 23 apresenta a

quantidade, em massa, do material utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos das argamassas de referência, com substituição de 35%, em volume, do cimento Portland pela CRLA-A, e com a mesma substituição pela CRLA-B.

Com a quantidade de água de cada traço, determinou-se o teor de água das argamassas com a CRLA-A e a CRLA-B, em relação à de referência, tendo ambas as argamassas com as cinzas, apresentado um teor de 114%. Este valor é maior que os 110% máximo indicado pela NBR 12653 (1992) para as pozolanas de classe C e E, sendo estas classes as quais a cinza poderia pertencer, indicando uma possível rejeição dela como material pozolânico.

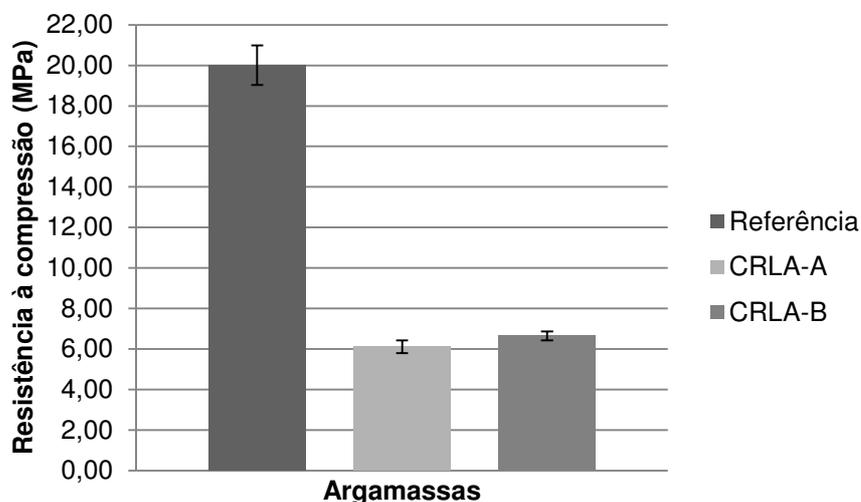
Tabela 23 - Traços, em massa, adotados para o ensaio de atividade pozolânica

Material	Referência	Massa necessária (g)	
		CRLA-A	CRLA-B
Cimento Portland	312,0	202,8	202,8
CRLA	-	100,5	117,4
Areia normal	936,0	936,0	936,0
Água	175,0	200,0	200,0

Fonte: autor, 2012.

Na Figura 17 visualizam-se as resistências à compressão obtidas para as argamassas ensaiadas após 28 dias. Os resultados mostram um grande decréscimo na resistência das argamassas com a CRLA-A e CRLA-B em relação à de referência, sendo seus resultados similares.

Figura 17 - Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas para a determinação do índice de atividade pozolânica



Fonte: autor, 2012.

O Índice da Atividade Pozolânica da CRLA-A, para as resistências obtidas, foi igual a 31%, um valor muito abaixo do exigido para materiais pozolânico, de acordo com o limite de 75% estabelecido pela NBR 12653 (1992). O mesmo pode ser dito para CRLA-B, que teve um índice igual a 33%, muito próximo ao da CRLA-A.

Estes resultados reforçam os obtidos pela análise química, descaracterizando a cinza residual de lenha Algaroba como material pozolânico. Entretanto, para fins de análise das propriedades das argamassas, decidiu-se manter neste estudo a substituição parcial do cimento Portland pela cinza, usando uma variação pequena de percentuais, sendo estes de 5%, 7%, 10%, 12% e 15%. Justifica-se a escolha destes percentuais devido à retirada do cimento tender a gerar argamassas mais frágeis e pouco coesas, e se espera que a cinza atue como fíler, sendo normalmente usado em baixos percentuais.

Objetivava-se com a moagem da cinza obter melhores resultados para o índice de atividade pozolânica, tornando o resíduo mais reativo. Visto que ambas as cinzas apresentaram reatividade insuficiente para classificá-las como materiais pozolânicos, não se justifica o gasto de energia para a moagem. Soma-se a isto o fato das cinzas terem apresentado índices similares, assim como finura (Tabela 21) e composição química (Tabelas 19 e 20). Decidiu-se, então, usar neste estudo apenas a CRLA-A, tendo em vista que a sua obtenção requer pouco beneficiamento.

4.2 Argamassas

4.2.1 Conversão dos traços em volume para em massa

Visualiza-se na Tabela 24 a conversão dos traços, em volume, para em massa e a quantidade dos materiais utilizados em cada argamassa para a produção de 3 (três) corpos-de-prova prismáticos. Com a definição do uso apenas da CRLA-A para a confecção e análise das propriedades das argamassas no presente estudo, deste ponto em diante convencionou-se a sua nomenclatura como apenas CRLA.

Tabela 24 - Traço, em massa, para a confecção dos corpos-de-prova prismáticos

Traço em volume	Argamassa	Composição do traço	Quantidade dos materiais Traço em massa (g)
1:3	T1A0	cimento:areia	415,0 : 1.278
	T1A5		394,3 : 13,0 : 1.278
	T1A7		386,0 : 18,3 : 1.278
	T1A10	cimento:CRLA:areia	375,5 : 26,0 : 1.278
	T1A12		365,2 : 31,3 : 1.278
	T1A15		352,8 : 39,0 : 1.278
1:2:8	T2A0	cimento:cal:areia	160,0 : 120,0 : 1.426
	T2A5		152,0 : 120,0 : 5,0 : 1.426
	T2A7		149,0 : 120,0 : 7,0 : 1.426
	T2A10	cimento:cal:CRLA:areia	144,0 : 120,0 : 10,1 : 1.426
	T2A12		141,0 : 120,0 : 12,1 : 1.426
	T2A15		136,0 : 120,0 : 15,1 : 1.426

Fonte: autor, 2012.

A Tabela 25 apresenta a massa total das argamassas estudadas, além de suas relações de massa. O Cimento Relativo indica a quantidade de cimento em relação à massa total de cada argamassa. A relação $\frac{CRLA}{\text{cimento}}$ indica quanto representa, em percentagem, a massa de cinza em relação à massa de cimento para cada traço de argamassa. A relação $\frac{CRLA}{\text{cim. ref.}}$ indica quanto representa, em percentagem, a massa de cinza em relação à massa inicial de cimento da argamassa de referência.

Com a substituição do cimento, em volume, pela cinza, todas as argamassas de um mesmo traço mantiveram o mesmo volume. Entretanto, o acréscimo da CRLA promoveu uma diminuição sutil na massa total das argamassas, devido se tratar de um material mais leve que o cimento (Tabela 22).

Tabela 25 - Massa total e relações de massa entre as argamassas estudadas

Traço em volume	Argamassa	Massa Total (g)	Perda de massa (%)	Cimento Relativo (%)	$\frac{CRLA}{\text{cimento}}$ (%)	$\frac{CRLA}{\text{cim. ref.}}$ (%)
1:3	T1A0	1.693	0,00	24,50	0,00	0,00
	T1A5	1.685	0,45	23,40	3,30	3,13
	T1A7	1.682	0,63	22,94	4,74	4,41
	T1A10	1.678	0,92	22,20	6,96	6,27
	T1A12	1.675	1,09	21,80	8,57	7,54
	T1A15	1.670	1,37	21,10	11,05	9,40
1:2:8	T2A0	1.706	0,00	9,38	0,00	0,00
	T2A5	1.703	0,17	8,93	3,31	3,14
	T2A7	1.702	0,23	8,75	4,72	4,40
	T2A10	1.700	0,35	8,47	6,98	6,28
	T2A12	1.699	0,41	8,30	8,56	7,54
	T2A15	1.697	0,52	8,01	11,09	9,43

Fonte: autor, 2012.

A quantidade de material gasto na confecção das 6 (seis) faixas de argamassa do traço T1, de 150 cm x 30 cm x 2 cm (comprimento, largura, espessura), usadas para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração, encontram-se expostas na Tabela 26. As suas relações de massa são as mesmas da Tabela 25 para o traço T1.

Tabela 26 - Traço, em massa, para a confecção das faixas de argamassa

Traço em volume	Argamassa	Composição do traço	Quantidade dos materiais Traço em massa (g)	Massa Total (g)
1:3	T1A0	cimento:areia	3.242 : 9.985	13.227
	T1A5		3.080 : 102 : 9.985	13.167
	T1A7		3.015 : 143 : 9.985	13.143
	T1A10	cimento:CRLA:areia	2.918 : 204 : 9.985	13.107
	T1A12		2.853 : 244 : 9.985	13.083
	T1A15		2.756 : 306 : 9.985	13.047

Fonte: autor, 2012.

4.2.2 Propriedades no estado fresco

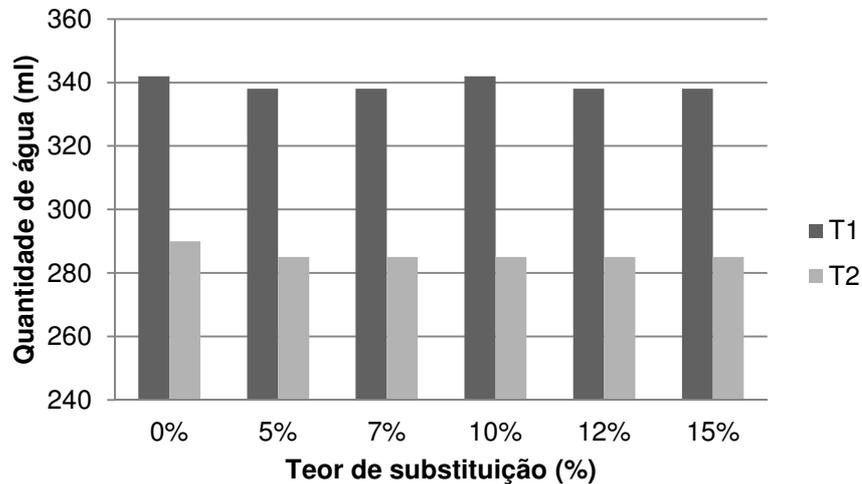
4.2.2.1 Índice de consistência e quantidade de água dos traços

Para as argamassas do traço T1 foi estabelecido um índice de consistência igual a 270 ± 5 mm, sendo um pouco superior aos 260 ± 5 mm adotados para as do traço T2, valor sugerido às argamassas pela norma NBR 12376 (2005). Durante os ensaios para a determinação da consistência, constatou-se que índices menores ao traço T1 geravam argamassas mais secas e pouco plásticas, dificultando a sua trabalhabilidade e mistura, justificando a adoção de um índice maior. O mesmo não foi constatado para as argamassas do traço T2, o que era esperado devido à presença da cal hidratada promover uma melhor plasticidade para a mistura. Com o índice de consistência estabelecido, os ensaios foram feitos a fim de determinar a quantidade de água para cada argamassa.

Como pode ser visto na Figura 18, a quantidade de água necessária nas argamassas para alcançar o índice de consistência estabelecido para cada traço praticamente se manteve constante, tendo sido bem inferior para o traço T2 devido à presença da cal, e maior para T1 devido a grande quantidade de finos na sua constituição. Com a diminuição gradual da quantidade de cimento, seria correto observar uma leve queda pela demanda de água, mas a sua substituição por outro

material fino, a CRLA, manteve a demanda, confirmando o que se esperava com o ensaio de finura.

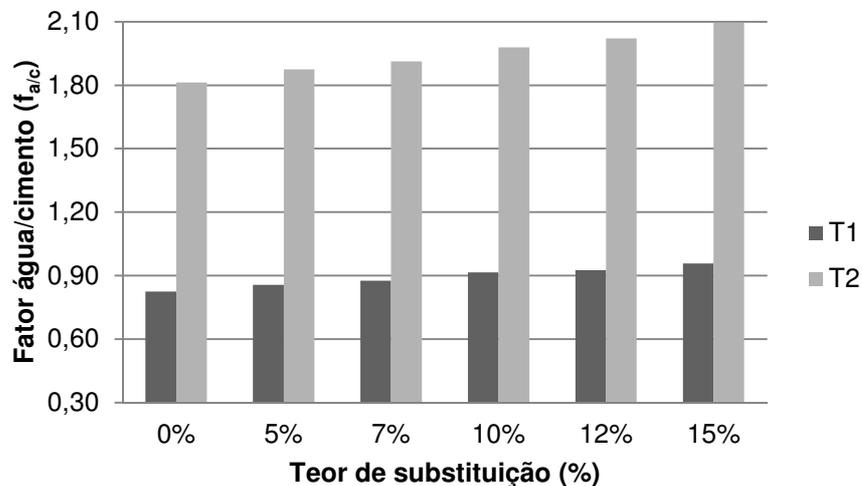
Figura 18 - Quantidade de água das argamassas



Fonte: autor, 2012.

Com a constância da quantidade de água para cada traço e a diminuição da quantidade de cimento, percebeu-se um aumento gradual no fator água/cimento ($f_{a/c}$) das argamassas, como visto na Figura 19. Essa condição favoreceu a redução da resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas aos 28 dias, para os traços estudados e com maiores teores de substituição, conforme observado nas Figuras 23, 24, 25 e 26.

Figura 19 - Fator água/cimento das argamassas

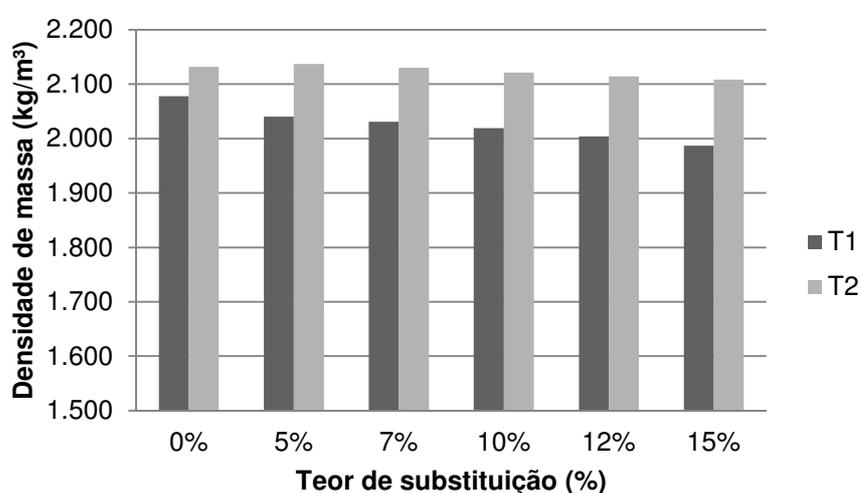


Fonte: autor, 2012.

4.2.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados relativos à densidade de massa no estado fresco, mostrados na Figura 20, indicam que houve uma variação mínima na densidade das argamassas de ambos os traços em relação às de referência (teor de 0%). Para as argamassas do traço T1 a variação máxima foi de 4,38%, para uma substituição do cimento pela cinza de 15% (T1A15), enquanto que para as argamassas do traço T2 esta variação foi menor, sendo igual a 1,13%, também para uma substituição de 15% (T2A15).

Figura 20 - Densidade de massa das argamassas no estado fresco



Fonte: autor, 2012.

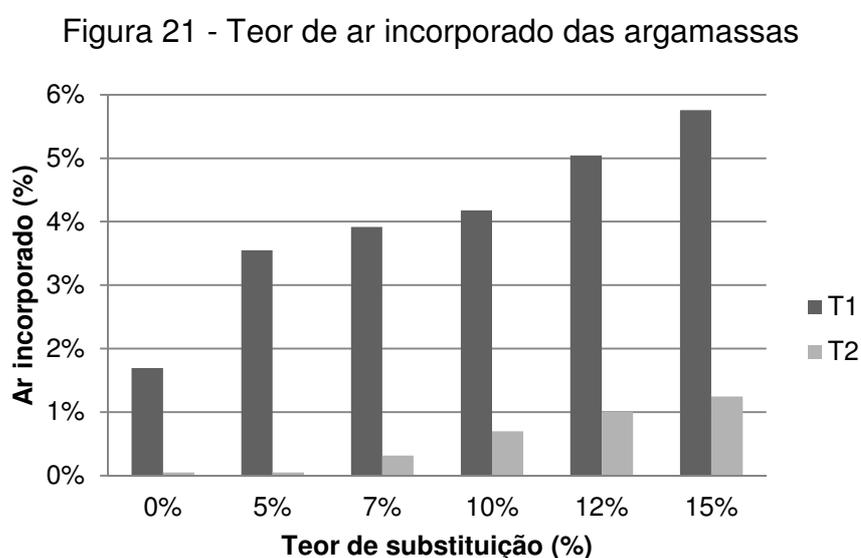
Devido aos resultados obtidos e à pequena variação da densidade de massa entre as argamassas, todas foram classificadas como D5, segundo a NBR 13281 (2005) e conforme apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 - Classificação das argamassas segundo sua densidade de massa no estado fresco

Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m³)	Método de ensaio
D1	≤ 1.400	ABNT NBR 13278
D2	1.200 a 1.600	
D3	1.400 a 1.800	
D4	1.600 a 2.000	
D5	1.800 a 2.200	
D6	> 2.000	

Fonte: NBR 13281, 2005.

Devido a CRLA estudada ser um material de massa específica pouco inferior a do cimento (Tabela 22), esperava-se uma diminuição mais sutil que a apresentada na densidade de massa para os teores de substituição adotados em relação ao peso dos seus materiais constituintes. Como visto na Tabela 25, a perda de massa para ambos os traços foi muito pequena, tendo sido de 1,37% para T1A15 e 0,52% para T2A15. Assim, a queda na densidade se deve principalmente pelo aumento no teor de ar incorporado nas argamassas, como pode ser observado na Figura 21, sendo justificado pelo aumento de finos nas argamassas.



Fonte: autor, 2012.

Com o aumento do teor de ar incorporado e sua consequente redução na densidade de massa no estado fresco, espera-se que as argamassas com maior teor de substituição sejam mais trabalháveis, tendo esta afirmativa sido confirmada na prática durante o preparo das argamassas e obtenção das suas consistências.

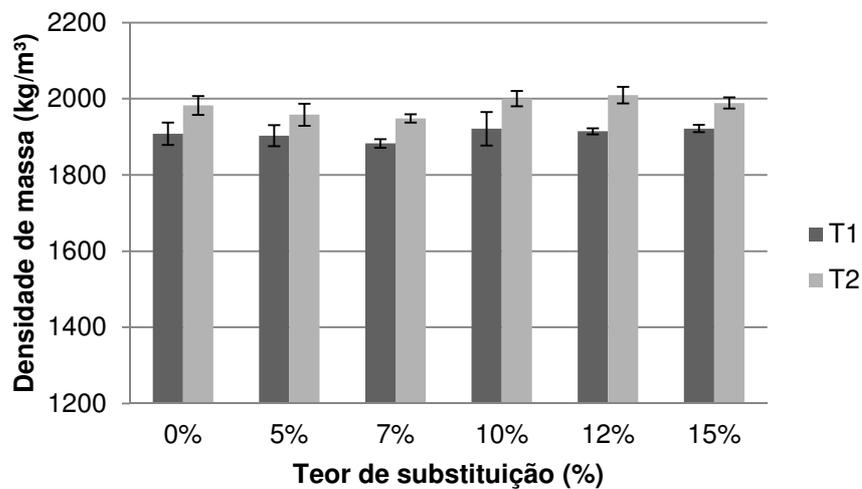
4.2.3 Propriedades no estado endurecido

4.2.3.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido

A Figura 22 apresenta os resultados relativos à densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas dos traços T1 e T2 para os seus respectivos teores de substituição.

Percebe-se, para as argamassas estudadas, que a densidade de massa no estado endurecido é menor que no seu estado fresco. Isto ocorre devido à saída de parte da água da argamassa. Desta forma, com a densidade de massa no estado fresco diminuindo gradualmente a cada aumento no teor de substituição para ambos os traços, espera-se que o mesmo ocorra na densidade de massa aparente no estado endurecido.

Figura 22 - Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas



Fonte: autor, 2012.

Para os percentuais de 5% e 7% de substituição, esta tendência é respeitada. Entretanto, para os demais percentuais, a densidade de massa aparente no estado endurecido tende a aumentar ou se manter constante em relação às argamassas de referência. Isso é justificado devido o rigoroso processo de moldagem dos corpos-de-prova analisados, dado a aplicação laboratorial para fins científicos.

Devido aos resultados e à pequena variação da densidade de massa no estado endurecido entre as argamassas, elas podem ser todas classificadas como M5, segundo a NBR 13281 (2005) e conforme apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 - Classificação das argamassas segundo sua densidade de massa aparente no estado endurecido

Classe	Densidade de massa no estado endurecido (kg/m ³)	Método de ensaio
M1	≤ 1.200	ABNT NBR 13280
M2	1.000 a 1.400	
M3	1.200 a 1.600	
M4	1.400 a 1.800	
M5	1.600 a 2.000	
M6	> 1.800	

Fonte: NBR 13281, 2005.

4.2.3.2 Resistência à tração na flexão e à compressão

Os resultados relativos à resistência à tração na flexão aos 3 e 28 dias para as argamassas dos traços T1 e T2, respectivamente, estão apresentados nas Figuras 23 e 24. As resistências obtidas para as argamassas do traço T1 foram superiores as do traço T2, justificado pela maior quantidade relativa de cimento presente na sua constituição (Tabela 25) e pelo seu menor fator água/cimento (Figura 19).

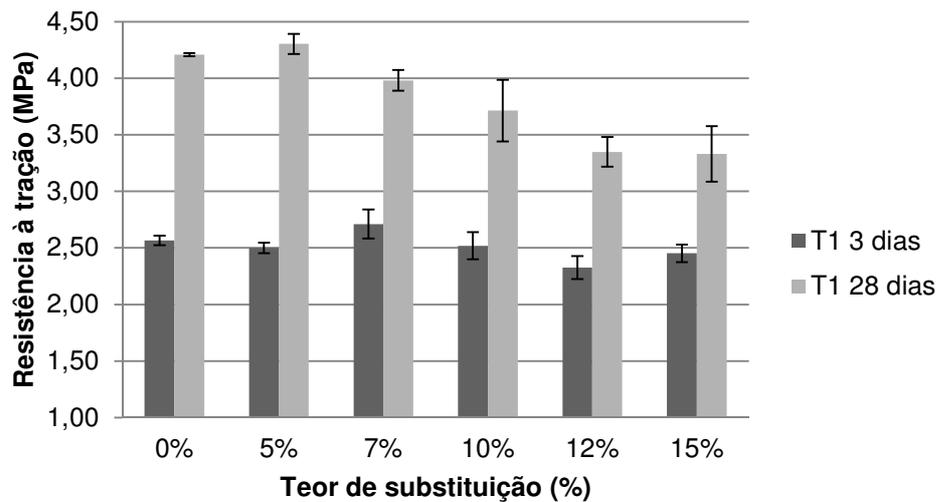
Os resultados obtidos a 3 dias para as argamassas de ambos os traços se mostraram incompatíveis com a tendência apresentada aos 28 dias. Entretanto, eles tenderam a se manter constantes, apresentando uma variação inferior a 10% para ambos os traços. Além disso, todos os resultados ficaram dentro do tolerado para o desvio máximo absoluto estabelecido pela norma NBR 13279 (2005), validando-os. O desvio máximo absoluto é a maior diferença possível entre a resistência média e uma das resistências encontrada para os corpos-de-prova numa mesma argamassa.

Percebe-se, então, que o acréscimo da CRLA em ambos os traços, mesmo para 15% de substituição, não alterou de forma significativa a resistência à tração na flexão inicial das argamassas. Entretanto, a diminuição da quantidade de cimento deveria, como consequência, reduzir essa resistência, uma vez que suas reações de hidratação rápida garantiriam o seu ganho. Esta perda não ocorre devido a cinza atuar como agente de nucleação e possivelmente acelerar a hidratação do clínquer, garantindo a manutenção da resistência inicial, além de atuar como fíler.

Corroborando com o fato da CRLA ter provado não ser um material pozolânico, observou-se que, aos 28 dias e devido a redução da quantidade de cimento, a resistência à tração na flexão das argamassas de ambos os traços diminuiu com o aumento no teor de substituição, como pode ser observado nas Figuras 23 e 24.

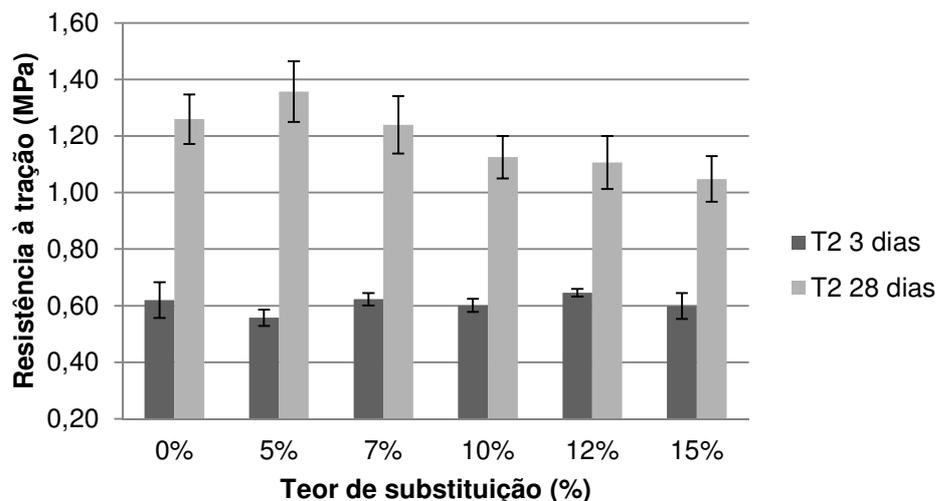
Entretanto, para 5% de substituição, houve um ganho na resistência de ambos os traços, tendo sido de apenas 2,25% para o traço T1, mas alcançando os 21,87% para o traço T2. Este aumento na resistência ocorreu devido a um melhor arranjo microestrutural das argamassas, principalmente para a argamassa do traço T2, tendo o cimento, a cal hidratada e areia grossa na sua constituição.

Figura 23 - Resistência à tração na flexão das argamassas do traço T1



Fonte: autor, 2012.

Figura 24 - Resistência à tração na flexão das argamassas do traço T2



Fonte: autor, 2012.

Estes resultados podem classificar as argamassas do traço T1, com relação à resistência à tração na flexão, como sendo da classe R5 e as do traço T2 como da classe R1, segundo a NBR 13281 (2005), conforme apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 - Classificação das argamassas segundo sua resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Método de ensaio
R1	≤ 1,5	ABNT NBR 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	

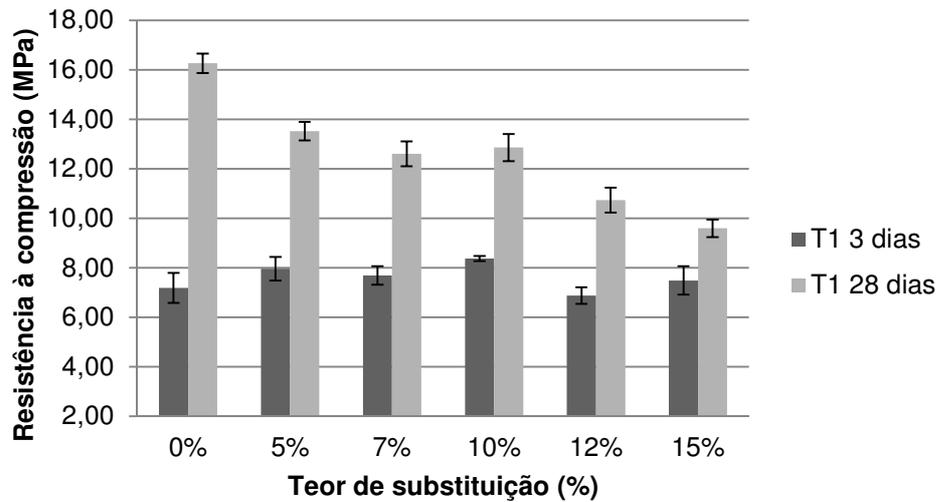
Fonte: NBR 13281, 2005.

As Figuras 25 e 26 mostram os resultados relativos à resistência à compressão das argamassas aos 3 e 28 dias para os traços T1 e T2, respectivamente. As resistências obtidas para as argamassas do traço T1 foram superiores as do traço T2, justificado pela maior quantidade de cimento presente na sua constituição.

Assim como para a resistência à tração na flexão, os resultados obtidos a 3 dias de ambos os traços apresentaram variações aleatórias, mas mantendo uma taxa de variação abaixo de 10% em relação às argamassas de referência (com teor de 0%). Pode-se, então, chegar à mesma conclusão exposta para a resistência à tração na flexão, reforçando o comportamento de fíler da cinza. Soma-se a isto o fato de que, mesmo com rigoroso controle laboratorial, o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades varia para cada argamassa, dado as condições de cura, moldagem dos corpos-de-prova, aplicação da energia durante o adensamento, e como ocorrem as reações químicas rápidas da hidratação do cimento em resposta a estes fatores.

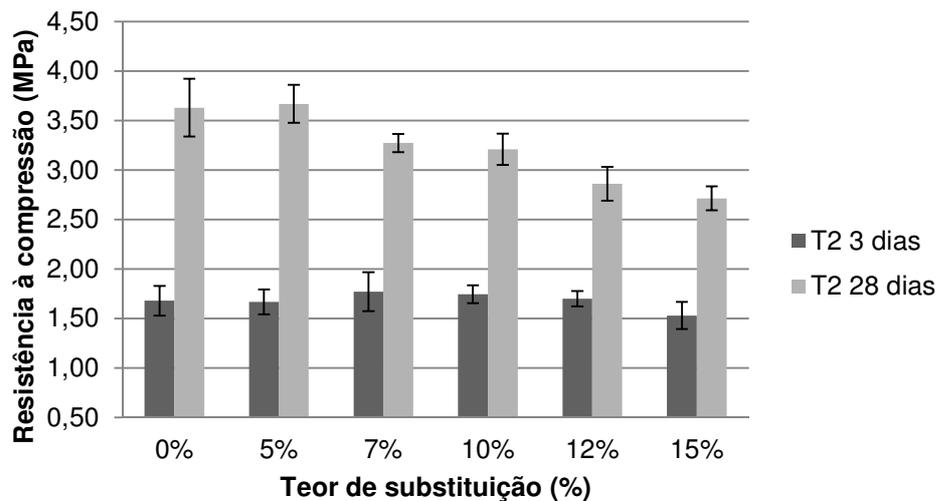
Para o traço T1, apresentado na Figura 25, houve uma perda significativa da resistência à compressão já para 5% de substituição, tendo tido uma perda máxima próxima a 41% para 15% de substituição em relação à argamassa de referência. Ainda assim, o valor da resistência obtido para 15% de substituição é satisfatório para argamassas. Para o traço T2, apresentado na Figura 26, esta perda da resistência foi menor, chegando até 25% de perda para 15% de substituição, e tendo até praticamente se mantido constante para 5% de substituição.

Figura 25 - Resistência à compressão das argamassas do traço T1



Fonte: autor, 2012.

Figura 26 - Resistência à compressão das argamassas do traço T2



Fonte: autor, 2012.

Percebe-se, então, que para o traço T1 a perda da resistência à compressão é significativamente maior em relação ao traço T2, devido à substituição do cimento, em massa, ser maior em T1 que T2. A redução sutil na quantidade de cimento no traço T2 acaba por não influenciar tanto a resistência das suas argamassas para os menores teores de substituição, gerando resultados muito similares à referência.

Estes resultados podem classificar as argamassas do traço T1, com relação à resistência à compressão, como sendo da classe P6 e as do traço T2 como da classe P3, segundo a NBR 13281 (2005) e conforme apresentado na Tabela 30.

Tabela 30 - Classificação das argamassas segundo sua resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Método de ensaio
P1	≤ 2,5	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8,0	

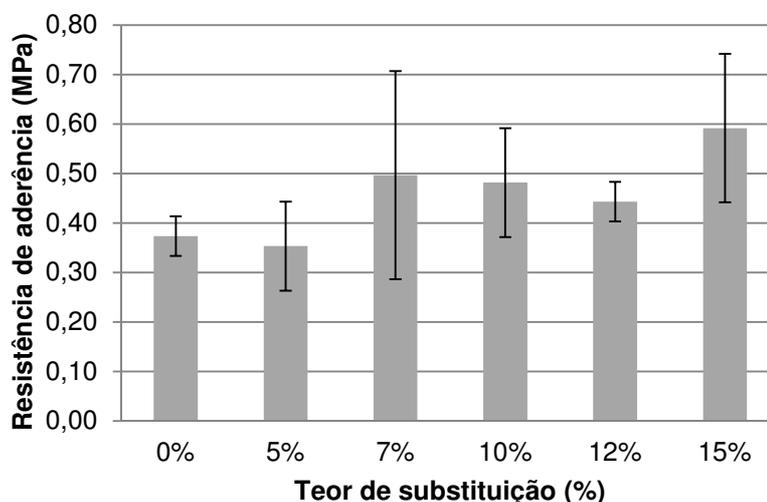
Fonte: NBR 13281, 2005.

4.2.3.3 Resistência de aderência à tração

O ensaio para determinar a resistência de aderência à tração foi realizado aos 28 dias e apenas para as argamassas do traço T1, uma vez que estas argamassas tem como aplicação a execução de revestimentos de acabamento (reboco). Os seus resultados estão apresentados na Figura 27.

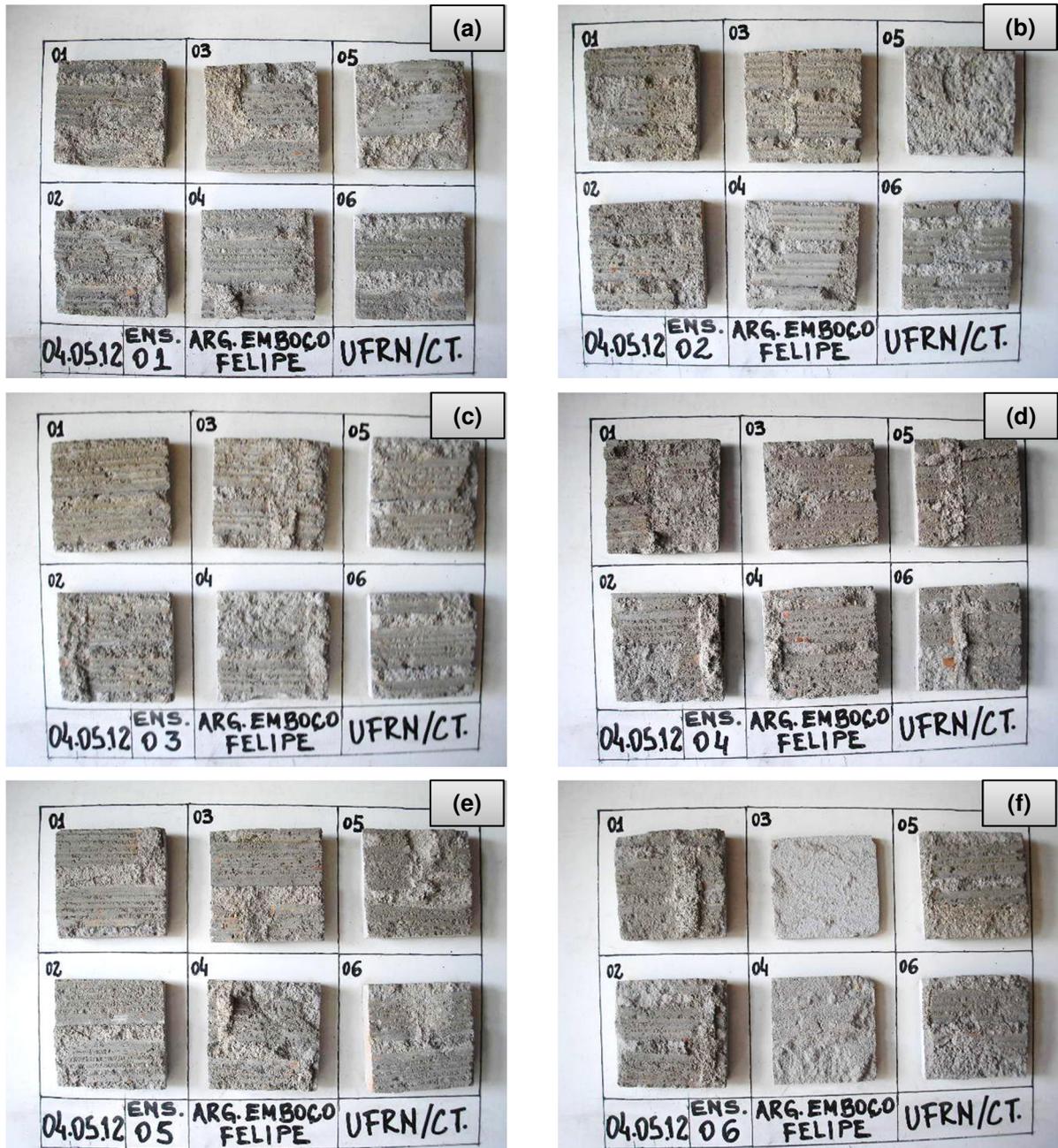
Devido à ruptura dos corpos-de-prova terem ocorrido predominantemente na argamassa do chapisco, ou na interface entre a argamassa do chapisco e os blocos cerâmicos, como pode ser visto na Figura 28, estima-se que a resistência potencial de aderência à tração das argamassas ensaiadas é superior aos valores obtidos, impossibilitando a análise da influência da cinza neste parâmetro. Pode-se observar também na Figura 27 uma grande variação nos valores de resistência de aderência, corroborando com a afirmação da impossibilitando da análise da influência da cinza.

Figura 27 - Resistência de aderência à tração das argamassas do traço T1



Fonte: autor, 2012.

Figura 28 - Amostras de 100 mm x 100 mm retiradas das faixas de argamassas ensaiadas com teor de (a) 0%, (b) 5%, (c) 7%, (d) 10%, (e) 12%, e (f) 15% de substituição, para determinação da resistência de aderência à tração



Fonte: autor, 2012.

Entretanto, estes resultados são suficientes para definir as argamassas como pertencentes à classe A3, segundo a NBR 13281 (2005) e conforme apresentado na Tabela 31, uma vez que nenhuma delas rompeu na própria argamassa e apresentou uma resistência inferior a 0,30 MPa.

Tabela 31 - Classificação das argamassas segundo sua resistência potencial de aderência à tração

Classe	Densidade de massa no estado fresco (MPa)	Método de ensaio
A1	< 0,20	ABNT NBR 15258
A2	≥ 0,20	
A3	≥ 0,30	

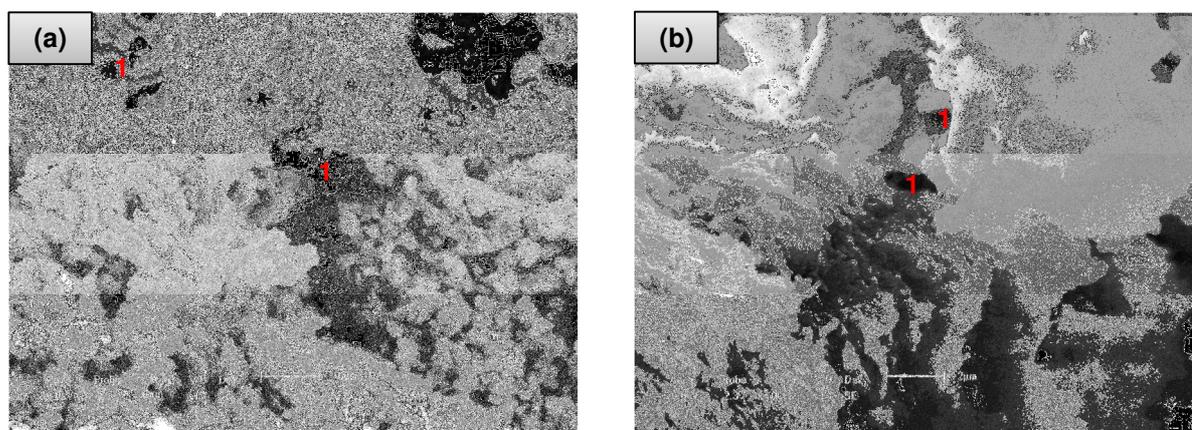
Fonte: NBR 13281, 2005.

4.2.3.4 Caracterização microestrutural e DRX

Foram realizadas a micrografia eletrônica de varredura (MEV) e a difração de Raios-X (DRX), a fim de comparar suas microestruturas e componentes químicos, para as argamassas de referência (T1A0 e T2A0), para as com 15% de substituição (T1A15 e T2A15), e para as com 5% de substituição (T1A5 e T2A5), sendo estas últimas avaliadas por terem apresentado bons resultados de resistência à flexão na tração e à compressão em relação às de referência. Os ensaios foram feitos após 28 dias de cura.

Visualiza-se na Figura 29 o MEV realizado para o traço de referência T1A0. Verifica-se a formação de superfícies pouco regulares e a presença de alguns poros (1), sendo uma microestrutura esperada para esta argamassa, devido à quantidade de cimento na sua constituição e por ter apresentando boas resistências.

Figura 29 - MEV em modo SE para a argamassa de referência T1A0 com aproximação de (a) x1000 e (b) x5000

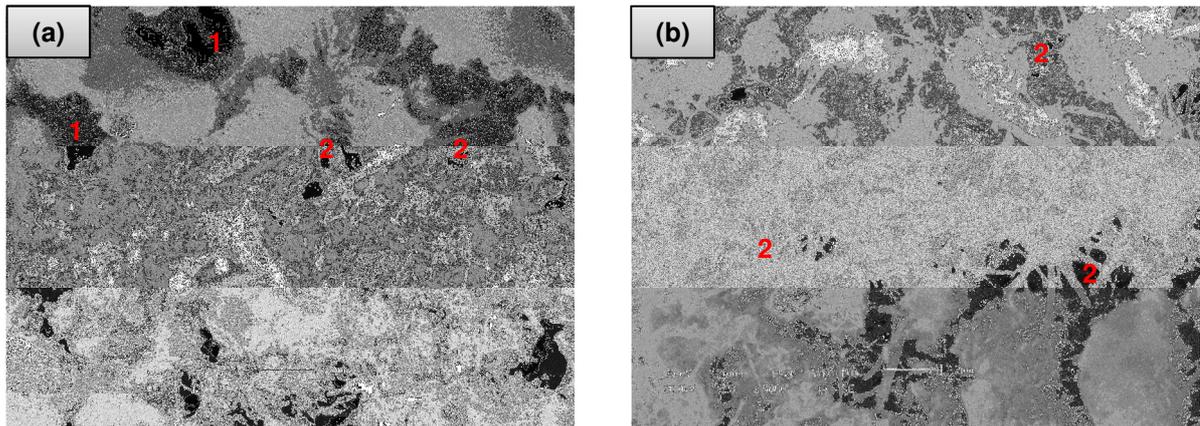


Fonte: autor, 2012.

O MEV realizado para o traço T1A5 pode ser visto na Figura 30a, enquanto que o do traço T1A15 consta na Figura 30b. Em comparação ao traço de referência

T1A0, verifica-se que ambos os traços apresentaram uma formação mais irregular e porosa (1), assim como apresentam a presença de vários elementos na forma de agulhas que podem ser cristais de etringita (2), que resulta na redução da resistência à compressão, corroborando com os resultados obtidos na Figura 25.

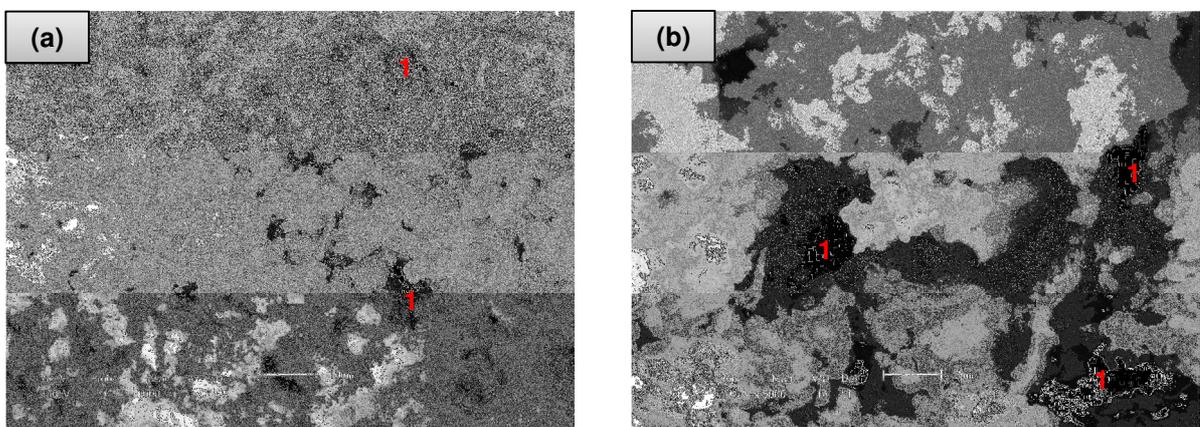
Figura 30 - MEV em modo SE (5000x) para as argamassas (a) T1A5 e (b) T1A15



Fonte: autor, 2012.

Visualiza-se na Figura 31 o MEV realizado para o traço de referência T2A0. Verifica-se a formação de grandes poros (1) e de uma superfície bem irregular, uma vez que a plasticidade aumentada pela presença de cal hidratada na mistura faz a pasta contornar os grãos da areia grossa e não preencher por completo os espaços entre eles, justificando os pequenos valores obtidos para as resistências em comparação às argamassas de traço T1.

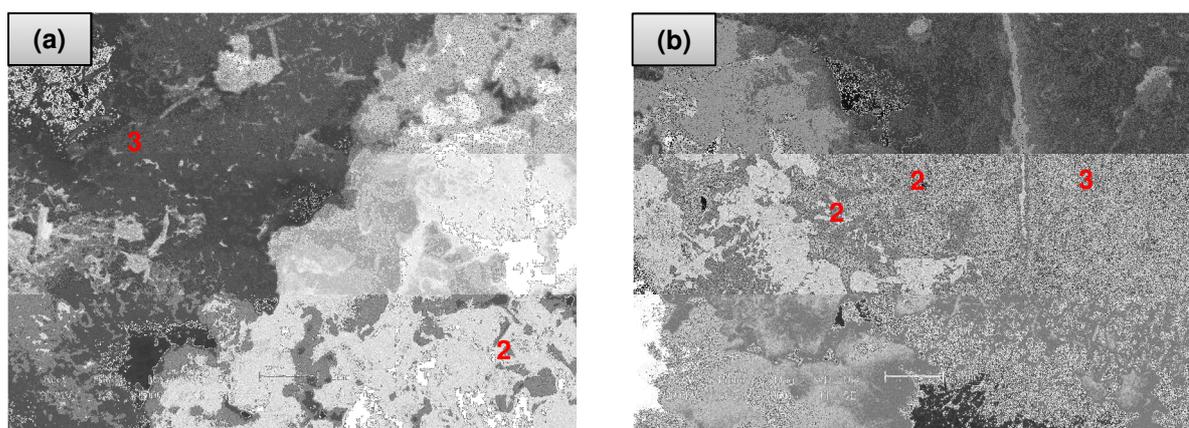
Figura 31 - MEV em modo SE para a argamassa de referência T2A0 com aproximação de (a) x1000 e (b) x5000



Fonte: autor, 2012.

O MEV realizado para o traço T2A5 pode ser visto na Figura 32a, enquanto que o do traço T2A15 consta na Figura 32b. Percebe-se que suas microestruturas são próximas as do traço T2A0, o que era esperado devido a pouca variação apresentada nas suas resistências em relação ao traço de referência. Houve, no entanto, o surgimento de cristais (2) com o aumento do teor de substituição. Ambas as microestruturas apresentam a separação entre a pasta e um grão de areia (3).

Figura 32 - MEV em modo SE (5000x) para as argamassas (a) T2A5 e (b) T2A15



Fonte: autor, 2012.

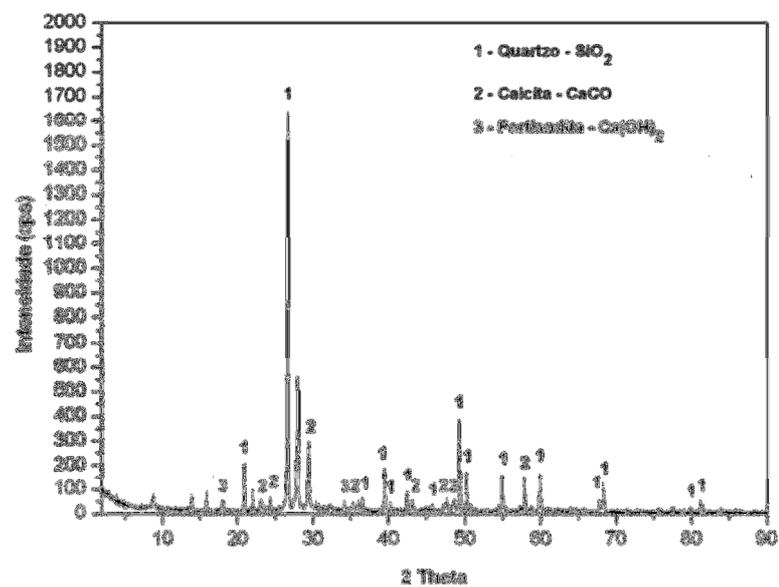
Quanto à análise microestrutural por meio do MEV, constatou-se que, com a substituição parcial do cimento pela cinza, as argamassas do traço T1 apresentaram uma mudança na sua microestrutura em relação ao traço de referência. Isso se deve pela maior incidência de cristais com o aumento da substituição, maior irregularidade na sua microestrutura e maior porosidade, justificando o fato das argamassas terem ficado menos resistentes.

Para as argamassas do traço T2, a mudança na microestrutura foi mais sutil, retificando as pequenas variações apresentadas em relação à de referência. O traço T2A5 apresentou uma microestrutura melhor empacotada que a de referência, explicando o aumento das suas resistências. Entretanto, o mesmo não pode ser dito para o traço T2A15, uma vez que o surgimento dos cristais não permitiu a melhora na microestrutura, tendo como consequência a redução na sua resistência à compressão, como pode ser constatado na Figura 26.

O DRX realizado para o traço de referência T1A0 está apresentado na Figura 33. Verifica-se a presença de uma grande incidência de quartzo (SiO_2), calcita (CaO) e do hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ na argamassa, mas há ausência da presença do

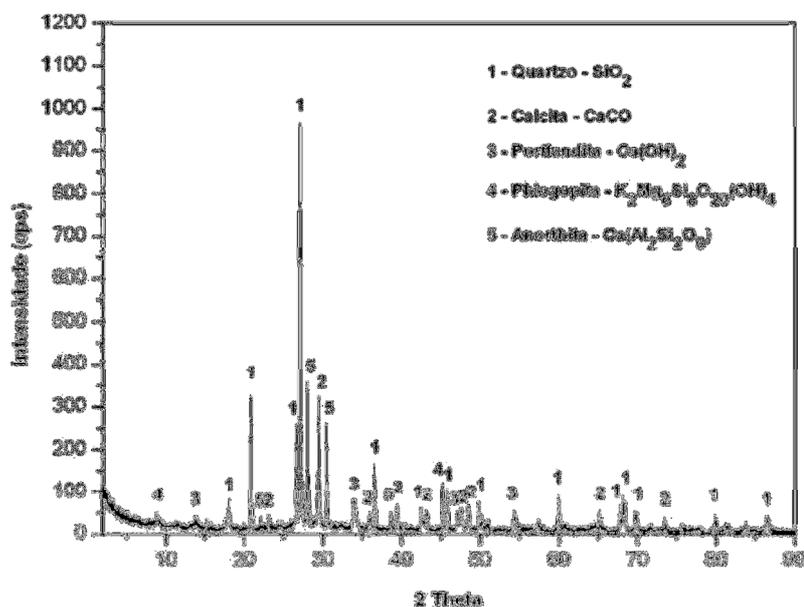
C-S-H. Além disso, o DRX para os demais traços foram muito similares ao do traço T1A0, e não acusaram a presença da etringita constatada no MEV, como pode ser visto na Figura 34 para o traço T2A15. Assim, não se pôde chegar a uma conclusão sobre a influência das cinzas no DRX das argamassas, nem constatar a presença da etringita, sendo indicada a repetição do ensaio com uso do método de refinamento de Rietveld. Tal repetição não foi possível ser realizada nesta pesquisa por questões operacionais.

Figura 33 - Difratoograma apresentando as fases identificadas para o traço T1A0



Fonte: autor, 2012.

Figura 34 - Difratoograma apresentando as fases identificadas para o traço T2A15



Fonte: autor, 2012.

CAPÍTULO 5

Conclusões

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que, para um teor de 5% de substituição, tanto para o traço 1:3 (T1; argamassa de revestimento) quanto para o traço 1:2:8 (T2; argamassa de assentamento de alvenaria), é possível substituir o cimento Portland pela cinza residual de lenha de algaroba (CRLA) nas argamassas estudadas, sem comprometer sua integridade e suas propriedades no estado fresco e endurecido. Assim sendo, é possível substituir em até 10% o cimento pela CRLA sem comprometer as suas propriedades, mantendo uma boa trabalhabilidade e resistências.

Na prática, utilizando um teor de 10% de substituição, para cada 10 sacos de cimentos usados em obra, seria poupado 1 saco e utilizado cerca de 32 kg de cinza, tendo sido apenas peneirada previamente, representando cerca de 36 litros de cinza utilizados. Estes são valores ótimos de aplicação da cinza, onde mesmo pequenos percentuais já a estariam dando uma destinação mais adequada.

Em função dos grupos de resultados e de acordo com os objetivos específicos estabelecidos, pode-se concluir que:

- As cinzas residuais de lenha de algaroba estudadas não apresentaram comportamento de material pozolânico. Adotou-se, então, para o restante do estudo apenas a CRLA-A, chamando-a de CRLA, devido a sua facilidade de aplicação e obtenção, uma vez que a CRLA-B não teve variações significativas em suas características, comparativamente. Também foram adotados pequenos percentuais de substituição, visando avaliar a aplicação da cinza como fíler;
- Em seu estado fresco, ambas as argamassas mantiveram seu consumo de água para os índices de consistência estabelecidos, indicando que a cinza exigiu um consumo de água tanto quanto necessitava o cimento substituído;

- Em seu estado endurecido, ambas as argamassas apresentaram valores inconstantes de densidade de massa aparente. Quanto à resistência à tração na flexão, as argamassas do traço T1 apresentaram queda na resistência a partir dos 7% de substituição em relação à de referência, enquanto que as argamassas do traço T2 tiveram um grande aumento na resistência para 5% de substituição e menores para os teores 7% e 10%, registrando queda aos demais teores em relação à de referência. Isso se deve a um melhor empacotamento do sistema, mesmo que sutil, contribuindo para manter e melhorar a resistência das argamassas com pouca substituição. Quanto à resistência à compressão, a substituição do cimento provocou grande queda nos valores para as argamassas do traço T1, mas manteve uma queda menos acentuada para as do traço T2. Quanto à resistência de aderência à tração das argamassas do traço T1, os resultados se mostraram inconclusivos;
- Com relação à microestrutura, os MEV demonstraram que a substituição do cimento pela CRLA promoveu poucas mudanças, ficando mais evidentes para as argamassas do traço T1. Quanto às fases formadas, os DRX indicaram que as argamassas apresentaram as mesmas fases, mas não elementos importantes, sendo inconclusiva e necessária a sua avaliação por outro método de refinamento, como Rietveld.

CAPÍTULO 6

Recomendações para trabalhos futuros

Ao longo deste estudo e considerando a abrangência do tema, constatou-se que é impossível abordar todas as possibilidades de análise com um único trabalho sobre o comportamento de um determinado material. Além disso, alguns ensaios e caracterizações não foram realizados, ficando aqui, portanto, a sugestão de que tais ensaios e adequações para que sejam realizados posteriormente:

- Analisar diferentes tipos de cinzas de lenha, como as de serragem ou as de resíduos de construção civil (pedaços de madeira descartados);
- Usar outras formulações de traço para aplicações diversas, assim como diferentes tipos de cimento;
- Reavaliar a resistência de aderência à tração de modo mais efetivo;
- Realizar ensaios de absorção de água por capilaridade, retenção de água e retração no estado fresco e endurecido.

Referências Bibliográficas

ARAUJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. das G. A. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: EDUR, 2000. 203 p.

ALMEIDA, M. V. V. A. **Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto forno. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6453**: Cal Virgem para construção civil – requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal Hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregado para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 1983.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225**: Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Especificações. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 1995.

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13530**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

BAÍA, L. L.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras. 1. ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000. 82 p.

BARBOSA, K. C. **Avaliação experimental do fenômeno de retração em alvenaria de blocos de concreto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Concreto**: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v. 1946 p. Cap 6.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. V1. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BEDINELLI, T. **Ação tenta frear lenha em indústrias do NE**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Campina Grande, 2 maio 2007. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/energia/reportagens/index.pho?id01=2670&lay=ene#>>. Acesso em: 21 nov. 2011.

BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha Parte I - Características da cinza. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 319, p. 192-196, 2005.

CAMELO, D. L.; SILVA, G. N. da; SOUZA, P. S. L.; MARTINS, M. L. Contribuição ao estudo de aproveitamento da cinza da casca da castanha-do-pará como Material Pozolânico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47, 2005, Recife. **Anais...** 1 CD-ROM.

CAPELLO, G. Cimento ecológico: produto tem nível de CO₂ reduzido em sua fórmula, causando menos impactos no meio ambiente. **Arquitetura & Construção**, São Paulo, fev. 2008. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/casa/conteudo_270173.shtml>. Acesso em: 07 nov. 2011.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p. Cap 26.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. Boletim técnico 237 IPT. São Paulo, 1999.

CETESB. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa associadas aos Processos Industriais**: Produtos Minerais, Produção de Cimento do Estado de São Paulo, 1990 a 2008. 1º Relatório de Referência. São Paulo, out. 2010.

CIMENTO.ORG. **Cimento Mundo**. Disponível em: <<http://www.cimento.org>>. Acesso em: 29 nov. 2011-1.

CIMENTO.ORG. **Cimento Brasil**. Disponível em: <<http://www.cimento.org>>. Acesso em: 29 nov. 2011-2.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento**: características, propriedades e métodos de ensaio. Boletim técnico 68 IPT. São Paulo, 1995.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M. Cal na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p. Cap 22.1.

CHEAH, C.B; RAMLI, M. Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, vol 30, p. 320-329, 2011.

COLEMAN, N. J. Cimento: essencial como água. **Super Obra**. Disponível em: <http://www.superobra.com.br/admin/news.asp?ID_New=667&Pag=all_news.asp&of fset=1&ID_Sessao_New=2&ID_ANew=10>. Acesso em: 20 ago. 2011.

CONSTRUFÁCIL. **Materiais do concreto**. Publicado em 6 jun. 2009. Disponível em: <<http://construfacil.webnode.com/news/materiais-do-concreto1/>>. Acesso em: 18 mar. 2012.

CORDEIRO, L de N. P; HENRIQUES, A. C. A; SOUZA, P. S. L. Contribuição ao Estudo de Aproveitamento da Cinza do Carçoço do Açaí como Material Pozolânico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** 1 CD-ROM.

CORDEIRO, G. C; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. de M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009.

CRUZ-YUSTA, M.; MÁRMOL, I.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. Use of olive biomass fly ash in the preparation of environmentally friendly mortars. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 16, p.6991-6996, 2011.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v. 1946 p. Cap 8.

DESMATAMENTO no seridó será reduzido. **Jornal De Fato**, Natal, 2007. Disponível em: <<http://www.semarh.rn.gov.br/detalhe.asp?IdPublicacao=7422>>. Acesso em: 15 out. 2010.

ETIÉGNI, L.; CAMPBELL, A. G. Physical and chemical characteristics of Wood ash. **Bioresource technology**, v. 37, p. 173-178, 1991.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a Construção Civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p. Cap 16.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. São Paulo: PINI, 2003, 223 p.

GOMES, A. O. Propriedades das argamassas de revestimento de fachadas. **Comunidade da Construção**. UFBA. Salvador, 2008.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2 ed. São Paulo: PINI, 2002. 341 p.

ISHIKAWA, P. H. **Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

KIELING, A.; CAETANO, M. O.; KULAKOSWIKI, M. P.; KAZMIERCZAK, C. de S. Influência da adição de cinza de casca de arroz na aderência de argamassas de revestimento. **Estudos Tecnológicos**, v. 5, n. 2, p. 157-170, 2009.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A. Análise da pozolanicidade da cinza da casca da castanha do caju pelo método de difratometria de Raios-X. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 680-688, 2009.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B; SABBATINI; F. H. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação interna e externa e tetos**. São Paulo: EPUSP, 1998.

MASCHIO, S. *et al.* Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortar production: Rheological behavior of the pastes and materials compression strength. **Chemosphere**, v. 85, p. 666-671, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, M. C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinza de algarroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou Pozolânico**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N.; MCCORMICK, S. Recycling of wood ash in cement-based construction materials. In: RESIDUE-TO-REVENUE: RESIDUAL WOOD CONFERENCE, 2001, Richmond, BC, Canadá. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www4.uwm.edu/cbu/Papers/2001%20CBU%20Reports/REP-446.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2010.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N.; SIDDIQUE, R. Use of wood ash in cement-based materials. In: CANMET/ACI, 7., 2003, Las Vegas, Estados Unidos. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www4.uwm.edu/cbu/Papers/2003%20CBU%20Reports/REP-513.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2010.

NETTO, R. M. **Materiais Pozolânicos**. Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. trad. Salvador E. Giammusso. São Paulo: PINI, 1997.

NÓBREGA, A. K. C.; MELO, F. C. A. C. de; SÁ, M. das V. V. A. de; PEREIRA, K. L. de A. Influência da cinza residual de algarroba na resistência mecânica de argamassas sustentáveis. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 2, 2011, Maceió. **Anais...** 1 CD-ROM.

PAULA, M. O. de; TINÓCO, I. de F. F.; RODRIGUES, C. de S.; SILVA, E. N. da; SOUZA, C. de F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Agriambi**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 353-357, 2009.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou Pozolânico**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

POUEY, M. T. F.; MOLIN, D. C. C. D.; BERGMANN, C. P. Avaliação de diferentes processos de moagem de cinzas de casca de arroz residuais com diferentes características mineralógicas através do Índice de Atividade Pozolânica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** 1 CD-ROM.

REPETTE, W. L. Cimentos Especiais de Base Mineral. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil** e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p. Cap 24.

RODRIGUES, M. S; BERALDO, A. L. Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 193-204, 2010.

ROMAN, H. R.; MUTTI, C. N.; ARAÚJO, H. N. **Construindo em alvenaria estrutural**. Florianópolis: UFSC, 1999. 83 p.

SABATTINI, F. H. Argamassa de revestimento para parede de alvenaria resistente. Boletim técnico da escola politécnica da Universidade de São Paulo. USP, 1986.

SANI, M. S. H. bin M.; MUFTAH, F. bt; RAHMAN, M. A. Properties of waste paper sludge ash (WPSA) as cement replacement in mortar to support green technology material. INTERNATIONAL SYMPOSIUM & EXIBITION IN Sustainable Energy & Environment, 3, 2011, Malaka, Malaysia. **Anais...**

SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

SIDDIQUE, R. **Waste Materials and By-Products in Concrete**. Alemanha: Springer, 2008.

SILVA, C. G. **Algaroba**. Laboratório de Produtos Fermento Destilados. Disponível em: <<http://www.ct.ufpb.br/laboratorios/lpfd/algaroba.htm>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil** e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p. Cap 23.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

SILVA, N. I. W.; CALARGE, L. M.; CHIES, F.; MALLMANN, J. E.; ZWONOK, O. Caracterização de cinzas volantes para o aproveitamento cerâmico. **Cerâmica**. São Paulo, v. 45, n. 296, nov.-dez. 1999. P. 184-187.

SOUZA, G. N.; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** CD-ROM.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford, 1997.

TEIXEIRA, L. **Análise do Setor de Cimento no Brasil**. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/files/textos/032.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

TRIBUNA DO NORTE. **Setor mineral quer expansão no RN**. Natal, 8 fev. 2009. Disponível em: <<http://tribunadonorte.com.br/noticias/100307.html>>. Acesso em: 29 nov. 2011.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.

YANG, F.; ZHANG, B.; PAN, C.; ZENG, Y. Traditional mortar represented by sticky rice lime mortar – One of the great inventions in ancient China. **Science in China Series E: Technological Sciences**. China, v. 52, n. 6, p. 1641-1647, 2009.