



**Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste - Núcleo de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental**

Marcio Couceiro Saraiva de Melo

**ESTUDO DE ARGAMASSAS ADICIONADAS DE CINZAS DE ALGAROBA
GERADAS NO ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE CONFECCÕES DO
AGRESTE PERNAMBUCANO**

**Caruaru
2012**

Marcio Couceiro Saraiva de Melo

**ESTUDO DE ARGAMASSAS ADICIONADAS DE CINZAS DE ALGAROBA
GERADAS NO ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE CONFECÇÕES DO
AGRESTE PERNAMBUCANO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade Federal de Pernambuco-
Centro Acadêmico do Agreste- para
obtenção do Título de Mestre.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Cecília Vieira
da Nóbrega.

**Caruaru
2012**

Catálogo na fonte
Bibliotecário Elilson Rodrigues Góis CRB4 - 1687

M565e Melo, Marcio Couceiro Saraiva de.
 Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano. / Marcio Couceiro Saraiva de Melo. – Caruaru: O autor, 2012
 120 f.: il. ; 30 cm.

 Orientador: Ana Cecília Vieira da Nobrega.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2012.
 Inclui bibliografia.

 1. Argamassa. 2. Biomassa. 3. Algaroba – Pernambuco (cinzas). 4. Revestimento - Tecnologia. I. NÓBREGA, A. C. V. (orientadora). II. Título.

628 CDD (23.ed.)UFPE (CAA 2012-27)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE CINZAS DE
ALGAROA GERADAS NO ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE
CONFEÇÕES DO AGRESTE PERNAMBUCANO**

defendida por

MÁRCIO COUCEIRO SARAIVA DE MELO

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 24 de fevereiro de 2012

Ana Cecília Vieira da Nóbrega – PPGECAM/UFPE
(orientadora)

Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – PPGEC/UFRN
(examinador externo)

Érika Pinto Marinho – PPGECAM/UFPE
(examinador interno)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Cinthya pelo incentivo e apoio que me fizeram começar, avançar e concluir esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pela dádiva da vida plena pela qual posso pensar e construir todos os meus objetivos;

A **minha esposa Cinthya** e às **minhas filhas Gabriela e Maiara**, por tanta compreensão nas minhas inúmeras horas de ausência familiar;

Aos meus pais **Márcio e Therezinha**, pelo apoio constante e irrestrito que me dedicaram;

Ao meu grande amigo **Ricardo Henrique**, companheiro de mestrado, pela amizade e pelos incansáveis incentivos ofertados em todos os momentos vividos durante o meu mestrado;

À **Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (UFPE-CAA)**, na pessoa da **Coordenadora e Professora Doutora Sylvana Santos**, pelo incentivo e apoio constantes;

À **FACEPE**, pelos dois anos de bolsa de mestrado concedida para esta pesquisa;

À **Professora Doutora Erika Marinho (UFPE-CAA)**, pelas ressalvas preciosas que fez durante todo período de mestrado;

Aos **Professores Doutores Antônio Acácio e Humberto Correia (UFPE-CAA)**, pelos valorosos comentários feitos na qualificação da dissertação;

Ao técnico administrativo da Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (UFPE-CAA) **Samuel Kisseberg**, pela disposição e boa vontade constantes nos atendimentos burocráticos;

À técnica do Laboratório de Materiais Construtivos (UFPE-CAA) **Fabíola Freire**, pela disposição e boa vontade no apoio à execução dos experimentos;

Aos alunos bolsistas de iniciação científica do curso de Engenharia Civil (UFPE-CAA), **Paloma Alcantara, José Venâncio e Lyneker**, pelo apoio na execução de parte dos experimentos;

Ao **Sr. Elias Frutuoso**, da Oficina Soldex, pela valiosa contribuição no desenvolvimento de acessórios para os equipamentos utilizados na etapa experimental da pesquisa;

Ao **Sr. Silvano Silva**, da Lavanderia Nova Geração, pelo fornecimento das cinzas de algaroba utilizadas na pesquisa;

E em especial, a minha orientadora **Professora Doutora Ana Cecília Vieira Nóbrega** (UFPE-CAA), pela confiança em mim depositada e pelo apoio irrestrito e incansável que me foi dado durante todo o percurso de orientação e de execução de laboratório, os quais me permitiram chegar ao término do mestrado com dedicação e estímulo.

RESUMO

Esse trabalho avaliou a incorporação em argamassas de revestimento de cinzas de topo e cinzas de base, provenientes da queima de lenha de Algaroba nas lavanderias do arranjo produtivo local (APL) de confecções da região agreste pernambucano-Brasil. As cinzas foram coletadas em uma lavanderia de médio porte representativa da região, peneiradas em malha 200, avaliadas quanto as suas características físico-químicas e adicionadas em argamassa do tipo emboço, com traço 1:2:9 (cimento, cal, areia), comum nas construções da região de Caruaru-Pernambuco-Brasil. Na produção das formulações, para cada uma das cinzas, foi mantida a mesma relação água/cimento e mesma faixa de consistência para todas as argamassas, gerando formulações com adição de 10, 20, 30 e 40% em relação à massa de cimento. As formulações com adição foram comparadas com uma argamassa padrão (sem adição), utilizando a metodologia para caracterização de argamassas descrita pela ABNT. Os resultados indicaram que argamassas com adição de cinzas, quando comparadas com a argamassa padrão, apresentaram, no estado fresco, capacidade de retenção de água e densidade semelhantes, e no estado endurecido, índice de vazios, resistência mecânica, absorção de água e resistência potencial de aderência à tração sem alterações significativas. A manutenção das características das argamassas com a adição é atribuída à ação do efeito *filler*, que contribuiu para uma maior compacidade do sistema compensando os efeitos negativos da adição. Foi verificado, ainda, que argamassas com adição de cinzas de topo e cinzas de base apresentaram resultados equivalentes. O sucesso dos resultados gera a possibilidade de estudos futuros envolvendo a substituição parcial do cimento por cinzas de algaroba, o que significa redução de custos para a obtenção de argamassas com resistências mecânicas semelhantes à argamassa padrão, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental minimizando o descarte aleatório desses resíduos.

Palavras-chave: Argamassa. Argamassa de revestimento. Cinzas de biomassa. Algaroba. *Filler*.

ABSTRACT

In this study was evaluated the incorporation of fly ashes and bottom ashes in masonry mortar. Both of ashes were produced by boilers from combustion of Algaroba wood in the laundries of the local productive arrangement on the clothing industry in the Agreste Region of Pernambuco. The ashes were collected in a midsize representative laundry of the region. In the sequence, both of them were sieved through 200 mesh and evaluated for their physicochemical properties and added to cement plasters. The mortar were prepared in proportion 1:2:9 (cement:lime:sand) in volume, commonly used in the region of Caruaru-Pernambuco-Brazil. The water-cement ratio was constant for all formulations, as well as the same range of the consistencies. In order to maintained this characteristics, it was possible to add both of the ashes in 10, 20, 30 e 40% by mass in relation to the mass of the cement. The formulations using each type of ash are specified by the ABNT standards organization and compared to the standard mortar (without any addition). When compared with the standard mortar, the results indicate that the mortars with addition of both of the ashes don't have influence in the fresh state properties, showing similar capacity of retention of water and density, as well as voids content, mechanical resistance, water absorption and resistance potential of adhesion traction were similar in the hardened state after the additions. The maintenance of the properties is mainly attributed to the action of the filler effect, which contributes to the compactness of the system, offsetting the negative effects of the addition. In addition, it was observed that the addition of fly ashes and bottom ashes showed similar results. The success of the results raises the possibility of future studies involving the partial replacement of cement by Algaroba ashes, which means lower costs for obtaining mortars mechanical strength similar to standard ones. Furthermore, the bases ash mortars contribute for the better environmental sustainability by minimizing the indiscriminate disposal of such wastes.

Keywords: Mortar. Masonry mortar. Biomass Ashes. Algaroba. Filler.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Combustíveis Utilizados nas Caldeiras das Lavadeiras de Toritama/PE.	23
Figura 2 - Camadas de revestimento.	25
Figura 3 - Efeito <i>filler</i> dos aditivos minerais.	33
Figura 4 - Variação da retenção de água em função da composição das argamassas.	41
Figura 5 - Fluxograma das etapas e ensaios realizados na pesquisa	49
Figura 6 - Curva granulométrica da areia utilizada nas argamassas.	52
Figura 7 – Calderia da lavanderia (a) e sua fornalha (b).	53
Figura 8 - Cinza de topo (CT) como coletada na lavanderia (a) e após beneficiamento (b).	54
Figura 9 - Cinza de base (CB) como coletada na lavanderia (a) e após beneficiamento (b).	55
Figura 10 - Determinação do índice de consistência.	60
Figura 11 - Sequência de determinação da retenção de água. Conjunto montando (a), massa do conjunto vazio com papel filtro úmido (b) e massa do conjunto com argamassa (c).	61
Figura 12 - Pesagem de corpo de prova em balança hidrostática para avaliação da absorção de água.	65
Figura 13 - Recipiente para realização do ensaio absorção de água por capilaridade.....	67
Figura 14 - Determinação do índice de capilaridade.	67
Figura 15 - Ensaio para determinação da absorção de água por capilaridade. Corpos-de-prova imersos (a) e pesagem (b).....	68
Figura 16 – Corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos prontos para ensaios de compressão.	69
Figura 17 - Determinação da resistência à compressão NBR 13279 (1995). ..	70
Figura 18 - Determinação da resistência a tração na flexão NBR 13279 (2005).	70
Figura 19 - Determinação da resistência a compressão com corpo de prova prismático.	71

Figura 20 - Ensaio de caracterização do lote de SP, pastilhas coladas para ensaio de aderência à tração.	73
Figura 21 - Ensaio de caracterização do lote de SP, absorção de água.	73
Figura 22 - SP sem argamassa (a) e SP após a aplicação de argamassa (b).	74
Figura 23 - SP com argamassa cortada (a) e SP com as pastilhas para ensaio de arrancamento coladas (b).	75
Figura 24 - SP após o ensaio de arrancamento.	75
Figura 25- Granulometria CT.	79
Figura 26 - Granulometria CB.	80
Figura 27 - Micrografia eletrônica de varredura em modo SE da CT (1000X) (a) e (5000X) (b).....	80
Figura 28 - Micrografia eletrônica de varredura em modo SE da CB (1000X) (a) e (5000X) (b).....	81
Figura 29 - Consistência normal de argamassas adicionadas com CT ou CB nas proporções de 10, 20, 30, 40 e 50%.	83
Figura 30 - Retenção de água das argamassas adicionadas com CT ou CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.	85
Figura 31 - Densidade de massa de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.	86
Figura 32 – Teor de ar incorporado de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.	87
Figura 33 - Densidade de massa no estado endurecido de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.	88
Figura 34 - Absorção de água em argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.	90
Figura 35 - Índice de vazios de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.	90
Figura 36 - Massa específica de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.	91
Figura 37- Absorção de água por capilaridade de massa de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%, após 10 minutos.	91

Figura 38- Absorção de água por capilaridade de massa de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%, após 90 minutos.	92
Figura 39 - Coeficiente de capilaridade de massa de argamassas adicionadas de CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.	93
Figura 40- Resistência a compressão corpos-de-prova prismáticos, com 0, 10, 20, 30 e 40% de adição de CT.	94
Figura 41 - Resistência a compressão corpos-de-prova prismáticos, com 0, 10, 20, 30 e 40% de adição de CB.	94
Figura 42 - Resistência a compressão corpos-de-prova cilíndricos, com 0, 10, 20, 30 e 40% de adição de CT.	95
Figura 43 - Resistência a compressão corpos-de-prova cilíndricos, com 0, 10, 20, 30 e 40% de adição de CB.	96
Figura 44 - Resistência potencial de aderência a tração de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 0, 10, 20, 30 e 40%.	97
Figura 45 - Microscopia eletrônica de varredura em modo SE (5000X) da argamassa padrão aos 28 dias.	100
Figura 46- Micrografias eletrônicas de varredura em modo SE (5000x) para a argamassa adicionada de CT nas proporções de 10% (a) e 20% (b).Fonte: Figura do autor, 2012.	101
Figura 47- Micrografias eletrônicas de varredura em modo SE (5000x) para a argamassa adicionada de CT nas proporções de 30% (a) e 40% (b).	101
Figura 48- Micrografias eletrônicas de varredura em modo SE (5000x) para a argamassa adicionada de CB nas proporções de 10% (a) e 20% (b).	102
Figura 49 - Micrografias eletrônicas de varredura em modo SE (5000x) para a argamassa adicionada de CB nas proporções de 30% (a) e 40% (b).	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais tipos de cimento Portland do mercado Brasileiro com as adições minerais recebidas.	28
Tabela 2 - Volume de CO ₂ liberado para a atmosfera para cada quilograma de cimento produzido.	31
Tabela 3 - Exigências químicas mínimas.	34
Tabela 4 - Exigências físicas mínimas.	34
Tabela 5 - Exigências químicas mínimas para a cal hidratada segundo a NBR 7175 (2003).	37
Tabela 6 - Exigências físicas mínimas para cal hidratada segundo a NBR 7175 (2003).	37
Tabela 7 - Módulo de finura recomendado pela NBR 7211 (2005).	39
Tabela 8 - Tipos de consistência das argamassas.	40
Tabela 9 - Classificação de argamassa quanto sua densidade de massa no estado fresco.	42
Tabela 10 - Limites da resistência de aderência a tração.	45
Tabela 11 - Características químicas do cimento.	50
Tabela 12 - Características físicas do cimento.	50
Tabela 13 - Análise química da cal hidratada.	51
Tabela 14 – Análise física da cal hidratada.	51
Tabela 15- Distribuição granulométrica da areia	52
Tabela 16 - Características físicas da areia.	52
Tabela 17 - Rendimento percentual do peneiramento das cinzas de lavanderia em malha 200.	54
Tabela 18 - Número de corpos-de-prova e parâmetros avaliados nos ensaios.	59
Tabela 19 - Número de corpos-de-prova e parâmetros avaliados nos ensaios.	63
Tabela 20 - Caracterização de qualidade do lote de SP utilizado na pesquisa.	74
Tabela 21- Características químicas da CT de algaroba.	77
Tabela 22 - Características químicas da CB de algaroba.	78
Tabela 23 – avaliação de perda ao fogo a 550°C de CT e CB.	78
Tabela 24- Massa específica e área específica da CT com partículas $\leq 75\mu\text{m}$	79

Tabela 25 – Índice de atividade pozolânica.....	81
Tabela 26 - Conversão do traço em volume para traço em massa.....	82
Tabela 27 - Traço padrão utilizado na pesquisa.....	84
Tabela 28- Classificação da retenção de água NBR 13281 (2005).	85
Tabela 29- Classificação das argamassas segundo a densidade de massa no estado fresco. NBR 13281 (2005).	86
Tabela 30 – Massa específica dos elementos das argamassas analisadas	87
Tabela 31 - Classificação das argamassas segundo densidade massa no estado endurecido. NBR 13281 (2005).	89
Tabela 32 - Classificação das argamassas segundo o coeficiente de capilaridade. NBR 13281 (2005)	93
Tabela 33 - Classificação das argamassas, segundo a resistência a compressão NBR 13281 (2005)	96
Tabela 34 - Classificação das argamassas segundo resistência potencial de aderência a tração. NBR 13281 (2005)	97
Tabela 35 – Aplicação prática das argamassas PADRÃO, CT10, CT20, CT30 e CT40	98
Tabela 36 - Aplicação prática das argamassas PADRÃO, CB10, CB20, CB30 e CB40.....	99
Tabela 37 - Consistência normal das argamassas analisadas.	117
Tabela 38- Retenção de água no estado fresco das argamassas analisadas.	117
Tabela 39 - Densidade de massa no estado fresco das argamassas analisadas	117
Tabela 40 - Densidade de massa no estado endurecido.....	118
Tabela 41 - Absorção total de água.	118
Tabela 42 - Índice de vazio, argamassa endurecida.	118
Tabela 43 - Massa específica das argamassas no estado endurecido.....	119
Tabela 44 - Absorção de água por capilaridade após 10 e 90 minutos.	119
Tabela 45 - Coeficiente de capilaridade.	119
Tabela 46 - Resistência a compressão corpos de prova cilíndricos.	120
Tabela 47 - Resistência a compressão corpos-de-prova prismáticos.	120
Tabela 48 - Resistência potencial de aderência a tração.	120

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

APL	Arranjo produtivo local
CT	Cinza topo
CB	Cinza base
CB10	Argamassa com adição de 10% de cinza de base
CB20	Argamassa com adição de 20% de cinza de base
CB30	Argamassa com adição de 30% de cinza de base
CB40	Argamassa com adição de 40% de cinza de base
CB50	Argamassa com adição de 50% de cinza de base
CT10	Argamassa com adição de 10% de cinza de topo
CT20	Argamassa com adição de 20% de cinza de topo
CT30	Argamassa com adição de 30% de cinza de topo
CT40	Argamassa com adição de 40% de cinza de topo
CT50	Argamassa com adição de 50% de cinza de topo
CPI	Cimento Portland comum
CP II	Cimento Portland composto
CP III	Cimento Portland de alto forno
CP IV	Cimento Portland pozolânco
CP V - ARI	Cimento de alta resistência inicial
CPRH	Agência estadual de meio ambiente e recursos hídricos- Pernambuco
SEBRAE	Serviço brasileiro de apoio as micros e pequenas empresas
SP	Substrato padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS.....	21
2.1	Objetivo Geral	21
2.2	Objetivos Específicos	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
3.1	APL de Confeções Pernambucano	22
3.2	Cinzas Geradas no APL de Confeções Pernambucano	23
3.3	Argamassas de revestimento	24
3.3.1	Classificação das argamassas de revestimento	26
3.3.2	Componentes de argamassa mista	26
3.3.2.1	Cimento Portland	27
3.3.2.1.1	Hidratação do cimento Portland	29
3.3.2.1.2	Adições minerais	30
3.3.2.1.3	Escória granulada de alto forno	32
3.3.2.1.4	Adições inertes ou quase inertes (efeito <i>filler</i>)	32
3.3.2.1.5	Material Pozolânico	33
3.3.2.2	Cal Hidratada	36
3.3.2.2.1	Processo de fabricação	36
3.3.2.2.2	Uso da cal em argamassas	37
3.3.2.3	Agregado miúdo.....	38
3.3.3	Propriedades no estado fresco	39
3.3.3.1	Trabalhabilidade.....	39
3.3.3.2	Consistência	40
3.3.3.3	Retenção de água.....	41
3.3.3.4	Densidade de massa	41
3.3.4	Propriedades no estado endurecido	42
3.3.4.1	Densidade de massa no estado endurecido.....	42
3.3.4.2	Permeabilidade	43
3.3.4.3	Resistência à compressão	43
3.3.4.4	Aderência.....	44

3.3.5	Argamassa de revestimento com adição de cinzas	45
3.3.5.1	Cinzas de biomassa	45
4	ESTADO DA ARTE	47
5	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	49
5.1	Material de partida	50
5.1.1	Cimento	50
5.1.2	Cal	51
5.1.3	Água	51
5.1.4	Agregado miúdo	51
5.1.5	Cinzas	53
5.1.5.1	Cinzas de topo (CT)	54
5.1.5.2	Cinzas de base (CB)	55
5.1.6	Caracterização físico-química das cinzas	55
5.1.6.1	Análise química	55
5.1.6.2	Granulometria a laser	56
5.1.6.3	Área superficial específica e porosidade das partículas	56
5.1.7	Caracterização microestrutural das cinzas	56
5.1.7.1	MEV	56
5.1.8	Determinação da atividade pozolânica das cinzas	56
5.2	Produção das argamassas	57
5.2.1	Desenvolvimento das formulações	57
5.2.2	Moldagem dos corpos de prova	58
5.3	Caracterização das argamassas no estado fresco	59
5.3.1	Consistência	59
5.3.2	Retenção de água	60
5.3.3	Densidade de massa e teor de ar incorporado	62
5.4	Caracterização das argamassas no estado endurecido	63
5.4.1	Densidade de massa aparente no estado endurecido	63
5.4.2	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	64
5.4.3	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade	66
5.4.4	Resistência à compressão e a tração na flexão	69
5.4.5	Resistência potencial de aderência potencial à tração	71
5.4.6	Avaliação da aplicabilidade das argamassas	76
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
6.1	Cinzas	77

6.1.1	Análise química	77
6.1.2	Massa específica e área específica (BET)	78
6.1.3	Granulometria.....	79
6.1.4	MEV	80
6.1.5	Determinação da atividade pozolânica das cinzas.....	81
6.2	Argamassas	82
6.2.1	Desenvolvimento das formulações	82
6.2.2	Propriedades no estado fresco	82
6.2.2.1	Consistência	82
6.2.2.2	Retenção de água.....	84
6.2.2.3	Densidade de massa no estado fresco	85
6.2.3	Propriedades no estado endurecido	88
6.2.3.1	Densidade de massa no estado endurecido.....	88
6.2.3.2	Absorção de água, índice de vazios.....	89
6.2.3.3	Absorção de água por capilaridade	91
6.2.3.4	Resistência à compressão e flexão	93
6.2.3.5	Resistência potencial de aderência à tração	96
6.2.4	Avaliação da aplicabilidade das argamassas.....	97
6.2.5	Caracterização microestrutural das argamassas endurecidas	100
6.2.5.1	MEV	100
6.2.5.1.1	Argamassa padrão	100
6.2.5.1.2	Argamassas com adição de cinzas	100
7	CONCLUSÕES.....	103
8	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
	ANEXOS.....	112
	ANEXO 1 - REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	112
	ANEXO 2 – TABELAS E DADOS DOS ENSAIOS.....	117

1 INTRODUÇÃO

O setor de confecções, do estado de Pernambuco, é o terceiro maior do Brasil, ficando atrás apenas de São Paulo e do Rio de Janeiro. A região agreste do estado concentra 60% de toda a produção estadual do pólo de confecções, englobando os municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe, Toritama e Surubim, onde os principais produtos são o Jeans (calças, bermudas, saias, shorts e camisas), malharia em algodão e peças de moda casual em tecido (SEBRAE, 2006).

Dentre as operações de uma lavanderia de jeans está o processo de tingimento, onde se faz necessário aquecimento da água em caldeiras. Para tanto, a lenha ainda é uma das fontes de energia utilizada no agreste Pernambucano, gerando assim grande quantidade de cinzas que são descartadas sem nenhum tipo de controle.

Nesse cenário, o presente trabalho avaliou a possibilidade de reutilização de dois tipos de cinzas produzidas pela queima de lenha de algaroba em uma lavanderia de médio porte representativa do APL de confecções de Pernambuco em argamassas de revestimento do tipo emboço. A primeira cinza foi denominada cinza de topo (CT), por ficar retida dentro da caldeira após o ponto de queima da lenha; já a segunda foi denominada de cinza de base (CB), por cair da grelha onde é depositada a lenha para combustão.

A escolha do sistema construtivo argamassa está intrinsecamente relacionada com o fato de ser um material cimentício empregado na maioria das edificações e que não necessita de grandes desempenhos mecânicos. A opção pela camada de emboço, em detrimento das camadas de chapisco e reboco, é devido ao seu maior volume de utilização na obra, uma vez que é a camada de maior espessura, principal componente do sistema de revestimento.

A possibilidade do desenvolvimento de atividade pozolânica pelo grupo que abrange as cinzas de biomassa de uma forma geral reportadas na literatura vigente: cinza volante (TAYLOR, 1990), cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CORDEIRO *et al.*, 2008), casca de arroz (METHA; MONTEIRO, 2008), cinza de casca de castanha caju (LIMA, 2008), entre outros, orientou a

necessidade de caracterização inicial da atividade pozolânica das CT e CB de algaroba.

As pozolanas são por definição, materiais silicosos ou sílico aluminosos que finamente divididos e na presença de água reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio presente na reação de hidratação do cimento Portland, formando compostos estáveis e com propriedades aglomerantes (METHA; MONTEIRO, 2008). Assim, podem ser utilizados como substituição parcial ao cimento Portland em pastas, argamassas e concretos (CORDEIRO, 2009).

Nesse sentido, a escolha primordial do elemento a ser parcialmente substituído na argamassa pelas cinzas (cimento ou agregado), bem como a possibilidade das cinzas serem adicionadas ao sistema como carga estava condicionada a esse resultado. Assim, foi realizada como pré-análise a caracterização da atividade pozolânica das cinzas de topo e cinzas de base de algaroba.

A possibilidade de substituir parcialmente o cimento é benéfica porque reduz custos energéticos envolvidos com a produção do cimento, além da redução do efeito estufa devido ao CO_2 , além de menos custos finais para a produção da argamassa. Para isso, é necessário que o material apresente atividade pozolânica.

Por outro lado, uma vez não apresentando atividade pozolânica, outra possibilidade tão relevante está na substituição parcial do agregado ou na adição como carga. Em ambos os casos, o efeito ambiental é alcançado, uma vez que se deixará de descartar um passivo ambiental gerado em grande quantidade de difícil descarte.

Na presente pesquisa, as CT e CB provenientes da lenha de algaroba não apresentaram atividade pozolânica pelo Método de Chapelle. Em consequência desse fato, e dado o módulo de finura naturalmente alcançado pelas cinzas de lenha de algaroba, sendo granulometricamente distante da faixa de classificação de agregado miúdo, optou-se por incorporar as cinzas ao sistema como carga.

Além disso, vislumbrou-se como efeito benéfico a possibilidade de obtenção do efeito da melhoria do empacotamento do sistema (*efeito filler*) com a adição de um resíduo sem necessidade de nenhuma adição de energia

externa e custo para moagem; por isso optou-se por classificar as cinzas na peneira em malha 200 (75 μm).

O efeito *filler* é um efeito físico de adições em materiais cimentícios e está relacionado às características de empacotamento da mistura; portanto, tamanho, forma e textura das partículas são fundamentais para permitir um melhor preenchimento dos vazios da estrutura, aumentando consequentemente a resistência do material (CORDEIRO *et al.*, 2008).

Além disso, a possibilidade de obtenção desse efeito *filler* é importante para as argamassas de revestimento, foco de estudo da presente dissertação, porque poderá contribuir para a redução da permeabilidade e porosidade, dois elementos importantes para este material. Em função disso, foi optado por direcionar o trabalho para a possibilidade desse efeito *filler*.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Avaliar o comportamento de argamassas de revestimento do tipo emboço, composta por cal, cimento e agregado, com adição de CT (cinza de topo) e CB (cinza de base) proveniente da queima de lenha de algaroba, geradas em uma lavanderia representativa do APL de confecções do agreste pernambucano.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar caracterização físico-química e de pozolanicidade (Método de Chappelle) das CT e CB peneiradas em malha 200 (75 μ m);
- Desenvolver formulações de argamassas adicionadas com CT e CB em relação à massa de cimento, até o limite onde a maior adição ficar dentro da faixa de consistência recomendado pela NBR 13276 (2005) de 260 ± 5 mm;
- Avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido das formulações de argamassa com cinzas em relação à argamassa padrão, tomando como base as normas da ABNT para caracterização de argamassas;
- Avaliar a microestrutura das argamassas com adição de cinzas em relação à argamassa padrão.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A finalidade deste capítulo é apresentar os fundamentos teóricos relacionados a argamassas de revestimento e cinzas de lenha de algaroba, de forma a embasar o leitor para interpretação dos resultados experimentais obtidos durante o desenvolvimento desta pesquisa. Abordou-se sobre o APL de Confeções Pernambucano e sua geração de cinzas, sobre as argamassas de revestimento: classificação, componentes, propriedades nos estado fresco e endurecido, além de argamassa de revestimento com adição de cinzas, cinzas de biomassa e a influência dessa adição nas propriedades de argamassas de uma forma geral.

Além disso, realizou-se também uma revisão sistemática da literatura a partir de buscas na Base de Dados *Science Direct* (<http://www.sciencedirect.com>), na opção de busca avançada, com as palavras-chave WOOD ASH e MORTAR no título, resumo e palavras-chave, a fim de fazer um breve levantamento dos artigos que apareciam e tinham relação com a pesquisa (cf. anexo 1).

3.1 APL de Confeções Pernambucano

Pernambuco possui o terceiro maior setor de confeções do Brasil, ficando atrás apenas do Rio de Janeiro e São Paulo, com faturamento representando 7% do PIB pernambucano.

A região agreste concentra 60% da produção do estado, onde existem 12 mil empreendimentos pertencentes ao arranjo produtivo local (APL) de confeções, concentrados principalmente nos municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe, Toritama e Surubim. O complexo emprega cerca de 76 mil pessoas, sendo os principais produtos fabricados o jeans, a malharia em algodão e as peças de moda casual em tecido (SEBRAE, 2008).

Segundo Castro (2009, p.8)

Arranjo produtivo local é uma aglomeração de empresas, localizadas em um mesmo território que apresenta especialização produtiva e mantém algum vínculo de articulação, interação, cooperação e aprendizagem entre si e com outros atores locais, tais como: governo, associações empresariais, instituições de crédito, ensino e pesquisa.

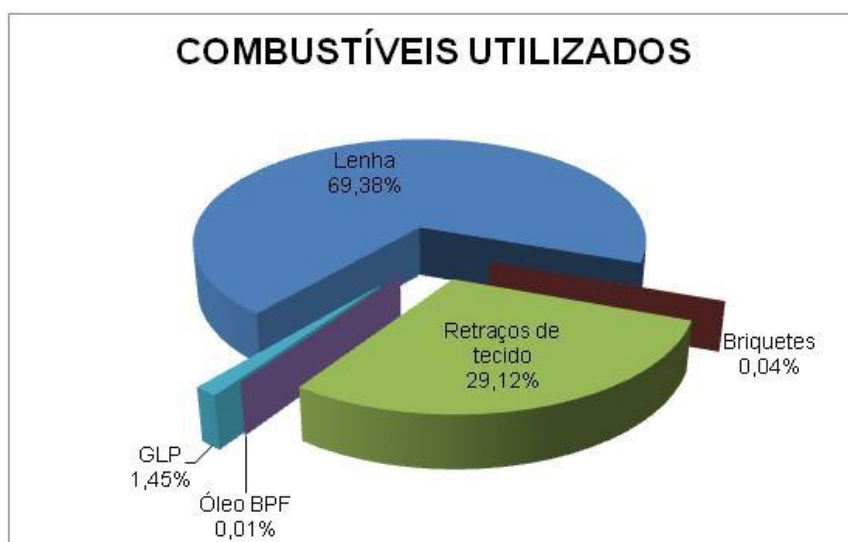
3.2 Cinzas Geradas no APL de Confeccões Pernambucano

No campo energético, a lenha tem contribuição no desenvolvimento da humanidade, tendo sido sua primeira fonte de energia. Inicialmente empregada para aquecimento e cocção de alimentos, hoje é utilizada para geração de energia térmica, mecânica e elétrica. No Brasil, segundo dados do balanço energético nacional do Ministério das Minas e Energia, a lenha representou 7,5% de toda a energia consumida no país no ano de 2009 (BEN, 2010).

No agreste pernambucano, dados do CPRH (Agência Estadual de Meio Ambiente-Pernambuco) de 2005, indicam que a lenha de algaroba é utilizada como fonte de energia, devido à facilidade para aquisição e baixo custo quando comparado com outros combustíveis.

Especificamente no pólo de confeccões, em especial na cidade de Toritama, foi realizada em 2005 uma pesquisa pela CPRH em uma amostragem de 59 lavanderias e foi identificado que a lenha representa 69% da energia consumida nas caldeiras para geração de vapor e água produzindo grande quantidade de cinzas como resíduo, conforme especificado na Figura 1.

Figura 1 - Combustíveis Utilizados nas Caldeiras das Lavandeiras de Toritama/PE.



Fonte: CPRH, 2005.

A algaroba é uma árvore da família das leguminosas e foi introduzida na região agreste de Pernambuco no ano de 1942, no município de Serra Talhada/PE, com sementes procedentes do Peru. A espécie se desenvolve

bem em regiões com precipitação pluviométrica entre 150 e 1200 mm anuais e resiste a longos períodos de estiagem. É considerada uma árvore de uso múltiplo e seus frutos são importantes fontes de proteínas e carboidratos, principalmente em regiões mais secas, e sua madeira é durável, sendo utilizada em mourões, taboas, dormente, estacas para cerca, lenha e carvão. (RABASKI *et al.* 2009).

3.3 Argamassas de revestimento

A argamassa de revestimento desempenha importante papel nas edificações, protegendo os elementos estruturais e de vedação da ação direta de agentes agressivos.

As principais funções de uma argamassa de revestimento segundo Carasek (2010) são:

- proteger a alvenaria e estruturas contra a ação do tempo, no caso de argamassas para exterior;
- integrar o sistema de vedação das edificações, contribuindo para o isolamento térmico e acústico, a estanqueidade à água, a segurança ao fogo e a resistência ao desgaste e abalos superficiais;
- regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir de base para elementos decorativos.

A NBR 13281 (2001, p.2) define argamassa como:

Mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

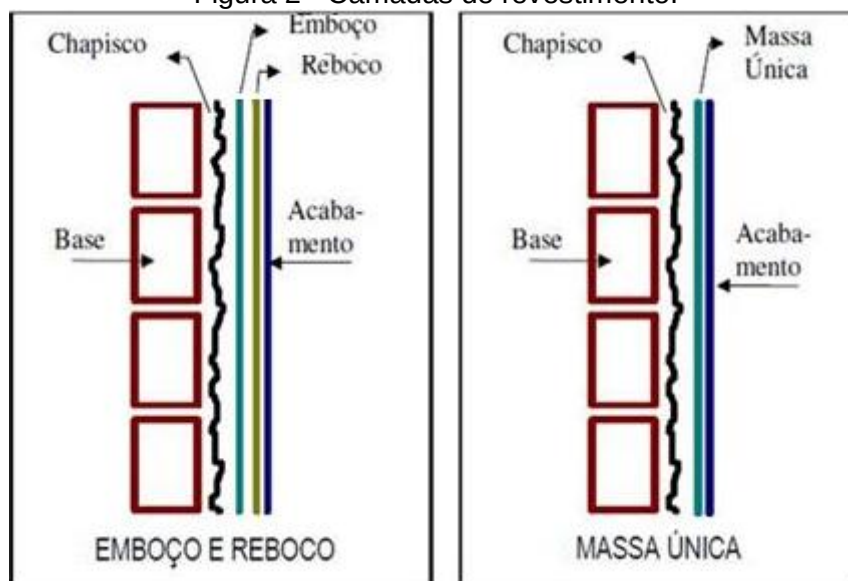
A NBR 13529 (1995, p.1) define sistema de revestimento como:

Conjunto formado por argamassa e acabamento, compatível com a natureza da base, condições de exposição, acabamento final e desempenho, previstos em projeto.

Essa norma define ainda que quanto ao número de camadas, o revestimento de argamassa pode ser de camada única, denominado massa

única ou constituído por duas camadas, uma de emboço e outra de reboco. Os revestimentos de camada única e dupla camada aplicados sobre parede de alvenaria podem ser vistos na Figura 2.

Figura 2 - Camadas de revestimento.



Fonte: Baía, 2008 (adaptado por MELO, MARCIO, 2012)

Onde :

- **Chapisco:** é uma argamassa preparatória que proporciona condições de fixação para outros elementos. É aplicada com a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção de água em superfícies lisas, favorecendo substratos com pouca absorção, e reduzindo a absorção em substratos muito porosos, o que melhora a aderência dos revestimentos (BAIA, 2008). O chapisco pode ser empregado ainda como revestimento de acabamento, sendo às vezes utilizados seixos rolados ou brita, a fim de se obter um acabamento mais áspero. Sua composição é de cimento e areia grossa e sua constituição bastante fluida (AZEVEDO, 1987);
- **Emboço:** é uma argamassa de revestimento utilizado para cobrir e regularizar a superfície base, propiciando uma superfície plana que permita receber outra camada de acabamento final, como reboco, cerâmica ou revestimento decorativo final, no caso de aplicação de revestimento em camada única (BAÍIA, 2008). Deve atuar ainda, no

caso de revestimentos externos, como barreira para a infiltração de água das chuvas (AZEVEDO, 1987);

- **Reboco:** o reboco é uma argamassa de revestimento utilizada para cobrir o emboço de forma a permitir o uso das pinturas. Possui na sua composição agregados de menor granulometria do que o emboço, apresentando, assim, melhor acabamento superficial;
- **Camada única:** revestimento de um único tipo de argamassa aplicado à base sobre o qual é aplicada uma camada decorativa.

3.3.1 Classificação das argamassas de revestimento

A NBR 15530 (1995) classifica as argamassas de revestimento com relação ao tipo de aglomerante em:

- **Argamassa de cal:** é uma mistura entre cal, água e agregado miúdo, que juntos 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 (GUIMARÃES, 2002). A cal dá a argamassa uma boa trabalhabilidade e capacidade para reter água, entretanto quando endurecida apresenta baixa resistência mecânica;
- **Argamassa de cimento:** a argamassa de cimento é constituída por cimento e agregado miúdo. Adquire alta resistência mecânica em pouco tempo, porém tem pouca trabalhabilidade e baixa retenção de água. Como argamassa de revestimento é muito utilizado na confecção de chapiscos (MIRANDA, 2009);
- **Argamassa mista de cimento e cal:** argamassas mistas de cimento e cal apresentam comportamentos característicos dos dois aglomerantes. A cal contribui principalmente pela sua característica plastificante, pela sua capacidade de reter água, o que melhora a trabalhabilidade; já o cimento contribui para a maior resistência mecânica do conjunto.

3.3.2 Componentes de argamassa mista

3.3.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um material inorgânico finamente moído constituído principalmente por silicatos de cálcio que quando na presença de água forma uma pasta que endurece através de uma reação química conhecida por hidratação. Após seu endurecimento, mantém a resistência mesmo em contato com água (LEA'S, 2004).

Como o cimento é constituído essencialmente por silicatos de cálcio, na sua produção, é utilizado o calcário como fonte de carbonato de cálcio e as argilas ou xistos argilosos como fonte de silicato. Nas matérias primas, além do cálcio e silício, ocorre ainda a presença de impurezas como o óxido de magnésio - MgO (principalmente no calcário), óxidos de alumínio - Al_2O_3 , óxidos de ferro - Fe_2O_3 e álcalis (nas argilas), que contribuem para que a reação de formação dos silicatos aconteçam em temperaturas mais baixas.

Pela importância dessa característica, quando essas impurezas não estão presentes em quantidades suficientes nas matérias primas principais, são adicionados bauxita ou minério de ferro. Outros componentes ainda estão presentes nas matérias primas em menor proporção e entram como impurezas, mas não afetam de forma importante a reação (METHA; MONTEIRO, 2008).

Após a seleção, as matérias primas são moídas e em seguida processadas em fornos rotativos contínuos, onde são aquecidas em temperatura de $1450\text{ }^{\circ}C$, ocorrendo a fusão parcial dos materiais presentes e diversas reações químicas, sendo formado como produto final o clínquer.

O clínquer é composto de nódulos escuros arredondados, com composição química na faixa de 67% de CaO , 22% de SiO_2 , 5% de Al_2O_3 , 3% de Fe_2O_3 e 3% de outros componentes, presentes em quatro principais fases denominadas alita, belita, aluminato e ferroaluminato, e em outras fases menores como sulfatos alcalinos e óxidos de cálcio (TAYLOR, 1990).

As principais fases do clínquer apresentam as seguintes características (TAYLOR, 1990):

- **Alita** - Representa 50% a 70% do seu volume do clínquer. Quimicamente é composto por silicato tricálcico (Ca_3SiO_5 ou de forma

abreviada C_3S). Reage rápido na presença de água e é a fase mais importante no desenvolvimento da resistência até os 28 dias;

- **Belita** - Representa 15% a 30% do clínquer e é constituído por silicato dicácico (Ca_2SiO_4 ou C_2S). Reage de forma mais lenta que a alita e contribui pouco para resistência até 28 dias. Em maiores idades sua resistência se assemelha a da alita;
- **Aluminato Tricálcico** - Representa 5% a 10% do clínquer e é constituído por aluminato tricalcídico ($Ca_3Al_2O_4$). Reage rápido na presença de água e pode causar uma pega muito rápida se sua reação não for controlada por algum agente externo como sulfato de cálcio;
- **Ferroaluminato Tetracálcico** - Representa 5% a 15% do clínquer e é constituído por tetracalcídico aluminoferrita (Ca_2AlFeO_5). A taxa de reação com água varia por diferenças na composição, mas geralmente é alta no início da hidratação e lenta em maiores idades.

Na etapa final da fabricação do cimento Portland comum, o clínquer é finamente moído e adicionado sulfato de cálcio para controle do tempo de pega; em seguida, é ensacado e o processo de fabricação é finalizado.

Existem diversos tipos de cimento Portland e várias adições possíveis utilizadas para alterar algumas características. A Tabela 1 apresenta os tipos de cimento Portland mais comuns do mercado brasileiro e as adições minerais que eles recebem, segundo a ABCP (2009).

Tabela 1 - Principais tipos de cimento Portland do mercado Brasileiro com as adições minerais recebidas.

Tipo de cimento Portland	Composição (% em massa)					Norma Brasileira
	Sigla	Clinker + Gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla F)	Material Carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I - S	99-95		1 - 5		
Composto	CPII - E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11587
	CPII - Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CPII - F	94-90	-	-	6-10	
Alto-Forno	CPIII	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CPIV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

Fonte: Tabela adaptada de ABCP, 2009.

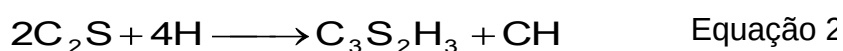
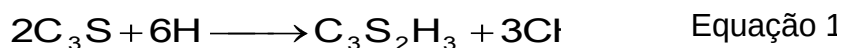
Ainda segundo a ABCP (2009), no mercado brasileiro também existem outros tipos de cimento utilizados em menor escala, destinados a aplicações específicas como:

- cimento Portland de alta resistência inicial;
- cimento Portland resistente a sulfatos;
- cimento Portland branco;
- cimento Portland de baixo calor de hidratação;
- cimento Portland para poços de petróleo.

3.3.2.1.1 Hidratação do cimento Portland

O processo de hidratação pode ser resumido pela reação entre a água e os silicatos e aluminatos presentes no cimento anidro. São dois os mecanismos de hidratação: o primeiro é o mecanismo 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 (METHA; MONTEIRO, 2008).

A hidratação dos silicatos C_3S (alita) e C_2S (belita) produzem como resultado da reação, silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH), conforme Equação 1 e Equação 2, respectivamente.



Apesar dos silicatos C_3S e C_2S produzirem os mesmos compostos finais, existe grande diferença na contribuição para a taxa de liberação de calor e na taxa de ganho de resistência até o 28 dias. Isso pode ser explicado pela velocidade de reação, já que em 28 dias, tipicamente 70% do C_3S reage na presença de água enquanto que, no mesmo período, apenas 30% do C_2S tem reagido (TAYLOR, 1990).

Silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) representam 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento completamente hidratado, sendo o produto mais importante para determinação das propriedades da pasta. É uma estrutura que varia largamente em função da relação Ca/Si e do teor de água quimicamente combinada (TAYLOR, 1990).

Outro produto da hidratação é o hidróxido de cálcio (CH). Constitui 20 a 25% do volume de sólidos de uma pasta totalmente hidratada e apresenta estrutura estequiometricamente bem definida. Sua contribuição para resistência mecânica é limitada devido a sua grande superfície específica e ainda contribui negativamente na estabilidade química do composto (METHA; MONTEIRO, 2008).

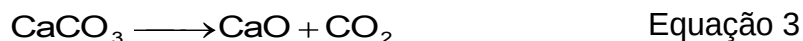
A hidratação do aluminato tricálcico e do ferroaluminato tetracálcico produzem praticamente os mesmos compostos, quando hidratados na presença de sulfatos. Dependendo da concentração de aluminato e de íons sulfato na solução, o produto cristalino de precipitação pode ser o trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita), que se cristaliza em pequenas agulhas prismáticas ou o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm), que se cristaliza em placas hexagonais. 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 etringida torna-se instável, sendo gradativamente convertida para AFm (TAYLOR, 1990).

3.3.2.1.2 Adições minerais

A indústria do cimento é considerada uma das maiores poluidoras do meio ambiente pela grande quantidade de emissões de CO₂ geradas durante o processo de produção do cimento. Isso ocorre devido ao volume de combustível necessário para elevar a temperatura das matérias primas até 1450 °C, temperatura necessária para que ocorram as reações químicas necessárias para a produção de clínquer, que após moagem se transforma no cimento.

Outro fator que contribui para a poluição é a utilização de calcário (CaCO₃) como fonte de cálcio, que sofre o processo de descarbonatação durante as

reações para a formação do clínquer, como mostrado na Equação 3, liberando para atmosfera uma grande quantidade de CO₂.



Segundo LEA'S (2004), considerando uma fábrica de cimento muito eficiente, são utilizados 2930 kJ de energia térmica e 1209 g de calcário. Considerando ainda que a energia elétrica utilizada pela indústria para movimentação de maquinários tenha origem em uma usina termoeletrica, para a produção de um quilograma de cimento são liberados para a atmosfera 882 g de CO₂, conforme pode ser visualizado na Tabela 2.

Nesse contexto, a utilização de cimentos com adições minerais possui grande relevância, já que permitem a redução da quantidade de cimento empregado para um mesmo volume de material cimentante utilizado em uma obra de construção civil.

Tabela 2 - Volume de CO₂ liberado para a atmosfera para cada quilograma de cimento produzido.

Fonte de CO ₂	CO ₂ gerado
Combustível dos fornos	0,327 kg
Descarbonatação do calcário	0,532 kg
Energia elétrica	0,032 kg
TOTAL	0,882 kg

Fonte: LEA'S, 2004.

Adições minerais são materiais finamente moídos que são adicionados a materiais cimentícios com a finalidade de alterar algumas características do concreto ou da argamassa. Essas adições podem ser classificadas em materiais pozolânicos e materiais cimentantes (METHA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Taylor (1990), adições minerais também são conhecidas como material cimentício complementar e os mais importantes são as pozolanas e a escória granulada de alto forno. Existem ainda adições inertes ou quase inertes como é o caso de material carbonático.

As adições minerais têm a finalidade de melhorar o comportamento dos materiais cimentícios. No estado fluido, melhoram a consistência e a coesão da mistura, e no estado endurecido melhoram a resistência a compressão e a

permeabilidade, devido não só ao efeito químico da reação pozolânica, mas também pelo efeito físico, através do preenchimento de poros (ANJOS, 2008).

3.3.2.1.3 Escória granulada de alto forno

Escória de alto forno é um resíduo da produção de aço, sendo constituído por uma mistura de óxidos de cálcio, silício e alumínio, mesmos componentes do cimento, porém em proporções diferentes (NEVILLE, 1994).

Essa composição confere à escória a condição de ser utilizada como um aglomerante hidráulico, mas para isso necessita ser moída e receber a adição de alguma substância ativadora da reação como gipsita e/ou hidróxido de cálcio, substâncias presentes no cimento anidro como adição (gipsita) e como produto da hidratação (hidróxido de cálcio).

Segundo Taylor (1990), a escória é formada entre 1350 e 1550 °C na manufatura do aço onde a cal reage com materiais ricos em SiO₂ e Al₂O₃ presentes nas cinzas do carvão utilizado no processo, e que quando resfriada rapidamente forma um material com características cimentantes e composição média 30 a 50% de CaO, 27 a 42% de SiO₂, 5 a 33% de Al₂O₃ e 0 a 21% de MgO.

A NBR 5735 (1991, p.2) define escória granulada de alto forno como:

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.

Para utilização como adição no cimento, a norma define que a massa dos componentes químicos presentes devem respeitar as proporções da Equação 4.

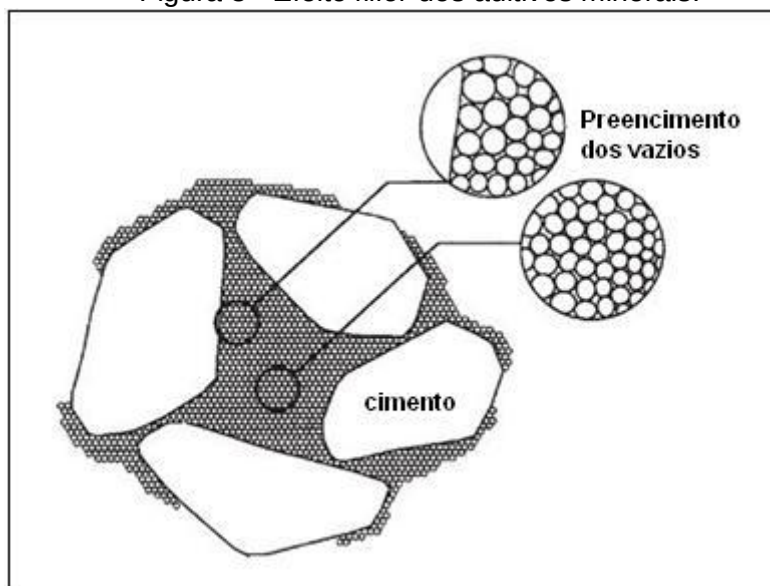
$$\frac{\text{CaO} + \text{Mg} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1 \quad \text{Equação 4}$$

3.3.2.1.4 Adições inertes ou quase inertes (efeito *filler*)

Esse tipo de adição é utilizada com a finalidade de preencher os vazios existentes no sistema melhorando o desempenho do composto.

Usualmente se emprega o calcário, que quando finamente moído e adicionado ao cimento, tem a capacidade de melhorar a distribuição de partículas preenchendo os vazios entre os grãos de clínquer, melhorando o empacotamento e aumentando a resistência do sistema (efeito *filler*), conforme esquematizado na Figura 3. Além desse efeito, segundo Taylor (1990), cerca de 3% do calcário reage quimicamente durante a hidratação do cimento acelerando a hidratação do C_3S .

Figura 3 - Efeito *filler* dos aditivos minerais.



Fonte: Aitcin, 2008 (adaptado por MELO, MARCIO, 2012)

Cordeiro *et. al.* (2008) analisaram o efeito químico e físico da adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e identificou uma contribuição para a resistência nos primeiros dias de cura quando da adição do resíduo ao material cimentício utilizado, demonstrando assim a contribuição física da melhoria do empacotamento do sistema.

3.3.2.1.5 Material Pozolânico

Segundo Lea's (2004), as pozolanas são constituídas essencialmente de SiO_2 e Al_2O_3 , e sozinhas não reagem com a água, mas quando finamente moídas e na presença de água e de hidróxido de cálcio, reagem em temperatura ambiente para formar compostos de silicato de cálcio semelhantes aos que são produzidos pela hidratação do cimento Portland.

Cimentos pozolânicos apresentam boa resistência a sulfatos e outros ataques químicos destrutivos, já que a reação pozolânica deixa menos hidróxido de cálcio para ser lixiviado, além de reduzir a porosidade da pasta, o que aumenta a impermeabilidade do compósito (NEVILLE, 1994).

A NBR12653 (1992, p.2) define que:

pozolanas são materiais silicosos ou sílico aluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos como propriedades aglomerantes.

Pela norma, as pozolanas são classificadas em três classes:

- Classe N - pozolanas naturais ou artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis pela NBR12653 (1992). Nessa categoria são encontradas pozolanas de materiais como vulcânicos, sílicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- Classe C - cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas que obedecem aos requisitos aplicáveis pela NBR 12653 (1992);
- Classe E - qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido por essa norma.

A divisão em três classes é baseada em características físicas e químicas pré-estabelecidas e que definem parâmetros mínimos dos materiais pozolânicos, conforme apontam a Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 - Exigências químicas mínimas.

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

Fonte: NBR 12653, 1992.

Tabela 4 - Exigências físicas mínimas.

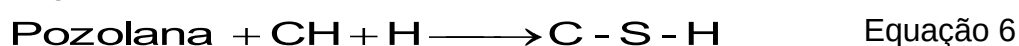
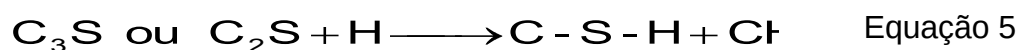
Propriedades	Classe do material		
	N	C	E

Material retido # 325	34	34	34
Índice de atividade pozzolânica com cimento aos 28 dias,% mínimo	75	75	75
Índice de atividade pozzolânica com cal aos 7 dias, MPa	6	6	6
Água requerida,% máximo	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12653, 1992.

Os materiais pozzolânicos, quando adicionados ao cimento Portland, reagem com o hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 produzido durante a hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado adicional, o que confere ao sistema maior resistência mecânica (TAYLOR, 1990).

A Equação 5 demonstra de forma simplificada os produtos de hidratação da alita (C_3S) e belita (C_2S), com a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e do hidróxido de cálcio (CH) e a Equação 6 demonstra a reação de um material pozzolânico adicionado ao cimento com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento gerando silicato de cálcio hidratado adicional ao sistema em relação ao cimento comum.



Onde:

H - água;

C_3S - silicato tricálcico (alita);

C_2S - silicato dicálcico (belita);

CH - hidróxido de cálcio;

C-S-H - silicato de cálcio hidratado.

As reações pozzolânicas afetam as propriedades físicas e químicas de uma pasta cimentícia. Como a velocidade de reação é mais lenta, ocorre a redução na fissuração térmica, já que a taxa de liberação de calor é menor. Ocorre ainda o refinamento dos poros, o que reduz a permeabilidade do sistema e consequentemente aumenta a durabilidade do compósito frente a ataques químicos (METHA; MONTEIRO, 2008).

3.3.2.2 Cal Hidratada

A cal hidratada é um pó branco composto principalmente de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, resultante da hidratação da cal virgem. Sua qualidade está relacionada com as impurezas presentes na matéria-prima, na sua granulometria e superfície específica (GUIMARÃES, 2009).

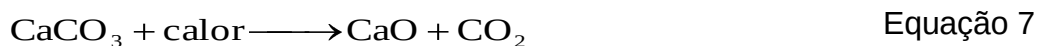
Segundo a NBR 7175 (2003, p.2)

cal hidratada é um pó seco obtido pela adequada hidratação da cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou pela mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxidos de magnésio.

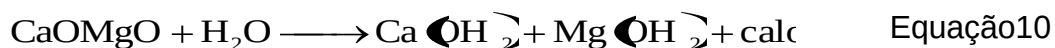
3.3.2.2.1 Processo de fabricação

A cal hidratada é produzida a partir de calcário do tipo cálcico (CaCO_3) ou dolomítico ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$), que após sua extração e moagem é aquecido em temperatura entre 750 e 900 °C, dependendo de sua composição química.

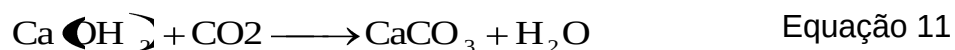
Durante o aquecimento, a cal hidratada sofre o processo de calcinação conforme Equação 7 (calcário cálcico) e Equação 8 (calcário dolomítico), sendo obtido como subproduto a cal virgem e CO_2 , conforme Guimarães (2002).



Para ser utilizada na construção civil, a cal virgem é então hidratada pelo processo de imersão ou aspersão de água, o que a transforma em cal extinta, conforme ação sequencial exposta na Equação 9 e na Equação 10.



Depois de aplicada, o endurecimento da cal em uma argamassa a base de cal ocorre devido à recarbonatação da cal, sendo um processo lento, uma vez que o CO₂ presente no ar irá reagir com o hidróxido de cálcio, que se converte em carbonato de cálcio, como exposto na Equação 11. A velocidade da carbonatação depende da temperatura, da estrutura porosa e da umidade da pasta.



Existem, no mercado brasileiro, três tipos de cal hidratada normatizadas pela ABNT através da NBR 7175 (2003), cujas características químicas e físicas encontram-se expostas na Tabela 5 e na Tabela 6, respectivamente.

Tabela 5 - Exigências químicas mínimas para a cal hidratada segundo a NBR 7175 (2003).

Compostos		Limites		
		CH - I	CH - II	CH - III
Anidrito carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratados		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais não voláteis		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: NBR 7175, 2003.

Tabela 6 - Exigências físicas mínimas para cal hidratada segundo a NBR 7175 (2003).

Compostos		Limites		
		CH - I	CH - II	CH - III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,6 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 3%	≥ 2,5%	≥ 2,2%
Estabilidade		Ausência de cavidades e protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: NBR 7175, 2003.

3.3.2.2.2 Uso da cal em argamassas

A cal hidratada tem grande capacidade para reter água em torno de suas partículas, conferindo à argamassa no estado fresco maior plasticidade e trabalhabilidade, além de permitir melhor controle da perda de água para o substrato onde foi aplicada, melhorando sua aderência final.

No estado endurecido, a presença de cal na argamassa contribui para redução da absorção de água, aumenta a compacidade com o tempo e, por ser um produto alcalino, impede a oxidação da ferrugem. Além disso, age como um agente bactericida e fungicida (GUIMARÃES, 2009).

3.3.2.3 Agregado miúdo

A NM 52 (2009, p.2) define agregado miúdo como:

a porção que passa na peneira 4,75 mm e fica retida quase totalmente na peneira 75 μ m.

A NBR 7211 (2009, p.2) define que:

os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo.

O agregado miúdo é a parte inerte ou quase inerte da argamassa e tem a função de minimizar os efeitos de alteração de volume e baratear o custo de produção. Em argamassas de cal, ele facilita ainda a penetração do gás carbônico, necessário para a recarbonatação do hidróxido de cálcio (ISHIKAWA, 2003).

A distribuição granulométrica do agregado afeta diretamente a quantidade de água necessária para molhar todos os sólidos, a trabalhabilidade, a densidade de massa e a tendência de segregação, alerta Neville (1994). Carneiro (1999) ratifica Neville (1994) dizendo que a granulometria e o formato dos grãos do agregado interferem na trabalhabilidade e na retenção de água no estado fresco e no estado endurecido, na resistência mecânica, na capacidade de deformação e na permeabilidade.

Ainda nesse âmbito, Carneiro *et al.* (1997) ressaltam que se o agregado miúdo (areia) for muito uniforme, independente do formato dos grãos, a trabalhabilidade da argamassa pode ser comprometida e há um enrijecimento impedindo o deslizamento dos grãos de areia entre si, demandando maior consumo de pasta.

A NBR 7211 (2005) recomenda para argamassas e concreto a utilização de areia com os módulos de finura (MF) indicados na Tabela 7, deixando aberta a possibilidade da utilização de areia com outros MF, desde que sejam realizados estudos para comprovar sua aplicabilidade.

Tabela 7 - Módulo de finura recomendado pela NBR 7211 (2005).

Faixas	MF
Zona utilizável inferior	1,55 a 2,2
Zona ótima	2,2 a 2,9
Zona utilizável superior	2,9 a 3,5

Fonte: NBR 7211, 2005.

3.3.3 Propriedades no estado fresco

3.3.3.1 Trabalhabilidade

É a propriedade da argamassa que determina a facilidade como ela pode ser misturada, transportada e aplicada, permanecendo em uma condição homogênea. Segundo Baia (2008), uma argamassa é considerada trabalhável quando:

- permite facilmente a entrada da colher de pedreiro sem ser fluida;
- mantem a coesão sem aderir na colher de pedreiro quando aplicada;
- distribui-se facilmente preenchendo facilmente todas as ondulações do substrato;
- não endurece rapidamente durante a aplicação.

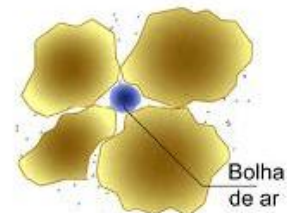
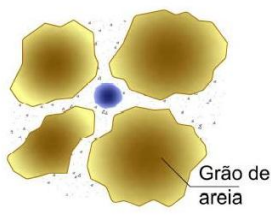
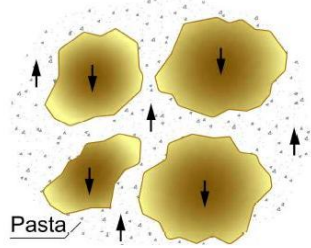
A medição da trabalhabilidade é feita de forma indireta através de uma correlação com a consistência da argamassa, já que resulta do efeito de rolamento dos grãos agregados lubrificados pela pasta cimentícia, ou seja, do atrito interno, da coesão e da viscosidade da argamassa. Assim, uma argamassa é mais trabalhável quando possui uma consistência com características plásticas (SABATTINI, 1986).

3.3.3.2 Consistência

A consistência é a maior ou menor capacidade da argamassa de se deformar no estado fresco sob ação de cargas e é afetada pelo tipo e quantidade de cada tipo de material empregado, destaca Baia (2008). Em uma obra, devido ao proporcionamento dos materiais ser previamente definido, o aplicador ajusta a quantidade de água a fim de ajustar esse parâmetro.

Na Tabela 8 podem ser visualizadas as características dos tipos de consistência possíveis de ocorrer na prática para uma argamassa: argamassa seca, plástica ou fluida.

Tabela 8 - Tipos de consistência das argamassas.

Tipo de argamassas	Fenômenos envolvido com a consistência da argamassa	Ilustração esquemática
Argamassa seca	A pasta aglomerante preenche apenas os vazios entre os agregados, deixando-os ainda em contato. Existe atrito entre as partículas o que resulta em uma massa áspera.	
Argamassa plástica	Uma fina camada de pasta envolve a superfície dos agregados, dando boa adesão entre eles.	
Argamassa fluida	As partículas de agregados estão imersas no interior da pasta aglomerante, sem coesão interna e com tendência a se depositar por gravidade (segregação).	

Fonte: Tabela adaptada de Carasek, 2010.

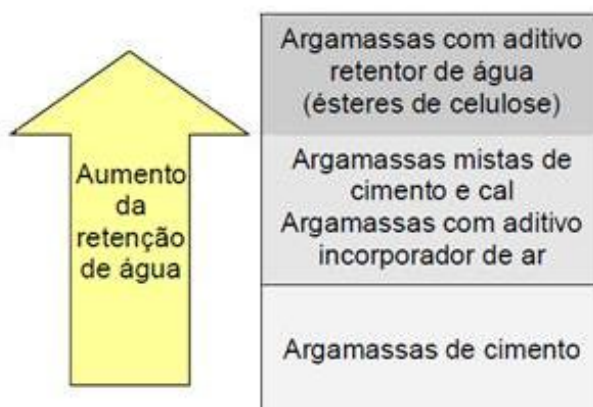
A consistência plástica normalmente é a ideal para a maior parte das aplicações, exceto em argamassas para contrapiso, que são elaboradas com uma consistência seca para permitir sua compactação, ressalta Carasek (2010).

3.3.3.3 Retenção de água

Retenção de água é a propriedade da argamassa de não perder água, seja por evaporação, seja para o substrato onde ela foi assentada. No estado fresco, essa propriedade interfere na trabalhabilidade da argamassa; já no estado endurecido, interfere na adequada hidratação do cimento. Segundo Baia (2009), a rápida perda de água prejudica ainda a aderência, a capacidade de absorver deformações e a resistência mecânica final das argamassas, comprometendo assim sua durabilidade.

Os fatores que determinam a retenção de água são as características e proporcionamento dos materiais e essas propriedades podem ser melhoradas com a presença de cal e aditivos, conforme esquematizado na Figura 4.

Figura 4 - Variação da retenção de água em função da composição das argamassas.



Fonte: Carasek, 2010.

A retenção de água está relacionada com as características e proporções dos materiais constituintes da argamassa e pode ser medida através da metodologia estabelecida pela NBR 13277 (2005).

3.3.3.4 Densidade de massa

A densidade de massa ou massa específica varia com o teor de ar incorporado e com a massa específica dos materiais constituintes. Quanto mais

leve for a argamassa, mais trabalhável será ao longo do tempo, reduzindo o esforço do operário na aplicação gerando, conseqüentemente, um aumento de produtividade na operação. Carasek (2010) sugere uma classificação para argamassas segundo sua densidade no estado fresco, conforme compilado na Tabela 9.

Tabela 9 - Classificação de argamassa quanto sua densidade de massa no estado fresco.

Argamassa	Densidade de massa A (g/cm ³)	Principais agregados utilizados	Usos
Leve	$A < 1,40$	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	$2,30 \leq A \leq 1,40$	Areia de rio e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	$A > 2,30$	Barita (sulfato de bário)	Blindagem de radiação

Fonte: Carasek, 2010.

A NBR 13278 (2005) estabelece o método de determinação da densidade de massa de argamassas e representa a relação entre a massa e o volume ocupado pela argamassa.

3.3.4 Propriedades no estado endurecido

3.3.4.1 Densidade de massa no estado endurecido

A densidade de massa é a relação entre massa do corpo de prova e seu volume, estando, portanto, relacionado com o material utilizado e a quantidade de vazios na estrutura; ou seja, quanto mais densos forem os materiais empregados ou quanto melhor for o arranjo do empacotamento do sistema, mais densa será a argamassa (NARCISO, 2006).

Segundo Carasek (2010), a densidade de massa no estado endurecido é menor do que no estado fresco, devido à saída de parte da água. Nesse sentido, de uma forma geral, é observada uma relação direta entre o teor de água da argamassa e a redução da densidade quando no estado endurecido.

3.3.4.2 Permeabilidade

Segundo Selmo (1989), a permeabilidade é a propriedade que identifica a possibilidade de passagem de água em um material e pode ocorrer das seguintes formas:

- por infiltração sob pressão;
- por capilaridade, onde apenas pelo contato ocorre a absorção;
- por difusão de vapor de água através dos condutos capilares.

A argamassa é um material poroso e permite a percolação de água tanto no estado líquido quanto no estado de vapor. A permeabilidade é, portanto, a propriedade relacionada à passagem de água pela argamassa no estado endurecido. O controle dessa propriedade é muito importante em argamassas, principalmente quando se tratar de exteriores ou de locais úmidos, já que uma das funções do revestimento é proteger as edificações da infiltração de água. Essa preocupação é porque a umidade infiltrada na parede está associada a manifestações patológicas como eflorescências, descolamentos e manchas de bolor e mofo (CARASEK, 2010).

Como os materiais que compõem uma edificação apresentam coeficientes de absorção de água diferente, os ciclos de absorção e de evaporação de água provocam diferentes dilatações e contrações que pode levar à formação de fissuras e rupturas. Nesse cenário, o revestimento deve impedir a sua percolação pela água, mas deve ser permeável ao vapor para favorecer a secagem de umidade de infiltração (SABATTINI, 2008).

Diversos fatores influenciam a permeabilidade como: a proporção e a natureza dos materiais que constituem a argamassa e o tipo de fissuras existentes (CARASEK, 2010).

3.3.4.3 Resistência à compressão

A resistência mecânica dos revestimentos é definida como a capacidade de suportarem solicitações de compressão, tração e cisalhamento. Assim, o revestimento de argamassa deve apresentar a capacidade de absorver

pequenas deformações sem ruptura ou microfissuras, que poderiam comprometer sua aderência, estanqueidade e durabilidade (CARASEK, 2010).

Em linhas gerais, essas resistências variam com a quantidade dos materiais empregados reduzindo com o aumento da quantidade de agregados empregado e/ou com o aumento da relação água/cimento. Existem ainda outros fatores que interferem na resistência mecânica final dos revestimentos, como, por exemplo, a energia de amassamento ou, ainda, o uso de adições (MACIEL *et al.* 1998).

Para controle da resistência mecânica dos revestimentos é utilizada a NBR 13279 (2005), que estabelece método para determinação da resistência a tração na flexão e da resistência a compressão de argamassas de assentamento e revestimento, bem como a NBR 13281 (2005) que estabelece requisitos a serem seguidos para argamassas de revestimento.

3.3.4.4 Aderência

É a propriedade da argamassa de manter-se fixa ao substrato através de tensões normais e tangenciais na junção entre base e substrato. É resultante da resistência de aderência a tração, da resistência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa (MACIEL *et al.*, 1998).

A aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno mecânico, devido à entrada da pasta aglomerante e argamassa nos poros e rugosidades do substrato onde foi aplicada. Quando a argamassa no estado plástico entra em contato com o substrato, parte da água penetra pelos poros e cavidades, onde ocorre, então, precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal, exercendo então após algum tempo a ação de ancoragem à base (CARASEK, 2010). Assim, os mecanismos de aderência são consolidados pela penetração e hidratação adequada da pasta nos poros da base, sem uma elevada absorção de água (BIANCHIN, 1999).

A aderência de uma argamassa pode ser medida através de ensaio de arrancamento, normalizados pela NBR 15258 (2005) e NBR 13528 (2010) onde sua qualidade pode ser avaliada tomando como parâmetros valores de resistência indicados pela NBR 13749 (1996). Os limites de resistência de

aderência a tração estabelecidos pela norma NBR 13749 (1996) encontram-se expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Limites da resistência de aderência a tração.

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

Fonte: Tabela adaptada de NBR 13749, 1996.

3.3.5 Argamassa de revestimento com adição de cinzas

3.3.5.1 Cinzas de biomassa

Em geral, as cinzas produzidas pela queima de alguma biomassa são ricas em sílica (SiO_2) e se a queima ocorrer em condições controladas, até 600°C, o material moído é fortemente pozolânico (TAYLOR, 1990). Já Martirena *et al.* (2006) destaca temperatura máxima de 700°C com tempo de permanência mínima nessa temperatura de duas horas.

Para que um material rico em sílica tenha atividade pozolânica é necessário que grande parte dessa sílica seja amorfa e assim tenha alta reatividade. Nas sílicas cristalinas, apesar da composição química ser a mesma da sílica amorfa, sua estrutura é bem definida e, conseqüentemente, são estáveis. O fato de uma cinza ser ou não pozolânica está relacionada com a temperatura de queima, com o tempo de queima, bem como com a granulometria do produto final. (MARTIRENA *et al.*, 2006).

Borlini *et al.* (2005) estudaram as cinzas de lenha de eucalipto através de ensaios de fluorescência de Raios-X, difração de Raios-X, distribuição de tamanho de partícula, análise térmica (ATD/TG) e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostram que a cinza da lenha se apresenta como um aglomerado de partículas de forma arredondada bastante poroso em sua estrutura, sendo constituída principalmente por Ca, Si, Mg, K, S, P e Al. A concentração de cálcio foi de 32,5% do peso da amostra, sendo composta

predominantemente por carbonato de cálcio. Essa propriedade alcalina é extremamente importante para a manutenção dos materiais cimentícios.

Cordeiro *et. all.* (2009) estudaram o comportamento químico (atividade pozolanica) e físico (efeito *filler*) da adição de cinzas de bagaço de cana em argamassas e identificaram a contribuição das cinzas para os dois efeitos .

4 ESTADO DA ARTE

Nos últimos anos, a crescente preocupação com o meio ambiente tem feito a humanidade buscar o uso de combustíveis renováveis. Neste cenário, a biomassa de madeira tem ocupado cada vez mais o espaço dos combustíveis fósseis como o carvão. Pesquisas sobre a reutilização dos resíduos gerados pela madeira necessitam ser feitas para absorver o volume crescente de cinzas geradas.

Devido aos poucos dados existentes sobre o assunto, Etiégni e Campbell (1990) realizaram estudos sobre as características físicas e químicas de cinzas de madeira, 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.

Misra *et al.* (1993) 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 como pinus, carvalho e casca do carvalho. Verificaram, principalmente, a presença de cálcio, potássio e magnésio, e ainda observaram percentuais menores que 1% de silício e de alumínio.

Maschio *et al.* (2011) avaliaram argamassas com 5, 10, 20 e 30% de substituição de cimento por cinzas de topo e cinzas de base 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.

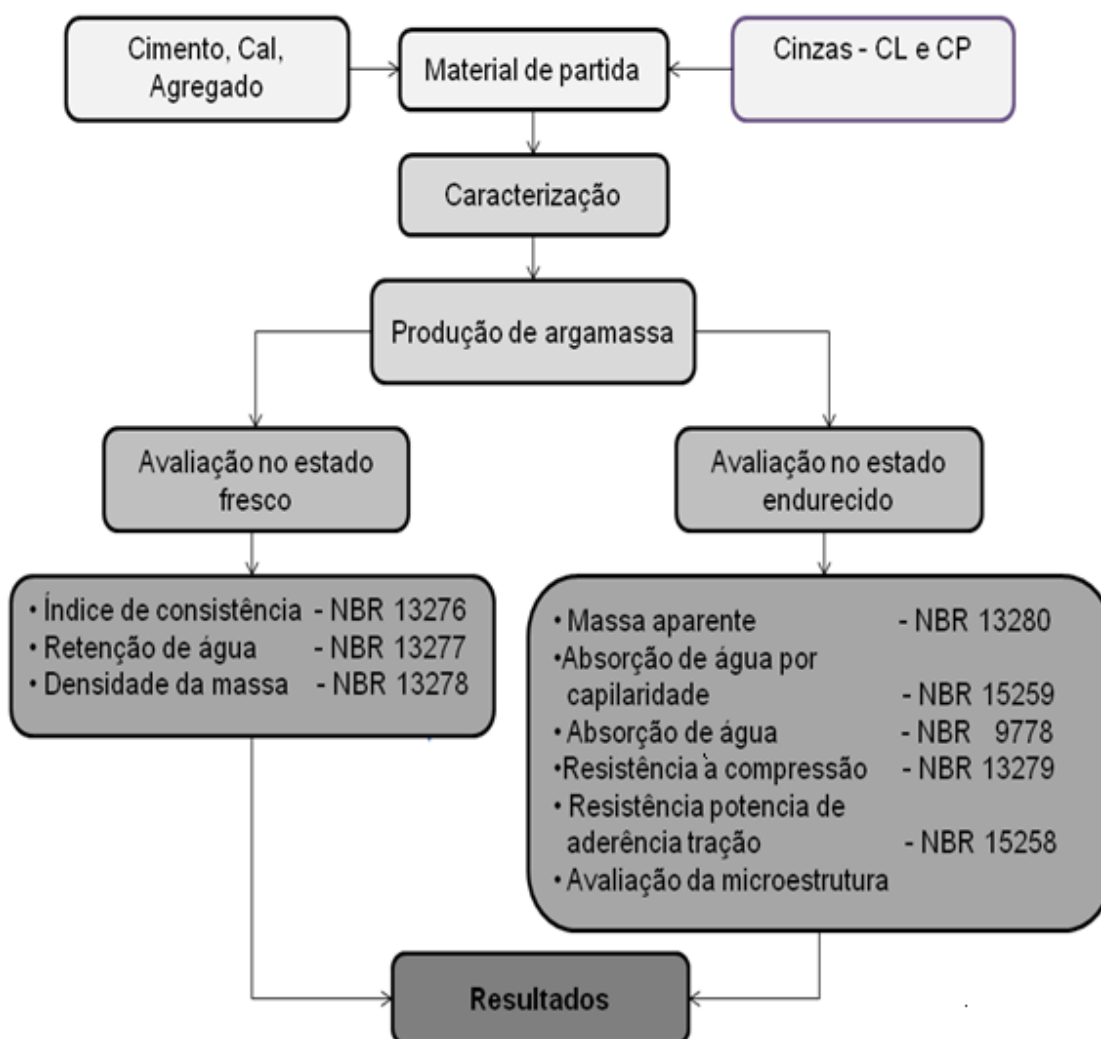
Etiégni e Campbell (1991, *apud* Bam e Ramli, 2011) diz que cinzas de lenha são comumente utilizadas como corretivo de solo, mas podem ser utilizadas também como *filler* na construção de pavimentos flexíveis para ruas e estradas.

Cueah e Ramli (2012) 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.

5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental foi elaborada baseada nos objetivos gerais e específicos definidos para a presente pesquisa, a fim de desenvolver argamassas de revestimento do tipo emboço com adição de CT e CB em relação à massa de cimento, comparando seus desempenhos, no estado fresco e endurecido, com uma argamassa padrão sem adição. Para tanto, as argamassas desenvolvidas foram avaliadas seguindo metodologias para caracterização de argamassas de revestimento devidamente preconizadas pela ABNT, seguindo o fluxo indicado na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma das etapas e ensaios realizados na pesquisa



Fonte: Figura do autor, 2012.

5.1 Material de partida

Foram utilizados materiais usualmente empregados nas construções da região agreste pernambucana a fim de facilitar a aplicação dos resultados obtidos no mercado de construção civil da região.

5.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP II Z - 32 da empresa Nassau, por ser um cimento usualmente utilizado na região de Caruaru - Pernambuco.

Apesar de ser um cimento pozolânico, não afetou as análises realizadas, já que o foco da pesquisa foi avaliar a melhoria do empacotamento do sistema com a adição de cinzas e, para tanto, todas as avaliações no estado sólido ocorreram até a idade de 28 dias. As características químicas e físicas fornecidas em boletim técnico da empresa Nassau para o lote utilizado se encontram apresentadas na Tabela 11 e na Tabela 12, respectivamente.

Tabela 11 - Características químicas do cimento.

Caracterização Química	Resultado (%)
Perda ao fogo	5,33
Resíduo Insolúvel	11,06
SiO ₂	22,79
Al ₂ O ₃	4,73
Fe ₂ O ₃	2,37
CaO	54,09
MgO	4,51
SO ₃	3,65
Na ₂ O	0,14
K ₂ O	1,58

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Cimentos Nassau.

Tabela 12 - Características físicas do cimento.

Caracterização Física	Unidade	Resultado
Massa específica	g/cm ³	3,01
Área específica	m ² /kg	418,00
Consistência normal	%	28,3
Início de pega	horas	4,15
Fim de pega	horas	5,20
Resistência compressão 1 dia	MPa	12,60
Resistência compressão 3 dias	MPa	23,10
Resistência compressão 7 dias	MPa	28,10
Resistência compressão 28 dias	MPa	38,10

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Cimentos Nassau.

5.1.2 Cal

Na composição das argamassas foi utilizada a cal hidratada CH-II, da marca MegaO, fabricante Sibelco. A Tabela 13 e a Tabela 14 apresentam a análise química e física, respectivamente, fornecidas em boletim técnico pela empresa Sibelco.

Tabela 13 - Análise química da cal hidratada.

Caracterização Química	Resultado (%)
CaO	48,79
MgO	26,14
Resíduo Insolúvel	2,96
Umidade	1,06
Perda ao Fogo (1.000°C)	21,05
H ₂ O combinada	19,12
CO ₂	3,98
SO ₃	0,08
Óxidos não hidratados	14,12
Al ₂ O ₃	0,06
Fe ₂ O ₃	0,05

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Sibelco.

Tabela 14 – Análise física da cal hidratada.

Peneira	Resultado (%)
Malha 30 (0,60 mm)	0,01
Malha 200 (0,075 mm)	11,75

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Sibelco.

A massa específica da cal foi avaliada utilizando a metodologia da NBR NM 23 sendo encontrado o valor de 2,47 g/cm³.

5.1.3 Água

Foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento local como água de amassamento, que se pressupõe ser livre de impurezas.

5.1.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na produção das argamassas mistas foi proveniente de depósitos do rio Ipojuca na região de Caruaru-Pernambuco-Brasil. Para a utilização na presente pesquisa, todo o agregado miúdo foi seco

em estufa a 105 °C por 24 horas e peneirado em peneira de malha 4,75 mm e 0,75 μ m para sua padronização, seguindo a definição para agregado da NBR NM 52 (2009). A sua caracterização granulométrica e física foi realizada após esse pré-tratamento, caracterizando-o tal qual empregado nas argamassas.

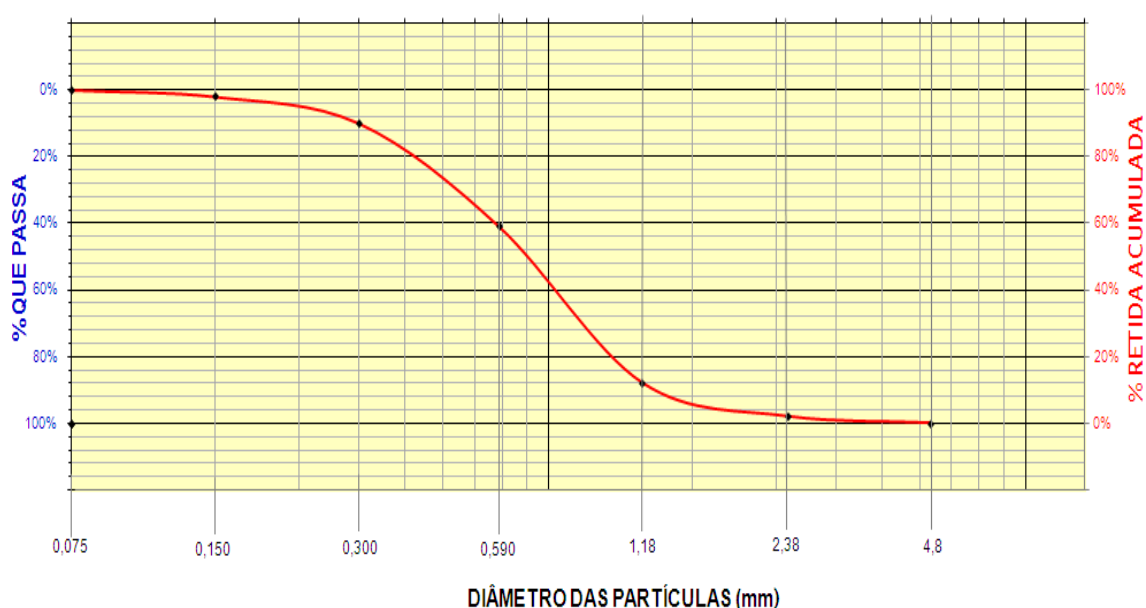
A Tabela 15 e a Figura 6 apresentam sua distribuição e a curva granulométrica, respectivamente.

Tabela 15- Distribuição granulométrica da areia

Peneira (mm)	4,75	2,38	1,18	0,590	0,300	0,150	0,075
% Retida acumulada	100	98	88	41	10	2	0

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Figura 6 - Curva granulométrica da areia utilizada nas argamassas.



Fonte: Figura do autor, 2012.

As características físicas foram realizadas seguindo os procedimentos da NBR NM 248 (2003) e NBR 9776 (1987) e encontram-se compiladas na Tabela 16.

Tabela 16 - Características físicas da areia.

Característica	Unidades	Resultado
Módulo de finura	-	3,6
Dimensão máxima característica	mm	2,60
Massa específica	g/cm ³	2,60

Fonte: Tabela do autor, 2012.

5.1.5 Cinzas

Foram utilizados na elaboração das formulações dois tipos de cinzas denominadas CT (cinza de topo) e CB (cinza de base), ambas geradas na caldeira da lavanderia representativa de médio porte, durante a queima de lenha de algaroba para geração de água quente, conforme indica a Figura 7. A lavanderia está localizada na cidade de Caruaru/Pernambuco e produz um volume médio mensal de 42.000 peças de Jeans beneficiado e nesse mesmo período, gera 6500 kg de cinzas, sendo 1100 kg de CT e 5500 kg de CB.

Figura 7 – Caldeira da lavanderia (a) e sua fornalha (b).



Fonte: Fotos do autor, 2012.

A meta para a produção de argamassa com cinzas foi o desenvolvimento de um processo para utilização de CT e CB de forma simplificada e com foco na melhoria do empacotamento do sistema, efeito *filler*.

Devido à granulometria da areia utilizada, para que as cinzas pudessem ser utilizadas com possibilidade de gerar efeito *filler* no sistema, suas partículas deveriam ser menores do que 75 μm . Para isso, tanto as CT como as CB foram classificadas em peneira de malha 200 (75 μm), descartando a porção não passante, sem o emprego de qualquer energia adicional de moagem, com bom rendimento, conforme exposto na Tabela 17, ou seja, para cada quilograma de CT e CB da forma como foram recebidas, respectivamente 292 e 275 gramas foram utilizadas nesta pesquisa.

A opção de moagem geraria um rendimento bem superior, dada a característica pulverulenta e friável das cinzas. No entanto, enxergando

aplicações futuras no mercado, simplicidade e custos adicionais, optou-se apenas pelo peneiramento nesse primeiro momento.

Tabela 17 - Rendimento percentual do peneiramento das cinzas de lavanderia em malha 200.

Tipo de Cinza	Rendimento
CT	29,2%
CB	27,5%

Fonte: Tabela do autor, 2012.

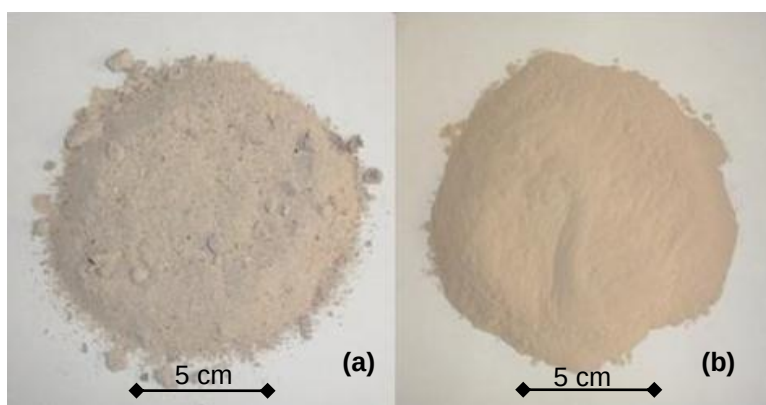
5.1.5.1 Cinzas de topo (CT)

Neste trabalho, as cinzas descritas como cinzas de topo (CT) são as cinzas geradas na combustão de lenha de algaroba e que são arrastadas pelo ar quente durante a combustão ficando retidas nos tubos trocadores de calor dentro da caldeira enquanto que o ar quente é expelido pela chaminé.

As cinzas utilizadas nos experimentos foram coletadas dentro desses dutos trocadores de calor da caldeira durante operação periódica quinzenal de limpeza para remoção do excesso de cinzas que é acumulado.

O aspecto das CT, da maneira como foram coletadas dentro da caldeira, pode ser visualizado na Figura 8 (a), bem como seu aspecto após peneiramento em malha 200 na Figura 8 (b)

Figura 8 - Cinza de topo (CT) como coletada na lavanderia (a) e após beneficiamento (b).



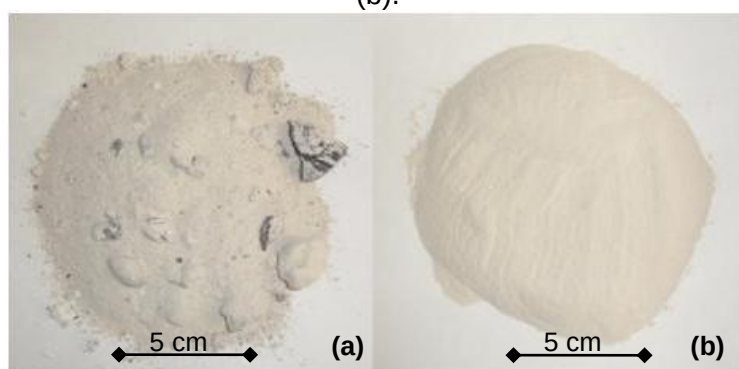
Fonte: Fotos do autor, 2012.

5.1.5.2 Cinzas de base (CB)

As cinzas descritas como cinzas de base (CB) são as cinzas geradas na combustão de lenha de Algaroba na câmara de combustão da caldeira e que, pela ação da gravidade, caem pelas grelhas onde é colocada a lenha e, periodicamente, recolhidas por uma caixa de coleta sob o ponto de queima.

Na Figura 9a podem ser vistas as cinzas como foram coletadas na caixa de coleta. Já na Figura 9b pode ser visualizado aspecto da cinza após peneiramento em malha 200.

Figura 9 - Cinza de base (CB) como coletada na lavanderia (a) e após beneficiamento (b).



Fonte: Fotos do autor, 2012.

5.1.6 Caracterização físico-química das cinzas

5.1.6.1 Análise química

A determinação da composição química foi feita através de fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva em um equipamento Shimadzu, modelo EDX-820. Os espectros de fluorescência de raios X foram obtidos utilizando-se cerca de 300 mg de amostra em pó fino depositado em um porta-amostra formado por um filme plástico de polietileno, que apresenta baixa absorção de Raios-X na faixa de energia de interesse. A análise química da cinza de algaroba foi realizada no Laboratório de Materiais do Departamento de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

5.1.6.2 Granulometria a laser

Foi utilizado o Analisador de Tamanho de Partículas S3500 / Microtrac. As análises foram desenvolvidas no Laboratório de Caracterização de Materiais do CETENE (Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste), Recife.

5.1.6.3 Área superficial específica e porosidade das partículas

Para as medidas de área superficial pelo método BET (Brunauer-Emmett-Teller) e do volume de poros pelo método BJH (Barrett-Joyner-Halenda), foi usado o analisador de superfície e de tamanho de poros ASAP 2420 da Micromeritics. As análises foram desenvolvidas no Laboratório de Caracterização de Materiais do CETENE (Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste), Recife.

5.1.7 Caracterização microestrutural das cinzas

5.1.7.1 MEV

Esta análise foi realizada no Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco – DEQ. Foi realizada em sistema dispersivo de baixo vácuo com microanálise por energia dispersiva em um microscópio eletrônico de varredura da marca Philips, modelo XL30 ESEM. O procedimento de preparação dos materiais para a análise consistiu na deposição de uma porção do sólido sobre uma fita adesiva de carbono fixada no porta-amostra.

5.1.8 Determinação da atividade pozolânica das cinzas

Para análise da atividade pozolânica das cinzas, CT e CB, foi empregada a metodologia preconizada pela NBR 15895 (2010), método de Chapelle modificado, que avalia a atividade pozolânica de um material pelo teor de hidróxido de cálcio fixado utilizado as seguintes etapas:

- pesou-se um grama das cinzas peneiradas em peneira de malha 200 e um grama de óxido de cálcio utilizando uma balança semi-analítica;

- ambos foram colocados em um Erlenmeyer plástico de 500 ml vazio dotado de tampa plástica com rosca;
- adicionou-se 250 ml de água isenta de CO₂ no Erlenmeyer, sendo o mesmo fechado e colocado em banho-maria com agitação a 90 ± 5 °C por 16 horas.
- após esse tempo, o conjunto foi resfriado em água corrente até a temperatura ambiente;
- o Erlenmeyer foi, então, aberto e adicionou-se 250 ml de solução de sacarose a 240g/L e o conjunto agitado;
- a solução foi filtrada e titulada com solução padronizada de HCl 0,1 M, usando solução de fenoftaleína (1 g/L) como indicador.

O índice de atividade pozolânica Chapelle é dado pela Equação 12 e corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado.

$$I_{ca} = \frac{28 (V_3 - V_2) \cdot F_c}{M_2} * 1,32 \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

- I_{ca} = índice de atividade pozolânica Chapelle;
- M_2 = massa de material pozolânico (g);
- V_2 = volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio com a amostra;
- V_3 = volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio com padrão;
- F_c = fator de correção do HCl para concentração de 0,1 M.

5.2 Produção das argamassas

5.2.1 Desenvolvimento das formulações

As formulações das argamassas foram desenvolvidas utilizando um traço comum no mercado regional de construção civil de Caruaru-Pernambuco-Brasil, para argamassas do tipo emboço seguindo os seguintes parâmetros:

- traço 1:2:9 (cimento, cal hidratada, agregado miúdo) em volume. Esse traço foi tomado com base para a elaboração de todas as formulações do experimento;
- as cinzas utilizadas nas formulações foram inicialmente peneiradas em malha 200 e adicionadas à argamassa base como adição em percentuais que variavam de 10 em 10% (10, 20, 30, 40, 50, 60%, etc...) em relação ao peso do cimento, sem alteração na massa dos componentes anidros presentes na argamassa base (cimento, cal e areia);
- como materiais com alta superfície específica absorvem muita água do sistema, foi definido que a relação água/cimento seria fixa, ou seja, foi utilizado o mesmo volume de água da argamassa padrão para todas as argamassas;
- para que uma argamassa fosse considerada adequada para as análises de caracterização, mantendo a relação água/cimento como indicado anteriormente, sua consistência teve que ficar dentro da faixa de consistência recomendadas pela norma NBR 13276 (2005) de 260 ± 5 mm, que foi tomada como parâmetro para definir as porcentagens máximas de cinzas a serem adicionadas ao sistema.

5.2.2 Moldagem dos corpos de prova

As argamassas utilizadas no experimento foram produzidas e moldadas seguindo os critérios estabelecidos pela norma NBR 13276 (2002), para argamassas à base de cimento e cal, em argamassadeira eletro-mecânica de eixo vertical da marca Contenco, com capacidade para 5 litros, na rotação de 830 rpm.

As bateladas foram produzidas utilizando-se 2,5 kg de material seco para todas as análises, exceto para a análise de resistência potencial de aderência à tração preconizada pela NBR 15258 (2005), onde foram utilizados 5 kg, respeitando-se o mesmo proporcionamento entre os materiais orientados pelo traço.

Seguindo os procedimentos indicados pela NBR 13276 (2002) para a confecção de argamassas mistas com cal, inicialmente foram misturadas a

areia, a cal hidratada e a água por quatro minutos em argamassadeira na velocidade baixa, produzindo uma argamassa de cal hidratada, que em seguida foi acondicionada em recipiente fechado para evitar perda de água por evaporação.

Após 24 horas de maturação, o cimento e as cinzas, nas devidas proporções pré-estabelecidas para cada traço analisado, foram adicionados à argamassa de cal hidratada e misturadas por mais quatro minutos em argamassadeira na velocidade baixa para a obtenção da argamassa mista de interesse.

5.3 Caracterização das argamassas no estado fresco

Para caracterização das argamassas no estado fresco foi utilizada a metodologia descrita pela ABNT. A Tabela 18 indica as normas que foram utilizadas e o número de corpos-de-prova utilizados.

Tabela 18 - Número de corpos-de-prova e parâmetros avaliados nos ensaios.

Ensaio realizado	Referência ABNT	Número de amostras
Consistência	NBR 13276:2005	9
Retenção de água	NBR 13277:2005	9
Densidade de massa	NBR 13278:2005	9
Teor de ar incorporado	NBR 13278:2005	9

Fonte: Fotos do autor, 2012.

5.3.1 Consistência

A consistência das argamassas foi medida segundo a metodologia preconizada pela NBR 13276 (2005), que descreve o procedimento de medição pelo espalhamento da argamassa sobre mesa cadente padronizada (Figura 10). Para execução do experimento foram seguidas as seguintes etapas:

- o tampo da mesa e a parede do molde cônico foram deixados ligeiramente úmidos;
- o cone foi preenchido com argamassa em três camadas sucessivas; na primeira foram aplicados 15 golpes com soquete metálico, na segunda 10 golpes e na terceira 5 golpes, de forma a deixar a argamassa uniformemente distribuída;

- foi realizado o rasamento da superfície do molde cônico;
- na sequência, o molde cônico foi removido e a manivela da mesa acionada de modo que a mesa recebesse 30 golpes em aproximadamente 30 segundos;
- foram realizadas três medições ao longo do perímetro da argamassa espalhada sobre a mesa com paquímetro, sendo, então, determinada a consistência pela média das três medidas.

Figura 10 - Determinação do índice de consistência.



Fonte: Fotos do autor, 2012.

5.3.2 Retenção de água

A propriedade de retenção de água das argamassas foi medida através da metodologia estabelecida pela NBR 13277 (2005), onde se utiliza o funil de Buchner modificado com bomba de vácuo, Figura 11. Para a realização do experimento foram seguidas as seguintes etapas:

- o funil de Buchner foi montado com o prato, o papel filtro colocado e umedecido, aplicado sucção de 51 mm de coluna de mercúrio por 90 segundos para remoção do excesso de água e, em seguida, o conjunto foi pesado;
- na sequência operacional, foi realizado preenchimento do conjunto com argamassa recém produzida até um pouco acima da borda, adensando-a com 37 golpes de soquete, 16 golpes na borda e 21 golpes no centro e, em seguida, o conjunto foi rasado e pesado; e, por fim,

- o conjunto foi montado, aplicada sucção de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos e, em seguida, pesado novamente; Para determinação da quantidade de água retida, foi utilizada a Equação 13.

$$R_a = \left[1 - \frac{m_a - m_s}{AF(m_a - m_v)} \right] \cdot 100 \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

R_a = retenção de água (%);

m_a = massa do conjunto com argamassa (g);

m_s = massa do conjunto com argamassa após sucção (g);

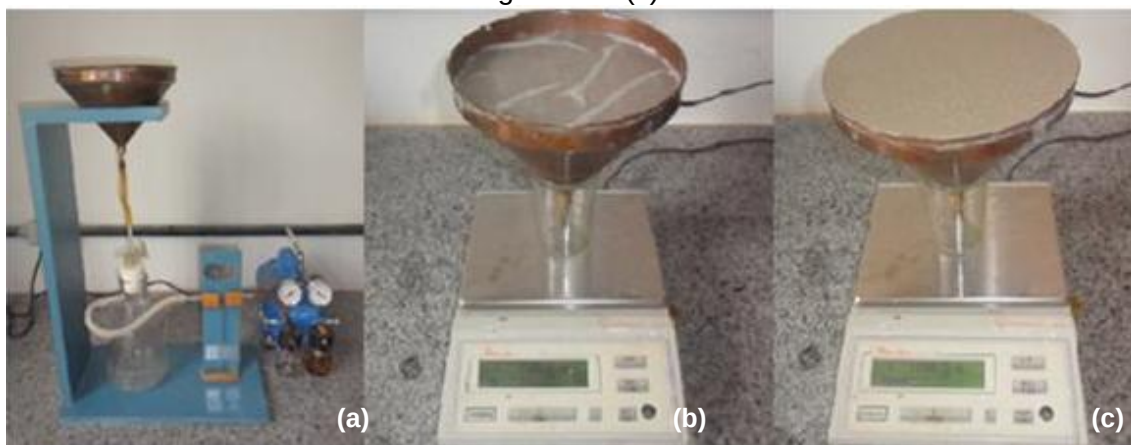
m_v = massa do conjunto vazio com papel filtro úmido (g);

$AF = \left[\frac{m_w}{m + m_w} \right]$ = fator água/argamassa fresca;

m_w = massa total de água adicionada a mistura (g);

m = soma das massas dos componentes anidros (g).

Figura 11 - Sequência de determinação da retenção de água. Conjunto montando (a), massa do conjunto vazio com papel filtro úmido (b) e massa do conjunto com argamassa (c).



Fonte: Fotos do autor, 2012.

5.3.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa da argamassa no estado fresco foi determinada pelo método indicado na NBR 13278 (ABNT, 2005). O ensaio foi realizado nas seguintes etapas:

- um recipiente cilíndrico com volume de 417 cm³ e massa 314 g, calibrado segundo a NBR 13278 (2005), foi preenchido em três camadas, sendo aplicados 20 golpes de soquete em cada uma das camadas e, em seguida, executaram-se três quedas de aproximadamente 3 cm para evitar vazios;
- a superfície foi rasada para remover o excesso de argamassa e o recipiente com argamassa foi pesado.

Para determinação da densidade de massa foi utilizada a Equação 14.

$$d = \left(\frac{m_c - m_v}{v_r} \right) \cdot 1000 \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

d = densidade de massa da argamassa (kg/m³);

m_c = massa do recipiente cilíndrico com argamassa (g);

m_v = massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

v_r = volume do recipiente cilíndrico (cm³).

A determinação do teor de ar incorporado foi realizada através da Equação 15 da Equação 16.

$$A = \left(1 - \frac{d_v}{d_t} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 15}$$

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{n}} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

A = teor de ar incorporado;

d = densidade de massa da argamassa (kg/m^3);

d_t = densidade de massa teórica da argamassa (kg/m^3);

m_i = massa seca de todos os componentes da argamassa mais a água;

n = massa específica de cada componente da argamassa.

5.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Para caracterização das argamassas no estado endurecido foi utilizada a metodologia descrita pela ABNT. A Figura 19 indica as normas que foram utilizadas e o número de corpos-de-prova utilizados.

Tabela 19 - Número de corpos-de-prova e parâmetros avaliados nos ensaios.

Ensaio realizado	Referência ABNT	Nº de amostras
Densidade de massa;	13280:2005	27
Absorção de água, índice de vazio e massa específica;	9778:2005	27
Absorção de água por capilaridade e índice de capilaridade;	15259:2005	27
Resistência a compressão corpos-de-prova cilíndricos	13279:1995	162
Resistência a compressão corpos-de-prova prismáticos	13279:2005	81
Resistência potencial de aderência a tração;	15258:2005	90

Fonte: Fotos do autor, 2012.

5.4.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Para medição da densidade de massa aparente foi utilizada a metodologia preconizada pela NBR 13280 (2005).

Foram moldados 3 corpos de prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm) para cada um dos traço estudados conforme recomendação da NBR 13279 (2005). Como o experimento foi desenvolvido com argamassas de cimento e cal, após 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e curados ao ar em ambiente de laboratório por 28 dias. Após esse período, foram feitas medições de massa e volume de cada um dos corpos-de-prova e calculada a densidade de massa pela Equação 17.

$$\rho = \left(\frac{M}{V} \right) \cdot 1000 \quad \text{Equação 17}$$

Onde :

= massa específica expressa em kg/m³;

V = volume do corpo de prova em cm³;

M = massa do corpo de prova em g; e,

O resultado obtido foi a média de três medições para cada traço.

5.4.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas foi utilizada a metodologia indicada na NBR 9778 (2005), que consiste, de forma simplificada, na análise da variação de massa que ocorre em uma argamassa partindo do seu estado seco até o de completa saturação.

Foram moldados 3 corpos de prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm) para cada um dos traços estudados conforme recomendação da NBR 13279 (2005). Como o experimento foi desenvolvido com argamassas de cimento e cal, após 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e curados ao ar em ambiente de laboratório por 28 dias. Para a obtenção da determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas foram seguidas as seguintes etapas:

- as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 72 h, em seguida resfriadas até a temperatura ambiente e pesadas;
- após as pesagens, as amostras foram imersas em água por 72 h, para saturação e, em seguida, colocadas por 5 horas em recipiente com água em ebulição;
- em seguida, as amostras imersas na água resfriaram naturalmente e foram pesadas em balança hidrostática, como pode ser visto nas Figura 12a e Figura 12b.

Figura 12 - Pesagem de corpo de prova em balança hidrostática para avaliação da absorção de água.



Fonte: Fotos do autor, 2012.

Para a determinação da absorção de água dos traços utilizados na pesquisa foi utilizada a Equação 18.

$$A = \left(\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

M_{sat} = massa das amostras saturada após fervura e pesada em balança convencional;

M_s = massa da amostra seca.

Na determinação do índice de vazios das argamassas e da massa específica da amostra seca foram utilizadas, respectivamente, a Equação 19 e a Equação 20.

$$I_v = \left(\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 19}$$

$$\rho_s = \left(\frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \right) \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

I_v = índice de vazios;

M_i = massa da amostra saturada após fervura, pesada em balança hidrostática;

I_v = índice de vazios da amostra;

ρ_s = massa específica da amostra seca.

5.4.3 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada pelo método indicado na NBR 15259 (2005), que consiste na avaliação da variação de massa de um corpo de prova padronizado, ao longo do tempo, quando uma de suas faces está imersa em água. Quanto mais interligados estão os poros, maior será sua absorção de água por capilaridade.

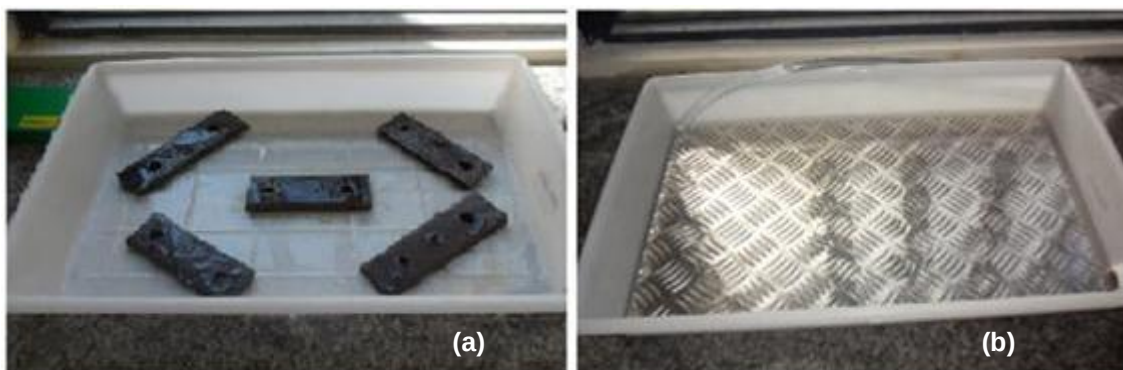
Foram moldados 3 corpos de prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm) para cada um dos traços estudados conforme recomendação da NBR 13279 (2005). Como o experimento foi desenvolvido com argamassas de cimento e cal, após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e curados ao ar em ambiente de laboratório por 28 dias. Para a determinação da absorção de água por capilaridade foram seguidas as seguintes etapas:

- os corpos de prova tiveram uma de suas faces lixadas e limpas e, em seguida, foram pesados;
- os corpos de prova foram, então, posicionados com a face lixada para baixo em recipiente com nível de água constante de 5 ± 1 mm, acima do nível de contato e com superfície, o que permitiu maior contato possível da face da argamassa com a água;
- os corpos de prova imersos foram pesados após 10 e 90 minutos de imersão, removendo, antes da pesagem, o excesso de água com pano úmido.

Para execução do experimento foi utilizado um recipiente plástico, onde foi instalada uma chapa de alumínio ranhurada elevada em 12 mm do fundo do recipiente plástico (Figura 13a). Foi instalada, ainda, uma mangueira para alimentar o recipiente com água corrente e um dreno para controle do nível de água em 5 ± 1 mm acima de cada ponto ranhurado da chapa, onde

posteriormente foram colocados os corpos-de-prova, como pode ser visto na Figura 13b.

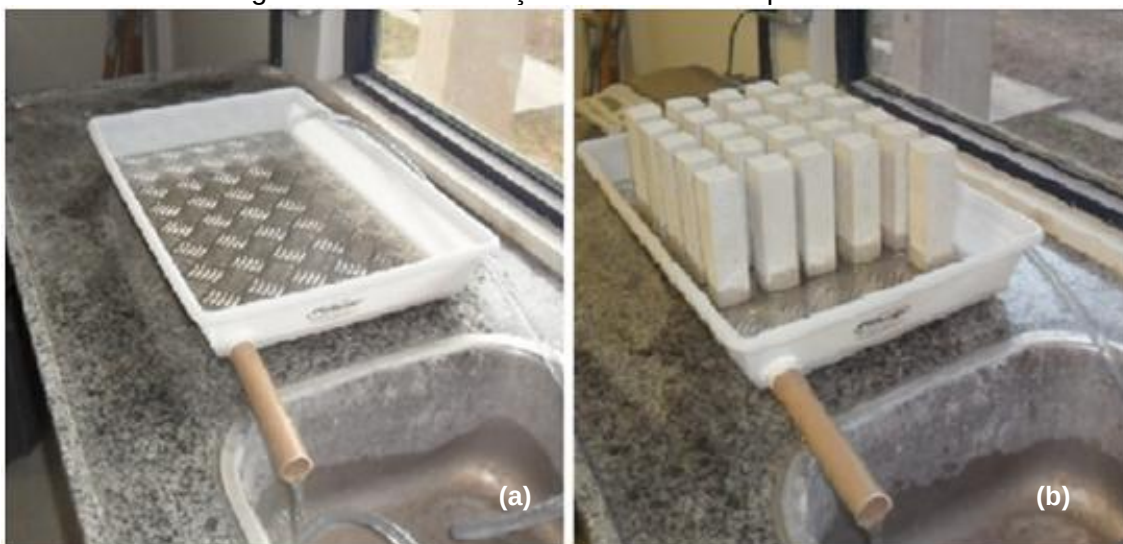
Figura 13 - Recipiente para realização do ensaio absorção de água por capilaridade.



Fonte: Fotos do autor, 2012.

O volume total estático de água no recipiente quando ajustado em 5 ± 1 mm acima das ranhuras foi 3 litros de água, ficando inferior ao mínimo de 45 litros recomendado pela norma para evitar saturação da água. Porém esse fato foi compensado pela renovação constante da água no recipiente a uma taxa de 1,5 litros a cada minuto ou de 135 litros no período de 90 minutos do experimento, conforme pode ser visto na Figura 14a e Figura 14b.

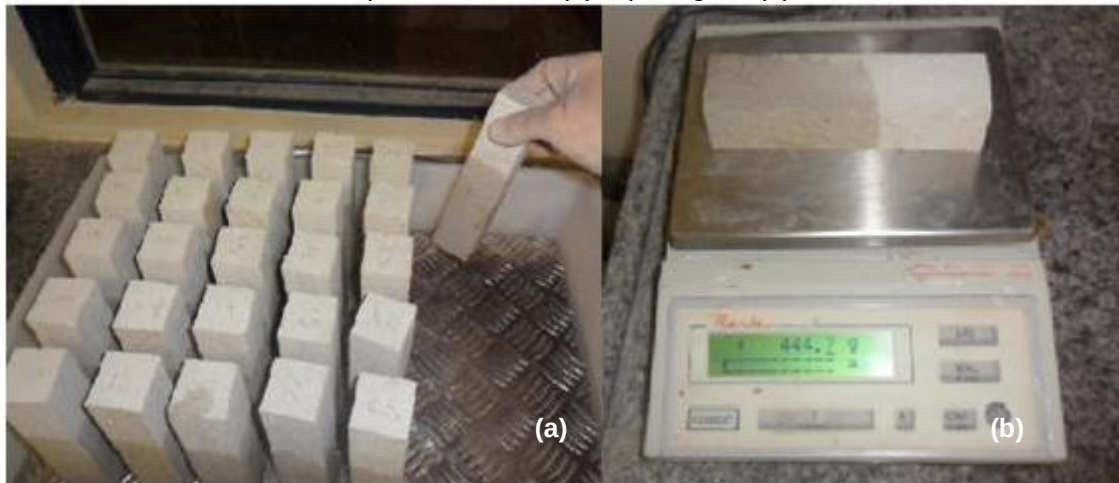
Figura 14 - Determinação do índice de capilaridade.



Fonte: Fotos do autor, 2012.

O aspecto dos corpos-de-prova imersos após 90 minutos pode ser visto na Figura 15a, bem como a operação de pesagem na Figura 15b.

Figura 15 - Ensaio para determinação da absorção de água por capilaridade. Corpos-de-prova imersos (a) e pesagem (b).



Fonte: Fotos do autor, 2012.

A absorção de água por capilaridade foi determinada pela Equação 21.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

A_t = absorção de água por capilaridade (g/cm²);

m_t = massa do corpo de prova a cada tempo (g);

m_0 = massa inicial do corpo de prova (g); e,

16 = área de corpo-de-prova avaliado (cm²).

O coeficiente de capilaridade definido pela NBR 15259 (2005) é expresso em g/dm². e é determinado pela Equação 22.

$$C = m_{90} - m_{10} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

M_{10} – massa do corpo de prova após 10 minutos de absorção;

M_{90} – massa do corpo de prova após 90 minutos de absorção.

5.4.4 Resistência à compressão e a tração na flexão

Para avaliação da resistência à compressão das argamassas analisadas foram utilizadas como referência duas versões da norma NBR 13279.

A NBR 13279 (1995), que descreve o ensaio utilizando corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 5 x 10 cm e a NBR 13279 (2005), que descreve o ensaio para compressão e tração na flexão utilizando moldes prismáticos de 4 x 4 x 16 cm.

Como no ensaio à compressão de moldes prismáticos a seção ensaiada não possui dimensão exata, decidiu-se comparar seus resultados com os de compressão de corpos de prova cilíndricos 5 x 10 cm, que possuem seção bem definida, para uma posterior discussão. Nesse cenário, foram moldados e ensaiados os dois tipos de corpo de prova; uma visão geral dos corpos de prova ensaiados pode ser vista na Figura 16.

Figura 16 – Corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos prontos para ensaios de compressão.



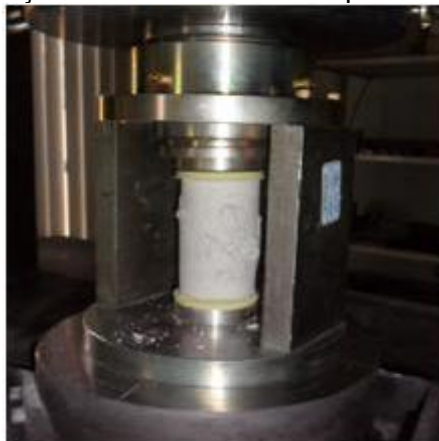
Fonte: Fotos do autor, 2012.

Seguindo a metodologia da NBR 13279 (1995) foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5 x 10 cm, para cada um dos traços definidos na etapa de desenvolvimento das formulações e para as idades de rompimento de 7, 14 e 28 dias, sendo, portanto, moldados 18 corpos de prova para cada traço.

Como o experimento foi desenvolvido com argamassas de cimento e cal, após 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e curados ao ar em ambiente de laboratório por 28 dias. Antes do ensaio, os corpos de prova foram

capeados com enxofre e após 24 horas, ensaiados em prensa hidráulica da marca Shimadzu 2000 kN, utilizando a escala de 40 kN, conforme Figura 17.

Figura 17 - Determinação da resistência à compressão NBR 13279 (1995).



Fonte: Fotos do autor, 2012.

Por outro lado, seguindo a metodologia da NBR 13279 (2005), foram moldados 3 corpos de prova prismáticos, 4 x 4 x 16 cm, para cada um dos traços definidos para as idades de rompimento 7, 14 e 28 dias; sendo, portanto, moldados 9 corpos-de-prova para cada traço.

Como o experimento foi desenvolvido com argamassas de cimento e cal, após 24 horas os corpos-de-prova foram desmoldados e curados ao ar em ambiente de laboratório por 28 dias até o momento do ensaio, realizados também em prensa hidráulica da marca Shimadzu 2000 kN, utilizando-se a escala de 40 kN, sendo obtido o resultados em MPa. Inicialmente foi realizado o ensaio de tração na flexão, que consiste na aplicação de uma força centrada em um corpo de prova bi-apoiado até a sua ruptura por flexão Figura 18.

Figura 18 - Determinação da resistência a tração na flexão NBR 13279 (2005).



Fonte: Fotos do autor, 2012.

Após o ensaio de flexão, as metades restantes de cada um dos corpos prismáticos foram posicionadas no dispositivo para o ensaio de compressão, conforme pode ser visualizado na Figura 19. Para cada idade e traço foram rompidos 6 corpos de prova correspondente às 6 metades dos 3 corpos-de-prova prismáticos.

Figura 19 - Determinação da resistência a compressão com corpo de prova prismático.



Fonte: Fotos do autor, 2012.

5.4.5 Resistência potencial de aderência potencial à tração

A ABNT regulamenta a determinação da resistência à tração de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas através de duas normas, a NBR 15258 (2005) e a NBR 13528 (2010) intituladas, respectivamente, “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da resistência potencial de aderência à tração” e “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto - Determinação da resistência de aderência à tração”.

O que diferencia a NBR 15258 (2005) da NBR 13528 (2010) é que na primeira a determinação é a resistência POTENCIAL de aderência à tração e na segunda, é determinada a resistência de aderência à tração em paramentos, tal qual em uma alvenaria da obra. No caso da resistência potencial, é a máxima que pode ser atingida, uma vez que é estabelecido o uso de um substrato padrão.

Nesse cenário, no presente trabalho optou-se pela utilização da NBR 15258 (2005) em detrimento da NBR 13528 (2010) para a determinação da resistência potencial de aderência à tração, pois se acredita que, por se tratar

de uma análise comparativa entre argamassas com adição em relação a uma argamassa padrão, o uso do substrato padrão condirá com resultados comparativos mais repetitivos e reprodutivos, uma vez que se deseja avaliar em nível laboratorial a argamassa e não o conjunto argamassa/paramento de uma obra. Assim, a NBR 15258 (2005) fornece subsídios suficientes para avaliação da variação da aderência em função da variação das adições.

Para execução do ensaio seguindo a metodologia da NBR 15258 (2005), inicialmente foram moldos substratos, denominado substrato padrão (SP) nas dimensões de 50 x 25 x 2,5 cm seguindo as orientações da NBR 14082 (2004), que recomenda a utilização do cimento de alta resistência inicial ARI CP V, bem como especifica a quantidade de água o volume e as características do agregado que devem ser empregados.

Como o cimento de alta resistência inicial ARI CP V, por não ser produzido na região nordeste, não está disponível no mercado regional para aquisição, foi utilizado em substituição ao cimento e aos agregados, o SIKAGROUT 250, fabricado pela SIKA, na confecção dos SP.

A escolha desse *grout* se deu pela disponibilidade no mercado e por possuir resistência mecânica superior a do cimento CP V, quando misturado com agregados, além de ter baixa absorção de água e de ser auto-adensável.

Para confecção dos SP, foram seguidas as mesmas etapas descritas pela NBR 14082 (2004), que foram:

- as formas 250 x 500 x 2,5 cm foram limpas;
- foi adicionada a armadura, constituída de tela eletro-soldada com diâmetro de 2,5 mm e com espaçamento entre fios de 50 x 50 mm. Em seguida, a tela foi nivelada para permanecer a meia altura;
- em seguida, foi realizada a preparação do SIKAGROUT 250, seguindo as orientações do fabricante;
- o SIKAGROUT 250, por possuir consistência fluida, foi vertido nas formas sem a necessidade de nenhum tipo de vibração;
- nas primeiras 24 horas, o substrato de SIKAGROUT 250 foi mantido na forma com lâmina d'água (manter umidade) e, após

esse tempo, o substrato foi desmoldado e colocado em cura úmida por 48 horas.

- após esse tempo, o substrato permaneceu no ambiente de laboratório por 28 dias.

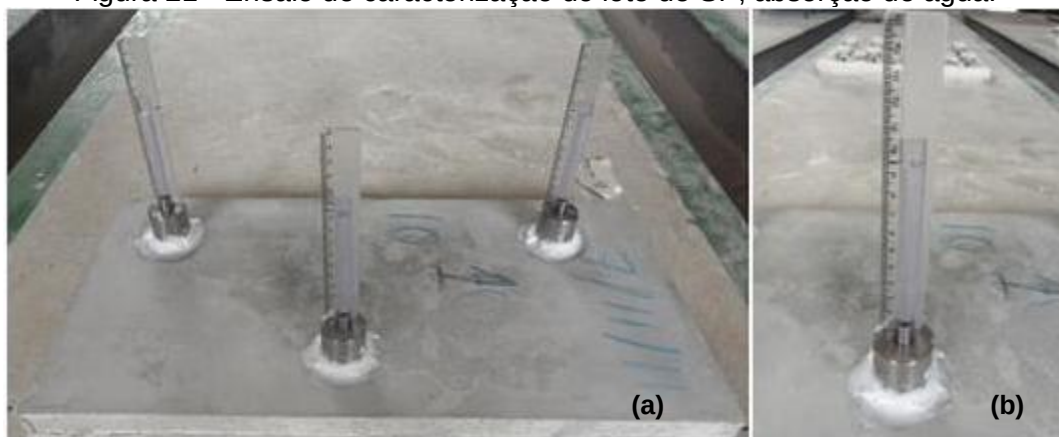
Após o período de cura, dois SP do lote foram caracterizados para avaliação da qualidade, com relação a resistência à tração, Figura 20, e permeabilidade, Figura 21, a fim de verificar se atendem às exigências da NBR 14082 (2004).

Figura 20 - Ensaio de caracterização do lote de SP, pastilhas coladas para ensaio de aderência à tração.



Fonte: Fotos do autor, 2012.

Figura 21 - Ensaio de caracterização do lote de SP, absorção de água.



Fonte: Fotos do autor, 2012.

Foram encontrados valores dentro das especificações recomendada pela NBR 14082 (2004), conforme pode ser visto na Tabela 20.

Tabela 20 - Caracterização de qualidade do lote de SP utilizado na pesquisa.

Ensaio de caracterização	Valores recomendados pela NBR 14082 (2004)	Valor obtido no ensaio
Aderência a tração	$\geq 2,0$ MPa	2,29 MPa
Absorção de água	$< 0,5$ cm ³	0,15 cm ³

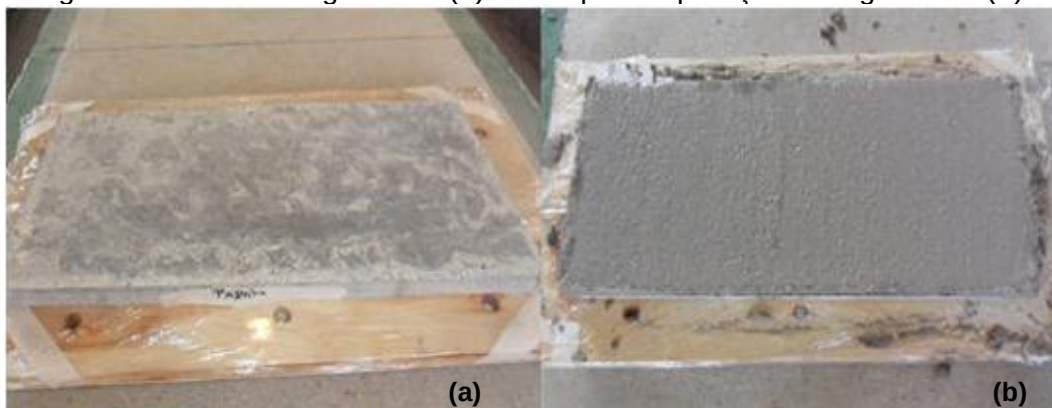
Fonte: Tabela do autor, 2012.

Devido as dificuldade para aquisição de cimento CP V - ARI na região nordeste e embasados nos resultados de caracterização obtidos no lote de SP avaliado, justifica-se a execução de um trabalho futuro, comparando uma maior quantidade de substratos com a utilização do cimento CPV - ARI, seguindo as orientações da NBR 14082 (2004), com outras opções disponíveis de *grout*, desenvolvendo, assim, alternativas para os pesquisadores da região.

Após o preparo, cura e caracterização do lote do SP, foram realizadas a aplicação dos traços de argamassa; um traço para cada substrato, seguindo as etapas recomendadas pela NBR 15258 (2005).

- a argamassa padrão e as argamassas com adição de CT e CB foram preparadas e vertidas em duas camadas, a primeira com aproximadamente 5 mm, sendo pressionadas com colher de pedreiro; e, a segunda camada passando um pouco do gabarito ajustado para 18 ± 2 mm em relação ao substrato, Figura 22;
- a argamassa foi rasada com régua deixando o acabamento uniforme, sem que ocorresse o alisamento da superfície;
- as argamassas ficaram curando em ambiente de laboratório até o momento do ensaio de arrancamento.

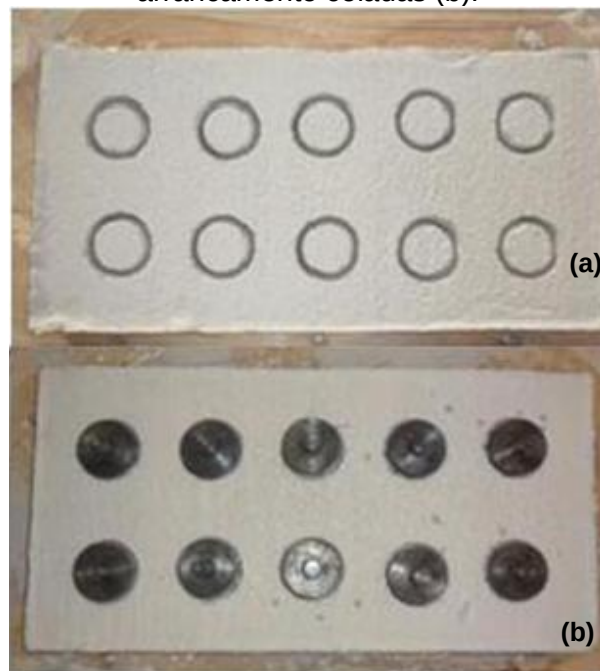
Figura 22 - SP sem argamassa (a) e SP após a aplicação de argamassa (b).



Fonte: Fotos do autor, 2012.

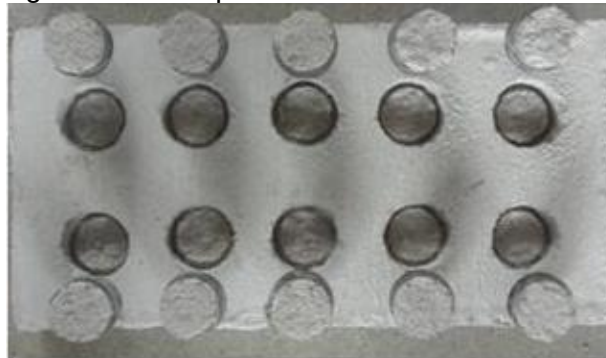
- após o tempo de cura, com os substratos na posição horizontal, foi executado corte do revestimento com serra copo diamantada, alcançando até 1 mm para dentro do substrato, um dia antes do ensaio, Figura 23, (a);
- a superfície das argamassas nas regiões onde foram realizados os cortes, foram escovadas, limpas e, em seguida, coladas pastilhas com dimensões de 5 cm de diâmetro. Para cada argamassa foram colocadas 10 pastilhas, Figura 23 (b);
- após o período de cura da cola de epóxi, o equipamento de tração foi acoplado e o ensaio realizado, Figura 24.

Figura 23 - SP com argamassa cortada (a) e SP com as pastilhas para ensaio de arrancamento coladas (b).



Fonte: Fotos do autor, 2012.

Figura 24 - SP após o ensaio de arrancamento.



Fonte: Fotos do autor, 2012.

Os resultados foram avaliados seguindo as características do tipo de ruptura e as resistências potenciais de aderência a tração calculadas utilizando a Equação 23.

$$R_i = \frac{P_i}{A_i} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

R_i = resistência potencia de aderência a tração (MPa);

P_i = Carga de ruptura (N); e,

A_i = Área do corpo de prova (mm²).

5.4.6 Avaliação da aplicabilidade das argamassas

A aplicabilidade das argamassas foi avaliada em obra foi avaliada pelo Sr. José Galdino, mestre de obra que tem grande experiência na construção civil. O mestre avaliou aspectos de aderência inicial, trabalhabilidade, acabamento entre outros, sempre da forma prática empregando a sensibilidade, como é usual em grande número dos canteiros de obra.

Para esta avaliação foram utilizados os traços CT10, CT20, CT30, CT40, CB10, CB20, CB30, CB40, bem como o traço padrão, sem nenhuma alteração em relação aos experimentos realizados no laboratório.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, os resultados obtidos durante a realização desta pesquisa estão apresentados e discutidos, os quais compreendem: caracterização química, física, pozolânica e microestrutural das cinzas; apresentação das propriedades das argamassas com adição de cinzas CT e CB, comparativamente à argamassa padrão; e, por fim, a caracterização microestrutural das argamassas.

6.1 Cinzas

6.1.1 Análise química

A análise química da CT de algaroba, Tabela 21, demonstra que possui apenas 2% de SiO_2 , 0,35% de Fe_2O_3 e 0,56% de Al_2O_3 , e a CB, Tabela 22 1,7% de SiO_2 , 0,32% de Fe_2O_3 e 0,73% de Al_2O_3 o que indica que essas cinzas não possuem as condições químicas necessárias para desenvolver atividade pozolânica, segundo a NBR 12653 (1992), que preconiza o valor mínimo de 50% para o somatório dos percentuais de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 para considerar um material como pozolânico.

Tabela 21- Características químicas da CT de algaroba.

Caracterização Química	Resultado (%)
CaO	77,29
K ₂ O	4,96
P ₂ O ₅	4,55
MgO	3,88
SO ₃	2,56
Cl	2,25
SiO ₂	2,23
SrO	1,06
Al ₂ O ₃	0,56
Fe ₂ O ₃	0,35
TiO ₂	0,12
MnO	0,09
ZnO	0,03
CuO	0,02

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 22 - Características químicas da CB de algaroba.

Caracterização Química	Resultado (%)
CaO	78,19
K ₂ O	8,46
P ₂ O ₅	3,94
MgO	3,03
SiO ₂	1,66
Cl	1,56
SrO	0,98
SO ₃	0,84
Al ₂ O ₃	0,73
Fe ₂ O ₃	0,32
TiO ₂	0,13
MnO	0,09
ZnO	0,03
CuO	0,02
Rb ₂ O	0,01

Fonte: Tabela do autor, 2012.

A análise de perda ao fogo a 550°C é apresentado na Tabela 23, onde é possível verificar que a CB apresenta quantidade dez vezes maior de matéria orgânica em relação a CT.

Tabela 23 – avaliação de perda ao fogo a 550°C de CT e CB.

Tipo de cinza	Teor de umidade (%)	Materia orgânica presente (%)
CT	0,04	0,98
CB	0,50	7,79

Por outro lado, a grande presença de CaO sugere a possibilidade da presença de calcita, que quando em granulometria reduzida, como é o caso das cinzas, pode contribuir para a melhora do empacotamento do sistema.

6.1.2 Massa específica e área específica (BET)

A massa específica e a densidade de massa das cinzas são apresentadas nas Tabela 24 e Tabela 25. Verifica-se que a CT apresenta maior massa específica, menor área específica, bem como menor porosidade acompanhada de diâmetro médio dos poros também menores, comparativamente aos parâmetros apresentados pela CB.

Tabela 24- Massa específica e área específica da CT com partículas $\leq 75\mu\text{m}$.

Tipo de cinza	Avaliação	Valor obtido no ensaio
CT	Massa específica	2,66 g/cm ³
	Área específica	44.000 m ² /kg
	Porosidade	0,0414 cm ³ /g
	Diâmetro médio dos poros	50,01 Å

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 23- Massa específica e área específica da CB com partículas $\leq 75\mu\text{m}$.

Tipo de cinza	Avaliação	Valor obtido no ensaio
CB	Massa específica	2,47 g/cm ³
	Área específica	47.000 m ² /kg
	Porosidade	0,0673 cm ³ /g
	Diâmetro médio dos poros	58,42 Å

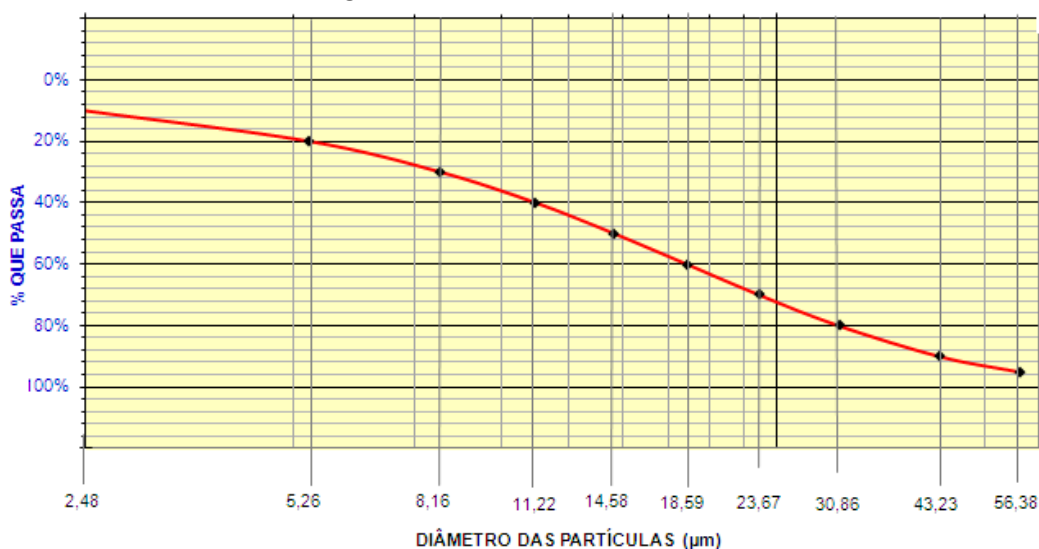
Fonte: Tabela do autor, 2012.

6.1.3 Granulometria

As curvas granulométricas das CT e CB são apresentadas nas Figura 25 e Figura 26, respectivamente. Após tratamento em peneira de malha 200, se observa que as partículas de CT possuem dimensão predominantemente entre 2,48 e 58,38 μm , e as partículas de CB entre 2,46 e 43,91 μm .

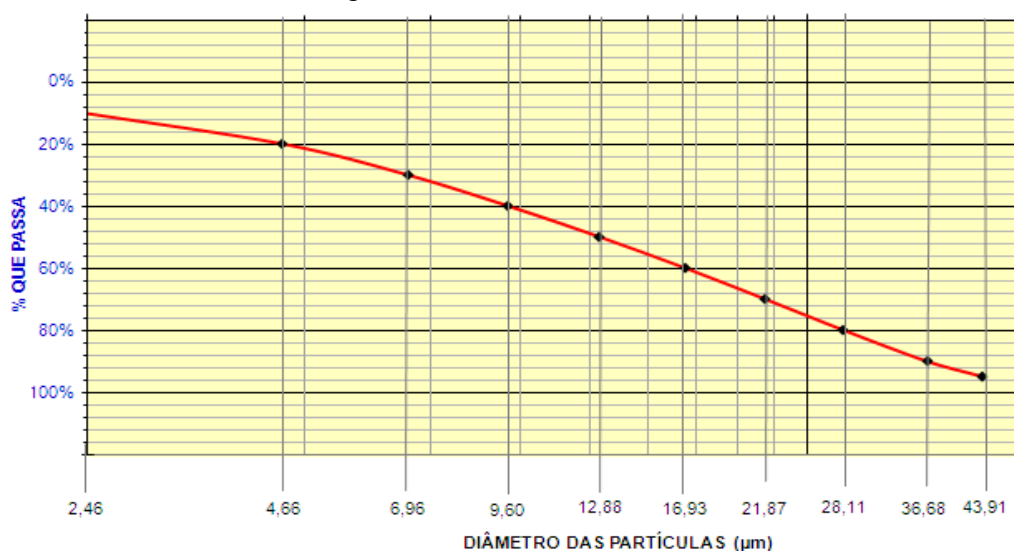
Esses dados reforçam as informações obtidas na análise de área de superfície específica, já que materiais com partículas menores possuem área superficial maior, bem como indicam condições para utilização dessas cinzas como *filler* numa matriz cimentícia.

Figura 25- Granulometria CT.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Figura 26 - Granulometria CB.

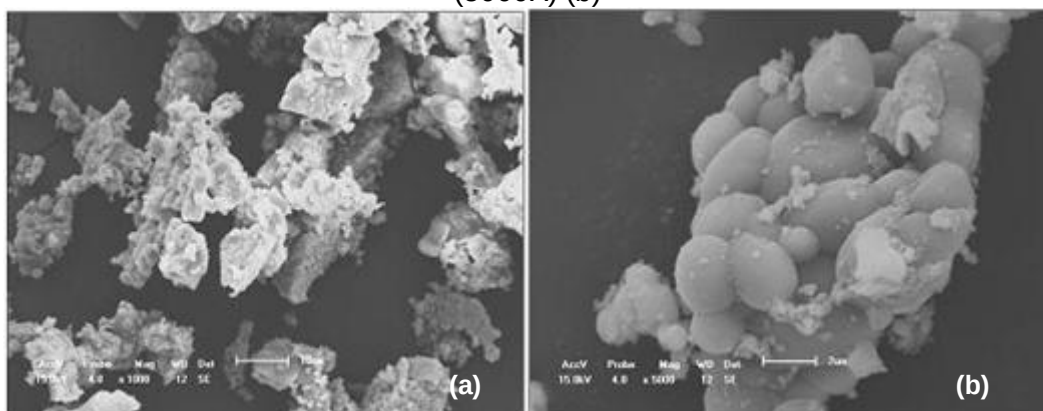


Fonte: Figura do autor, 2012.

6.1.4 MEV

Na Figura 27 podem ser visualizadas micrografias eletrônicas referente à CT de lenha de algaroba. Na ampliação de 1000X (a), verifica-se que a cinza apresenta superfície irregular e porosa, que pode ser melhor visualizada na ampliação de 5000X (b), onde é observado pequenas partículas arredondadas e bem formadas aglomeradas, mantendo entre elas vazios.

Figura 27 - Micrografia eletrônica de varredura em modo SE da CT (1000X) (a) e (5000X) (b)



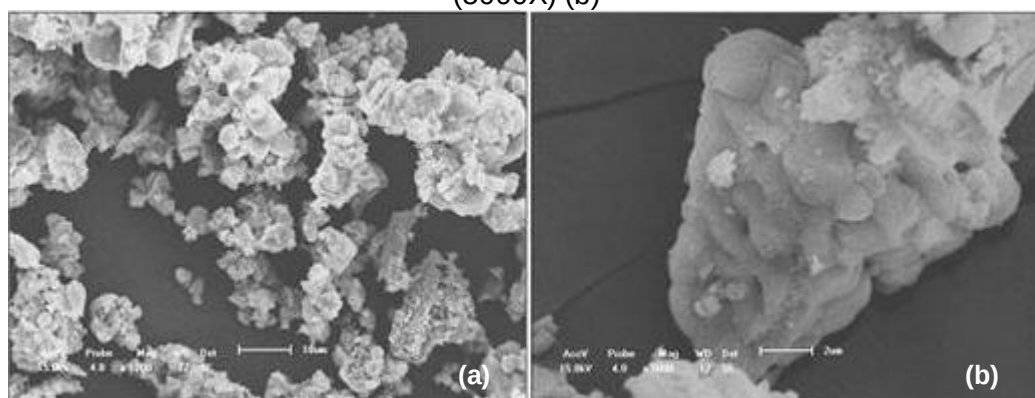
Fonte: Figura do autor, 2012.

Na Figura 28 podem ser visualizadas micrografias eletrônicas referente à CB de lenha de algaroba. Na ampliação de 1000X (a) verifica-se uma superfície mais irregular e com placas de menor diâmetro do que as de CT. É

possível verificar ainda na ampliação de 5000X (b) que as partículas menores se aglomeram de uma forma quase lamelar o que confere um maior número de vazio, sugerindo, assim, uma área superficial e porosidade maior da CB em relação a CT. Esse dado é confirmado pela análise de área de superfície específica (BET) e porosidade apresentados anteriormente.

As características superficiais discutidas de ambas as cinzas podem vir a interferir na consistência das argamassas devido à absorção da água de amassamento. Nesse cenário, a CB poderá interferir de forma mais intensa na redução da consistência.

Figura 28 - Micrografia eletrônica de varredura em modo SE da CB (1000X) (a) e (5000X) (b)



Fonte: Figura do autor, 2012.

6.1.5 Determinação da atividade pozolânica das cinzas

Os valores obtidos nos ensaios de Chapelle modificado para as duas cinzas CT e CB estão expostos na Tabela 25.

Tabela 25 – Índice de atividade pozolânica.

Material	Índice de atividade pozolânica (mg de Ca(OH)_2 /g de material)
CT	-178,83
CB	-448,27

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Segundo Christófolli (2010) um material é considerado pozolânico quando no ensaio de Chapelle modificado apresenta consumo mínimo de 330 mg de CaO por grama de amostra analisada. Portanto, como as CT e CB

apresentam como resultado valores negativos, indica que não apresentam atividade pozolânica.

O fenômeno da indicação negativa dos resultados pode estar associado ao fato das duas cinzas apresentarem elevada alcalinidade, sendo maior na CB por possuir maior proporção de K e Ca em relação a CT, sendo necessário maior consumo de HCL 0,1 M para haver a titulação em relação ao padrão.

A possível explicação deriva do fato de se mensurar a atividade pozolânica pelo método de Chapelle modificado como a capacidade de um material de fixar hidróxido de cálcio quando mantido numa solução aquosa com óxido de cálcio. Nesse método, após certo período de tempo em ambiente propício, a solução com material avaliado é titulada com HCl 0,1 N e fenoftaleína e o consumo de HCl 0,1 N é comparado ao utilizado em uma solução padrão, identificando assim a quantidade de CaO combinado com o material testado.

6.2 Argamassas

6.2.1 Desenvolvimento das formulações

Para maior acuidade dos ensaios, o traço do tipo emboço 1:2:9 (cimento, cal hidratada e areia), em volume, foi convertido em massa, obtendo-se como resultado a relação indicada na Tabela 26.

Tabela 26 - Conversão do traço em volume para traço em massa.

Material	Traço volume	Traço em massa
Cimento	1	1
Cal	2	1,18
Areia	9	10,76

Fonte: Tabela do autor, 2012.

6.2.2 Propriedades no estado fresco

6.2.2.1 Consistência

Seguindo um dos objetivos da pesquisa foi tomado como parâmetro de referência o valor de consistência 260 ± 5 mm, recomendado pela NBR 13276 (2005), para todas as argamassas que seriam avaliadas nos demais experimentos da pesquisa.

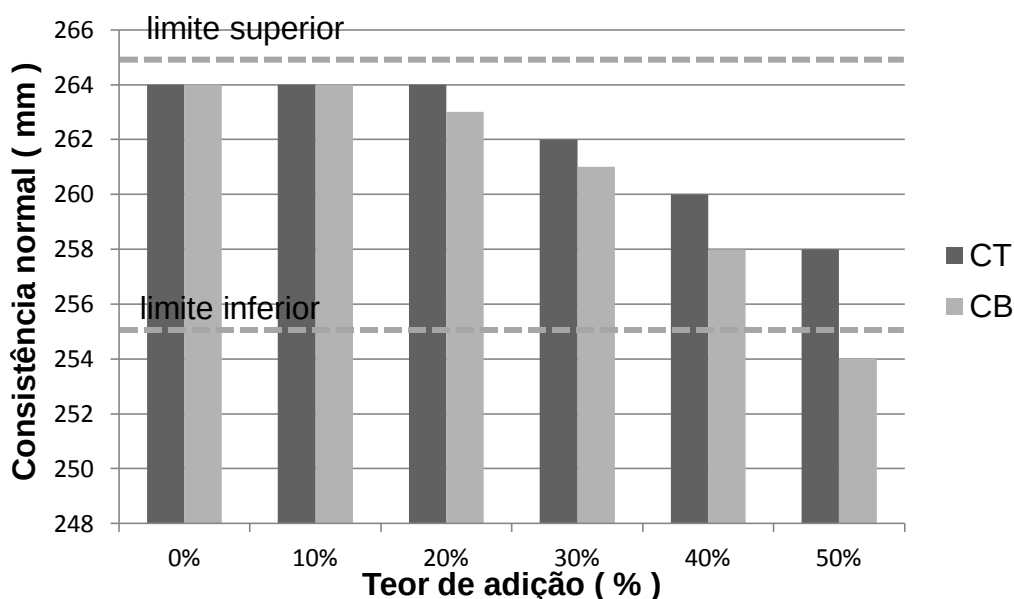
Ou seja, o fator determinante para qualificação de uma argamassa com adição era que ela estivesse dentro da faixa de consistência definida. Assim, inicialmente foi definida a quantidade de água necessária para determinação do traço para a argamassa padrão (Tabela 27), e em seguida, mantendo a mesma relação água cimento, foi sendo adicionado em múltiplos de 10, percentuais de adição de CT e CB.

Os resultados de consistência obtidos pela argamassa padrão, e pelas argamassas com adição de CT e CB nas proporções de 10, 20, 30, 40 e 50% encontram-se expostos na Figura 29. Como a argamassa com 50% de CB não atendeu a faixa de consistência estabelecida, foi definido que esse percentual seria excluído da pesquisa, bem como o com adição de 50% de CT.

O fato da CB absorver mais água comparativamente a CT já era esperado, uma vez que a CB apresenta maior área específica, bem como maior porosidade acompanhada de poros também maiores, resultado esse já explorado nas Tabela 24 e Tabela 25.

A pesquisa foi, então, desenvolvida com nove traços, o traço base e quatro traços para cada tipo de cinzas, nas proporções de 10, 20, 30 e 40% de adição.

Figura 29 - Consistência normal de argamassas adicionadas com CT ou CB nas proporções de 10, 20, 30, 40 e 50%.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Tabela 27 - Traço padrão utilizado na pesquisa.

Cimento	Areia	Cal	Água
1	1,18	10,76	2,13

Fonte: Tabela do autor, 2012.

6.2.2.2 Retenção de água

Os resultados obtidos no ensaio de retenção de água estão expostos na Figura 30, onde se verifica o aumento crescente na retenção de água com a adição de CT e CB em relação à argamassa padrão com maior aumento para as CB. Segundo Sabattini (1986) aumenta-se a retenção de água de uma argamassa aumentando a superfície específica dos constituintes ou utilizando aditivos que por suas características absorvam ou impeçam a percolação de água.

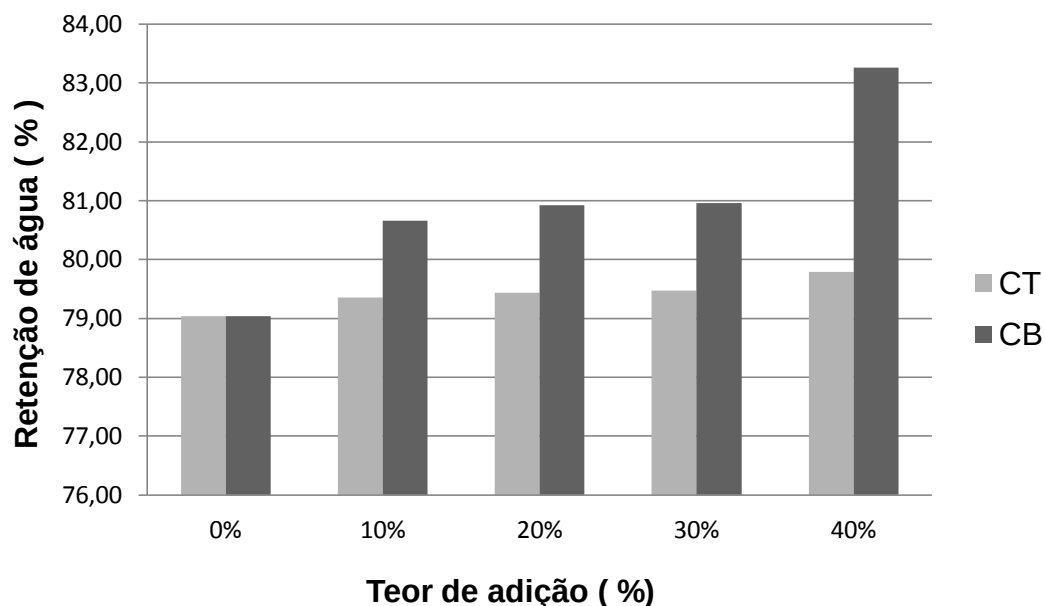
No experimento, como as CT e CB possuem elevada superfície específica, à medida que foram adicionadas maiores proporções destas nas argamassas, houve tendência ao aumento no parâmetro de retenção de água. Nessa linha de raciocínio, como a área específica da CB é superior a da CT, esperava-se, realmente, que as argamassas adicionadas de CB apresentassem maior retenção de água comparativamente às argamassas com CT, conforme pode ser visto na Figura 30.

Além disso, o aumento no valor do parâmetro retenção de água foi diretamente proporcional a quantidade de cinza adicionada aos sistemas para ambas as argamassas, sendo os incrementos mais acentuados quando da adição da CB, em função da sua maior área superficial.

Por outro lado, como a relação água/cimento para todas as argamassas foi à mesma, com o aumento da retenção de água houve o efeito de perda de plasticidade. Esse efeito pode ser visto com maior relevância na argamassa com CB na proporção de 40%, já que esse traço apresentou a maior retenção de água do experimento, mas teve o menor índice de consistência.

No entanto, as variações ocorridas entre as argamassas podem ser avaliada como de pequena magnitude, já que todas as argamassas podem ser classificadas na mesma classe para este tipo de análise, segundo a NBR 13281 (2005), Tabela 28.

Figura 30 - Retenção de água das argamassas adicionadas com CT ou CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Tabela 28- Classificação da retenção de água NBR 13281 (2005).

Classe	Retenção de água %	Tipo de argamassa
U1	≤ 78	Padrão, CT10, CT20, CT30, CT40, CB10, CB20, CB30, CB40
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 A 100	

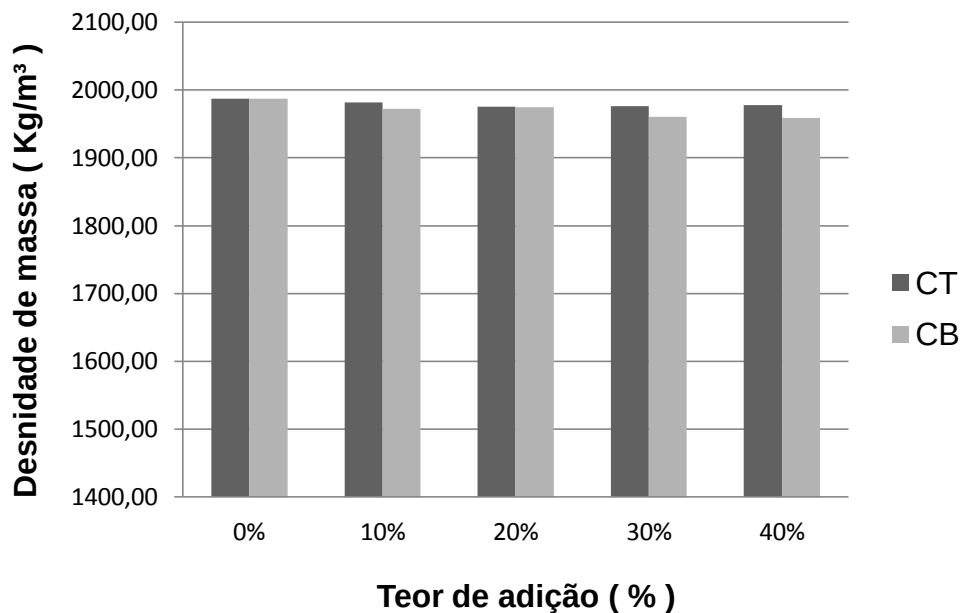
Fonte: ABNT, 2012.

6.2.2.3 Densidade de massa no estado fresco

Os resultados relativos à densidade de massa no estado fresco das argamassas com e sem as adições podem ser visualizados na Figura 31 e apresentam uma variação máxima de 0,8% entre a densidade de massa da argamassa padrão e a argamassa com 40% de CB, que apresenta a menor densidade de todas as argamassas analisadas. Assim, não houve variação significativa na densidade de massa no estado fresco nas argamassas após a adição de até 40% de cinzas, seja CT ou CB.

Em função da reduzida variação entre as argamassas, todas elas podem ser classificadas na mesma classe segundo a NBR 13281 (2005), Tabela 29.

Figura 31 - Densidade de massa de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Tabela 29- Classificação das argamassas segundo a densidade de massa no estado fresco. NBR 13281 (2005).

Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m³)	Tipo de argamassa
D1	≤ 1400	
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	
D4	1600 a 2000	
D5	1800 a 2200	Padrão, CT10, CT20, CT30, CT40, CB10, CB20, CB30, CB40
D6	>2000	

Fonte: ABNT, 2012.

Segundo Carasek (2010), a densidade de massa varia com o teor de ar e com a massa específica dos materiais constituintes principalmente dos agregados. Nesse cenário, como a massa específica das cinzas é semelhante aos demais componentes da argamassa, Tabela 30, e pode ser observado aumento na quantidade de ar incorporado com o aumento das adições,

Figura 32, provavelmente, a tendência à redução de densidade ocorrida foi ocasionada pelo aumento de ar incorporado nas argamassas com adição.

Tabela 30 – Massa específica dos elementos das argamassas analisadas

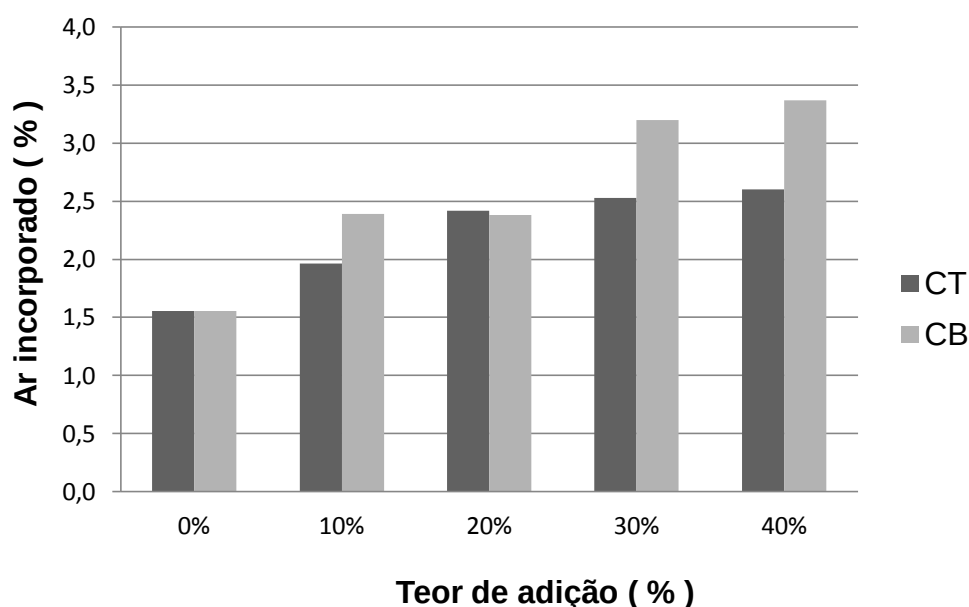
Material	Massa específica g/cm ³	Método
Cimento	3,01	Boletim técnico Cimentos Nassau
Cal	2,47	NBR NM 23:2000
Areia	2,6	NBR NM 23:2000
CT	2,66	NBR NM 23:2000
CB	2,47	NBR NM 23:2000

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Como mencionado anteriormente, com a adição gradual de CT e CB foi observada redução da consistência das argamassas em relação ao padrão. Como esse processo é consequência da redução da plasticidade e coesão entre as partículas, infere-se que a incorporação de ar deve ter ocorrido durante o período de amassamento, realizado mecanicamente com argamassadeira. Essa teoria é ratificada pelo fato das cinzas, provavelmente, não reagirem durante o período de amassamento.

Desta forma, ao adicionar agitação com considerável energia de mistura impressa à massa, quanto menos plástica e coesa estava argamassa, mais propensas eram as condições para a incorporação de ar. Ressalta-se que quanto maior for a quantidade de ar incorporada, melhor a trabalhabilidade das argamassas. Sendo assim, a adição das cinzas CT e CB foi positiva.

Figura 32 – Teor de ar incorporado de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.



Fonte: Figura do autor, 2012.

6.2.3 Propriedades no estado endurecido

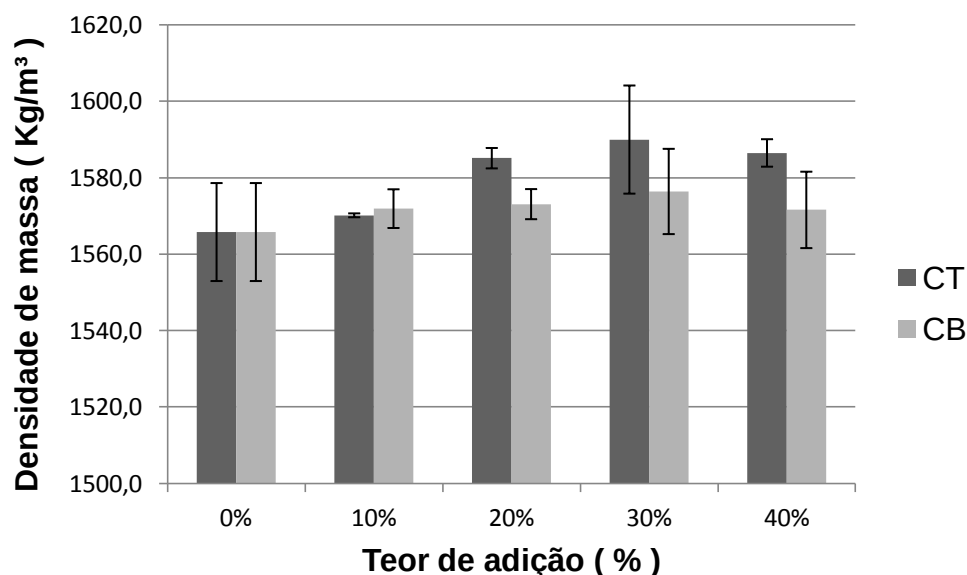
6.2.3.1 Densidade de massa no estado endurecido

Os resultados da avaliação dos parâmetros densidade de massa no estado endurecido para as argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40% encontram-se expostos na Figura 33.

Segundo Carasek (2010), a densidade de massa no estado endurecido é menor do que no estado fresco, devido à saída de parte da água da argamassa.

Na análise dos resultados no estado fresco pôde ser verificada a tendência de redução de densidade à medida que as cinzas foram sendo adicionadas, o que em princípio, deveria ter sido seguido no estado endurecido. No entanto, é observado o fenômeno inverso na Figura 33, ou seja, a densidade aumentou à medida que se foi aumentado o teor de cinzas.

Figura 33 - Densidade de massa no estado endurecido de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Numa aplicação em obra esse fenômeno seria incoerente, porém, em nível laboratorial de cunho científico esse fenômeno é explicado pelo processo de moldagem dos corpos de prova analisados estabelecido pela NBR 13279 (2005), que define etapas de preenchimento dos moldes e vigoroso adensamento das argamassas a fim de remover ao máximo o ar incorporado.

Narciso (2006) identificou que argamassas produzidas com agregados que possuíam maior teor de finos apresentaram maior densidade de massa em relação as que não possuíam finos. Esse fenômeno ocorre em função dos finos ocuparem os vazios entre os grãos, aumentando a compacidade do conjunto.

Desta forma, como os resultados da densidade de massa das argamassas analisadas aumentam à medida que se adicionam cinzas, indica-se que essa adição melhora o empacotamento das argamassas. Esse comportamento é reforçado pela reduzida granulometria apresentada pelas cinzas. Apesar do aumento da densidade ocorrida, todas as argamassas analisadas podem ser classificadas na mesma classe segundo a NBR 13281 (2005), Tabela 31.

Tabela 31 - Classificação das argamassas segundo densidade massa no estado endurecido. NBR 13281 (2005).

Classe	Densidade massa (kg/m ³)	Tipo de argamassa
M1	≤ 1200	
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	Padrão, CT10, CT20, CT30, CT40, CB10, CB20, CB30, CB40
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	
M6	>1800	

Fonte: ABNT, 2012.

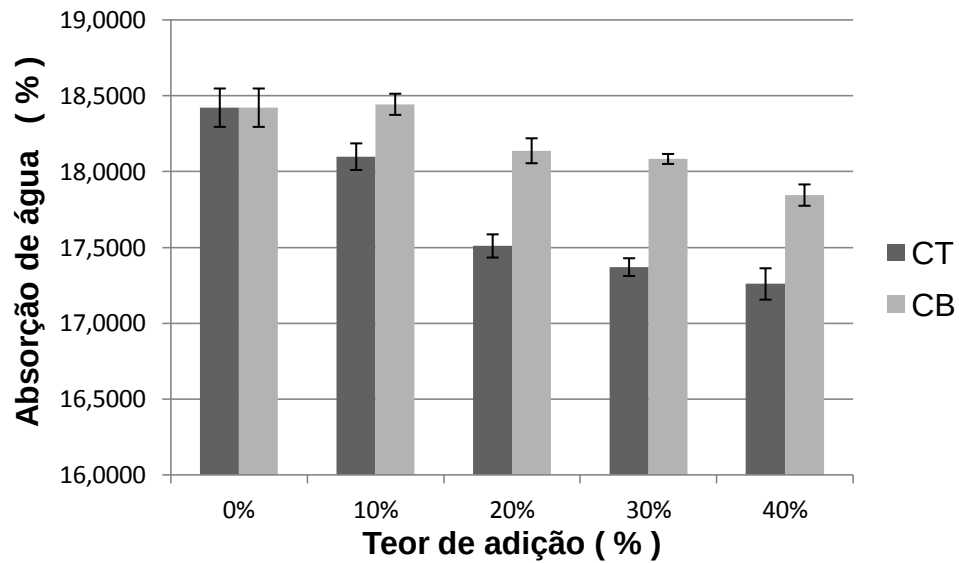
6.2.3.2 Absorção de água, índice de vazios

Os resultados para absorção de água para as argamassas adicionadas de CT e CB, comparativamente à argamassa padrão, encontram-se expostos na Figura 34.

Nesse ensaio, as argamassas com adição de CT e CB apresentaram redução na absorção de água total em relação ao padrão e esse efeito fica mais evidenciado na adição de 40% de CT, onde houve redução de 6% na absorção. Esse efeito ocorreu pelo mesmo motivo do aumento da densidade de massa, ou seja, as cinzas ao serem adicionadas nas argamassas preencheram parte dos espaços vazios das estruturas (efeito *filler*), conforme redução no índice de vazios (Figura 35) à medida que o volume das cinzas aumenta. Essa redução nos vazios dificulta a percolação de água na estrutura e a absorção de água é reduzida. Outro efeito observado em função da

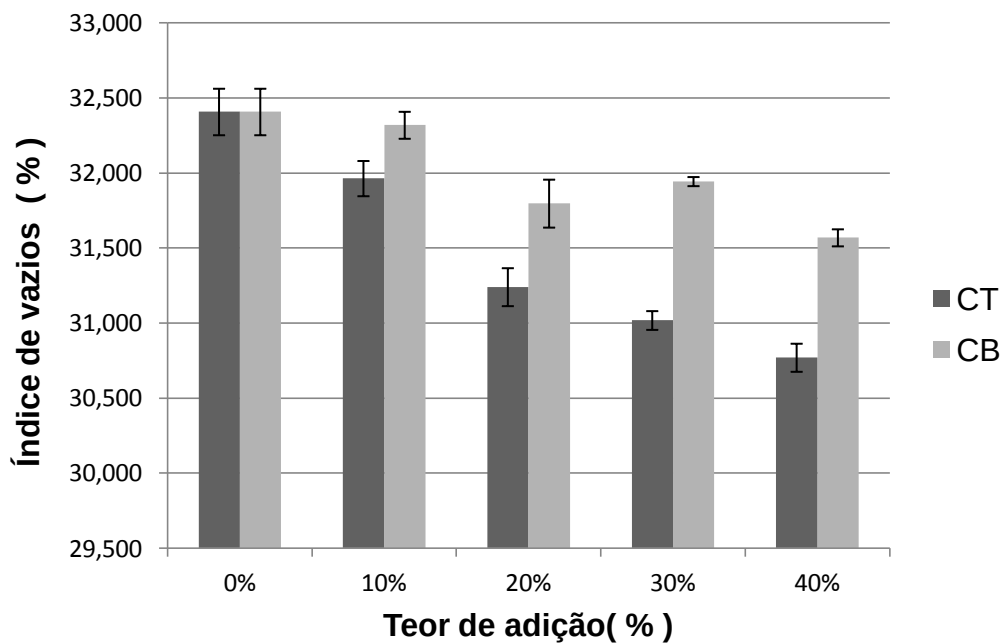
redução dos espaços vazios é o aumento da massa específica das argamassas, Figura 36

Figura 34 - Absorção de água em argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.



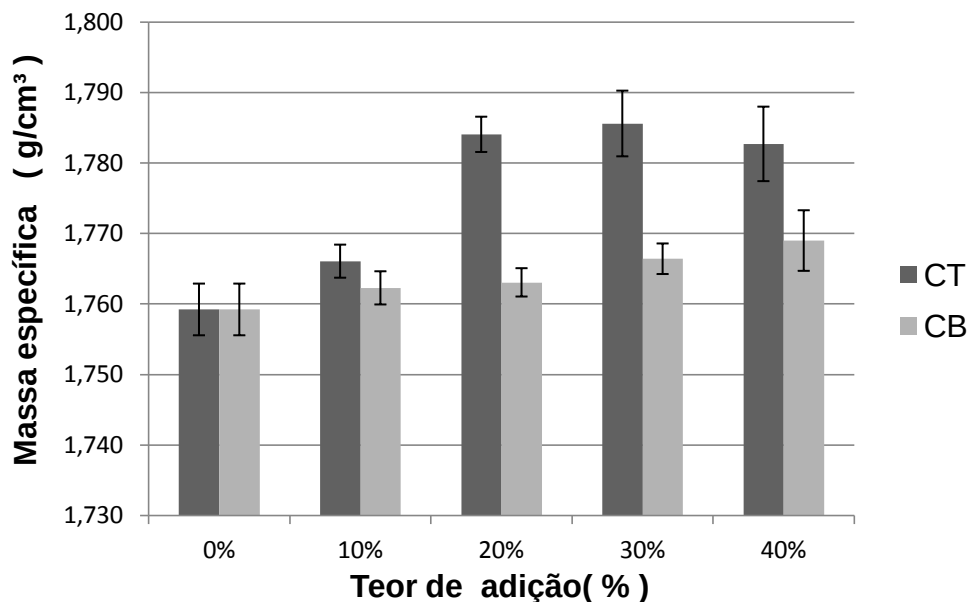
Fonte: Figura do autor, 2012.

Figura 35 - Índice de vazios de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.



Fonte: Figura do autor, 2012

Figura 36 - Massa específica de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.

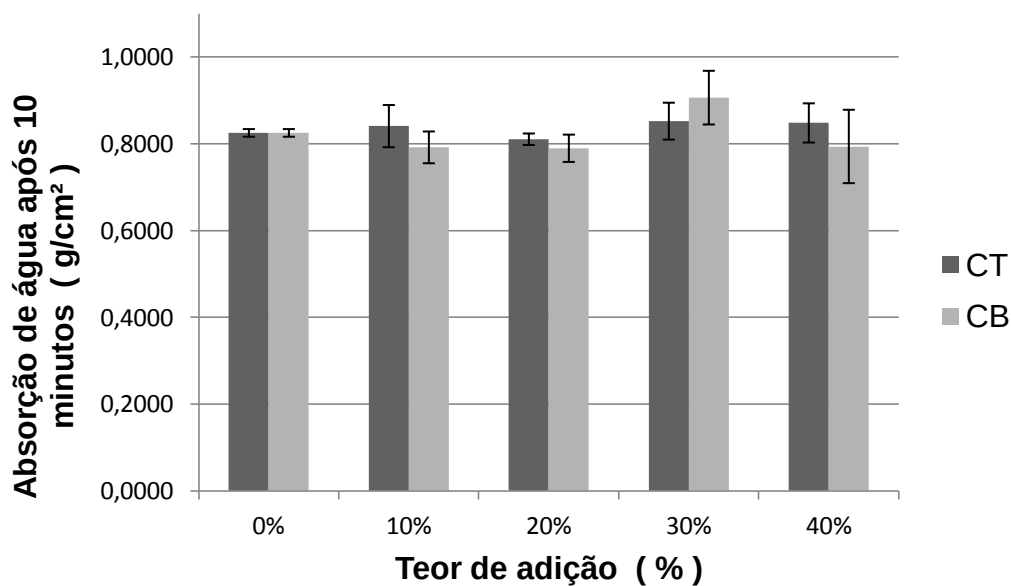


Fonte: Figura do autor, 2012.

6.2.3.3 Absorção de água por capilaridade

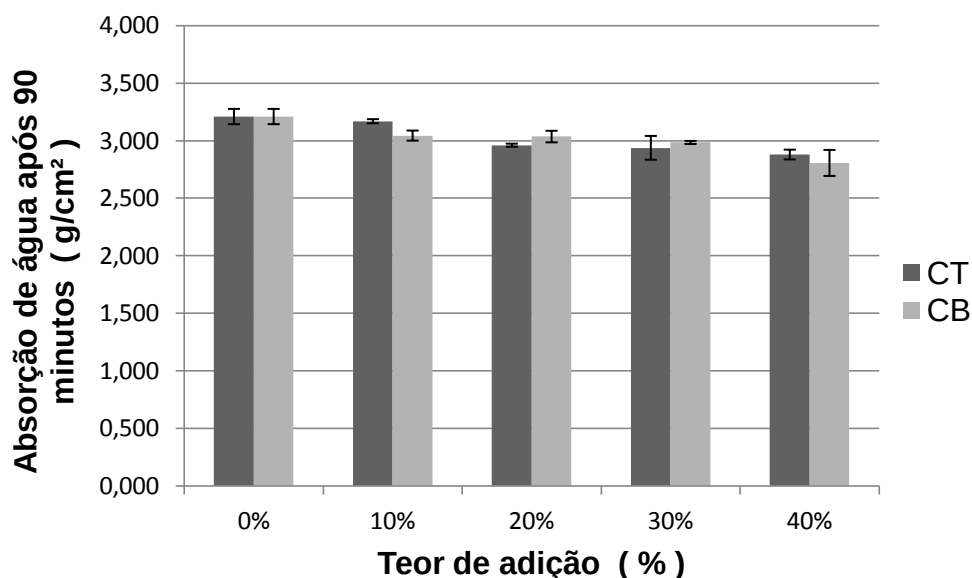
Na Figura 37 e Figura 38 são apresentados os resultados da absorção de água por capilaridade após 10 e 90 minutos, respectivamente.

Figura 37- Absorção de água por capilaridade de massa de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%, após 10 minutos.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Figura 38- Absorção de água por capilaridade de massa de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%, após 90 minutos.



Fonte: Figura do autor, 2012

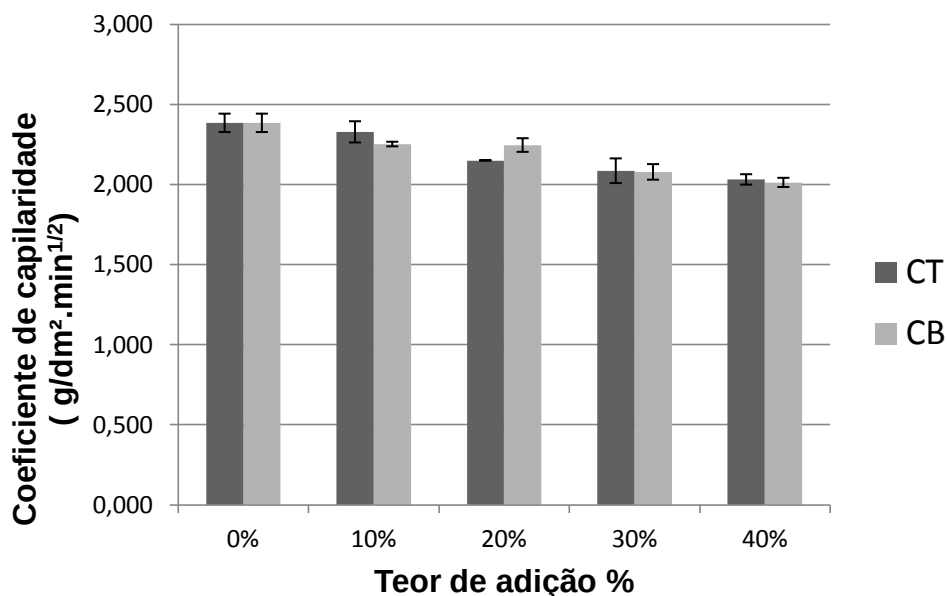
Nos 10 minutos iniciais, a absorção de água das argamassas com e sem adição de cinzas apresentaram comportamentos semelhantes, porém aos 90 minutos de ensaio em contato com a água, pode ser observada uma redução na absorção de água com a adição gradual de cinzas. Esse fenômeno, provavelmente, se dá pela redução dos raios dos capilares em função de um melhor empacotamento das argamassas com adição de cinzas.

Outro efeito que pode estar contribuindo para a redução da absorção de água por capilaridade é o efeito de bloqueio dos capilares pelas partículas de cinzas, o que dificulta a percolação de água nas estruturas das argamassas.

Segundo Bauer (2008) a altura de penetração de água é inversamente proporcional ao raio dos capilares, logo quanto menor for o raio, maior será a altura que a água atingirá nos corpos-de-prova. Por outro lado, quanto maior for o raio maior será a velocidade de absorção de água.

Desta forma o coeficiente de capilaridade das argamassas (Figura 39) sofreu redução com adição de CT ou CB, mas não de forma significativa, já que todas elas ficaram dentro da mesma classe de classificação segundo a NBR 13281 (2005), conforme Tabela 32.

Figura 39 - Coeficiente de capilaridade de massa de argamassas adicionadas de CT e CB nas proporções de 10, 20, 30 e 40%.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Tabela 32 - Classificação das argamassas segundo o coeficiente de capilaridade. NBR 13281 (2005)

Classe	Coeficiente de capilaridade g/dm².min ^{1/2}	Tipo de argamassa
C1	≤ 1,5	Padrão, CT10, CT20, CT30, CT40, CB10, CB20, CB30, CB40
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 12,0	
C6	>10,0	

Fonte: ABNT, 2012.

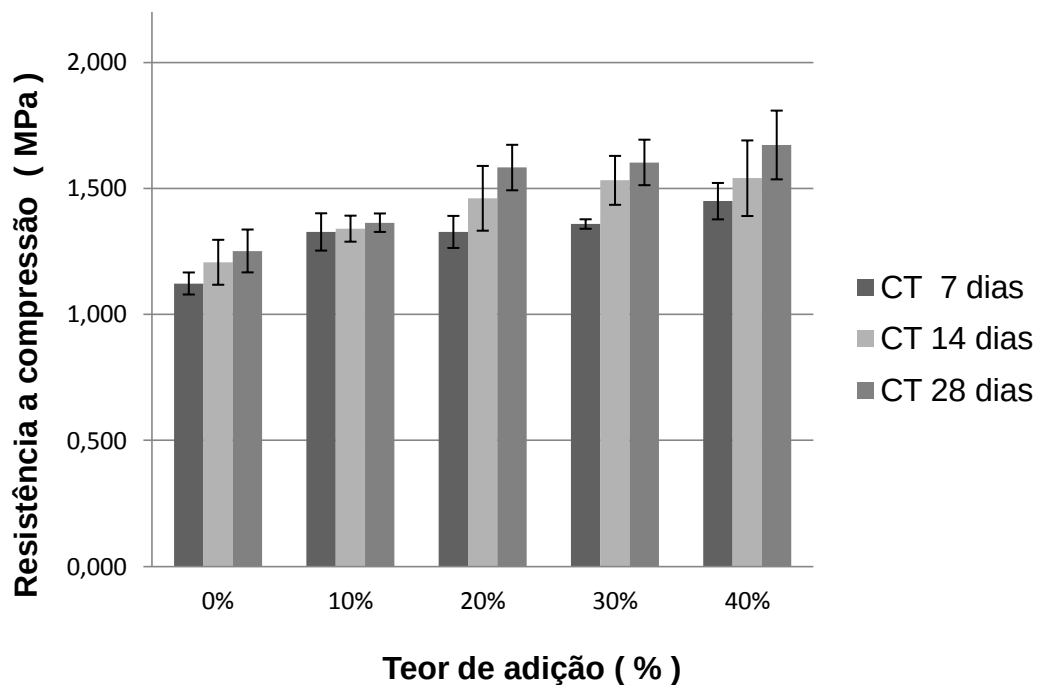
6.2.3.4 Resistência à compressão e flexão

Foi realizado ensaio para determinação da resistência à tração na flexão seguindo a metodologia da NBR 13279 (2005), porém os dados obtidos demonstraram falta de repetibilidade, provavelmente ocasionada pela escala utilizada na prensa. Desta forma, esses dados foram desconsiderados da pesquisa e as metades dos corpos de prova prismáticos rompidos foram utilizados para avaliação da resistência a compressão.

Os dados obtidos pelo ensaio de resistência a compressão, avaliados segundo a NBR 13279 (2005), utilizando corpos de prova prismáticos pode ser visto na Figura 40 (CT) e Figura 41(CB), onde é verificado aumento da resistência a compressão para todos os traços com adição de cinzas em

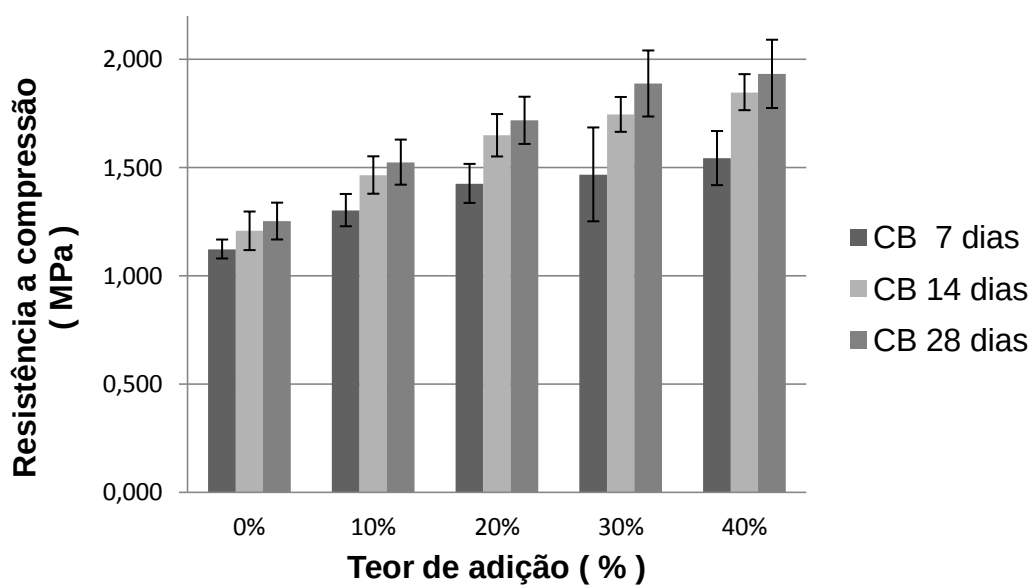
relação ao traço padrão, bem como se pode observar que traços com as maiores adições tiveram os melhores resultados.

Figura 40- Resistência a compressão corpos-de-prova prismáticos, com 0, 10, 20, 30 e 40% de adição de CT.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Figura 41 - Resistência a compressão corpos-de-prova prismáticos, com 0, 10, 20, 30 e 40% de adição de CB.



Fonte: Figura do autor, 2012.

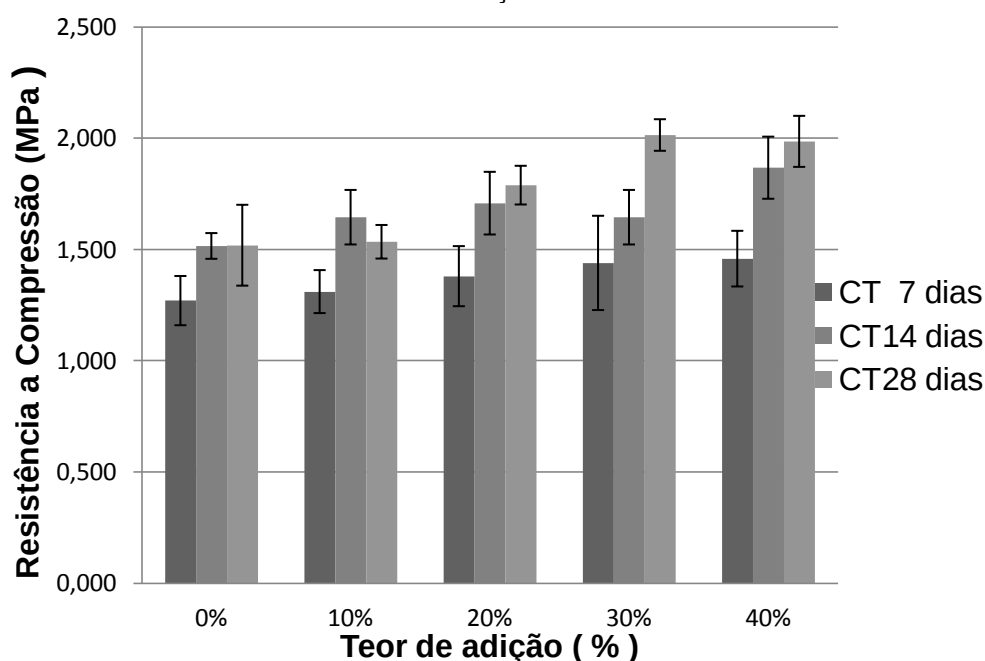
Esse aumento de resistência ocorreu devido ao preenchimento dos vazios da estrutura pelas cinzas nas argamassas com adições, que provocam maior compacidade. Esse fenômeno de melhora da compacidade do sistema foi o mesmo que contribuiu para o aumento da densidade no estado endurecido, bem como para a redução da absorção de água total e da absorção por capilaridade.

Para análise comparativa foram rompidos corpos-de-prova cilíndricos, seguindo a NBR 13279 (1995), e os resultados obtidos encontra-se compilados nas

Figura 42 e Figura 43, demonstram a mesma tendência de aumento na resistência, porém com resultados superiores quando comparado com os corpos de prova prismáticos.

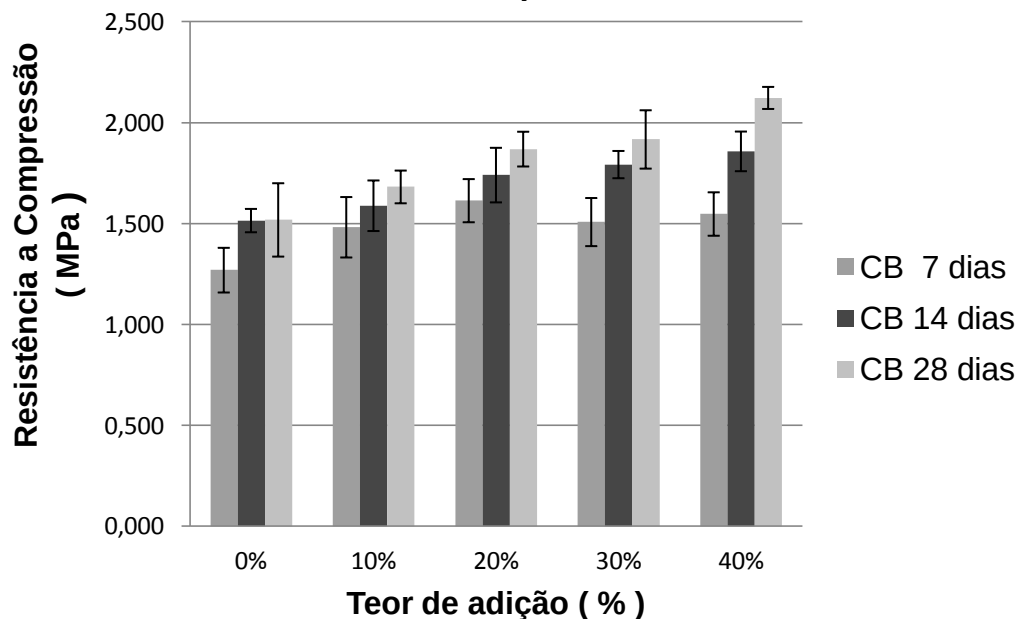
Para um trabalho futuro, é interessante uma melhor avaliação dessas diferenças, já que no corpo de prova prismático provavelmente existe um erro embutido em função dele não possuir dimensões exatas da área a ser aplicada a carga para compressão, o que não ocorre nos corpos de prova cilíndricos.

Figura 42 - Resistência a compressão corpos-de-prova cilíndricos, com 0, 10, 20, 30 e 40% de adição de CT.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Figura 43 - Resistência a compressão corpos-de-prova cilíndricos, com 0, 10, 20, 30 e 40% de adição de CB.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Os resultados obtidos demonstram que adições de cinzas nas argamassas promovem aumento da resistência à compressão, mas não de forma significativa, o que é reforçado pela NBR 13281 (2005), que as classifica na mesma classe, conforme Tabela 33. **Erro! Auto-referência de indicador não válida.**

Tabela 33 - Classificação das argamassas, segundo a resistência a compressão NBR 13281 (2005)

Classe	Resistência a compressão MPa	Tipo de argamassa
P1	≤ 2,0	Padrão, CT10, CT20, CT30, CT40, CB10, CB20, CB30, CB40
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: ABNT, 2012.

6.2.3.5 Resistência potencial de aderência à tração

O ensaio de resistência potencial de aderência a tração foi realizado aos 28 dias e foram obtidos os resultados apresentado na Figura 44, onde considerando as barras de erro ocorreu uma tendência ao aumento na

resistência. Esses resultados aliados a classificação da NBR 13281 (2005), demonstram pouca influência da adição na resistência à tração (Tabela 34).

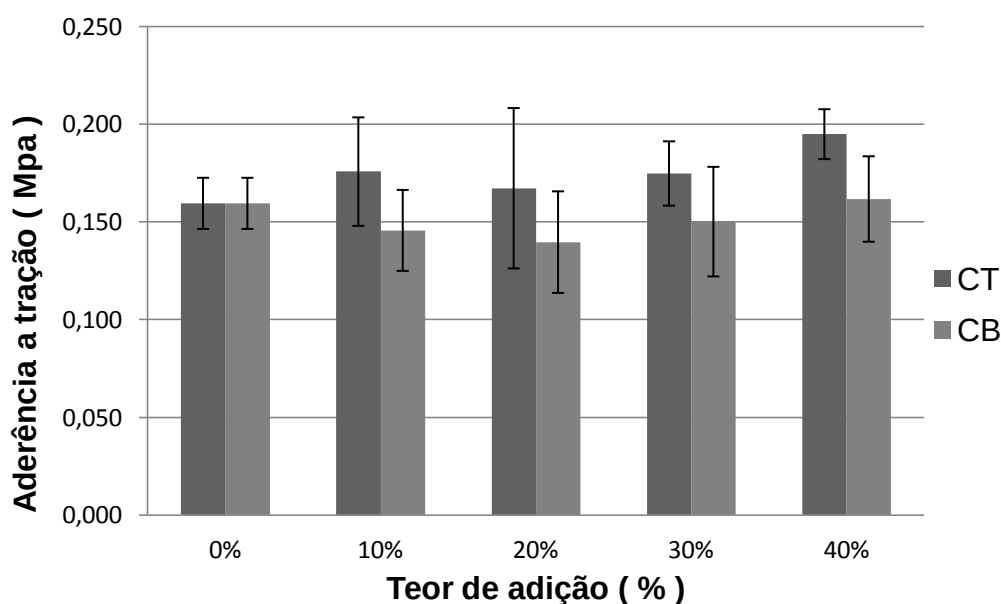
Outro ponto relevante nesse experimento é que todas as amostras tracionadas romperam na argamassa, ou seja, houve aderência da argamassa com o substrato.

Tabela 34 - Classificação das argamassas segundo resistência potencial de aderência a tração. NBR 13281 (2005)

Classe	Resistência a compressão MPa	Tipo de argamassa
A1	< 2,0	Padrão, CT10, CT20, CT30, CT40, CB10, CB20, CB30, CB40
A2	≥ 0,20	
A3	≥ 0,30	

Fonte: ABNT, 2012.

Figura 44 - Resistência potencial de aderência a tração de argamassas adicionadas com CT e CB nas proporções de 0, 10, 20, 30 e 40%.



Fonte: Figura do autor, 2012.

6.2.4 Avaliação da aplicabilidade das argamassas

As argamassas foram aplicadas pelo Sr. José Galdino, mestre de obra, conforme Tabela 35 e Tabela 36.

Tabela 35 – Aplicação prática das argamassas PADRÃO, CT10, CT20, CT30 e CT40

Argamassa	Aspecto na Aplicação	Aspecto após 3 dias de cura
Padrão		
CT10		
CT20		
CT30		
CT40		

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 36 - Aplicação prática das argamassas PADRÃO, CB10, CB20, CB30 e CB40

Argamassa	Aspecto na Aplicação	Aspecto após 3 dias de cura
Padrão		
CB10		
CB20		
CB30		
CB40		

Fonte: Tabela do autor, 2012.

De uma forma geral, o mestre de obra declarou que durante a aplicação não conseguiu perceber diferenças entre as argamassas com ou sem adição de cinzas, seja CT ou CB. O Sr Galdino fez alguns comentários descritos abaixo:

- “Tem boa quantidade de água”;
- “Tem boa trabalhabilidade, igual a argamassa padrão”;
- “As argamassas não irão rachar, têm boa liga”;
- “São boas para sarrafear, desempolar e dar o acabamento”;
- “Aparentemente o aumento da quantidade de cinza não muda as massas”.
- “Dá para trabalhar com todas. São argamassas comuns”

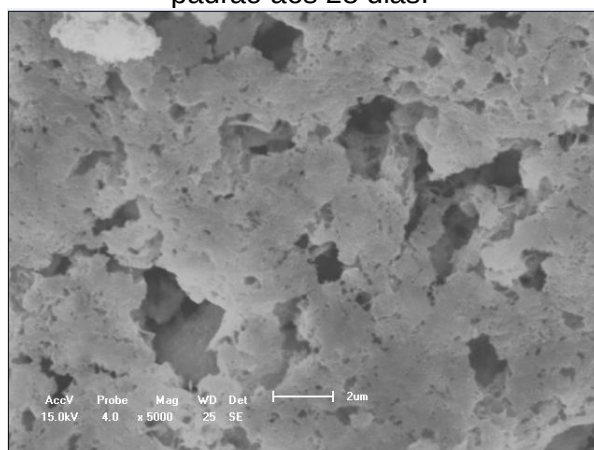
6.2.5 Caracterização microestrutural das argamassas endurecidas

6.2.5.1 MEV

6.2.5.1.1 Argamassa padrão

Na Figura 45 pode ser visualizada a micrografia eletrônica referente à argamassa com traço padrão após 28 dias de cura. Verifica-se uma superfície irregular e porosa, típica de um traço de argamassa com baixo teor de cimento como o utilizado no presente trabalho, 1:2:9 (cimento, cal, areia).

Figura 45 - Microscopia eletrônica de varredura em modo SE (5000X) da argamassa padrão aos 28 dias.



Fonte: Figura do autor, 2012.

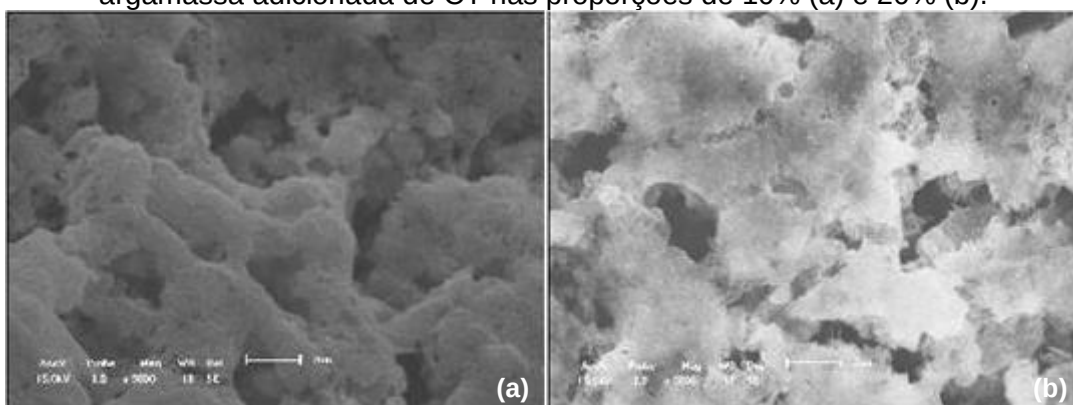
6.2.5.1.2 Argamassas com adição de cinzas

Na Figura 46 podem ser visualizadas as micrografias eletrônicas de varredura das argamassas com adição de CT nas proporções de 10% (a) e 20 % (b) e na Figura 47 com adições de 30% (a) e 40% (b). Verifica-se que não

houve alteração perceptível nas micro estruturas das argamassas com adições em relação à argamassa padrão.

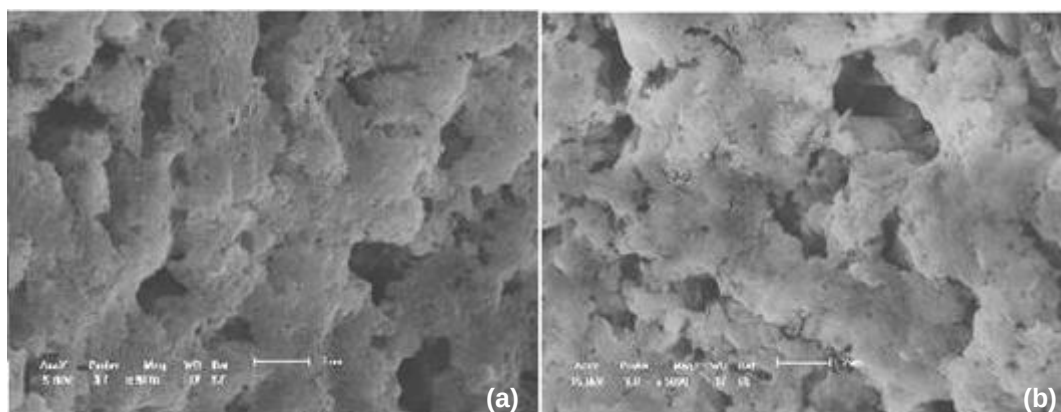
Na Figura 48 podem ser visualizadas as argamassas com adição de CB nas proporções de 10% (a) e 20 % (b) e na Figura 49 com adições de 30% (a) e 40% (b). Verifica-se que da mesma forma como ocorreu com as argamassas com adição de CT, não houve alterações perceptíveis na estrutura das argamassas com adições em relação a argamassa padrão.

Figura 46- Micrografias eletrônicas de varredura em modo SE (5000x) para a argamassa adicionada de CT nas proporções de 10% (a) e 20% (b).



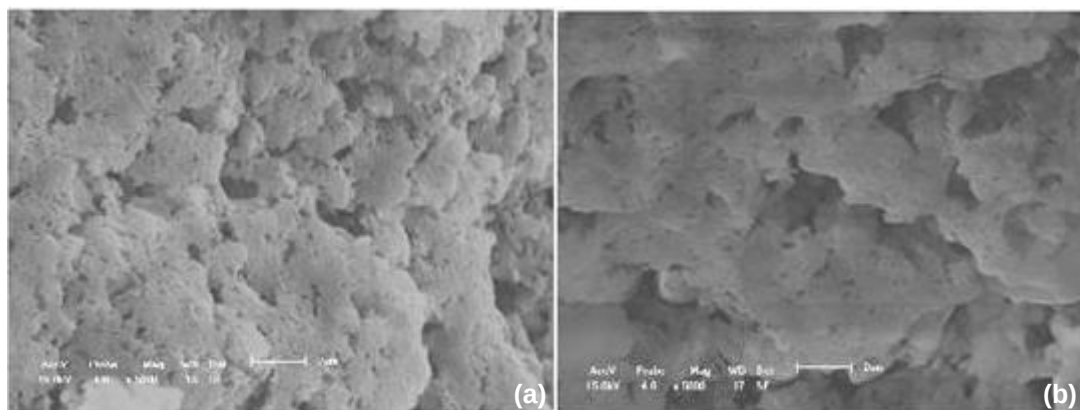
Fonte: Figura do autor, 2012.

Figura 47- Micrografias eletrônicas de varredura em modo SE (5000x) para a argamassa adicionada de CT nas proporções de 30% (a) e 40% (b).



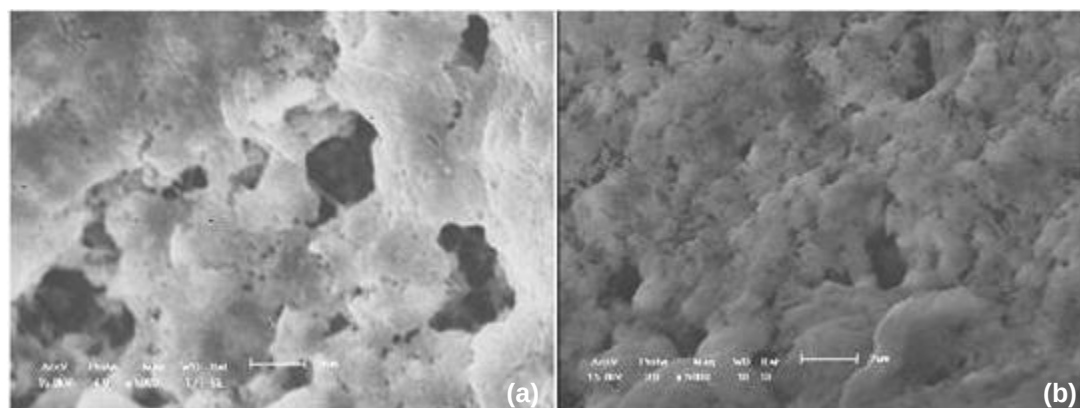
Fonte: Figura do autor, 2012.

Figura 48- Micrografias eletrônicas de varredura em modo SE (5000x) para a argamassa adicionada de CB nas proporções de 10% (a) e 20% (b).



Fonte: Figura do autor, 2012.

Figura 49 - Micrografias eletrônicas de varredura em modo SE (5000x) para a argamassa adicionada de CB nas proporções de 30% (a) e 40% (b).



Fonte: Figura do autor, 2012.

A adição de CT e CB nos percentuais analisados não interferem de forma significativa na estrutura das argamassas a ponto de ser visualizadas diferenças morfológicas nas micrografias eletrônica de varredura, o que ratifica os resultados dos experimentos realizados no estado endurecido com as argamassas, que apesar de indicarem alterações positivas no comportamento das argamassas com adições, estes não foram expressivos.

Por fim, todo esse conjunto da avaliação microestrutural ratifica o fato das argamassas possuírem a mesma classificação de classes, para cada experimento, segundo a NBR 13281 (2005).

7 CONCLUSÕES

Como conclusão geral tem-se que a adição de até 40%, em relação a massa de cimento, de CT ou CB em argamassas de revestimento do tipo emboço é tecnicamente viável, sem comprometer sua integridade, além de contribuir para uma tendência de melhora nas características das argamassas no estado fresco e endurecido. Salienta-se que essa adição em 40% em relação à massa do cimento representa o uso de 20 kg de cinza para cada saco de 50 kg de cimento, dando uma destinação adequada após um simples tratamento de peneiramento a um resíduo sólido industrial gerado em quantidades significativas na região do pólo de confecções de Pernambuco.

Em função de cada grupo de resultados e de acordo com os objetivos específicos da pesquisa, formularam-se as seguintes conclusões:

- As cinzas provenientes da queima de algaroba apresentaram na sua composição química baixa concentração de SiO_2 , Fe_2O_3 e ausência Al_2O_3 , indicando falta de características químicas para o desenvolvimento de atividade pozolânica. O ensaio de Chapelle modificado confirmou a falta de atividade pozolânica e indicou que as cinzas possuíam alta alcalinidade, o que é benéfico para um material cimentício;
- A adição de CT e CB nas argamassas de revestimento analisadas, provocou redução do índice de consistência à medida que os percentuais de adição foram sendo elevados e que o limite máximo de adição para que fosse mantida a consistência de 260 ± 5 mm, recomendada pela NBR 13276 (2005), foi de 40% em relação à massa de cimento. A redução da consistência observada está relacionada com o aumento da absorção de água promovida pelas cinzas em função da elevada área de superfície específica, maior na CB, que foi a primeira a perder a consistência pré-definida;

- Argamassas com adição de cinzas tiveram desempenho superior, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Porém, os percentuais de melhora foram pouco expressivos, a ponto de todas as argamassas com adições serem classificadas na mesma classe da argamassa padrão, segundo a NBR 13281 (2005).
 - No estado fresco a elevada superfície específica das cinzas promoveu a maior retenção de água, a elevação do ar incorporado e consequente redução da massa específica; desta forma, as argamassas com adições ficaram mais leves e plásticas, o que melhorou, em tese, a trabalhabilidade, além de ter apresentado melhores condições para aderência e qualidade após cura, em função da maior retenção de água. Essas melhoras foram em pequena escala, não sendo, portanto, percebidas numa aplicação prática em obra realizada;
 - No estado endurecido, o reduzido tamanho das partículas das cinzas promoveu maior empacotamento da estrutura das argamassas com adições, gerando efeitos benéficos como a redução da absorção de água total e por capilaridade, aumento da resistência a compressão e maior resistência ao arrancamento, quando comparadas com a argamassa padrão. Apesar das melhorias apresentadas serem pequenas, em termos práticos, poderiam contribuir para melhora na performance das argamassas, já que ficariam menos vulneráveis a degradação pela água e por solicitações mecânicas.
- Com relação a microestrutura, os ensaios microestruturais ratificaram a não alteração de forma significativa da estrutura.
- A adição de cinzas de algaroba em argamassas de revestimento sem o comprometimento de suas características, tanto no estado fresco quanto no endurecido, contribui de forma significativa para a sustentabilidade ambiental por dar destino a um resíduo sólido industrial na construção civil.

8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do trabalho foram sendo observadas necessidades e novas propostas de abordagem para a reutilização dos resíduos. 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:

- Alterar a ordem de mistura (maturar a cinza junto com a cal);
- Avaliar *grouts* para substituição do cimento ARI CP – V na confecção dos substratos padrões;
- Realizar ensaios de retração no estado fresco e endurecido;
- Avaliar a possibilidade da substituição parcial ao cimento, focando a manutenção da resistência da argamassa padrão;
- Avaliar melhor as possíveis diferenças e seus efeitos ao comparar resistência a compressão empregando corpos de prova cilíndricos e prismáticos;
- Avaliar a durabilidade de argamassa com adição de cinzas de lenha de algaroba.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- 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 teto- Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da densidade de massa aparente em estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa de Assentamento e Revestimento de paredes e Teto- Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15258**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259**: Argamassa de Assentamento e Revestimento de paredes e Teto- Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14082**: Argamassa industrializada para assentamento de placas cerâmicas- Execução do substrato padrão e aplicação de argamassa de ensaios. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassa inorgânica-procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 1993.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento portland -Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

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 15895**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto- especificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ABCP**, Boletim técnico - Guia prático de utilização do cimento Portland. São Paulo, 2002.

AITCIN, P. **Hight-Performance Concrete**. Canada: Editora E & FN SPON, 2004.

ANJOS, A. S. **Adição de resíduos de biomassa de cana de açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleo pesado**. 2009. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFRN, Natal/RN, 2009.

AZEVEDO, H. A. **O edifício e seu acabamento**. São Paulo: Editora Blucher, 1987.

BAIA, L. L. M.; SABATTINI, F. H. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa**. 4. ed. São Paulo: Editora O nome da rosa, 2002.

BAN, C.C.; RAMLI, M. The implementario of wood ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. **Researches, Conservation and Recycling**, vol.55, p. 669-685, 2011.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 2**. 5. Ed. Vol. 2. São Paulo: Livros técnicos editora, 2008.

BEM. Balanço Energético Nacional 2010. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf> Acesso em: 20 fev. 2011.

BIANCHIN, A. C. **Influência do proporcionamento dos materiais constituintes no desempenho de argamassas para reboco de recuperação de alvenarias contaminadas por umidade e sais**. Dissertação (Mestrado). 1999. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre/RS, 1999.

BORLINI, M. C. et al. Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. parte I: características da cinza. **Cerâmica 51**, vol.51, n.319 [cited 2009-04-27], p. 192-196, 2005.

CARASEK, H. Argamassa. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Vol 2, 2. ed atualizada e ampliada. São Paulo: Ibracon, 2010.

CARNEIRO, A. M. P.;CINCOTTO, M. A. Dosagem de argamassas através de curvas granulométrica. **Boletim técnico da escola politécnica da USP**, São Paulo, BT/BCC/237, 1999.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, VANDERLEY M. A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassa. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 1, n. 2, jul/dez, 1997.

CASTRO, L. H. Arranjo produtivo local. Brasília, 44P, SEBRAE, 2009. (Série Empreendimentos Coletivos).

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.

CORDEIRO, G. C. et al. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, vol. 32, N. 1, p. 82-86, 2009.

CORDEIRO, G. C. et al. Pozzolan activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, vol. 30, p. 410-418, 2008.

CPRH - AGENCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSO HÍDRICOS. **Diagnóstico Ambiental das Lavanderias de Toritama-2005**. Disponível em: <<http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/toritama.pdf>>, Acesso em: 25 fev. 2011.

CHRISTÓFOLLI, J. L. **Estudo de argilas calcinadas para produção de cimento portland pozolânico na região de Curitiba, Parana-Brasil**. (Dissertação). 2010, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, UFPR. Curitiba/Paraná, 2010.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2010/outubro/4a-semana/utizacao-da-palha-de-arroz-na-producao-de-briquetes-e-tema-de-seminario/>> Acesso em: 17 fev. 2011.

ELETROSUL CENTRAIS ELETRICAS S.A. Disponível em: <http://www.eletrosul.gov.br/gdi/gdi/index.php?pg=cl_abre&cd=gloaYc68fXecq> Acesso em: 23 fev. 2011.

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

GENESAN, K. et al. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 29, p. 515-524, 2007.

GUIMARÃES. J. E. P. **A cal**: fundamentos e aplicações na engenharia civil. 2. Ed. São Paulo: Pini, 2002.

INVENTÁRIO. Estadual de Resíduos Sólidos Industriais de Pernambuco. PERNAMBUCO - RECIFE. CPRH/FNMA, 2003. 174p. Disponível em: <<http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/inventario>> Acesso em: 14 fev. 2011.

ISHIKAWA, P. H. **Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural**. 2003. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, 2003.

LEA´S. **Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. London: Elsevier Science & Technology, 2004.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação da Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2001.

LIMA, S. A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias**: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju. Dissertação (Mestrado). 2008. Programa de Pós-graduação em Arquitetura, urbanismo e Tecnologia. EESC/USP. São Carlos/SP, 2008.

LUXAN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**. Vol. 19, p. 63-68, 1989.

MACIEL, L. L.; et al. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação interna e externa e tetos**. São Paulo: EPUSP, 1998.

MARTIRENA, F. et al. Rudimentary, low tech incinerators as a means to produce reactive pozzolan out of sugar cane straw. **Cement and Concrete Research**, vol. 36, p.1056-1061, 2006.

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**, vol 85, p. 666-671, 2011.

MISRA, M.K. et al. Wood ash composition as a function of furnace temperature. **Biomass and Bioenergy**, vol.4, n°2, p. 103-116, 1993.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Estrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MIRANDA, L. M. C. C., **Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição de cal hidráulica e de cal hidratada**. Dissertação (Mestrado). 2009. Universidade de trás-os-montes e alto douro. Vila Real/ Portugal, 2009.

NARCISO, G. S. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação (Mestrado). 2006. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. UFPR. Curitiba/PR, 2006.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. London: Longman scientific & technical, 1994.

NÓBREGA, A. C. V. **Estudos de durabilidade frente ao ataque ácido de compósitos portland-polímero para cimentação de poços de petróleo**. Tese (Doutorado). 2008. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais. UFRN. Natal/RN, 2008.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana de açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado). 2006. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade de Viçosa, 2006.

RABASKI, J. et al. Algaroba (prosopis juliflora): Árvore de uso múltiplo para região semiárida Brasileira. **EMBRAPA**: Comunicado técnico 240. Colombo/PR, 2009.

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

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento e cal para revestimento externo de edifícios**. Dissertação (Mestrado). 1989. 187f. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo/ São Paulo, 1989.

SINGH, N. B.; et al. Hydration of bagasse ash-blended Portlant cement. **Cement and Concrete Research**, vol. 30, p. 1485-1488, 2000.

SEBRAE. Perfil econômico e principais oportunidades de negócio em Pernambuco, 2008.

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

ÚNICA, União da indústria da cana de açúcar. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>> Acesso em: 17 fev. 2011.

ANEXOS

ANEXO 1 - REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Como não foram identificados, na literatura vigente, muitos trabalhos com o uso de cinzas de lenha em materiais cimentícios, optou-se realizar uma revisão sistemática da literatura, datada do final de fevereiro de 2012.

No dia 08 de fevereiro de 2012 foi realizada uma busca na Base de Dados *Science Direct* (<http://www.sciencedirect.com>), na opção de busca avançada, com as palavras-chave WOOD ASH e MORTAR no título, resumo e palavras-chave. Houve em retorno de 6 artigos, mas apenas 3 tinham relação com a pesquisa:

- *“The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview.”*
- *“Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement”.*
- *“Utilization of waste materials and by-products in producing controlled low-strength materials”.*

Na busca para ASH and BIOMASS no título nas engenharias, e somente em revistas, retornaram 69 artigos, e apenas pareceram interessantes para a presente pesquisa:

- *“The physicochemical properties of different biomass ashes at different ashing temperature”.*
- *“Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars”.*

Ao se procurar o termo MORTAR WOOD ASH, na busca simples, retornam cerca de 2.000 artigos e apenas 5 foram considerados interessantes:

- *“Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength”.*
- *“Investigation of Biomass Fly Ash in Thailand for Recycle to Glass Production”.*
- *“Hydration of coal–biomass fly ash cement”.*

- *“Ash characteristics of high alkali sawdust and sanderdust biomass fuels.”*
- *“Ash formation mechanisms during combustion of wood in circulating fluidized beds”.*

Na sequência, a busca foi expandida sendo realizada com base nas palavras-chave WOOD ASH e PORTLAND, pesquisando-se em todos os campos. Retornaram 2.450 artigos. Dado o grande número de artigos retornados, foi utilizado, como critério de exclusão, a procura de artigos apenas com a palavra-chave WOOD. Retornaram ainda os mesmos 2.450 artigos.

O próximo critério de exclusão foi limitar a pesquisa às revistas que têm mais chance de trabalhos na área de adição de cinzas e argamassas: *Construction and Building Materials* (98), *Cement and Concrete Composites* (96), *Cement and Concrete Research* (81) e *Building and Environment* (16). Desse processo, retornaram ainda 291 artigos, dos quais, após breve análise do tema, só 5 puderam ter relação com o presente trabalho:

- *“Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage”.*
- *“Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash”.*
- *“Cementitious binder from fly ash and other industrial wastes”.*
- *“Effects of fly ash on fatigue and fracture properties of hardened cement mortar”.*
- *Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash.*

Ao se utilizar como critério de busca a palavra-chave ASH, há uma série de trabalhos que abordam a atividade pozolânica das cinzas de biomassa: bagaço de cana de açúcar, casca de arroz, bambu, entre outras, como cinzas de topo e cinzas de base de carvão, por exemplo. No entanto, como a abordagem e a análise dos fenômenos desses trabalhos estão muitas vezes relacionadas com o desenvolvimento da atividade pozolânica, não se abordou no estado da arte e referencial bibliográfico esses trabalhos de cunho pozolânico na presente pesquisa, de cunho de possibilidade de efeito *filler* por adição da cinza como carga e não substituição parcial ao cimento.

Por outro lado, ao se procurar a palavra WOOD ASH como palavra-chave, retornaram cerca de 46.000 artigos. A maior porcentagem de retornos foi em relação ao uso da cinza de lenha de madeira com uso na agricultura para correção de pH do solo, bem como relacionados com a capacidade calorífica da madeira.

Esses trabalhos também não foram levados em consideração para o levantamento do estado da arte, por apenas fornecer características físico-química das cinzas de lenha, que, não necessariamente, seriam as mesmas da cinza de algaroba, foco de estudo desse trabalho; nesse cenário, optou-se por realizar análises físico-químicas das cinzas em questão.

Apenas 3 trabalhos mais aplicados foram levados em consideração para comparação com os parâmetros encontrados nos ensaios experimentais:

- *“Physical and chemical characteristics of wood ash”.*
- *“Wood ash composition as a function of furnace temperature”.*
- *“Characterization of ashes from wood and straw”.*

Já na base de dados da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD) do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT, vinculado ao Ministério da Ciência e Tecnologia – Brasil, também em 08 de fevereiro de 2012, na primeira abordagem buscou-se no campo busca avançada as palavras-chave CINZAS no título e ALGARROBA no resumo, não retornando respostas. Ao alterar a palavra-chave de ALGARROBA para LENHA, também não retornaram resultados.

No entanto, ao alterar para MADEIRA no resumo, retornou 1 resultado, apenas uma dissertação de mestrado utilizando outro tipo de cinzas para outro material construtivo, não-cimentício, intitulado: “Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica”, desenvolvido na Escola de Engenharia de São Carlos.

Ao se ter como palavras-chave ARGAMASSAS e CINZAS retornaram 2 trabalhos, mas de cunho pozolânico, que não são foco do presente trabalho, como já citado:

- *“Viabilidade do uso de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residuais do estado de Goiás como adição mineral ao cimento Portland”.*

- “Aproveitamento das cinzas da queima da cama sobreposta de suínos para substituição parcial do cimento Portland”.

Já para as palavras ARGAMASSAS e PORTLAND têm-se, além dos dois acima citados:

- “Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural”.
- “Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju”.

Por fim, foi também realizado um levantamento na Base de Dados *Scopus* (<http://www.scopus.com>) com as palavras-chave WOOD ASH e MORTAR e retornaram 13 artigos, dos quais, retirando os já citados na pesquisa da Base de Dados *Science Direct*, bem como os que fogem ao escopo da presente pesquisa, obteve-se:

- “Characterisation of high calcium wood ash for use as a constituent in wood ash-silica fume ternary blended cement”.
- “Wood ash from forest waste for partial cement replacement in mortars”.

Ao se definir as palavras-chave WOOD ASH e PORTLAND, dentre os trabalhos que retornaram da busca, tem-se, após filtrar os já citados:

- “Estimation of the cementitious properties of various industrial by-products for applications requiring low mechanical strength”.
- “Sawdust ash as concrete material”.
- “Strength development, durability, and micromineralogical analysis of cement mortar samples containing fly-ash from co-firing of wood pellets with lignite”.
- “Biomass fly ash in concrete: SEM, EDX and ESEM analysis”.
- “Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability”.
- “A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete”.

Em termos de congresso, foram localizados 2 trabalhos de um mesmo autor, diretamente relacionados com o tema em estudo, nos quais propõe o uso em argamassas de cinzas de algaroba geradas na indústria de cerâmica vermelha, assim intitulados:

- “Compósito cimentício à base de cinza residual e cimento Portland” – Resumo - 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 21 a 25 de novembro de 2010, Campos do Jordão, SP, Brasil.
- “Influência da cinza residual de algaroba na resistência mecânica de argamassas sustentáveis” – Trabalho completo - ENARC 2011 - II Seminário sobre resíduos sólidos na construção civil, 07 e 08 de julho, Maceió, AL, Brasil.

As pesquisas descritas acima indicam que o material estudado como adição em argamassas não apresenta muitos estudos e análises realizadas e divulgadas em meio eletrônico, como a internet.

ANEXO 2 – TABELAS E DADOS DOS ENSAIOS

Tabela 37 - Consistência normal das argamassas analisadas.

Tipo de Argamassa	Consistência (mm)
Padrão	264,2
CT 10	264,1
CT 20	264,5
CT 30	262,4
CT 40	260,1
CT 50	258,2
CB 10	264,1
CB 20	263,7
CB 30	261,7
CB 40	258,4
CB 50	254,1

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 38- Retenção de água no estado fresco das argamassas analisadas.

Tipo de Argamassa	Retenção de água (%)
Padrão	79,04
CT 10	79,35
CT 20	79,44
CT 30	79,47
CT 40	79,79
CB 10	80,66
CB 20	80,92
CB 30	80,96
CB 40	83,26

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 39 - Densidade de massa no estado fresco das argamassas analisadas

Tipo de Argamassa	Densidade de massa (Kg/m ³)
Padrão	1987,1
CT 10	1981,8
CT 20	1975,5
CT 30	1976,3
CT 40	1987,1
CB 10	1972,4
CB 20	1974,8
CB 30	1960,4
CB 40	1959,2

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 37 – Ar incorporado no estado fresco das argamassas analisadas

Tipo de Argamassa	Densidade de massa (%)
Padrão	1,6
CT 10	2,0
CT 20	2,4
CT 30	2,5
CT 40	2,6
CB 10	2,4
CB 20	2,4
CB 30	3,2
CB 40	3,4

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 40 - Densidade de massa no estado endurecido.

Tipo de Argamassa	Média da densidade de massa (kg/m ³)	Desvio
Padrão	1566	13
CT 10	1570	1
CT 20	1585	3
CT 30	1590	14
CT 40	1587	4
CB 10	1572	5
CB 20	1573	
CB 30	1576	11
CB 40	1571	10

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 41 - Absorção total de água.

Tipo de argamassa	Média da absorção de água (g/cm ²)	Desvio
Padrão	18,42	0,13
CT 10	18,09	0,09
CT 20	17,51	0,08
CT 30	17,37	0,06
CT 40	17,26	0,10
CB 10	18,44	0,07
CB 20	18,14	0,08
CB 30	18,08	0,032
CB 40	17,85	0,07

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 42 - Índice de vazios, argamassa endurecida.

Tipo de argamassa	Média do índice de vazios (%)	Desvio
Padrão	32,41	0,15
CT 10	31,97	0,12
CT 20	31,24	0,13
CT 30	31,02	0,06
CT 40	30,77	0,09
CB 10	32,32	0,09
CB 20	31,80	0,16
CB 30	31,94	0,03
CB 40	31,58	0,06

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 43 - Massa específica das argamassas no estado endurecido.

Tipo de argamassa	Média da massa específica (g/cm ³)	Desvio
Padrão	1,759	0,004
CT 10	1,766	0,002
CT 20	1,784	0,003
CT 30	1,786	0,005
CT 40	1,783	0,005
CB 10	1,762	0,002
CB 20	1,763	0,002
CB 30	1,766	0,002
CB 40	1,769	0,004

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 44 - Absorção de água por capilaridade após 10 e 90 minutos.

Tipo de argamassa	Absorção de água após 10 minutos (g/cm ²)		Absorção de água após 90 minutos (g/cm ²)	
	Média	Desvio	Média	Desvio
Padrão	0,825	0,088	3,209	0,066
CT 10	0,840	0,049	3,169	0,018
CT 20	0,810	0,013	2,960	0,013
CT 30	0,852	0,042	2,938	0,103
CT 40	0,848	0,045	2,879	0,043
CB 10	0,792	0,037	3,044	0,044
CB 20	0,790	0,031	3,035	0,050
CB 30	0,906	0,062	2,902	0,013
CB 40	0,794	0,085	2,806	0,113

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 45 - Coeficiente de capilaridade.

Tipo de argamassa	Coeficiente de capilaridade g/dm ² .min ^{1/2}	Desvio
Padrão	2,384	0,057
CT 10	2,328	0,066
CT 20	2,150	0,004
CT 30	2,085	0,077
CT 40	2,031	0,032
CB 10	2,252	0,014
CB 20	2,246	0,043
CB 30	2,078	0,049
CB 40	2,013	0,029

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 46 - Resistência a compressão corpos de prova cilíndricos.

Tipo de argamassa	7 dias		14 dias		28 dias	
	MPa	Desvio	MPa	Desvio	MPa	Desvio
Padrão	1,270	0,111	1,498	0,045	1,570	0,163
CT10	1,273	0,059	1,534	0,014	1,557	0,055
CT20	1,380	0,102	1,707	0,141	1,788	0,087
CT30	1,499	0,190	1,708	0,082	2,014	0,071
CT40	1,490	0,109	1,867	0,140	1,985	0,115
CB10	1,482	0,150	1,626	0,113	1,709	0,051
CB20	1,614	0,107	1,782	0,100	1,869	0,086
CB30	1,601	0,056	1,815	0,043	1,967	0,086
CB40	1,587	0,072	1,828	0,072	2,123	0,055

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 47 - Resistência a compressão corpos-de-prova prismáticos.

Tipo de argamassa	7 dias		14 dias		28 dias	
	MPa	Desvio	MPa	Desvio	MPa	Desvio
Padrão	1,123	0,044	1,207	0,089	1,252	0,085
CT10	1,327	0,074	1,340	0,052	1,364	0,037
CT20	1,327	0,064	1,461	0,129	1,583	0,090
CT30	1,359	0,019	1,532	0,097	1,603	0,090
CT40	1,449	0,072	1,540	0,150	1,672	0,136
CB10	1,302	0,075	1,465	0,086	1,524	0,104
CB20	1,426	0,090	1,648	0,098	1,717	0,109
CB30	1,468	0,217	1,745	0,081	1,888	0,153
CB40	1,543	0,125	1,847	0,083	1,932	0,158

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Tabela 48 - Resistência potencial de aderência a tração.

Tipo de argamassa	Média da resistência a tração (MPa)	Desvio
Padrão	0,160	0,013
CT 10	0,176	0,028
CT 20	0,167	0,041
CT 30	0,175	0,016
CT 40	0,195	0,028
CB 10	0,145	0,021
CB 20	0,140	0,026
CB 30	0,150	0,028
CB 40	0,162	0,022

Fonte: Tabela do autor, 2012.