



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

Dannúbia Ribeiro Pires

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO PORTLAND POR CINZAS DE ALGAROA GERADAS DO APL
(ARRANJO PRODUTIVO LOCAL) DE CONFECÇÕES PERNAMBUCANO**

Caruaru

2016

DANNÚBIA RIBEIRO PIRES

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO PORTLAND POR CINZAS DE ALGAROA GERADAS DO APL
(ARRANJO PRODUTIVO LOCAL) DE CONFECÇÕES PERNAMBUCANO**

Dissertação de Mestrado para obtenção do título de Mestre, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste.
Área de Concentração: Estruturas e Materiais.
Linha de Pesquisa: Materiais e Componentes da Construção Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Érika Pinto Marinho

**Caruaru - PE
Fevereiro/ 2016**

Catálogo na fonte:
Bibliotecária - Simone Xavier CRB/4-1242

P667d Pires, Dannúbia Ribeiro.
Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas de algaroba geradas do APL (Arranjo Produtivo Local) de confecções pernambucano. / Dannúbia Ribeiro Pires. - 2016.
96f. il. ; 30 cm.

Orientador: Ana Cecília Vieira da Nóbrega
Coorientadora: Erika Pinto Marinho
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2016.
Inclui referências bibliográficas

1. Argamassa. 2. Algaroba. 3. Revestimentos. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 5. Carbonato de cálcio. I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da.(Orientadora). II. Marinho, Erika Pinto (Coorientadora). III. Título.

620 CDD (23. ed.)
UFPE (CAA 2016-027)

**ATA DA VIGÉSIMA SÉTIMA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DO CENTRO
ACADÊMICO DO AGRESTE DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, NO DIA
15 DE FEVEREIRO DE 2016.**

Aos 15 (quinze) dias do mês de fevereiro do ano de 2016 (dois mil e dezesseis), às 10:00h (dez horas), na sala K2 do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, em sessão pública, teve início a defesa da Dissertação de mestrado intitulada **“DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZAS DE ALGAROA GERADAS DO APL (ARRANJO PRODUTIVO LOCAL) DE CONFECÇÕES PERNAMBUCANO”** da aluna **DANNÚBIA RIBEIRO PIRES**, na área de concentração **ESTRUTURAS E MATERIAIS**, sob a orientação da Profa. Dra. **ANA CECÍLIA VIEIRA DA NÓBREGA** e coorientação da Profa. Dra. **ÉRIKA PINTO MARINHO**. A mestranda cumpriu todos os demais requisitos regimentais para a obtenção do grau de **MESTRE**, em Engenharia Civil e Ambiental. A Banca Examinadora foi indicada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em 16 de dezembro de 2015, na sua 33ª (trigésima terceira) reunião ordinária e homologada pela Diretoria de Pós-Graduação, através do Processo Nº 23076.001935/2016-09 em (20/01/2016) 20 de janeiro de 2016 composta pelos Professores: **Dra. ÉRIKA PINTO MARINHO**, Coorientadora e Presidente da Banca, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental –CAA-UFPE, **Dr. ULISSES TARGINO BEZERRA** examinador externo, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba e **Dr. HUMBERTO CORREIA LIMA JÚNIOR** examinador interno, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental–CAA-UFPE. Após cumpridas as formalidades, a candidata foi convidada a discorrer sobre o conteúdo da Dissertação. Concluída a explanação, a candidata foi arguida pela Banca Examinadora que, em seguida, reuniu-se para deliberar e conceder a mesma a menção **APROVADA** da referida Dissertação. E, para constar, lavrei a presente Ata que vai por mim assinada, José Marcelo Lopes Vanderley Secretário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, e pelos membros da Banca Examinadora.

Caruaru, 15 de fevereiro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a ÉRIKA PINTO MARINHO

Prof. ULISSES TARGINO BEZERRA

Prof. HUMBERTO CORREIA LIMA JÚNIOR

*Dedico primeiramente a Deus e, em especial,
aos meus pais, à minha irmã e ao meu noivo.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de desenvolver este trabalho, por acreditar que eu seria capaz de realizar mais este desafio em minha vida. Por nunca me desamparar e não me deixar desistir diante das dificuldades e obstáculos que a vida nos oferece, pois quem crê Nele, jamais está sozinho. Agradeço por mais esta conquista na minha vida, por possibilitar eu alcançar mais este objetivo. Agradeço também pelas pessoas especiais que Ele colocou na vida, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Ana Maria Ribeiro Pires e Josival Pires da Sila, e a minha irmã Danielle Ribeiro Pires, por sempre acreditarem e apoiarem minhas escolhas, por todo o carinho, amor e apoio nos momentos de dificuldade, por todo o incentivo e conselhos, por sempre me mostrarem o caminho certo a seguir, por me ensinarem que com dedicação, esforço e perseverança nós somos capazes de realizar nossos sonhos. Agradeço também a toda minha família por sempre acreditar e torcer por mim.

Ao meu noivo, Djalma Ferreira do Nascimento Neto, por toda a paciência e compreensão que sempre teve comigo durante estes 9 anos e 4 meses juntos, por sempre me apoiar em minhas escolhas e por sempre torcer e acreditar em mim; por ter o dom de me acalmar, de me fazer entender as dificuldade da vida e de saber exatamente o que dizer quando eu mais preciso; por sempre me confortar nos momentos de tristeza e sempre comemorar comigo nos momentos de alegria; por ser o companheiro de todas as horas; por toda a atenção e carinho; pelo amor de sempre e por me fazer feliz a cada dia, muito obrigada.

A minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Ana Cecília Vieira da Nóbrega, pela dedicação de sempre, pelos ensinamentos e experiências compartilhadas. Pela amizade e carinho, por todas as orientações e contribuições para o meu crescimento pessoal e profissional. Pelo apoio e incentivo em todos os momentos, desde a graduação até o mestrado e pela confiança de sempre, muito obrigada.

A minha co-orientadora, Prof^a. Dr^a. Érika Pinto Marinho, por suas constantes contribuições e comentários pertinentes para uma melhor elaboração do trabalho. Por seu apoio, dedicação, e pelo acolhimento no desenvolvimento final desta trajetória, muito obrigada.

A todos os professores do PPEGE CAM (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental), da UFPE/CAA, pelos ensinamentos e conhecimentos passados em sala de aula, por sempre estarem dispostos a nos ajudar e por toda a dedicação com os alunos.

Aos amigos Manuella Figueiras, Carlos Henrique e Emerson Silva, colegas do curso de mestrado, pelos momentos de descontração, pelas conversas e conselhos, pelos sofrimentos compartilhados e pela torcida mútua de sempre.

A minha amiga, parceira de sofrimento, companheira de caminhada desde a graduação, e agora madrinha de casamento, Maria Victória, pelos momentos de descontração, pelo apoio nos momentos de dificuldades que enfrentamos durante esta trajetória, por sempre se mostrar disposta a ajudar e sempre torcer por mim, muito obrigada.

Ao secretário do PPGECAM, Marcelo, pela sua boa vontade em sempre resolver os problemas burocráticos. A toda a equipe do LCC (Laboratório de Construção Civil da UFPE/CAA), composta pelos técnicos Fabíola e Ewerton, e os alunos do programa de manutenção acadêmica e graduandos em engenharia civil, Eulina, Kalil e Vanderlan, por toda boa vontade em ajudar na realização de parte dos ensaios laboratoriais.

Ao Prof^o. Dr^o. Rafael Pileggi, por aceitar ser meu tutor, a Prof^a. Dr^a. Maria Alba Cincotto, por me permitir assistir suas aulas que contribuíram para o meu amadurecimento profissional, ao pesquisador Dr^o. Cesar Romano, por sua constante ajuda e fundamental contribuição científica, aos alunos Heitor e Marcel, e a todos pertencentes a equipe do LME (Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais) da Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo), que me acolheram muito bem e me ajudaram na realização dos experimentos reológicos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Sr^o. Silvano Silva, da Lavanderia Nova Geração, pelo fornecimento das cinzas de algaroba, resíduo utilizado no desenvolvimento desta pesquisa. E ao Sr. José Manoel da Silva, que colaborou na realização do ensaio de aderência inicial das argamassas no substrato.

Ao projeto Casadinho/Proacad (parceria entre UFPE/CAA, UFRN e USP), que viabilizou o intercâmbio com a USP. E ao PRONEX/ NUTREL III (Programa de Apoio a Núcleos de Excelência/ Núcleo de Tecnologia de Tratamento e Reuso de Efluentes e Lodos III), parceria entre UFPE/CAA, UFPE/CTG e USP, pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

A FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco), pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa. Bem como, pela oportunidade de convênio de pesquisa com o CETENE (Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste).

“Acredite na força dos seus sonhos. Deus é justo e não colocaria em seu coração um desejo impossível de ser realizado.”

Paulo Coelho

RESUMO

A grande demanda de cinza de algaroba gerada nas lavanderias pertencentes ao APL de Pernambuco e sua constituição química prioritária de carbonato de cálcio, caracterizando seu efeito *filler*, impulsionaram a verificação do comportamento do sistema cimentício quando da substituição do cimento pela cinza nas argamassas de revestimento. O objetivo deste trabalho é utilizar o resíduo, atualmente descartado no ambiente, em materiais cimentícios, de modo a contribuir para o desenvolvimento sustentável, reduzindo o impacto produzido pelo armazenamento e descarte inadequado. Além disso, pretende-se contribuir para a redução da emissão de CO₂ causada pelas indústrias cimenteiras e minimizar os custos dos produtos com cimento Portland. Neste trabalho, foi avaliada a influência da substituição do cimento Portland em diferentes porcentagens (0%, 5%, 10% e 20%) nas propriedades nos estados fresco e endurecido das argamassas, aplicando no traço (1-X):2:X:9 (cimento: cal: cinza: areia), em volume, comumente utilizado para emboço e argamassa de assentamento em obras da região. A cinza foi caracterizada física e quimicamente. As propriedades analisadas no estado fresco foram: reologia das argamassas (reometria de mistura, de cisalhamento e compressiva - *squeeze flow*), densidade de massa e teor de ar incorporado e aderência inicial das argamassas no substrato; e no estado endurecido foram: resistência à tração por compressão diametral, resistência potencial de aderência à tração, módulo de elasticidade dinâmico, porosidade e permeabilidade. De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, a presença da cinza favoreceu, em todas as porcentagens estudadas, a redução no teor de água de amassamento, mantendo a trabalhabilidade das argamassas. As argamassas com teores de 5% de cinza preservam as propriedades do sistema compatíveis com as propriedades da argamassa de referência. Porém, até 10% é possível a introdução deste resíduo, em substituição ao cimento, sem prejuízos aos sistemas cimentícios, proporcionando alterações mínimas em relação à argamassa de referência, sendo promissor o uso desse resíduo em materiais cimentícios.

Palavras-chave: Cinza de algaroba. Carbonato de cálcio. Efeito *filler*. Argamassas de revestimento. Materiais cimentícios.

ABSTRACT

There is a considerable production of algaroba wood ash in the laundries of the local productive arrangement on the clothing industry in the Agreste Region of Pernambuco. It is possible to apply it as *filler* due to its mainly chemical constitution as calcium carbonate. Based on these facts, it was evaluated the mortars behaviour when cement is partial replaced by algaroba ashes. This work objectives reuse this residue, currently discarded in the environment, in cementitious materials. In this way, it contributes to the sustainable development by reducing the impact by storage and improper disposal. Moreover, it is intended contributes to reducing CO₂ emissions caused by cement industries and minimize the costs of products with Portland cement. This study investigates the influence of the gradual replacement of cement by algaroba ash (0%, 5%, 10% and 20%). It was evaluated the properties of mortars in fresh and hardened states. The mix by volume (1-X):2:X:9 (cement, lime, ash, sand) was studied, taking into account that these alternative mortars can be applied on regional building sites as rendering plaster and laying mortar. The ashes were characterized physically and chemically. It was carried out in the fresh state: rheology of mortars (mixture, compressive and shear rheometers - squeeze flow), mass density, a content of entrained air and initial adherence of the mortars to the substrate; and in the hardened state: diametrical traction, potential adherence, dynamic modulus of elasticity, porosity and permeability. The results indicate that the presence of the ashes decreases the quantity of mixing water required to keep the workability of the mortars, regardless the content of cement replacement content by algaroba ash. The mortar with 5% ash content preserving system properties compatible with the properties of the reference mortar. However, it is possible to partial substitute the cement by algaroba ash until 10% in the studied mortars, when comparing to the reference system, algaroba ashes are a promising material to incorporate in a cementitious system.

Keywords: Algaroba ashes. Calcium carbonate. *Filler* effect. Rendering mortars. Cementitious materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do APL de confecções pernambucano.	16
Figura 2 – Árvore de algaroba.	17
Figura 3 – Camadas das argamassas de revestimento: (a) emboço e reboco; (b) massa única.	21
Figura 4 – Efeito <i>filler</i> dos aditivos minerais.	35
Figura 5 – Análise TG da CLA.	37
Figura 6 - Análise MEV da CLA, com aumento de 1.200 vezes.	38
Figura 7 – Fluxograma das etapas do procedimento experimental.	43
Figura 8 – (a) Queima de lenha de algaroba em forno industrial; (b) Cinza da lenha de algaroba após ser retirada do forno.	46
Figura 9 – Cinza da lenha de algaroba: (a) retida na peneira 200 (material descartado); (b) passante na peneira 200 (material utilizado na pesquisa).	47
Figura 10 – Reômetro planetário.	52
Figura 11 – Etapas para preparação da amostra para o ensaio de <i>squeeze flow</i> : (a) preenchimento do molde; (b) rasamento da amostra; (c) retirada do molde.	56
Figura 12 – Aspecto inicial e final da amostra no ensaio de <i>squeeze flow</i> , respectivamente.	56
Figura 13 – Procedimento para ensaio de aderência inicial da argamassa no substrato: (a) adição da água nos pós; (b) homogeneização da mistura; (c) aplicação da argamassa no substrato; (d) sarrafeamento; (e) acabamento; (f) aspecto final da argamassa no substrato.	58
Figura 14 – Procedimento do ensaio: (a) cortes na argamassa; (b) escovação da superfície; (c) colagem da pastilha; (d) extração das pastilhas; (e) retirada CP ensaiado; (f) aspecto final do CP preso na pastilha após a realização do ensaio.	62
Figura 15 – Formas típicas de ruptura ocorridas em ensaios de arrancamento.	63
Figura 16 – Distribuição granulométrica dos componentes das argamassas.	65
Figura 17 – Análise DRX dos componentes finos das argamassas.	66
Figura 18 – Reometria de mistura das argamassas.	67
Figura 19 – Energia de mistura das argamassas.	68
Figura 20 – Perfil do fluxo de cisalhamento das argamassas.	69
Figura 21 – Viscosidade plástica das argamassas.	71
Figura 22 – Torque de escoamento das argamassas.	72
Figura 23 – Perfil do fluxo de cisalhamento das argamassas por <i>squeeze flow</i>	73
Figura 24 – Deslocamentos das argamassas por <i>squeeze flow</i>	74
Figura 25 – Densidade de massa das argamassas no estado fresco.	75

Figura 26 – Teor de ar incorporado das argamassas.....	76
Figura 27 – Aspecto final das argamassas aplicadas ao substrato após 28 dias de cura.....	78
Figura 28 – Resistência à tração por compressão diametral das argamassas.	80
Figura 29 – Aspecto final das argamassas após o ensaio de resistência de aderência à tração.	81
Figura 30 – Resistência de aderência à tração das argamassas.	82
Figura 31 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.	83
Figura 32 – Porosidade aparente das argamassas.	85
Figura 33 – Permeabilidade das argamassas.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.....	24
Tabela 2 – Classificação e composição dos materiais <i>filler</i>	35
Tabela 3 – Análise química por FRX da CLA.	37
Tabela 4 - Características químicas do CPV-ARI.	44
Tabela 5 - Características físicas do CPV-ARI.	44
Tabela 6 - Análise química da CH-I.	45
Tabela 7 - Análise granulométrica da CH-I.	45
Tabela 8 – Traços em volume das argamassas estudadas.	51
Tabela 9 – Traços em massa para preparo das argamassas.	52
Tabela 10 – Quantidade de água para cada traço no preparo das argamassas.	53
Tabela 11 – Características físicas das matérias primas anidras.	64
Tabela 12 – Classificação das argamassas segundo sua densidade de massa no estado fresco.	76
Tabela 13 – Análise estatística de variância da resistência à tração por compressão diametral.	80
Tabela 14 – Análise estatística de variância da resistência de aderência à tração.....	82
Tabela 15 - Classificação das argamassas segundo sua resistência potencial de aderência à tração.....	83
Tabela 16 – Análise estatística de variância do módulo de elasticidade dinâmico.	84
Tabela 17 – Análise estatística de variância da porosidade.	85
Tabela 18 – Análise estatística de variância da permeabilidade.	87

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Problemática e justificativa.....	16
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	19
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	19
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1 Argamassas de revestimento.....	20
2.1.1 <i>Principais componentes das argamassas</i>	22
2.1.1.1 Cimento Portland.....	22
2.1.1.2 Cal.....	24
2.1.1.3 Agregado miúdo	26
2.1.1.4 Água.....	27
2.1.2 <i>Propriedades no estado fresco</i>	27
2.1.2.1 Reologia das argamassas	28
2.1.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado	30
2.1.3 <i>Propriedades no estado endurecido</i>	31
2.1.3.1 Resistência mecânica	31
2.1.3.2 Aderência.	32
2.1.3.3 Módulo de elasticidade	32
2.1.3.4 Porosidade.....	33
2.1.3.5 Permeabilidade	33
2.2 Adições minerais.....	33
2.2.1 <i>Adições inertes ou quase inertes (filler)</i>	34
2.2.2 <i>Utilização do filler em materiais cimentícios</i>	35
2.2.3 <i>Caracterização da CLA</i>	36
2.3 Cinzas como adições minerais aos produtos do cimento	38
2.3.1 <i>Cinza residual de lenha</i>	38
3 METODOLOGIA	42
3.1 Obtenção e beneficiamento dos componentes da argamassa.....	44
3.1.1 Cimento Portland	44
3.1.2 Cal.....	45

3.1.3 Agregado miúdo.....	45
3.1.4 Água.....	46
3.1.5 Cinza residual de lenha de algaroba	46
3.2 Ensaios para caracterização dos componentes das argamassas	47
3.2.1 Massa unitária	47
3.2.2 Massa específica real (densidade real).....	48
3.2.3 Área específica.....	49
3.2.4 Distribuição granulométrica	49
3.2.5 Difração de raios-X (DRX).....	50
3.3 Formulação e preparo das argamassas	50
3.3.1 Definição dos traços das argamassas	50
3.3.2 Conversão dos traços em volume para massa.....	51
3.3.3 Preparo das argamassas	52
3.3.4 Moldagem dos corpos de prova.....	54
3.4 Ensaios para caracterização das argamassas no estado fresco.....	55
3.4.1 Reologia das argamassas	55
3.4.1.1 Reometria de mistura.....	55
3.4.1.2 Ciclo de cisalhamento.....	55
3.4.1.3 Reometria compressiva (<i>squeeze flow</i>).....	55
3.4.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado	56
3.4.3 Aderência inicial das argamassas no substrato	57
3.5 Ensaios para caracterização das argamassas no estado endurecido	58
3.5.1 Permeabilidade	58
3.5.2 Módulo de elasticidade dinâmico	59
3.5.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	60
3.5.4 Porosidade	60
3.5.5 Resistência potencial de aderência à tração	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1 Caracterização dos componentes das argamassas	64
4.1.1 Massa unitária, massa específica real e área específica	64
4.1.2 Distribuição granulométrica	65
4.1.3 Difração de raios-X (DRX).....	66
4.2 Avaliação das argamassas no estado fresco.....	67

4.2.1 Reologia das argamassas	67
4.2.1.1 Reometria de mistura.....	67
4.2.1.2 Ciclo de cisalhamento.....	69
4.2.1.3 Reometria compressiva (<i>squeeze flow</i>).....	72
4.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado	75
4.2.3 Aderência inicial das argamassas no substrato	77
4.3 Avaliação das argamassas no estado endurecido	79
4.3.1 Resistência à tração por compressão diametral.....	79
4.3.2 Resistência potencial aderência à tração.....	81
4.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico	83
4.3.4 Porosidade	84
4.3.5 Permeabilidade	86
5 CONCLUSÕES	88
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
REFERÊNCIAS.....	92

Pernambucano, é gerado um grande volume de Cinzas da Lenha de Algaroba (CLA). Cerca de 6.500 kg de cinza são produzidos por mês para uma lavanderia de médio porte, de acordo com Melo, M. (2012). Além disso, outros APL, como o de cerâmica e gesso, também fazem uso dessa matriz energética, ratificando seu volume de geração.

A algaroba (*Prosopis juliflora*) é uma árvore que possui uma madeira durável, com densidade da ordem de $0,85 \text{ g.cm}^{-3}$, sendo utilizada para mourões, tábuas, dormentes, estacas para cercas, lenha e carvão. Resiste bem a longos períodos de estiagem, com duração superior a nove meses de seca e cresce sobre diferentes classes de solos, mesmo que rochosos, arenosos e/ou salinizados. Esta árvore adaptou-se facilmente à região semiárida do nordeste brasileiro, sendo introduzida a partir de 1942 em Serra Talhada, Pernambuco. Para essa região brasileira, é considerada uma espécie de rápido crescimento, podendo atingir em sua fase adulta de 6 m a 15 m de altura (RIBASKI et al., 2009). Seu corte e uso é legalizado na região (ver Figura 2).

Figura 2 – Árvore de algaroba.



Fonte: Ribaski et al. (2009).

Nesse cenário, o GPEMAT (Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais da Universidade Federal de Pernambuco/Centro Acadêmico do Agreste - UFPE/CAA) mostrou-se preocupado com esta cinza, e principalmente com a falta de destinação adequada deste resíduo gerado em quantidades consideráveis resultantes da queima da lenha de algaroba. O grupo vem, ao longo dos anos, desenvolvendo pesquisas com o objetivo de encontrar uma destinação adequada final para esta cinza inserindo-a em materiais cimentícios. A exemplo, podem ser citados os trabalhos de Melo, M. (2012), Leloup (2013), Mota (2014) e Nascimento

(2014). Com a realização destes trabalhos, a caracterização da cinza foi sendo aprofundada, e a segurança em se utilizar a cinza em materiais cimentícios foi ficando mais evidente.

Os resultados do uso de cinzas de algaroba em materiais cimentícios têm sido bastante promissores do ponto de vista científico e de propriedades, provavelmente devido a ação das cinzas como *filler* na matriz cimentante, resultando em melhorias e/ou manutenção das propriedades do sistema cimentício adicionado com cinzas de algaroba. A constituição química predominante de carbonato de cálcio (CaCO_3) e seu efeito *filler* nos impulsiona a verificar o comportamento do sistema quando da substituição do cimento. Nesse cenário, o grupo (MELO, M. (2012); LELOUP (2013); MOTA (2014); NASCIMENTO (2014)) se encontra amadurecido com relação ao resíduo de cinzas de algaroba em termos de composição química, granulometrias e propriedades físicas para propor a substituição do cimento pelas cinzas de algaroba.

O presente projeto ratifica a ideia do Centro Acadêmico do Agreste (CAA) voltar sua atenção para a região onde está inserido, sendo o APL de confecções gerador de passivos ambientais que podem ser utilizados em compósitos cimentícios como elementos construtivos.

Dentre os materiais cimentícios, as argamassas de revestimento mistas foram escolhidas como foco de estudo por serem materiais de construção simples, muito utilizados e de fácil moldagem e execução. Além disso, com o advento das argamassas industrializadas, tem-se a oportunidade de incrementar a adição do resíduo em fábrica, de modo a baratear o custo final da produção.

Embora já se tenham obtido resultados promissores em argamassas quando em adição como carga ou em substituição à cal, como é o caso do trabalho desenvolvido por Nascimento (2014), a proposta atual está relacionada com a substituição do cimento, minimizando custos do produto final e redução do caráter de poluição ambiental, dado que a indústria cimenteira possui alto grau de poluição por CO_2 .

Além disso, espera-se analisar a ação deste resíduo atuante como *filler* no sistema, tanto do ponto de vista reológico como do ponto de vista mecânico e físico. Se a resistência e as propriedades em função da capacidade de *filler* forem mantidas, ter-se-á um material mais econômico podendo atuar positivamente no sistema cimentício em termos de propriedades do estado fresco e endurecido das argamassas.

A reutilização das cinzas de algaroba em materiais de construção contribuirá para o desenvolvimento sustentável do setor e minimizará suas preocupações com descarte e encargos ambientais, reduzindo o impacto produzido pelo armazenamento inadequado desse resíduo sólido, bem como gerará oportunidade de emprego e renda, agregando valor

comercial a um subproduto e disponibilizando tecnologia para emprego dos compósitos na construção civil, principalmente na construção de habitações populares, visando a minimização dos problemas de moradia no agreste pernambucano. Contribuirá, ainda, fortemente na implantação e adequação das empresas ao Selo Verde, recentemente lançado para estar presente nos *jeans* como uma etiqueta para empresas que somem um conjunto de práticas sustentáveis no seu processo. O presente projeto de dissertação vem a somar nos esforços para incorporação como reutilização desse resíduo em materiais cimentícios.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland por cinzas de algaroba (0%, 5%, 10% e 20%), geradas no APL de confecções pernambucano, nas argamassas de revestimento, em termos de propriedades nos estados fresco e endurecido.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar física e quimicamente as cinzas de algaroba;
- Avaliar como a cinza de algaroba interfere na quantidade de água necessária para manter o sistema com uma consistência constante;
- Avaliar como a cinza de algaroba interfere nas propriedades das argamassas no estado fresco: reologia das argamassas (reometria de mistura, reometria de cisalhamento e reometria compressiva - *Squeeze Flow*); densidade de massa e teor de ar incorporado; aderência inicial das argamassas no substrato; e
- Avaliar como a cinza de algaroba interfere nas propriedades das argamassas no estado endurecido: resistência à tração por compressão diametral; resistência potencial de aderência à tração (arrancamento); módulo de elasticidade dinâmico; porosidade; permeabilidade (*Vacum-decay*).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Argamassas de revestimento

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

No Brasil, as argamassas passaram a ser utilizadas no primeiro século de sua colonização para assentamento de alvenaria de pedra (BEZERRA, 2010). Atualmente, um dos tipos de argamassas mais utilizadas na construção civil é de revestimento (MELO, F., 2012). Este é utilizado para revestir paredes, tetos, muros e pisos, os quais posteriormente recebem acabamento como revestimentos cerâmicos, pinturas, papéis de parede, laminados, etc.

A argamassa de revestimento é definida pela NBR 13529 (ABNT, 2013), como sendo: “o cobrimento de uma superfície com uma ou mais camadas superpostas de argamassa, apto a receber acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento final”. A argamassa para revestimento pode ainda ser classificada de acordo com a sua aplicação, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005) em:

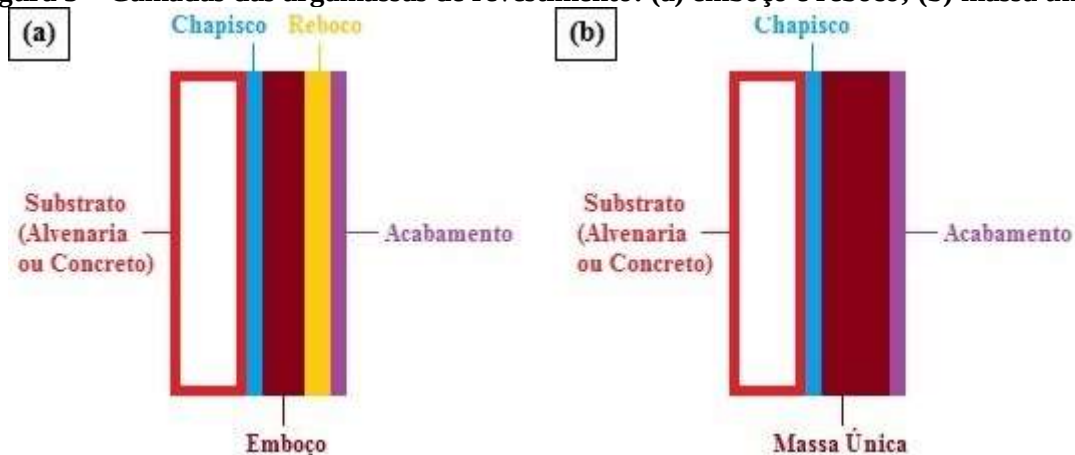
- Argamassa para revestimento interno: indicada para revestimento de ambientes internos da edificação, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única); e
- Argamassa para revestimento externo: indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos da edificação em contato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

De acordo com Sabbatini e Baía (2000), os revestimentos de argamassas podem ser classificados com relação ao seu número de camadas de duas formas: única camada, sendo denominado de massa única ou “reboco paulista”; e duas camadas, denominado emboço e reboco. Cada camada do revestimento tem as suas características e funções, sendo descritos abaixo (CARASEK, 2007) e esquematizados na Figura 3:

- Chapisco: camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou não, com o fim de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência. O chapisco ainda pode ser usado como acabamento, onde para tal é aplicado sobre a superfície utilizando-se uma tela a fim de obter um acabamento mais homogêneo;

- Emboço: camada executada para cobrir e regularizar a base, propiciando uma superfície que possa receber outra camada, seja de reboco ou revestimento decorativo;
- Reboco: camada executada para o cobrimento do emboço, propiciando uma superfície que possa receber revestimento decorativo ou acabamento final; e
- Camada massa única: revestimento de um único tipo de argamassa aplicado à base, sobre o qual é aplicada uma camada decorativa, como a pintura. Também é popularmente chamada “massa única” ou “reboco paulista”.

Figura 3 – Camadas das argamassas de revestimento: (a) emboço e reboco; (b) massa única.



Fonte: A autora (2016).

Cincotto, Silva e Cascudo (1995) destacam as principais características que as argamassas de revestimento devem apresentar:

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

Selmo (1985 *apud* NASCIMENTO, 2014) lista que os principais objetivos das argamassas de revestimentos de edificações devem ser:

- Proteger contra agentes agressivos, corroborando para melhoria da segurança e saúde dos ocupantes e durabilidade da estrutura;
- Auxiliar as vedações verticais nos cumprimentos de seus objetivos, possibilitado o conforto hidrocópico, térmico e acústico do ambiente; e
- Homogeneizar o substrato a ser revestido minimizando as irregularidades e preparando a superfície para uma adequada aplicação de outros revestimentos de base cerâmica ou polimérica.

2.1.1 Principais componentes das argamassas

Segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013), as argamassas são classificadas com relação ao tipo de aglomerante em: argamassa com cal, argamassa com cimento e argamassa mista com cimento e cal.

As argamassas usadas em obra geralmente são compostas por areia natural lavada com granulometrias que variam dependendo da sua aplicação, e usam como aglomerantes o cimento Portland e a cal hidratada. Elas ainda podem ter adições na forma de aditivos ou adições minerais. Portanto, nesse estudo, será utilizada a argamassa mista com cimento e cal, a qual é composta pelo cimento, a cal, o agregado miúdo e a água, tendo as características dos dois aglomerantes. A cal contribui para a plasticidade e retenção de água da argamassa, enquanto que o cimento contribui com uma maior resistência, conforme a NBR 13529 (ABNT, 2013).

Nascimento (2014) destaca que as argamassas mistas com cal são muito utilizadas na construção civil, pois suas propriedades reológicas no estado fresco e comportamento diferenciado no estado endurecido norteiam as condições para trabalhabilidade adequada e durabilidade, envolvendo fácil homogeneização e aplicação no substrato, garantindo maior resistência às intempéries.

2.1.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico composto essencialmente de silicatos, aluminatos e óxido de ferro. O calcário e argila são as principais matérias-primas do cimento, sendo as fontes de cálcio e sílica necessárias para a formação de seus compostos (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Sua obtenção tem início a partir da mistura de matérias-primas (calcário, argila, filito, minério de ferro, etc) de composição pré determinada que são aquecidas a temperaturas médias de 1450°C, formando um novo material sintetizado chamado de

“clínquer”, que é um composto granular de 5mm a 25 mm de diâmetro, escuro, fosco e com propriedades hidráulicas (KANNING, 2013). O clínquer sai do forno como uma mistura de duas fases de silicatos bem cristalizados, os quais são conhecidos como: silicato tricálcico ou alita (C_3S), silicato dicálcico ou belita (C_2S), e uma fase intersticial composta de fase aluminato (C_3A) e fase ferrita (C_4AF), mais ou menos cristalizada. Após o resfriamento do clínquer, ele é moído até se tornar um pó bem fino, de diâmetro entre 10 μm e 15 μm , sendo então adicionado um pouco de gesso, resultando no cimento Portland comercial utilizado em todo o mundo (MELO, F., 2012).

O cimento Portland só atua como aglomerante quando misturado à água, onde ocorre a sua hidratação. Existem dois mecanismos de hidratação, sendo o primeiro o de dissolução-precipitação, que acontece nos primeiros momentos da hidratação e onde ocorre a dissolução dos compostos anidros em seus constituintes iônicos e a formação de hidratos na solução; já o segundo mecanismo é o da hidratação no estado sólido, onde as reações ocorrem diretamente na superfície dos compostos do cimento anidro sem entrarem em solução. Como resultado da hidratação do cimento, são formados principalmente dois compostos: CH (hidróxido de cálcio) e C-S-H (silicato de cálcio hidratado), principal produto para a determinação das propriedades da pasta e por sua resistência quando endurecida (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Desta forma o cimento Portland é constituído, basicamente, por compostos de cálcio e sílica com diâmetros da ordem de 30 μm a 100 μm , que apresentam os óxidos de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 em sua composição (KANNING, 2013). Segundo Mehta e Monteiro (1994), esses óxidos são os responsáveis pela característica adesiva e estabilidade do cimento em meio aquoso, quando hidratado.

Há diversos tipos de cimento Portland no comércio hoje. No Brasil, existem oito tipos básicos normalizados e que são comercializados com diferentes subtipos, totalizando mais de duas dezenas de opções e com várias aplicações (BATTAGIN, 2011). A escolha do melhor tipo de cimento para determinado serviço requer o bom conhecimento das suas características. A Tabela 1 apresenta um resumo dos diversos tipos de cimento vendidos no mercado. Entre os cimentos Portland mais utilizados no país destacam-se os compostos: CP II-E, CP II-Z, CP II-F.

Tabela 1 – Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.

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

Fonte: Battagin (2011).

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), os valores de resistência para as argamassas empregadas na construção civil variam de 0,1 MPa a 8,0 MPa, ou seja, não exigem resistências tão elevadas, sendo possível obter esses valores com o uso de materiais alternativos que não prejudiquem as propriedades mecânicas estabelecidas pelas normas e que tampouco ocasionem patologias a estas argamassas (BEZERRA, 2010).

As argamassas mais ricas em cimento Portland tendem a apresentar maiores resistências mecânicas e impermeabilidade. No entanto, isso pode proporcionar o aumento da ocorrência de formação de fissuras devido à hidratação do cimento provocar o enrijecimento e alterações na consistência inicial pela perda de parte da água de amassamento (ROCHA, 2005).

2.1.1.2 Cal

A cal é o aglomerante mais antigo utilizado pela humanidade, sendo o único usado, combinado ou não com pozolanas, na construção exposta às intempéries antes da invenção do cimento Portland. Trata-se de um aglomerante aéreo, apresentado na forma de um pó esbranquiçado muito fino, que possui baixa resistência à exposição continuada à água (MELO, F., 2012).

É obtido a partir da calcinação de rochas calcárias (ricas em carbonato de cálcio e/ou magnésio) entre temperaturas de 850°C a 1200°C. Como produto da calcinação é obtido o óxido de cálcio (CaO), comumente chamado de “cal virgem” ou “cal aérea”. A mistura da cal virgem com a água gera como resultado o hidróxido de cálcio (Ca(OH₂)), conhecido como “cal hidratada”. Na construção civil basicamente são utilizados tanto a cal virgem como a cal hidratada (BEZERRA, 2010).

A cal virgem é definida pela NBR 6453 (ABNT, 2003) como produto obtido da calcinação de carbonatos de cálcio e/ou magnésio, constituído essencialmente de uma mistura de óxidos de cálcio e óxidos de magnésio, ou ainda uma mistura de óxido de cálcio, óxido de magnésio e hidróxido de cálcio.

A cal hidratada, segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003), é um pó seco obtido pela hidratação de cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou, ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. Possui várias propriedades, segundo Bezerra (2010), que favorecem a sua utilização como, por exemplo, a trabalhabilidade, boa aderência, rendimento, retenção de água, durabilidade, atua como bactericida e fungicida (por ser um produto alcalino, impede a oxidação das ferragens), entre outros. No Brasil existem três tipos de cal hidratada, normatizadas pela NBR 7175 (ABNT, 2003): CH-I, CH-II e CH-III.

É mais comumente usada na construção civil a cal hidratada do que a cal virgem, principalmente para a confecção de argamassas. Tem-se com o seu uso melhor trabalhabilidade, boa aderência e maior rendimento na mão-de-obra. Argamassas que possuem cal hidratada têm boa resistência à compressão, tanto para assentamentos como para revestimentos, apresentam também baixo módulo de elasticidade, ou seja, absorvem melhor as pequenas movimentações das construções, evitando trincas, fissuras e até o descolamento dos revestimentos. É usada com o propósito de unir e revestir as alvenarias, devido à plasticidade e durabilidade que acrescenta às argamassas (BEZERRA, 2010).

Foi observado que duas propriedades no estado fresco são melhoradas com a presença da cal hidratada nas argamassas: plasticidade e retenção de água. A cal propicia maior plasticidade para a argamassa, permitindo melhor trabalhabilidade e, conseqüentemente, maior produtividade na sua aplicação. Outra propriedade é a retenção de água, importante no desempenho da argamassa por não permitir a sucção excessiva de água pela alvenaria (GUIMARÃES, 2002). Segundo Quarcioni (2008), ambas as propriedades estão relacionadas com a presença de microcristais finos e de alta área superficial, que favorecem a formação de uma película de água fortemente aderida ao redor das partículas de cal hidratada, diminuindo a

tensão superficial da argamassa. Com isso, reduz o atrito dos grãos de areia, bem como a capacidade de retenção de água em torno das partículas de cal, contribuindo para molhar mais homogeneamente os agregados. A retração inicial também é minimizada. Além disso, ao reagir com o CO₂, a água retida em torno de suas partículas é gradualmente liberada, colaborando com a hidratação do cimento nas primeiras idades (NASCIMENTO, 2014).

No estado endurecido, a cal atua contendo a retração provocada pela hidratação do cimento, nas argamassas mistas, gerando menor variação dimensional (GUIMARÃES, 2002). Além disso, podemos destacar a maior resistência à fissuração de argamassa com cal, devido ao baixo módulo de elasticidade alcançados por esse revestimento na presença da cal. A carbonatação do hidróxido de cálcio ocorre lentamente tampando os poros e pequenas trincas formadas no endurecimento, influenciando diretamente na durabilidade do material (CARASEK, 2007).

2.1.1.3 Agregado miúdo

A NBR 7211 (ABNT, 2009) define agregado miúdo como sendo uma areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,8 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,075 mm.

O agregado miúdo é a parte das argamassas que não participa das suas reações químicas de endurecimento, mas interfere, na trabalhabilidade conforme sua composição granulométrica e formato dos grãos e também na retenção de água. Já no estado endurecido ele interfere nas resistências mecânicas, na capacidade de deformação e na permeabilidade (CARNEIRO; CINCOTTO, 1999).

Na produção de argamassas podem ser usadas areias naturais (já encontradas na natureza sob a forma definitiva de utilização, como exemplo as areias provenientes de leitos de rio e de cava) e artificiais (necessitam de modificação textual para chegar à condição adequada para sua utilização, como exemplo as areias de origem da britagem das rochas como basalto, calcário, dentre outras), sendo esta última mais utilizada para a produção das argamassas industrializadas. Sugere-se que a escolha de uma areia deva ser baseada em uma granulometria contínua, com uma dimensão máxima característica de sua finalidade (TRISTÃO, 1995 *apud* MELO, F., 2012).

Segundo Carneiro e Cincotto (1999), se o agregado miúdo for muito uniforme, independente do formato de seus grãos, a trabalhabilidade da argamassa pode ser

comprometida, havendo um enrijecimento e impedindo o deslizamento dos grãos de areia entre si, demandando maior consumo de pasta.

Bezerra (2010) destaca que as areias, além de possibilitarem a fabricação de argamassas de natureza mais econômica do ponto de vista financeiro, tendo como base que o custo unitário da areia é inferior quando comparado ao do cimento, podem também favorecer outras propriedades tais como: redução da retração da pasta de cimento, aumento da resistência ao desgaste, melhor trabalhabilidade e aumento da resistência ao fogo.

2.1.1.4 Água

A água é responsável por promover a hidratação dos aglomerantes das argamassas e influencia diretamente a sua trabalhabilidade. A sua quantidade deve garantir uma boa trabalhabilidade e total hidratação da mistura, evitando a segregação dos seus constituintes (MELO, F., 2012).

A quantidade de água utilizada em uma mistura e a acomodação das partículas (empacotamento) são influenciadas diretamente pelas características do agregado miúdo utilizado. A finura do material é diretamente proporcional à quantidade de água utilizada, ou seja, quanto mais fino o agregado miúdo maior deve ser a quantidade de água necessária para obter a trabalhabilidade adequada (BEZERRA, 2010).

2.1.2 *Propriedades no estado fresco*

Muitas são as propriedades no estado fresco que são exigidas de uma argamassa de revestimento para que sua utilização seja coerente com as necessidades exigidas em obra (NASCIMENTO, 2014).

Buscando uma boa produtividade e bom desempenho das argamassas de revestimento, algumas características e comportamentos devem ser observados para se classificar a argamassa como trabalhável ou não, algumas delas são: fácil homogeneização (mistura) dos constituintes da argamassa, boas condições do substrato, características favoráveis à aplicação no substrato, fácil espalhamento do material no substrato, fácil desprendimento e sarrafeamento da argamassa.

Portanto, dentre as várias propriedades existentes no estado fresco, serão abordadas nesta pesquisa a reologia das argamassas e a densidade de massa e teor de ar incorporado.

2.1.2.1 Reologia das argamassas

O termo reologia originado do grego rheo = fluxo e logos = estudo, apresenta como significado o estudo da deformação e escoamento da matéria. É a ciência que estuda o comportamento do fluxo e a deformação quando os materiais estão submetidos a carregamentos, tensões ou forças mecânicas (COSTA, 2006).

Usualmente, a reologia é adotada para analisar o comportamento de fluidos, líquidos, emulsões e suspensões de partículas, onde se correlaciona a taxa de deformação de um determinado material com a tensão submetida. A classificação está baseada em modelos lineares relacionando uma deformação sofrida por um material devido a uma tensão aplicada sobre o mesmo. Os modelos para líquidos foram estudados por Isaac Newton (1642-1727), enquanto os modelos para sólidos por Robert Hooke (1635-1703) (ANTUNES, 2005). Os modelos para líquido e para sólidos expressam uma diferença importante no comportamento dos materiais, sendo que o fluido quando sujeito a uma determinada tensão escoar ao passo que um sólido se deforma.

Nascimento (2014) ressalta que no estudo da argamassa de revestimento é de fundamental importância o entendimento reológico, pois processos de mistura e aplicação do material estão diretamente relacionados a esta ciência.

Para uma argamassa ter uma produtividade adequada, de acordo com Silva (2006), é de fundamental importância o conhecimento da energia necessária para homogeneização do sistema durante o processo de mistura (manual ou mecânica) dos finos com a água. Além disso, o volume da argamassa e o tempo de mistura nas diferentes técnicas influenciam as propriedades reológicas.

Silva (2006) destaca outras propriedades da argamassa de revestimento no estado fresco que também são entendidas e caracterizadas reologicamente, são elas:

- Aplicação da argamassa no substrato necessita de uma compreensão reológica, que favorece uma área de contato maior e contínua, evitando o acúmulo de defeitos (bolhas de ar) entre o substrato e a argamassa de revestimento, possibilitando uma maior aderência dos materiais; e
- O espalhamento da argamassa no substrato através da colher de pedreiro necessita do comportamento reológico satisfatório para facilitar o processo e melhorar o contato com o substrato. Assim como o sarrafeamento, que em condições reológicas adequadas da massa, espera-se o corte da argamassa sem movimento de camadas.

Segundo Cardoso et al. (2014) a reometria rotacional é capaz de ultrapassar as limitações dos métodos tradicionais de ponto único de avaliação de concretos e argamassas sob uma gama considerável de taxas de cisalhamento variando através da velocidade de rotação. O reômetro planetário tem sido amplamente aplicado para avaliar o fluxo comportamento de argamassas e determinar a influência de proporções mistas, tipo pasta, minerais e escória adições, características de areias, aditivos e fibras; através dos parâmetros reológicos g e h do modelo de Bingham, conforme Equação 1:

$$T = g + hN \quad (1)$$

em que: T é o torque, em Nm; N é a velocidade de rotação, em rpm; e g e h são, respectivamente, proporcional a tensão de escoamento e a viscosidade plástica.

Pode-se definir tensão de escoamento como a tensão mínima de cisalhamento necessária para iniciar o movimento da suspensão, regida pelo tipo e quantidade de atrito entre os grãos presentes na mistura. Todavia, a viscosidade é definida como a resistência que o fluido oferece ao escoar (DE LARRARD, 1999).

John (2003) comenta que a argamassa de revestimento deve possuir em suas características uma tensão de escoamento relativamente alta, a fim de evitar seu escorrimento ao ser aplicada no substrato, sob a ação da força de gravidade, ou seja, a força gravitacional deve ser inferior à tensão de escoamento, mas, por outro lado, a viscosidade deve ser a menor possível, com o intuito de facilitar o espalhamento e o adensamento.

O desenvolvimento dos métodos para concretos e argamassas geralmente procuram condições experimentais mais adequados através da utilização de dispositivos específicos e rotinas de teste com o objetivo de cumprir os requisitos físicos básicos de qualquer deslize ou segregação para a boa aplicação dos modelos reológicos e/ ou para simular situações fluxo de interesse tecnológico científico (CARDOSO et al., 2014). Os ensaios mais utilizados para caracterização reológica completa da argamassa são: reometria de mistura, ciclo de cisalhamento e reometria compressiva (*squeeze flow*). Estes ensaios possibilitam, através de equações e modelos matemáticos, encontrar os parâmetros reológicos importantes para o estudo de argamassa de revestimento.

Através do ensaio de reometria de mistura é determinada a faixa do torque necessário para manter a mistura da argamassa com uma consistência constante. Além disso, é possível quantificar a energia de mistura necessária para homogeneização do sistema durante o processo de mistura dos componentes da argamassa.

O ensaio de ciclo de cisalhamento permite estudar o comportamento do material através de diversas taxas de cisalhamento aplicadas em um único corpo-de-prova, além de permitir a determinação da tensão de escoamento e viscosidade. Há muito tempo vem sendo utilizado, devido à sua simplicidade, para estudar materiais altamente viscosos, como por exemplo, o asfalto.

A reometria compressiva por *squeeze flow* visa analisar o comportamento de um material no formato cilíndrico quando este é submetido pela compressão de duas placas paralelas com deformação ou carregamento controlado (PILEGGI; CINCOTTO; JOHN, 2006). De acordo com Cardoso et al. (2014) é um ensaio que tem sido aplicado como um técnica complementar para avaliar o comportamento do fluxo de materiais de construção, tais como pasta de cimento, pasta de cal, gesso, e argamassas. O método cria condições de fluxo semelhantes as envolvidas no processamento e aplicação de pastas e argamassas (por exemplo, fluxo através de um bocal estreito durante o bombeamento ou pulverização; espalhamento sobre uma superfície e acabamento; espremendo entre tijolos). Além disso, as propriedades do placa (s), tais como rugosidade e absorção, podem ser alterados de modo a melhor simular a aplicação do material para substratos diferentes. O resultado final do ensaio é expresso por meio da curva carga versus deslocamento, sendo a carga a energia necessária para que ocorra a deformação do corpo-de-prova da argamassa e o deslocamento representa a movimentação do pistão do equipamento.

2.1.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa, ou a massa específica, corresponde à relação entre a massa do material e o seu volume, podendo ser absoluta (desconsiderando-se os vazios existentes) ou relativa (MELO, F., 2012). É uma propriedade importante para a dosagem das argamassas, por ser um dos fatores que afetam a trabalhabilidade do material. À medida que a densidade diminui, a argamassa se torna mais leve e com melhor trabalhabilidade, reduzindo o esforço do operário e contribuindo para o aumento da sua produção (BEZERRA, 2010).

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

Naturalmente, as argamassas apresentam vazios que muitas vezes são criados pelo ar aprisionado durante o processo de mistura, ou oriundos da evaporação da água de amassamento. O teor de ar incorporado é a quantidade de ar existente em certo volume de argamassa

(BEZERRA, 2010). À medida que o teor de ar aumenta, a densidade da argamassa diminui, aumentando a trabalhabilidade da mesma. Porém, uma argamassa com menor densidade de massa e excesso de ar incorporado, embora melhor trabalhabilidade, pode reduzir a resistência mecânica e a aderência da argamassa, devido à reduzida ligação entre pasta/agregado (KANNING, 2013).

A densidade de massa das argamassas é determinada através do método apresentado pela NBR 13278 (ABNT, 2005), assim como o seu teor de ar incorporado.

2.1.3 Propriedades no estado endurecido

As propriedades que regem o estado endurecido das argamassas (resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, resistência ao impacto, resistência à fadiga e resistência de aderência), quando aferidos, indicam a capacidade do material em atender as solicitações a ele exigidas (NASCIMENTO, 2014).

As variáveis que sustentam as propriedades no estado endurecido não se apoiam apenas nas características das argamassas, mas também nas do substrato e nas condições do ambiente onde está inserido o material (SILVA, 2006).

Portanto, dentre estas propriedades, apenas será abordada nesta pesquisa a resistência mecânica, aderência, módulo de elasticidade, porosidade e permeabilidade.

2.1.3.1 Resistência mecânica

É definida como a capacidade das argamassas resistirem às tensões de compressão, tração ou cisalhamento. Carasek (2007) ressalta que a resistência mecânica diz respeito à propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens e que se traduzem, em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento.

Esta propriedade das argamassas depende do consumo e da natureza dos agregados e aglomerantes, da dosagem dos materiais, da relação água/aglomerante (ROCHA, 2005), e também da técnica de execução, que busca a compactação da argamassa durante a sua aplicação e acabamento (SABBATINI; BAÍA, 2000). Existem ainda outros fatores que interferem na resistência das argamassas, como a energia de amassamento ou o uso de adições, segundo Maciel et al. (1998 *apud* MELO, F., 2012).

Os requisitos mecânicos e reológicos das argamassas devem estar em conformidade com as exigências indicadas pela NBR 13281 (ABNT, 2005), ou seja, os valores de resistência das argamassas aos 28 dias de cura, devem estar compreendidos entre 0,1 MPa a 8,0 MPa. E para a determinação da resistência mecânica das argamassas, utilizam-se os procedimentos de ensaio apresentados pela NBR 13279 (ABNT, 2005), que define o valor da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão.

2.1.3.2 Aderência

A aderência é a propriedade da argamassa em se manter fixa ao substrato devido a sua ancoragem, obtida através da resistência às tensões normais (tração) e tangenciais (cisalhamento) que surgem na interface substrato-argamassa (MACIEL et al., 1998 *apud* MELO, F., 2012).

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

Segundo Carasek (2007), as argamassas mistas com cal possuem alta aderência por propiciarem um melhor “molhamento” e preencher as cavidades do substrato, sendo as mais indicadas para alcançar bons resultados de aderência.

Na NBR 15258 (ABNT, 2005) são especificados os procedimentos para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração, o qual é utilizado para determinar a aderência das argamassas, sendo os seus limites estabelecidos pela NBR 13281 (ABNT, 2005).

2.1.3.3 Módulo de elasticidade

Elasticidade é a capacidade que a argamassa apresenta no estado endurecido, quando sujeita a solicitações diversas, em se deformar sem apresentar ruptura, e de retornar à sua dimensão inicial após cessarem as solicitações (SILVA, 2006).

A capacidade de deformação (ou rigidez) da argamassa é importante para o desempenho do revestimento, pois este deve ser capaz acompanhar variações dimensionais de diferentes naturezas que ocorrem na edificação, de forma a evitar a formação de defeitos (fissuras, trincas e falhas de interface) que possam comprometer a aderência entre o revestimento e a base ou a estanqueidade do sistema de vedação (CARDOSO, 2009).

2.1.3.4 Porosidade

A porosidade está relacionada com o teor de vazios (poros) presente nas argamassas. É a relação entre o volume de espaços vazios de uma argamassa e o volume total da mesma. Para a obtenção da porosidade dos materiais cimentícios, utiliza-se, geralmente, o método de imersão de Arquimedes (NASCIMENTO, 2014).

Cardoso (2009) define que a porosidade total é função do teor de ar incorporado no estado fresco (considerando este constante desde a medida até a consolidação) e da quantidade de água presente. Como no desenvolvimento microestrutural das argamassas uma pequena parcela da água da mistura é combinada quimicamente para formação das fases hidratadas com o cimento. Portanto, porosidade total de uma argamassa é igual à soma dos volumes de ar e da água não combinada quimicamente.

2.1.3.5 Permeabilidade

A permeabilidade da argamassa está relacionada à passagem de água pelo seu interior, que é um material que permite a percolação da água tanto no estado líquido como no estado de vapor (SABBATINI; BAÍA, 2000). É influenciada principalmente pelos seguintes fatores: proporção e natureza dos materiais constituintes, pela técnica de execução, pela espessura da camada, pela natureza da base e por fissuras existentes (KAZMIERCZAK, 2004 *apud* BEZERRA, 2010).

De acordo com Santos (2008), o cimento Portland, quando usado em proporções adequadas, pode reduzir bastante a permeabilidade de um revestimento argamassado, porém, se for usado em teores elevados, pode provocar fissuração, comprometendo a permeabilidade da argamassa.

2.2 Adições minerais

A indústria do cimento é atualmente considerada uma das grandes poluidoras do meio ambiente, devido a suas altas taxas de liberação de CO₂ na atmosfera. Sabe-se que para cada tonelada de clínquer a mesma quantidade de CO₂ seja produzida (CAPELLO, 2008). Portanto, é importante pensar em alternativas para substituir o cimento, a fim de diminuir o seu consumo e produção, sendo as adições minerais a alternativa mais utilizada atualmente (MELO, F., 2012).

Adições minerais são materiais altamente silicosos finamente divididos, que apresentam atividade pozzolânica ou propriedades cimentantes, que podem ser adicionados às argamassas ou aos concretos visando melhorar suas propriedades (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

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

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

2.2.1 Adições inertes ou quase inertes (*filler*)

Dal Molin (2011) descreve o *filler* como sendo um material finamente dividido, com diâmetro médio próximo ao do cimento que, em decorrência da sua ação física, melhora algumas características de concretos e argamassas, quando presente em quantidades inferiores a 15% da massa de cimento. Entre as propriedades melhoradas, cita-se a trabalhabilidade, a massa específica, a permeabilidade e a tendência de fissuração.

Mesmo sendo usualmente tratado como material inerte, o *filler* pode apresentar alguma atividade hidráulica ou participar quimicamente de algumas reações com os compostos do clínquer, como o C_3S . Segundo Taylor (1997), cerca de 3% do calcário adicionado como *filler* reage quimicamente durante a hidratação do cimento, acelerando a hidratação do C_3S .

A NBR 11578 (ABNT, 1991) limita a quantidade de *filler* em 10% para os cimentos Portland compostos, salientando que o material carbonático usado como *filler* deve ter no mínimo 85% de $CaCO_3$. O carbonato de cálcio é formado a partir da queima a altas temperaturas

do óxido de cálcio (CaO), que reage diretamente com o CO₂ presente no ar, produzindo então o CaCO₃ (NASCIMENTO, 2014).

Podem ser citados alguns resíduos ricos em CaCO₃, que funcionam como *filler* calcário quando adicionados a materiais cimentícios, são eles: pó de corte de mármore, pó granítico, pó de pedra, pó de cálcio, calcário, casca de ovo, casca de ostra, além da CLA, objeto de estudo desta dissertação.

Algumas características quanto a classificação e composição dos materiais *filler* podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação e composição dos materiais *filler*.

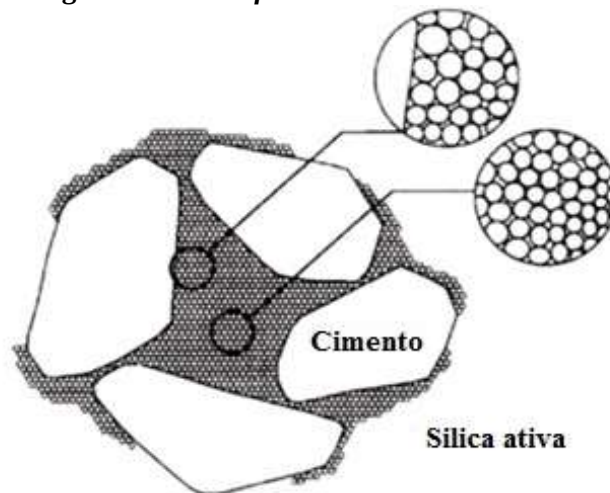
Classificação	Adição mineral	Composição química e mineralógica	Características da partícula
<i>Filler</i>	Calcário, pó de quartzo, pó de pedra	Variável conforme o material estudado	Não possui atividade química, porém auxilia no empacotamento granulométrico

Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

2.2.2 Utilização do *filler* em materiais cimentícios

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

Figura 4 – Efeito *filler* dos aditivos minerais.



Fonte: Adaptado de Aitcin (2004).

Quando acontecem as reações químicas de hidratação do cimento Portland, cristais são formados e vazios surgem entre eles. O efeito *filler* é caracterizado pelo preenchimento dos vazios entre os grãos do clínquer por partículas pequenas (finamente moídas), proporcionando a diminuição da porosidade do sistema (AGRA, 2013).

Agra (2013) ainda acrescenta que além de contribuir para uma argamassa menos porosa e permeável, o *filler* proporciona às argamassas, no seu estado endurecido, um acabamento visivelmente mais liso da superfície, ideal para quando utilizada como revestimento.

Existem estudos sobre a utilização de resíduos ricos em carbonato de cálcio atuando como *filler* em materiais cimentícios. Como exemplo, pode ser citado o estudo realizado por Sá (2006), que avaliou a influência da substituição de areia natural pelo pó de pedra em concretos, quanto à resistência mecânica, à microestrutura e à durabilidade. Foram confeccionados concretos com categorias de 20 MPa e 40 MPa, tanto com areia natural como contendo pó de pedra. Os resultados indicaram que os concretos de categoria 20 MPa apresentaram melhor desempenho do que o concreto de areia natural, sendo viável sua utilização.

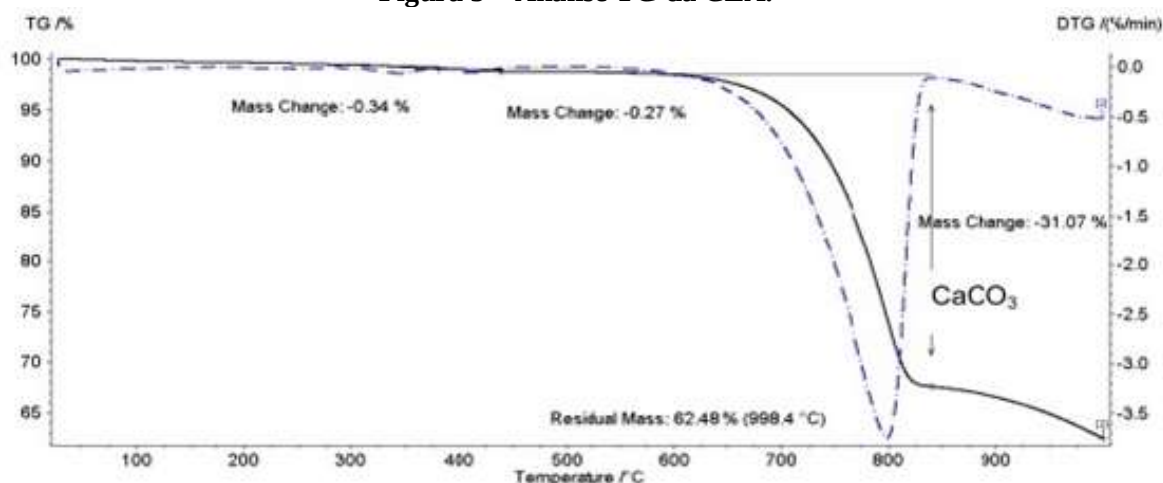
Um outro estudo semelhante foi realizado por Marques e Campos (2012), que analisou a influência da substituição da areia natural pelo pó de pedra em argamassas de revestimento e assentamento, quanto à resistência à compressão, à impermeabilidade e ao fator econômico e ecológico. As análises revelaram um aumento na resistência à compressão das argamassas com 100% de pó de pedra, porém elas são menos impermeáveis que as demais. Além disso, os estudos revelaram outros benefícios, por exemplo: o modo sustentável de aproveitamento desse material e a diminuição do uso de agregados naturais.

2.2.3 Caracterização da CLA

Caracterizações químicas e microestruturais da CLA que é produzida no APL, segundo Leloup (2013) e Nascimento (2014), indicam que ela é rica em carbonato de cálcio, assim como outras cinzas de madeira, de morfologia esférica com superfície levemente enrugada, o que a caracteriza o efeito *filler*.

Através da análise termogravimétrica (Figura 5) da CLA, é possível observar uma grande perda de massa de 31,07%, no pico de 800°C, referente a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3) presente na cinza de algaroba.

Figura 5 – Análise TG da CLA.



Fonte: Nascimento (2014).

Essa quantidade considerável de carbonato de cálcio presente na CLA é um fator positivo, pois esse composto químico inerte pode ser facilmente adicionado em produtos cimentícios, visto que o mesmo é encontrado em todos os tipos de cimentos Portland. O CaCO₃ também é resultado do processo de carbonatação da cal hidratada presente nas argamassas de revestimento, auxiliando na redução de poros e por consequência aumento na durabilidade do revestimento (NASCIMENTO, 2014).

A análise química da CLA produzida no APL de confecções pernambucano (Tabela 3), realizada por Leloup (2013), mostra a predominância de grande quantidade de cálcio (77,85%), além da presença de outros elementos mais significativos, como o potássio (13,81%), silício (4,09%) e o ferro (2,14%). Os resultados estão de acordo com Borlini et al. (2005), que explicam que a composição química da cinza de lenha é caracterizada basicamente por alta quantidade de CaO e SiO₂ e com quantidades significativas de K₂O e MgO.

Tabela 3 – Análise química por FRX da CLA.

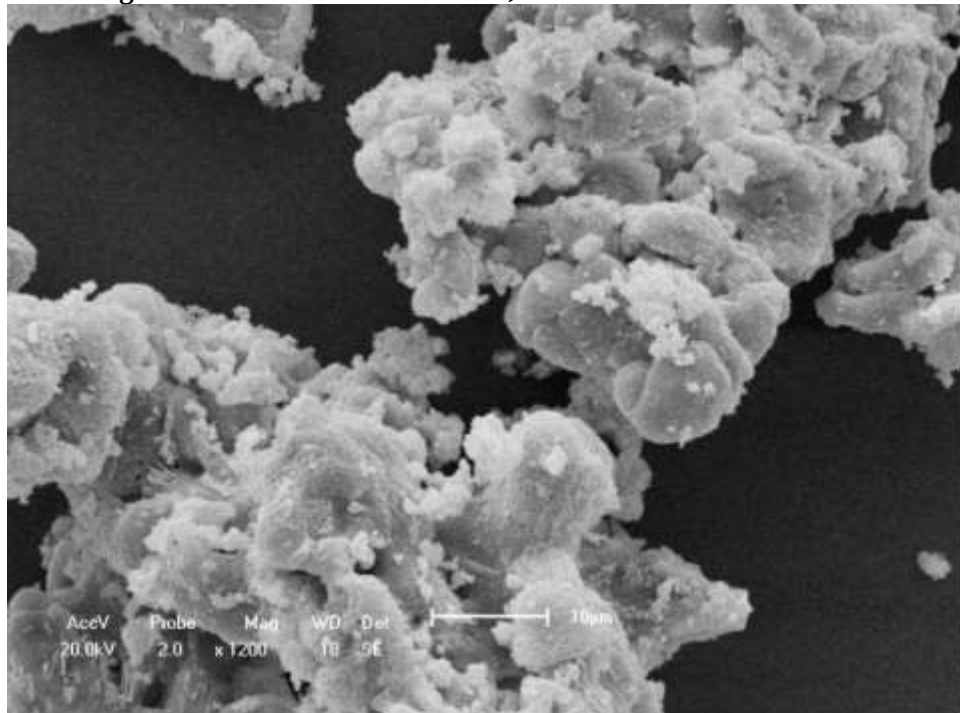
Óxidos	Percentual (%)
CaO	77,85
K ₂ O	13,81
SiO ₂	4,09
Fe ₂ O ₃	2,14
SO ₃	1,60
Sc ₂ O ₃	0,27
MnO	0,12
ZnO	0,10
CuO	0,03

Fonte: Leloup (2013).

A NBR 12653 (ABNT, 2012) 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. Esta análise da CLA revela um total de 6,23% de SiO_2 (4,09%) + Fe_2O_3 (2,14%), além de não apresentar Al_2O_3 . Segundo este critério, a CLA não possui as condições químicas mínimas necessárias para desenvolver atividade pozolânica. De fato, Melo, M. (2012) e Leloup (2013) mediram atividade pozolânica de cinzas de algaroba da região e não observaram pozolanicidade neste material.

Ainda no trabalho de Leloup (2013), a análise por MEV (Figura 6), mostra que a estrutura da CLA é arredondada com alguns grãos da ordem de 10 μm e outros aglomerados menores.

Figura 6 - Análise MEV da CLA, com aumento de 1.200 vezes.



Fonte: Leloup (2013).

2.3 Cinzas como adições minerais aos produtos do cimento

2.3.1 Cinza residual de lenha

A cinza residual de lenha é a cinza proveniente da queima de madeiras em fornos de olarias para o cozimento e a produção de cerâmica vermelha (tijolos e telhas), bem como, na região nordeste do Brasil, provenientes da queima da lenha de algaroba em caldeiras para

aquecimento da água de lavagem durante o processo de tingimento do *jeans* nas lavanderias do APL de confecções pernambucano (MELO, M., 2012).

Segundo Melo, F. (2012), no Brasil, o Rio Grande do Norte se destaca como um dos maiores Estados produtores de cerâmica vermelha do país, consumindo cerca 1,2 milhões de metros cúbicos de lenha por ano. Nas olarias do Estado, a cinza residual de lenha não possui aplicação alguma, sendo apenas depositada em valas cavadas dentro do terreno da olaria ou deixada ao ar livre, gerando poluição atmosférica quando seus finos são carregados pelo vento.

Devido aos poucos trabalhos existentes sobre a aplicação da cinza residual de lenha na construção civil, particularmente voltados aos materiais cimentícios, Etiégni e Campbell (1991) realizaram estudos sobre as características físicas e químicas de cinzas residuais de lenha, a fim de desenvolver alternativas para reciclagem do resíduo em função das restrições ambientais. Verificaram que as madeiras produzem cinzas muito alcalinas, com pH variando entre 9 e 13,5, e que o comportamento químico e físico variam em função da temperatura de combustão.

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

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 (DTG/TG), porosimetria de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura, e obtiveram resultados que mostram que a cinza da lenha se apresenta como aglomerados de partículas, sendo constituída principalmente por Ca, Si, Mg, K e S. Apresenta altos teores de carbono na sua composição e sílica cristalina, sendo composta predominantemente por carbonato de cálcio. Portanto, pode ser praticamente descartada como pozolana, ressaltam os autores.

Ramos, Matos e Sousa-Coutinho (2013) avaliaram o uso de cinzas de resíduos de madeira em argamassas (0%, 10% e 20%) como substituição parcial do cimentos, com o objetivo de determinar a aplicabilidade em concretos. Os resultados confirmaram que as cinzas de resíduos de madeira podem contribuir ainda mais para a sustentabilidade em construção. Ainda de acordo com os autores, cinzas de resíduos de madeira parecem ser promissoras quando utilizadas em substituição parcial ao cimento, sem proporcionar ao sistema cimentício perda de resistência, causando maior durabilidade e contribuindo para uma construção mais sustentável.

O estudo realizado por Julio et al. (2011) visa a solução para a destinação final das cinzas provenientes da queima de madeiras em caldeiras, propondo avaliar o uso desse resíduo, em comparação com um aditivo tradicional, a sílica ativa, em argamassas para uso não estrutural, substituindo parcialmente o cimento nas proporções de 10%, 20% e 30%. Após a análise dos resultados foi verificado que a utilização das cinzas de caldeiras provenientes da queima de madeiras é viável como aditivo em argamassas. Segundo os autores, a utilização das cinzas provenientes da queima de madeiras em caldeiras é viável frente aos impactos que a disposição inadequada deste resíduo pode causar a saúde ambiental de moradores próximos aos depósitos do mesmo.

Cheah e Ramli (2011) estudaram argamassas que tiveram na sua dosagem 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 do cimento, mantendo constante a proporção de água. Verificaram que não houve alteração na trabalhabilidade, no estado fresco, e que a resistência à compressão aos 90 dias foi maior na substituição de 15%, sem grandes prejuízos nas demais propriedades avaliadas. Manutenção das propriedades também foram relatadas quando da incorporação de cinzas de madeira, inclusive há relatos de melhoria na trabalhabilidade e resistência à flexão (CHEAH; RAMLI, 2012).

Melo, F. (2012) avaliou a substituição parcial do cimento Portland (5%, 7%, 10%, 12% e 15% em massa em relação à massa de cimento) pelas cinzas de algaroba em argamassas de revestimento, limitando seu emprego em 5%, tanto no traço 1:2:8 (cimento:areia:brita), quanto 1:3 (cimento:areia). Os resultados encontrados mostraram que, até um teor de 5% de substituição e para ambos os traços, pode-se substituir o cimento pela cinza residual de lenha de algaroba sem comprometer as argamassas microestruturalmente e no seu estado fresco e endurecido.

Além desses estudos que trazem a incorporação de cinzas de madeira em materiais cimentícios como foco de pesquisa, há também os estudos que vem sendo desenvolvidos pelo grupo GPEMAT da UFPE/CAA, descritos a seguir.

Melo, M. (2012) adicionou as cinzas de algaroba em proporções de 10%, 20%, 30% e 40% em relação à massa de cimento nas argamassas de revestimento. Os resultados indicaram que argamassas com adição de cinzas, quando comparadas com a argamassa padrão, apresentaram comportamento semelhante, tanto nas propriedades no estado fresco como no estado endurecido. Essa característica das argamassas com adição é atribuída ao efeito *filler*, que contribui para uma maior compacidade do sistema compensando os efeitos negativos da adição.

Leloup (2013) conseguiu relacionar a cinza de algaroba, na proporção de 1% de substituição, com o lodo têxtil (resíduo gerado também no APL de confecções Pernambucano), nas proporções de 1%, 2% e 3% de substituição, introduzindo-os em argamassas. Os experimentos realizados indicam que a inclusão dos resíduos viabiliza a utilização das argamassas no mercado da construção civil.

Mota (2014) incorporou a cinza de algaroba ao concreto seco moldado sob compactação manual em proporções de 5%, 10%, 20%, 30% e 40%. Ele conseguiu um ponto ótimo em concreto seco com 20 % de adição de cinza (porcentagem na qual mostrou resultados mais efetivos), justificando que a cinza é bem incorporada pelo sistema.

Nascimento (2014), por outro lado, investigou mais detalhadamente as propriedades reológicas dos sistemas quando da substituição gradual da cal hidratada CH I pela cinza de algaroba (0%, 25%, 50%, 75%, 100%), avaliando também os sistemas em termos de propriedades nos estados fresco e endurecido das argamassas mistas para revestimento. Em uma parceria com a USP, ele desenvolveu os primeiros trabalhos reológicos com a utilização da cinza, e os resultados indicaram que é possível substituir até 100% de cal por cinza de algaroba beneficiada em malha 200 sem prejuízos aos sistemas cimentícios, proporcionando alterações mínimas em relação às propriedades reológicas e mecânicas das argamassas mistas.

O presente trabalho consiste em avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland, minimizando custos do produto final e, consequentemente reduzindo a emissão de CO₂ pela indústria cimenteira, por cinzas de algaroba (0%, 5%, 10% e 20%) em argamassas de revestimento mistas com cal, em termos de propriedades nos estados fresco e endurecido. Trata-se de uma proposta de utilizar nas indústrias cimenteiras um resíduo atuante como *filler* sem destinação adequada, de modo a desenvolver alternativas para aplicações deste resíduo de forma sustentável, contribuindo para a minimização do impacto da entrada desse subproduto no meio ambiente.

3 METODOLOGIA

O fluxograma apresentado na Figura 7 mostra detalhadamente as etapas do procedimento experimental utilizado para a realização deste estudo.

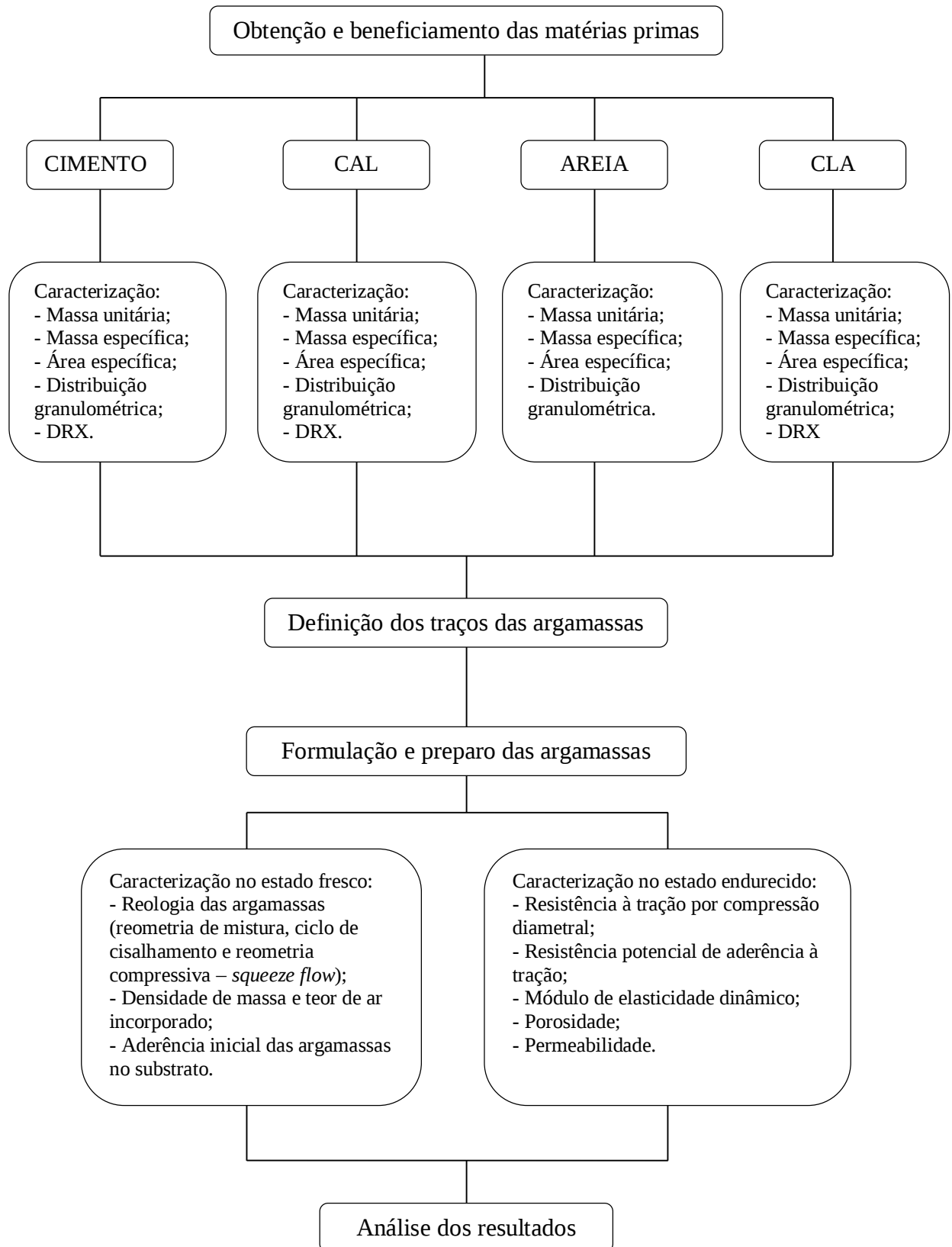
A obtenção e beneficiamento dos materiais de partida, definição dos traços das argamassas, ensaio de aderência inicial das argamassas no substrato e ensaio de resistência potencial de aderência à tração das argamassas foram desenvolvidos no LCC (Laboratório de Construção Civil) da UFPE/CAA (Universidade Federal de Pernambuco/ Centro Acadêmico de Agreste), localizado em Caruaru-PE.

Os ensaios para caracterização dos componentes da argamassa (massa unitária, massa específica, área específica, distribuição granulométrica e difração de raios-X), todo o estudo reológico das argamassas (reometria de mistura, ciclo de cisalhamento e reometria compressiva - *squeeze flow*), o ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco, bem como alguns ensaios no estado endurecido (permeabilidade, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração na compressão diametral e porosidade) foram desenvolvidos LME (Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais) da Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo), localizada em São Paulo-SP.

Salienta-se que foram utilizados os mesmos materiais em todos os experimentos.

De uma forma geral, o desenvolvimento deste projeto foi viável devido ao apoio financeiro da FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco), localizada em Recife-PE. Como também, do projeto Casadinho/Proacad (parceria entre UFPE/CAA, UFRN e USP de São Carlos), que apoiou financeiramente a realização dos ensaios na USP.

Figura 7 – Fluxograma das etapas do procedimento experimental.



Fonte: A autora (2016).

3.1 Obtenção e beneficiamento dos componentes da argamassa

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CPV-ARI, da marca Cimento Nacional do fabricante Brennand Cimentos. A escolha do emprego do CPV-ARI baseou-se na necessidade de entender com fidelidade a influência da cinza em substituição ao cimento, sem influência das possíveis adições presentes em outros cimentos comumente encontradas em cimentos comercializados (escória de alto forno, pozolânicos e *filler* calcário). As características físicas e químicas do cimento foram fornecidas via boletim técnico pelo fabricante e podem ser observadas nas Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 - Características químicas do CPV-ARI.

Características químicas	Resultado (%)
Perda ao fogo	3,00
Resíduo insolúvel	0,60
SiO ₂	18,10
Al ₂ O ₃	4,20
Fe ₂ O ₃	2,35
CaO	60,40
MgO	5,55
SO ₃	3,40
Na ₂ O	0,20
K ₂ O	1,03

Fonte: Boletim técnico fornecido pela Brennand Cimentos (2014).

Tabela 5 - Características físicas do CPV-ARI.

Características físicas	Unidade	Resultado
Massa específica	g/cm ³	3,01
Área específica	m ² /g	1,20
Início de pega	horas	3h e 10 min
Fim de pega	horas	4h e 30 min
Resistência à compressão 1 dia	MPa	40,40
Resistência à compressão 3 dias	MPa	45,20
Resistência à compressão 7 dias	MPa	48,70
Resistência à compressão 28 dias	MPa	52,40

Fonte: Boletim técnico fornecido pela Brennand Cimentos (2014).

3.1.2 Cal

A cal hidratada utilizada foi a CH-I, da marca Tradical. A escolha foi devido ao seu valor reduzido de carbonato de cálcio frente às demais cales presentes no mercado brasileiro. As características físicas e químicas da cal foram fornecidas via boletim técnico pelo fabricante e podem ser observadas nas Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 - Análise química da CH-I.

Caracterização química	Resultado (%)
CaO	71,70
MgO	0,75
Resíduo insolúvel	1,13
Umidade	0,62
Perda ao fogo (1.000°C)	25,50
CO ₂	1,59
SO ₃	0,25
Óxidos não hidratados	0,00
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	0,74

Fonte: Boletim técnico fornecido pela Tradical (2014).

Tabela 7 - Análise granulométrica da CH-I.

Peneira	Resultado (% passante)
Malha 30 (0,60 mm)	1,70
Malha 200 (0,075 mm)	0,00

Fonte: Boletim técnico fornecido pela Tradical (2014).

3.1.3 Agregado miúdo

Como agregado miúdo foi utilizada a areia de cava (AC), de origem natural, proveniente de leito de rio, comumente encontrada nas regiões brasileiras e utilizadas em obras de Pernambuco. A AC utilizada foi proveniente do LME (Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais da Escola Politécnica da USP). Ela foi previamente seca em estufa a uma temperatura de aproximadamente 100°C, durante um período de 24 horas, em seguida resfriada ao ar livre, e posteriormente peneiradas apenas para a retirada de partículas grosseiras indesejadas, antes de serem utilizadas nas argamassas.

3.1.4 Água

Como água de amassamento foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água local.

3.1.5 Cinza residual de lenha de algaroba

Dentre os municípios pernambucanos geradores do resíduo, o local escolhido para coleta foi Caruaru, pois, além de ter uma grande quantidade de lavanderias, o LCC (Laboratório de Construção Civil da UFPE-CAA), para armazenamento das amostras, encontra-se na mesma localidade.

As CLAs foram coletadas no interior dos fornos de queima da lavanderia Nova Geração, situada na Rua José Marcelino de Araújo, nº 163, Bairro Cedro, Caruaru-PE, pois esta lavanderia utiliza em sua linha de produção apenas a madeira da algaroba (Figura 8) e não uma mistura de diversas biomassas.

Figura 8 – (a) Queima de lenha de algaroba em forno industrial; (b) Cinza da lenha de algaroba após ser retirada do forno.



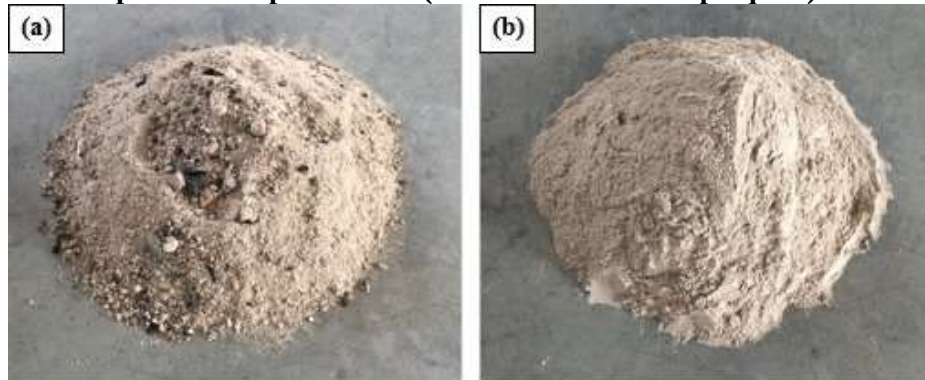
Fonte: Leloup (2013).

Existem dois tipos de cinzas obtidas após a queima da biomassa no interior dos fornos: as cinzas que se aglomeram no topo da caldeira, por isso chamadas de cinza de topo (as que foram utilizadas no desenvolvimento deste trabalho), que são mais finas e livre de interferência do meio ambiente (umidade e demais resíduos sólidos), e as cinzas que caem nas grelhas, chamadas de cinza de base.

O material foi recolhido diretamente do forno, ou seja, sem controle de queima, e após seu resfriamento completo ocorrido naturalmente, foi armazenada em recipiente vedado e impermeável. No LCC, a cinza foi peneirada na malha 200 (0,075 mm), visando eliminar o

material retido (em torno de 50% do material), que são resíduos diversos da queima irregular, objetivando torná-la mais fina para garantir uma melhor eficiência em termos de efeito *filler* (Figura 9).

Figura 9 – Cinza da lenha de algaroba: (a) retida na peneira 200 (material descartado); (b) passante na peneira 200 (material utilizado na pesquisa).



Fonte: A autora (2016).

3.2 Ensaios para caracterização dos componentes das argamassas

Após a etapa de obtenção e beneficiamento, os componentes das argamassas passaram por um processo de caracterização inicial.

As características físicas dos materiais foram obtidas através das seguintes técnicas: massa unitária, massa específica real, área específica e distribuição granulométrica. E as características químicas, através das seguintes técnicas: difração de raios-X (DRX)

3.2.1 Massa unitária

A massa unitária dos materiais (CPV-ARI, CH-I, AC e CLA) foram determinadas segundo o método descrito na NBR NM 45 (ABNT, 2006), sendo feito o ensaio em triplicata para cada material.

O material é lançado a uma altura de aproximadamente de 10 cm a 12 cm do topo de um recipiente metálico de massa e volumes conhecidos, 559,50 g e 1.009,20 cm³, e devidamente calibrado. Ao ser lançado, o material passa por uma peneira de abertura de 2,00 mm, seguindo por um funil e caindo diretamente sobre o recipiente até enchê-lo. Em seguida, é feito o rasamento do material, com o cuidado para não compactá-lo, e registrado o peso do recipiente com o material.

Para determinação da massa unitária do material no seu estado solto, utilizou-se a Equação 2:

$$\gamma_{mat} = \frac{m_t - m_{rec}}{V_{rec}} \quad (2)$$

em que: γ_{mat} é a massa unitária do material, no estado solto, em g/cm³; m_t é a massa total do recipiente + material, em g; m_{rec} é a massa do recipiente vazio, que já é conhecida, em g; e V_{rec} é o volume do recipiente, que já é conhecido, em cm³.

3.2.2 Massa específica real (densidade real)

A massa específica real, ou também chamada de densidade real dos materiais (CPV-ARI, CH-I, AC e CLA) foram determinadas segundo o método descrito na NBR NM 52 (ABNT, 2009), sendo feito uma média de 5 repetições de cada matéria-prima.

Para a determinação da densidade real dos pós foi utilizado o picnômetro de adsorção de gás hélio, em um equipamento Multipycnometer da marca Quantachrome Instruments. O ensaio permite a determinação do volume verdadeiro do sólido, mesmo na presença de porosidade, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido.

Inicialmente, preenche-se o cadinho escolhido com o material e é registrado a massa do material. Em seguida, esta amostra com massa conhecida é colocada na câmara. Certifica-se de que neste momento o marcador do equipamento esteja na posição “REF”. Inicia-se o ensaio com a liberação do gás hélio na câmara de referência e a válvula é fechada quando o visor marcar a pressão entre 17 e 17,3 psi, aguarda-se aproximadamente 1 minuto para estabilizar a pressão e anota-se este primeiro valor de pressão P1. Dando sequência, muda-se o marcador do equipamento para a posição “CELL”, conseqüentemente o gás que estava na câmara de referência é transferido para a câmara que contém o cadinho com o material, gerando um novo valor de pressão P2 que é também anotado. Para finalizar o ensaio, basta abrir a válvula que permite a saída do gás da câmara.

Admitindo-se o comportamento ideal do gás hélio, através do procedimento identificado nas Equações 3 e 4, é possível calcular a massa específica real dos materiais:

$$V_{mat} = V_{cell} - \left(\frac{P_1}{P_2 - 1} \right) V_{ref} \quad (3)$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_{mat}}{V_{mat}} \quad (4)$$

em que: ρ_{mat} é a massa específica do material, em g/cm³; m_{mat} é a massa do material, em g; V_{mat} é o volume do material, em cm³; V_{ref} é o volume da câmara de referência, em cm³; V_{cell} é o volume da câmara com o material, em cm³; $P1$ é a pressão medida na câmara de referência, em psi; e $P2$ é a pressão medida na câmara com o material, em psi.

3.2.3 Área específica

Para determinação da área específica dos materiais de partida (CPV-ARI, CH-I, AC e CLA), foi utilizado o método BET (Brunauer, Emmet e Teller), o qual baseia-se na adsorção física e dessorção de azoto gasoso na superfície da amostra sólida (fisiossorção), realizado num equipamento Belsorp Max, Bel Japão.

Uma massa de aproximadamente 0,20 g da amostra é utilizada para a realização do ensaio. Inicialmente é feito o pré-tratamento da amostra a uma temperatura de 60 °C e pressão de 10⁻² psi, de modo a eliminar qualquer umidade presente. Em seguida, a temperatura é aumentada e o porta-amostra contendo a amostra é mergulhado no nitrogénio líquido, dando início ao ensaio.

3.2.4 Distribuição granulométrica

A distribuição discreta do diâmetro das partículas foi quantificada por granulometria à laser, para obtenção das curvas granulométricas das matérias-primas utilizadas. Para se obter uma maior precisão nos resultados, o ensaio foi feito em triplicata para cada material.

Para os finos CPV-ARI, CH-I e CLA, o tamanho de partículas foi determinado em um laser analisador Sympatec, modelo KR Helos, com alcance de 0,1–35 micrometro pela lente R1 e de 0,5–350 micrometro pela lente R4. É pesado uma quantidade pequena do material, aproximadamente 0,15 g, e misturado com 50 g de água do próprio equipamento. Esta mistura é feita com a ajuda de um misturador de 2.000 rpm por aproximadamente 1 minuto, de modo ao material ficar totalmente diluído na água. Em seguida, a diluição é colcada no equipamento e é iniciado o ensaio. As lentes R1 e R4 fazem a varredura dos grãos da amostra e retornam o resultado em forma de gráfico.

Já para a determinação do tamanho das partículas da areia AC foi utilizado também um laser analisador Sympatec, modelo QicPic, que tem um alcance de 1–341 micrômetros (para finos) pela lente M3, de 10–3410 micrômetros (para agregados miúdos) pela lente M7 e de 30–10.000 micrômetros (para agregados graúdos) pela lente M9. A escolha da lente de análise

depende do material que será ensaiado. Foi pesado cerca de 100 g da AC e colocado no equipamento. Os parâmetros de frequência de agitação da calha (25 hz) e tempo máximo de duração do ensaio (3.600 s) foram ajustados. A lente de análise é selecionada (neste caso, a lente M7), e é iniciado o ensaio. O QicPic faz uma análise dinâmica da imagem da amostra ensaiada e retorna o resultado em forma de gráfico.

3.2.5 *Difração de raios-X (DRX)*

A composição mineralógica dos materiais (CPV-ARI, CH-I e CLA) foi avaliada pelo método de DRX em um equipamento Bruker AXS X, modelo D8 Avançado. Esta técnica indica possibilita a indicação das fases cristalográficas presentes nos materiais que compõem as argamassas.

Para análise destes materiais adotou-se a técnica de DRX convencional (pelo método do pó) e as variáveis do ensaio foram fixadas em: radiação de cobre, fenda automática de 0,5°, filtro de níquel e frequência de spinning de 2 segundos por rotação. As medidas foram feitas com passo de 0,02°, permanecendo em cada passo por 60 segundos, no intervalo de $5^\circ < 2\theta < 70^\circ$.

As amostras foram preparadas nos suportes seguindo a seguinte ordem: colocação da amostra no suporte, rasamento da amostra, prensagem da amostra, retirada do excesso de amostra após a prensagem, aspecto final da amostra no suporte, e por fim, a amostra retirada do suporte pronta para ser ensaiada. Em seguida, foram levadas ao dessecador, de modo a evitar o contato com a umidade, até a realização do ensaio.

3.3 **Formulação e preparo das argamassas**

3.3.1 *Definição dos traços das argamassas*

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado o traço (1-X):2:X:9 (cimento: cal: cinza: areia), em volume, comumente utilizado para emboço e argamassa de assentamento em obras da região. Essa escolha foi dada em função de sua maior espessura no paramento e, conseqüentemente, volume de utilização em revestimentos argamassados, comparativamente ao chapisco e reboco.

O cimento Portland foi substituído em porcentagens de 5%, 10% e 20% em volume, pela cinza. Foram formuladas, dessa forma, um total de 4 traços, 3 traços de argamassa com a

substituição parcial do cimento pela CLA em diferentes teores, e 1 traço sem substituição (0% de cinza), considerado de referência, que serviu como parâmetro comparativo. Os respectivos valores dos traços em volume das argamassas estudadas encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Traços em volume das argamassas estudadas.

Nomenclatura das argamassas	Teor de CLA	Composição do traço (cimento: cal: cinza: areia)			
		CPV-ARI	CH-I	CLA	AC
REF	0%	1	2	0	9
5%CLA	5,0 %	0,95	2	0,05	9
10%CLA	10,0 %	0,90	2	0,10	9
20%CLA	20,0 %	0,80	2	0,20	9

Fonte: A autora (2016).

3.3.2 Conversão dos traços em volume para massa

Para obtenção do traço em massa das argamassas estudadas, faz-se necessário a utilização da massa unitária das matérias-primas, determinadas conforme descrito no item 3.2.1.1. E para a conversão dos traços em volume, para valores em massa, para seguir com o preparo das argamassas, foi utilizada o procedimento demonstrado pelas Equações 5, 6 e 7, respectivamente:

$$V_{cim} : V_{cal} : V_{CLA} : V_{areia} \quad (5)$$

$$\frac{V_{cim}}{\gamma_{cim}} * \gamma_{cim} : \frac{V_{cal}}{\gamma_{cim}} * \gamma_{cal} : \frac{V_{CLA}}{\gamma_{cim}} * \gamma_{CLA} : \frac{V_{areia}}{\gamma_{cim}} * \gamma_{areia} \quad (6)$$

$$\frac{M_{cim}}{M_T} * m_{Tpó} : \frac{M_{cal}}{M_T} * m_{Tpó} : \frac{M_{CLA}}{M_T} * m_{Tpó} : \frac{M_{areia}}{M_T} * m_{Tpó} \quad (7)$$

em que: V_{cim} é a proporção do CPV-ARI no traço em volume da argamassa; V_{cal} é a proporção da CH-I no traço em volume da argamassa; V_{CLA} é a proporção da CLA no traço em volume da argamassa; V_{areia} é a proporção da AC no traço em volume da argamassa; γ_{cim} é a massa unitária do CPV-ARI, no estado solto, em g/cm³; γ_{cal} é a massa unitária da CH-I, no estado solto, em g/cm³; γ_{CLA} é a massa unitária da CLA, no estado solto, em g/cm³; γ_{areia} é a massa unitária da AC, no estado solto e seco, em g/cm³; $M_{cim} = \frac{V_{cim}}{\gamma_{cim}} * \gamma_{cim}$ é a proporção do CPV-ARI no traço em massa da argamassa; $M_{cal} = \frac{V_{cal}}{\gamma_{cim}} * \gamma_{cal}$ é a proporção da CH-I no traço em massa da argamassa; $M_{CLA} = \frac{V_{CLA}}{\gamma_{cim}} * \gamma_{CLA}$ é a proporção da CLA no traço em massa da

argamassa; $M_{areia} = \frac{V_{areia}}{\gamma_{cim}} * \gamma_{areia}$ é a proporção da AC no traço em massa da argamassa; $M_T = M_{cim} + M_{cal} + M_{CLA} + M_{areia}$ é a soma das proporções em massa dos materiais de partida da argamassa; e $m_{Tpó}$ é a massa total de pós (cimento + cal + cinza + areia) escolhida para determinação do traço, em g.

Para preparação das argamassas foi utilizado um total de 4 kg de pós, devido a capacidade máxima do recipiente de mistura. Para tanto, os traços em massa, para 4 kg de pós, convertidos a partir da Tabela 8, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Traços em massa para preparo das argamassas.

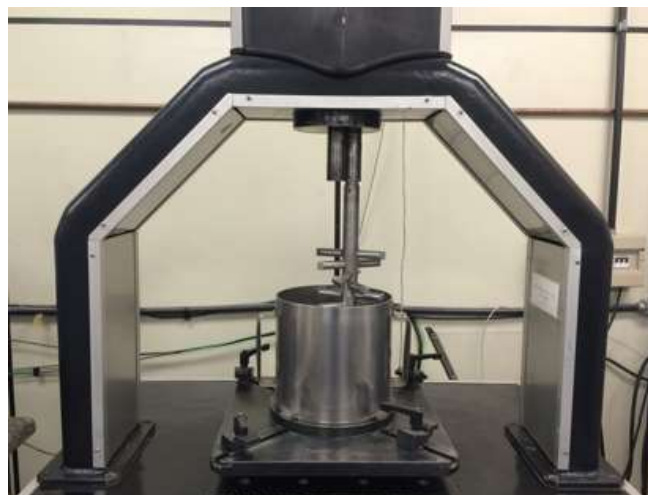
Nomenclatura das argamassas	Teor de CLA	Composição do traço (g) (cimento: cal: cinza: areia)			
		CPV-ARI	CH-I	CLA	AC
REF	0%	223,2	283,1	0,0	3493,7
5%CLA	5,0 %	212,3	283,4	7,2	3497,2
10%CLA	10,0 %	201,3	283,6	14,4	3500,7
20%CLA	20,0 %	179,3	284,2	28,9	3507,6

Fonte: A autora (2016).

3.3.3 Preparo das argamassas

Na preparação das argamassas foi utilizado o reômetro rotacional (movimento planetário), mostrado na Figura 10, obedecendo os procedimentos de mistura descritos na NBR 13276 (ABNT, 2005).

Figura 10 – Reômetro planetário.



Fonte: A autora (2016).

Os materiais foram pesados, conforme Tabela 9, e sem seguida previamente misturados a seco até a mistura adquirir um aspecto homogêneo. Depois a mistura foi colocada na cuba do equipamento, sendo então adicionada a água gradualmente por vazão controlada para promover um melhor preparo e homogeneização das argamassas.

O cuidado, no momento de preparação das argamassas, era manter o torque inicial de mistura para todas as argamassas igual, tomando como base a argamassa de referência REF, de modo a garantir a homogeneização adequada da mistura na fase inicial de segregação dos materiais. Para tanto, a quantidade de água utilizada para satisfazer esta condição não é fixa para todos os traços. É utilizada em cada traço a quantidade de água necessária para alcançar a condição do mesmo torque inicial para misturar as argamassas.

Na primeira tentativa, foi testado um teor de água de 15% em massa, ou seja, 600 g de água. No entanto, verificou-se que não foi suficiente. Então, na segunda tentativa foi sendo adicionada a água aos poucos, em uma vazão de aproximadamente 26 g/s, até se obter um bom torque adequado para a mistura, chegando ao valor de 780 g de água para a REF.

Para os demais traços, foi necessário manter o mesmo torque observado no traço de referência REF, que foi de $2,0 \pm 0,4$ Nm, e para isso foi necessário variar o teor de água de um traço para o outro. A quantidade de água para cada traço pode ser observada na Tabela 10.

Tabela 10 – Quantidade de água para cada traço no preparo das argamassas.

Nomenclatura das argamassas	Teor de CLA	Composição do traço (g) (cimento: cal: cinza: areia: água)				
		CPV-ARI	CH-I	CLA	AC	Água
REF	0%	223,2	283,1	0,0	3493,7	780,0
5%CLA	5,0 %	212,3	283,4	7,2	3497,2	740,0
10%CLA	10,0 %	201,3	283,6	14,4	3500,7	720,0
20%CLA	20,0 %	179,3	284,2	28,9	3507,6	720,0

Fonte: A autora (2016).

A forma de processamento da argamassa (mistura entre finos e água) foi então padronizada para todas as argamassas estudadas, buscando eliminar possíveis variações de mistura. Pois, apesar de apresentar aparente simplicidade operacional, segundo Romano (2013), a etapa de mistura é uma fase crítica na obtenção das argamassas, por influenciar de forma direta as propriedades do material no estado fresco (trabalhabilidade) e no desenvolvimento microestrutural do revestimento.

Após a colocação de toda a água na mistura, e uma completa homogeneização, os ensaios são iniciados, na seguinte ordem: reometria de mistura, ciclo de cisalhamento, *squeeze flow*, densidade de massa e teor de ar incorporado. Em seguida, a mesma amostra é ainda utilizada para a moldagem dos corpos de prova (CP's) necessários para posterior realização dos ensaios no estado endurecido: permeabilidade, porosidade, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração por compressão diametral.

As argamassas utilizadas para os ensaios de: aderência inicial das argamassas no substrato e resistência potencial de aderência à tração, foram preparadas de forma diferente. Elas foram misturadas manualmente, em uma superfície não absorvente e que impedisse a perda de água de amassamento. Da mesma forma que no reômetro, a água foi sendo adicionada aos poucos para promover um melhor preparo e homogeneização das argamassas.

3.3.4 Moldagem dos corpos de prova

Após a realização dos ensaios de reometria de mistura, ciclo de cisalhamento, *squeeze flow*, densidade de massa e teor de ar incorporado, com a mesma amostra inicialmente preparada no reômetro, foram moldados em moldes cilíndricos de 5 cm x 6 cm (padrão utilizado na USP), 6 corpos de prova (CP's) para cada traço, totalizando 24 CP's (6 CP's x 4 traços = 24 CP's), de modo a garantir uma melhor intervalo de confiança nos resultados, para realização dos ensaios no estado endurecido, na seguinte ordem de execução: permeabilidade, porosidade, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração por compressão diametral.

Os moldes foram previamente untados com vaselina, de modo a facilitar o desprendimento dos CP's no momento da desmoldagem. A moldagem é feita colocando-se a primeira camada de argamassa no molde e aplicando-se 20 golpes com a espátula verticalmente. Depois, é colocada a segunda e última camada de argamassa e é aplicado mais 20 golpes. Em seguida, é feito o rasamento dos CP's.

A cura dos CP's aconteceu em duas etapas. Primeiramente, os 24 CP's foram acondicionados em um saco plástico junto com um copo de água (de modo a garantir a cura úmida) e levados para a câmara seca, ficando em cura úmida por 7 dias. Ao completar 7 dias, os CP's foram desmoldados, retirados do saco plástico e levados novamente para a câmara seca, desta vez sem o copo de água (para garantir a cura seca), ficando em cura seca por mais 21 dias. Aos 28 dias de cura, os CP's foram retirados da câmara seca, e com a utilização de um paquímetro, foram aferidas algumas medidas de cada CP's (três medidas do diâmetro, uma medida de altura e a massa) necessárias para realização dos ensaios no estado endurecido.

3.4 Ensaios para caracterização das argamassas no estado fresco

3.4.1 Reologia das argamassas

3.4.1.1 Reometria de mistura

Como descrito no item 3.3.3, as argamassas estudadas foram misturadas em um reômetro planetário. Após a completa homogeneização da mistura, o ensaio de reometria de mistura é iniciado no mesmo reômetro (Figura 10) utilizado para preparação das argamassas.

O ensaio tem início com uma variação na velocidade de rotação, até atingir o torque inicial padrão determinado para a argamassa REF e que deve ser mantido para as demais argamassas, que foi de $2,0 \pm 0,4$ Nm.

No reômetro é possível um controle preciso da velocidade de rotação, tendo como resposta o torque ao cisalhamento aplicado. Consequentemente, é possível quantificar as propriedades das argamassas tanto durante a etapa de mistura quanto avaliar o perfil reológico da argamassa misturada.

Ao atingir o torque, foi então quantificado a variação do torque na mistura a uma velocidade de rotação constante de 500 rpm por 2 minutos. Ao final do ensaio, é gerado o gráfico da variação do torque ao longo do tempo.

3.4.1.2 Ciclo de cisalhamento

Dando continuidade ao estudo reológico do processamento da argamassa, na sequência, ainda com a amostra no reômetro (utilizado também para a realização deste ensaio), é aplicado um ciclo de cisalhamento variando-se a velocidade de rotação de 50 rpm a 1250 rpm e retornando a 50 rpm (permanecendo por 5 segundos em cada patamar). Ao final da mistura e após os ciclos, é quantificado a variação do torque em função da velocidade de mistura. Também é possível obter resultados da viscosidade e do torque de escoamento das argamassas.

3.4.1.3 Reometria compressiva (*squeeze flow*)

Após a realização dos dois ensaios anteriores, de reometria de mistura e do ciclo de cisalhamento, com a mesma amostra, agora fora do reômetro, é realizado o ensaio de *squeeze*

flow, de acordo com as prescrições da NBR 15839 (ABNT, 2010), com amostras de espessuras de 10 mm e 101 mm de diâmetro, em uma máquina universal Instron, modelo 5569.

Primeiramente, é feito o preenchimento do molde com argamassa. Em seguida, é feito o rasamento da amostra. O molde é então retirado para a obtenção da amostra. As etapas para a realização do ensaio são mostradas na Figura 11. Em seguida, a amostra é colocada na máquina, com controle de deslocamento do atuador de 0,1 mm/s.

Figura 11 – Etapas para preparação da amostra para o ensaio de *squeeze flow*: (a) preenchimento do molde; (b) rasamento da amostra; (c) retirada do molde.



Fonte: A autora (2016).

Durante a realização do ensaio, a amostra sofre a compressão axial, devido a carga aplicada, e o resultado é quantificado em um gráfico da carga aplicada em função do deslocamento da amostra. O aspecto inicial e final da amostra no ensaio pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Aspecto inicial e final da amostra no ensaio de *squeeze flow*, respectivamente.



Fonte: A autora (2016).

3.4.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Após a realização do ensaio de *squeeze flow*, a mesma amostra é utilizada para a determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado na argamassa. É realizado baseando-se no método gravimétrico, segundo a norma técnica NBR 13278 (ABNT, 2005),

através do teor de água presente na mistura e na densidade real dos pós, já obtida por picnometria de gás hélio.

O procedimento consiste em introduzir a primeira camada de argamassa fresca num recipiente cilíndrico de massa e volume conhecidos, e aplicar 20 golpes com a espátula verticalmente. Em seguida, é colocada a segunda camada de argamassa e aplicado mais 20 golpes. Finalizando com a colocação da terceira camada de argamassa, aplicando mais 20 golpes. É feito então o rasamento da amostra e logo após, é pesado o recipiente com a amostra.

A densidade de massa no estado fresco é calculada através da Equação 8:

$$d = \left(\frac{m_t - m_{rec}}{V_{rec}} \right) * 1000 \quad (8)$$

em que: d é a densidade de massa, no estado estão fresco, em kg/cm^3 ; m_t é a massa total do recipiente + massa da argamassa, em g; m_{rec} é a massa do recipiente vazio, que já é conhecida, em g; e V_{rec} é o volume do recipiente, que já é conhecido, em cm^3 .

O cálculo do teor de ar incorporado é feito através da Equação 9:

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

em que: A é o teor de ar incorporado na argamassa, em %; d é a densidade de massa, no estado estão fresco, em g/cm^3 ; e d_t é a densidade de massa teórica, sem vazios, em g/cm^3 , determinada pela Equação 10:

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}} \quad (10)$$

em que: m_i é a massa seca de cada componente da argamassa + massa de água, em g; e ρ_i é a massa específica de cada componente, em g/cm^3 .

3.4.3 Aderência inicial das argamassas no substrato

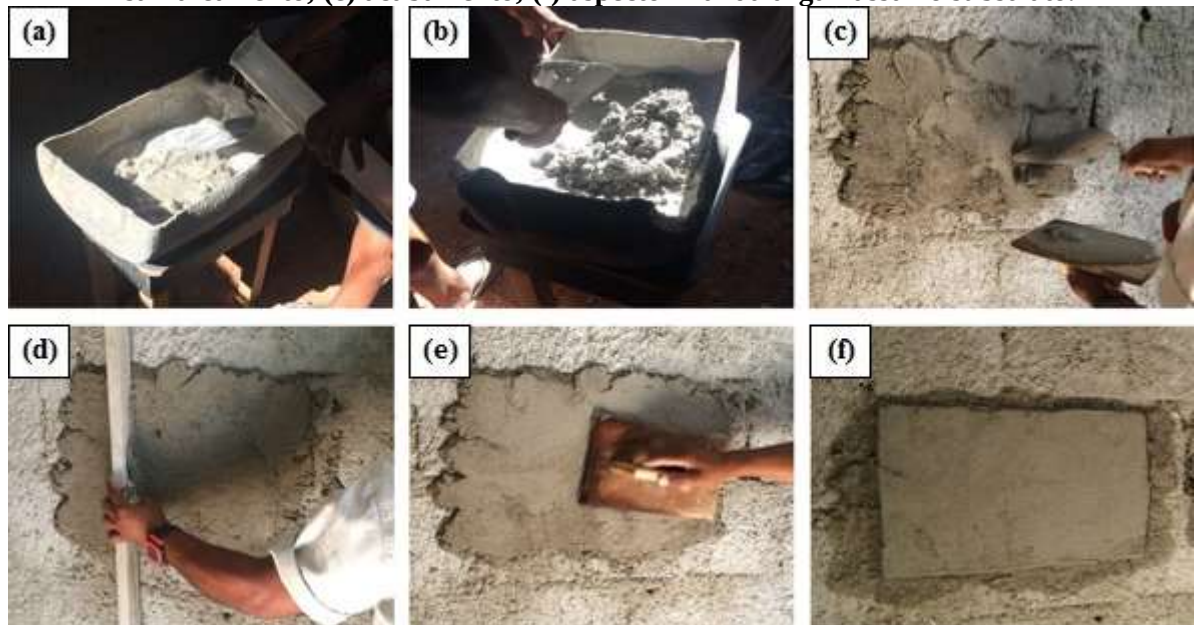
As argamassas desenvolvidas foram testadas em um canteiro de obra, pelo pedreiro José Manoel da Silva, atuante na profissão há 13 anos. O ensaio foi realizado na construção de uma residência unifamiliar (do próprio pedreiro), localizada na rua Antônio Nenel, nº 81, distrito de Rafael, Caruaru/PE.

Os materiais foram previamente pesados e misturados a seco no LCC, de modo a homogeneizar a mistura antes da realização do ensaio. As amostras foram então levadas para a

obra, onde foram misturadas manualmente, com o auxílio da colher de pedreiro, à medida que a água ia sendo adicionada aos poucos, de modo a promover um melhor preparo das argamassas. Para cada traço foi respeitado a quantidade de água indicada na Tabela 10.

O ensaio obedeceu a seguinte ordem de execução: adição da água nos pós, homogeneização da mistura, aplicação da argamassa no substrato (previamente chapiscado), sarrafeamento com a régua, finalizando o acabamento com a desempenadeira. O procedimento realizado pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Procedimento para ensaio de aderência inicial da argamassa no substrato: (a) adição da água nos pós; (b) homogeneização da mistura; (c) aplicação da argamassa no substrato; (d) sarrafeamento; (e) acabamento; (f) aspecto final da argamassa no substrato.



Fonte: A autora (2016).

O objetivo do ensaio era reproduzir fielmente a aplicabilidade das argamassas no cotidiano da construção civil. Para quantificar a qualidade das argamassas, foram feitas perguntas ao pedreiro no momento da execução do ensaio, de modo que ele pudesse avaliar em cada traço, com sua experiência profissional, aspectos de aderência inicial, trabalhabilidade, acabamento, entre outros, de forma prática, como é usual nas obras de construção civil.

3.5 Ensaios para caracterização das argamassas no estado endurecido

3.5.1 Permeabilidade

O primeiro ensaio a ser realizado com os 24 CP's após os 28 dias de cura é o *vacum-decay*, utilizado para a determinação da permeabilidade das argamassas.

Para realização deste ensaio, é fixado o CP na ventosa com o auxílio de massa de calafetar, a fim de impedir a entrada de ar durante o ensaio. Lembrando que todos os CP's devem ser fixados na mesma superfície, de modo a manter a comparatividade dos resultados. Em seguida, aciona-se a bomba de vácuo até a estabilização da pressão negativa (entre -0,80 bar e -0,84 bar), na qual é mantida por cerca de 1 minuto. Após esse período, a bomba de vácuo é desligada e consequentemente o ensaio é iniciado, sendo o tempo de decaimento da pressão quantificado. O ensaio mede o tempo que leva para o ar preencher todos os vazios existentes no CP. Ou seja, é quantificado o tempo de decaimento da pressão até atingir 0. Os dados são então tratados para obtenção dos resultados.

A permeabilidade das argamassas é expressa em valores de k_1 (m^2), constante de permeabilidade Darciana, que representa as interações do ar com meio poroso. Os resultados de k_1 são obtidos a partir da Equação 11:

$$k_1 = \frac{\alpha \cdot MM \cdot \mu_{ar} \cdot V_c \cdot L}{R \cdot (T_{amb} + 273) \cdot \rho_{ar} \cdot A} \quad (11)$$

em que: k_1 é a constante de permeabilidade, em m^2 ; α é a constante, em s^{-1} ; MM é a massa molar do ar, em kg/mol; μ_{ar} é a viscosidade do ar, em Pa.s; V_c é o volume útil da câmara, em m^3 ; L é a espessura da amostra, em m; R é a constante dos gases ideais, em J/molK; T_{amb} é a temperatura ambiente, em $^{\circ}C$; ρ_{ar} é a densidade do ar, em kg/ m^3 ; e A é a área útil da câmara, em m^2 .

3.5.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Em seguida, com os mesmos 24 CP's utilizados no ensaio de permeabilidade, é feito o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, com a utilização do pundit, equipamento de ultrassom para medição do módulo de elasticidade de superfícies.

A execução do ensaio consiste na fixação dos dois transdutores do equipamento nas extremidades do CP, por meio de um gel condutor, da marca plurigel. Ao ser estabilizada a corrente, anota-se o valor correspondente do tempo (em μs) necessário para a corrente ultrapassar todo o CP ao longo de sua altura.

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico podem ser calculados via Equação 12:

$$E_d = 0,9 \cdot d \cdot (v)^2 = 0,9 \cdot \left(\frac{m}{V}\right) \cdot \left(\frac{h}{t}\right)^2 \quad (12)$$

em que: E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, em GPa; d é a densidade de massa aparente do CP, em g/cm³; v é a velocidade de propagação da onda ultra-sônica, em mm/ μ s; m é a massa do CP, em g; V é o volume do CP, em cm³; h é a altura do CP, em mm; e t é o tempo de propagação da onda ultra-sônica, em μ s.

3.5.3 Resistência à tração por compressão diametral

O próximo ensaio a ser realizado com os mesmos 24 CP's é o de resistência à tração por compressão diametral, utilizando uma máquina de ensaio universal Instron, modelo 5569, com célula de carga de 50.000 N.

Antes da realização do ensaio, faz-se necessário o preparo das amostras. Os CP's foram enrolados em papel filme, de modo a evitar o esfrelamento no momento da ruptura. Em seguida, foram posicionados na prensa deitados no sentido longitudinal, tendo o cuidado para posicionar no sentido contrário ao plano favorável de fissuração (abertura lateral do molde) criado durante a moldagem. De modo a evitar o contato direto entre o CP e a prensa metálica, utilizou-se dois pedaços de madeira. O teste foi realizado com controle de carregamento contínuo da carga, de modo a evitar o impacto sobre o CP. O ensaio é então iniciado, e no momento da ruptura é anotado o valor da carga máxima suportada pelo CP.

A resistência à tração por compressão diametral é então determinada pela Equação 13:

$$\sigma_{CD} = \frac{2P}{\pi \cdot d_{méd} \cdot h} \quad (13)$$

em que: σ_{CD} é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa; P é a carga de ruptura, em N; $d_{méd}$ é o diâmetro médio (das três medidas do diâmetro) do CP, em mm; e h é a altura do CP, em mm.

3.5.4 Porosidade

O último ensaio a ser realizado com os 24 CP's foi o de porosidade, avaliada a partir da imersão da amostra em água, segundo o método de imersão de Arquimedes.

Para a realização deste ensaio é utilizado metade do CP restante do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, após o rompimento dos CP's na prensa. Inicialmente, a amostra é identificada e pesada, anotando-se o valor da massa no estado seco (m_s), sendo então colocados em um dessecador com água suficiente para cobrir todos os CP's. Ao final da última amostra colocada no dessecador, é acionado o vácuo por 2 horas, para forçar a intrusão nos poros. Após as 2 horas, o vácuo é desligado e as amostras se mantêm mergulhadas na água dentro do dessecador por 24 horas. Após as 24 horas, as amostras são retiradas da água e colocadas no aparato para medição da massa imersa (m_i), e em seguida, retiradas do aparato para medição da massa úmida (m_u).

As porosidades aparente e total, podem ser calculadas a partir das Equações 14 e 15, respectivamente:

$$PA = \left(\frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \right) * 100 \quad (14)$$

$$PT = (1 - \rho_{rel}) * 100 \quad (15)$$

em que: PA é a porosidade aparente, em %; m_u é a massa úmida do CP, em g; m_s é a massa seca do CP, em g; m_i é a massa imersa do CP, em g; PT é a porosidade total, em %; e ρ_{rel} é a densidade relativa do cimento (ou resultante dos pós que compõem as argamassas), em g/cm³.

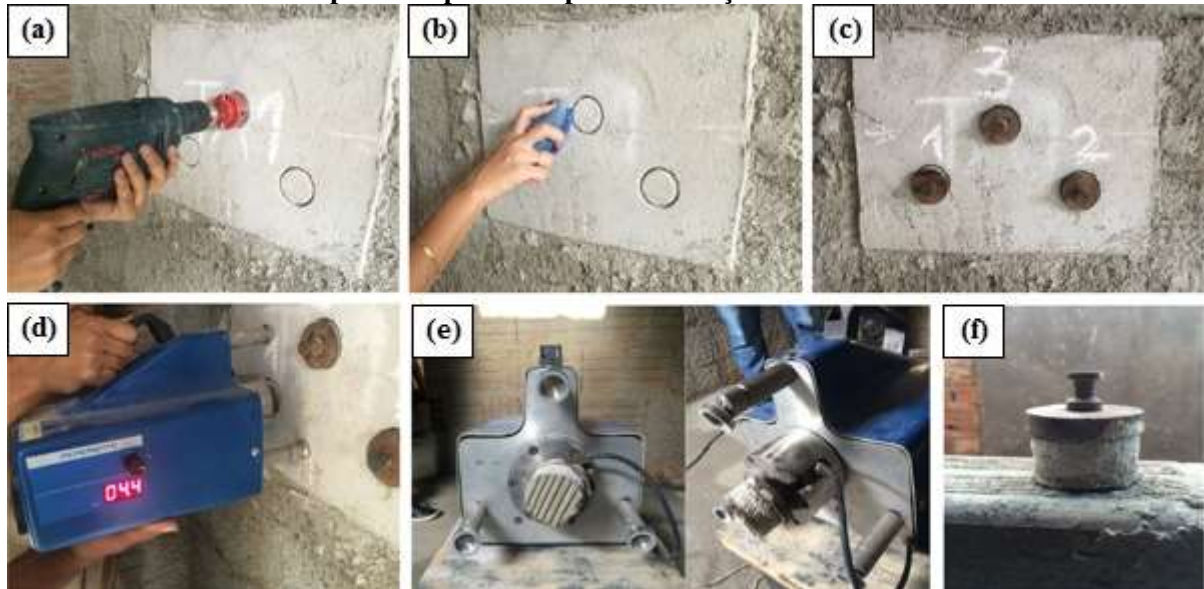
3.5.5 Resistência potencial de aderência à tração

Para a realização deste ensaio, foram utilizadas as mesmas quatro amostras utilizadas para a realização do ensaio, no estado fresco, de aderência inicial das argamassas no substrato, após completarem 28 dias de cura. Para tanto, foi utilizado o aderímetro da marca Pavitest, aparelho para arrancamento e medição da aderência em argamassa, e o ensaio foi executado conforme as prescrições da NBR 15258 (ABNT, 2005).

Primeiramente, com a ajuda de uma serra-copo diamantada, faz-se os cortes circulares a seco na argamassa, com uma profundidade além da argamassa (penetração aproximadamente de 2 mm no substrato), delimitando o CP que vai ser ensaiado. Para cada traço, foram delimitados 3 CP's, totalizando 12 CP's (4 traços x 3 CP's). Em seguida, a superfície é escovada, de modo a eliminar todos os resíduos. É feita então a colagem da pastilha metálica circular (diâmetro de 50 mm) no CP por meio de cola (a base de resina epóxi), transparente de secagem rápida em 10 minutos (marca PolyHobby da Pulvitec). Esperou-se os 10 minutos, tempo necessário para a cola endurecer, para poder ser iniciado o ensaio. Para isso, o aderímetro

é encaixado na pastilha, verificado se a taxa de carregamento constante é de aproximadamente 4,4 kgf/s (ajustada no aderímetro), e iniciado o ensaio. As pastilhas são extraídas, caracterizando a ruptura do CP, e é anotado o valor da carga de ruptura, a espessura do CP preso a pastilha (com a ajuda de um paquímetro) e registrado o tipo de ruptura que ocorreu no CP. O procedimento de realização do ensaio pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Procedimento do ensaio: (a) cortes na argamassa; (b) escovação da superfície; (c) colagem da pastilha; (d) extração das pastilhas; (e) retirada CP ensaiado; (f) aspecto final do CP preso na pastilha após a realização do ensaio.



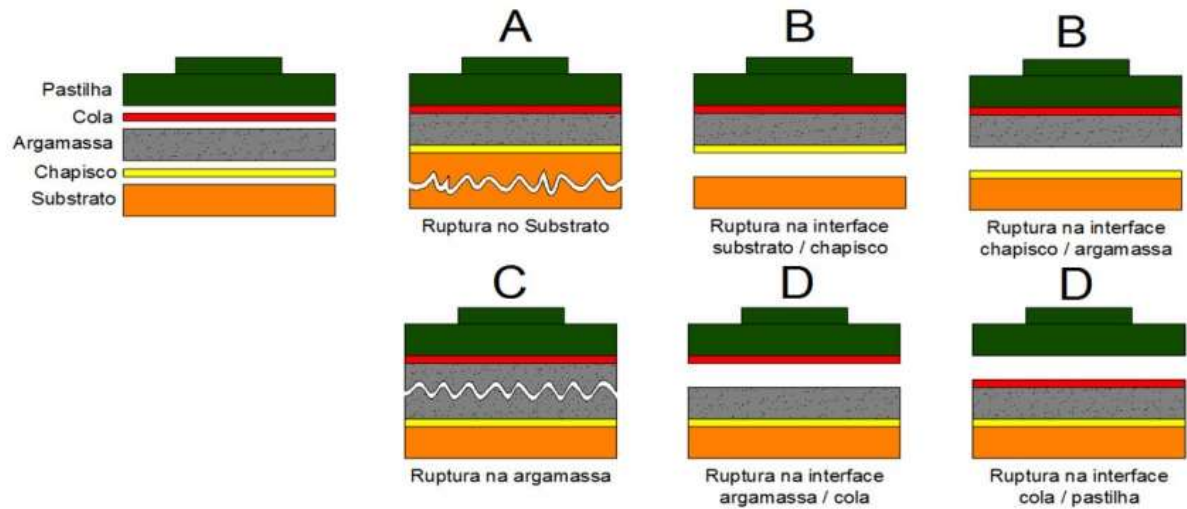
Fonte: A autora (2016).

É importante analisar os resultados do ensaio de resistência de aderência à tração também em relação ao tipo de ruptura ocorrido, pois, de acordo com Silva (2006), tanto o fato de romper na interface argamassa/substrato (aderência pura) quanto no interior dos materiais (falha de estruturação interna) representam fraturas no sistema de revestimento. Além disso, o tipo de ruptura pode interferir nos valores de resistência à tração obtidos pelo ensaio.

Os tipos de ruptura que podem ocorrer no CP, de acordo com a NBR 15258 (ABNT, 2005), e exemplificados na Figura 15, são:

- A é a ruptura no substrato;
- B é a ruptura na interface substrato/argamassa;
- C é a ruptura na argamassa;
- D é a falha na colagem da pastilha.

Figura 15 – Formas típicas de ruptura ocorridas em ensaios de arrancamento.



Fonte: Adaptado do Relatório de ensaio N° 1002 da MMC LAB (2013).

No caso das rupturas na interface do substrato/argamassa (situação B), o valor da resistência de aderência à tração é igual ao valor obtido no ensaio. Quando a ruptura do CP não ocorre totalmente na interface substrato/argamassa (situações A e C), dizemos que o valor da resistência à tração não foi determinado e que a aderência do revestimento à base é maior do que o valor encontrado, portanto o resultado do ensaio será precedido pelo sinal > (maior). O resultado será desprezado quando a ruptura ocorrer na interface cola/pastilha (situação D), pois indicará imperfeições na colagem das mesmas.

O cálculo da resistência potencial de aderência à tração de cada CP pode ser feito pela Equação 16:

$$R = \frac{P}{A} \quad (16)$$

em que: R é a resistência potencial de aderência à tração, em MPa; P é a carga de ruptura, em N; e A é a área do CP, em mm².

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos componentes das argamassas

4.1.1 Massa unitária, massa específica real e área específica

Com o tratamento dos dados obtidos nos ensaios de: massa unitária, massa específica real (através da picnometria de adsorção de gás hélio) e área específica (pelo método do BET), foram obtidos os resultados para caracterizar fisicamente os materiais de partida, apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Características físicas das matérias primas anidras.

Material	Massa unitária (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)	Área específica (m ² /g)
CPV-ARI	0,862	3,05	1,1
CH-I	0,490	2,36	9,5
AC	1,280	2,83	0,2
CLA	0,602	2,43	3,6

Fonte: A autora (2016).

Conforme observado, a CLA e o CPV-ARI apresentam massa unitárias próximas, já a massa específica da cinza (2,43 g/cm³) é menor do que a do cimento (3,05 g/cm³). Além disso, a área superficial específica da cinza (3,6 m²/g) é um pouco maior do que a do cimento (1,1 m²/g).

Os dados apresentados na Tabela 11 sugerem que a produção de argamassas com substituição parcial de cimento por CLA deveria demandar mais água para a mistura para o recobrimento de toda superfície das partículas, devido a maior área específica da cinza. No entanto, isso não é uma regra, pois outras características podem contribuir para o teor de água de uma mistura, como a granulometria dos sólidos, a absorção de água pelas partículas, a concentração de sólidos na mistura, a porosidade do sistema, a carga superficial de água nas partículas, entre outras. Neste estudo, foi usado menos quantidade de água ao longo do aumento do teor de cinza, para manter o torque inicial da mistura para todas as argamassas estudadas, conforme mostrado na Tabela 10.

Numa suspensão, a água adicionada primeiramente recobre a superfície das partículas para depois preencher o volume de vazios presente na amostra. O fato de ter sido retirado cimento (diminuindo a quantidade de cimento na amostra) e ter sido colocado cinza no lugar,

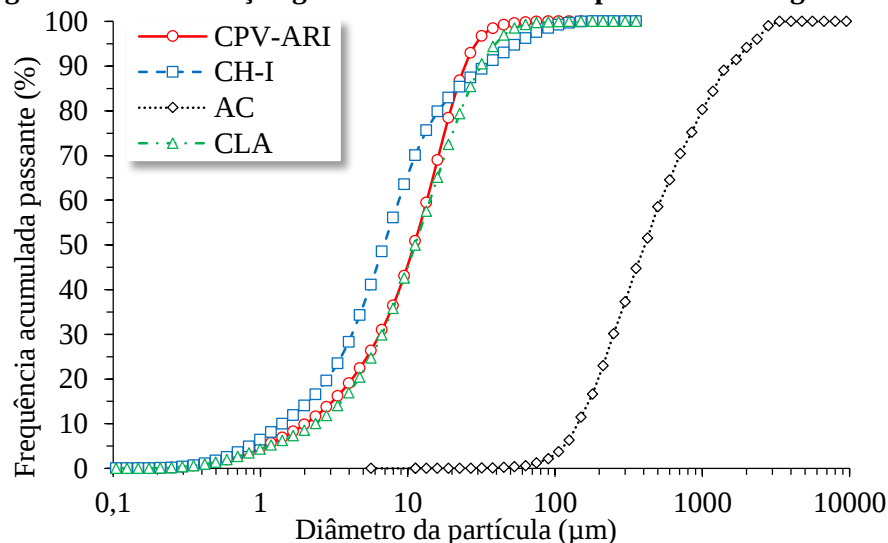
não contribuiu para uma maior demanda de água pelo sistema. Isso porque, as partículas finas da cinza não carregam a água do sistema para recobrir sua superfície. Ao contrário de alguns materiais silicosos, como a diatomita (que possui muitos canais em sua estrutura que facilitam a absorção de água pelas suas partículas), o MEV da cinza (Figura 6) indica que não há a presença de canais que facilitem a absorção de água pela cinza, não competindo com a água que o cimento precisa para hidratar e evoluir, ou seja, deixando a água livre no sistema para as reações de hidratação.

Provavelmente, a cinza mexeu na compacidade da massa, fazendo com que as partículas deslizassem com mais facilidade entre si, e isso fez com que a argamassa demandasse menos água de modo a manter o torque de mistura. A cinza, possivelmente, está deixando a água livre no sistema entre as partículas, facilitando o deslizamento entre as partículas, servindo como rolamento, reduzindo o consumo de água de amassamento e aumentando a compacidade do sistema. De fato, se há menos cimento na mistura, haverá uma menor demanda de água pelo sistema, visto que a cinza não interfere na quantidade de água necessária para a realização das reações de hidratação.

4.1.2 Distribuição granulométrica

Para complementar a caracterização física dos componentes, foram obtidos as curvas granulométricas de cada material (Figura 16), resultante do ensaio de distribuição granulométrica.

Figura 16 – Distribuição granulométrica dos componentes das argamassas.



Fonte: A autora (2016).

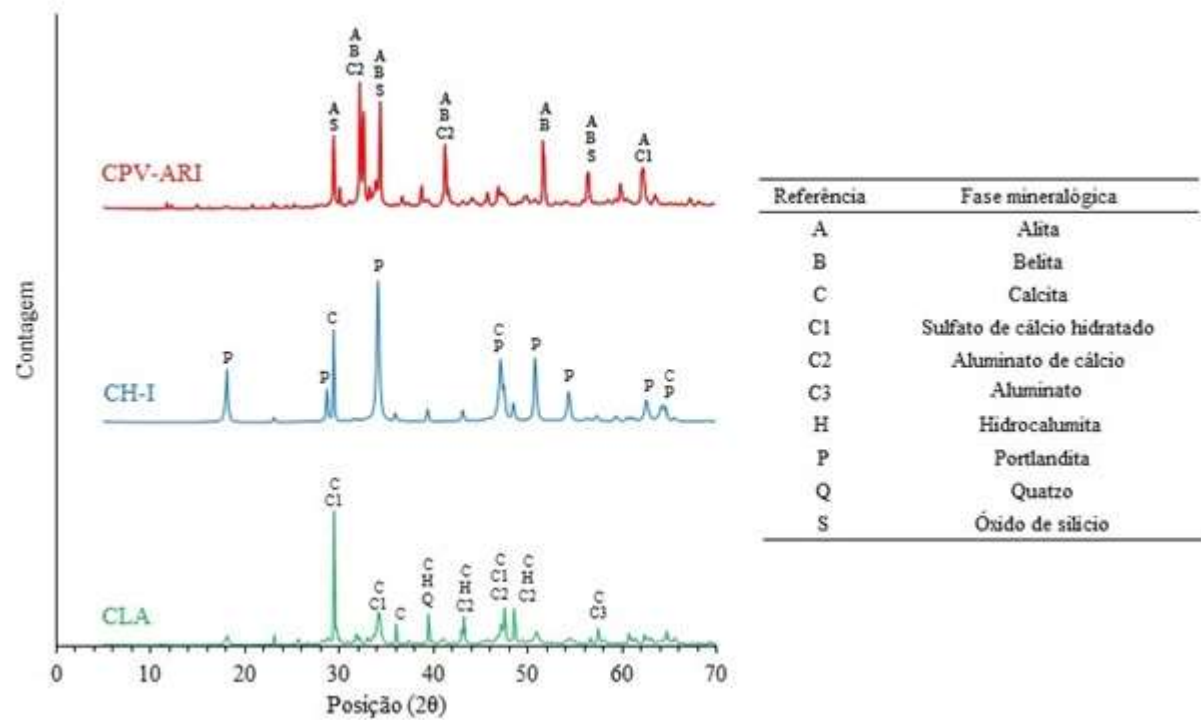
Conforme esperado, de acordo com os resultados obtidos da Tabela 11, a AC apresenta granulometria mais grossa do que os demais materiais. Além disso, é possível identificar uma semelhança granulométrica entre o CPV-ARI e a CLA, sendo a cinza mais uniformemente distribuída e o cimento tem mais partículas distribuídas em torno de 10 e 15 µm.

Estes resultados indicam que o diâmetro médio da CLA está bem próximo ao do CPV-ARI, característica positiva em termos de substituição, pois reforça a possibilidade de se usar as cinzas em substituição ao cimento como material *filler* da matriz cimentícia.

4.1.3 Difração de raios-X (DRX)

Os gráficos de DRX (Figura 17), apresentam os picos característicos dos materiais finos componentes das argamassas, CPV-ARI, CH-I e CLA, antes da hidratação.

Figura 17 – Análise DRX dos componentes finos das argamassas.



Fonte: A autora (2016).

Analisando o difratograma do CPV-ARI, foi possível constatar a presença de algumas fases anidras comuns ao cimento. O pico de maior intensidade está localizado em 32° é atribuído à alita (C₃S), identificada também como fase predominante em todos os picos do difratograma (TAYLOR, 1997). Encontra-se também picos referentes à belita (C₂S), sulfato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio e óxido de silício.

O difratograma da CH-I apresenta pico de maior intensidade (34°) da Portlandita. Bem como poucas fases de calcita também estão presentes. O fato de não ter sido identificado óxido de cálcio mostra a qualidade de seu processo produtivo.

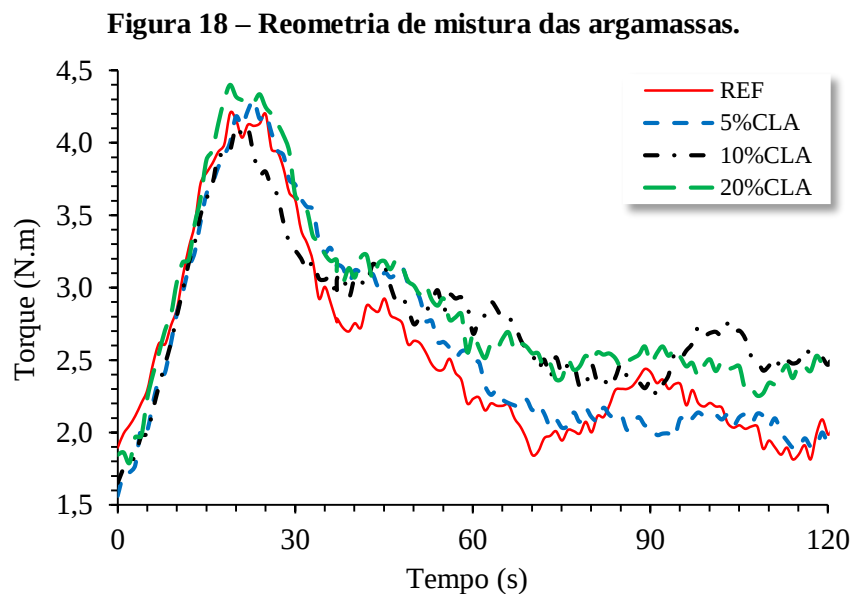
No difratograma da CLA fica bem destacado a presença da calcita (carbonato de cálcio) no pico de maior intensidade (aproximadamente 29°), fase mineralógica com maior predominância em todos os picos do difratograma. Também são identificados a presença de sulfato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio, aluminato, hidrocalumita e quartzo. A grande quantidade de calcita, de acordo com Melo, M. (2012), em granulometria reduzida, pode proporcionar um melhor empacotamento do sistema, atuando como *filler*.

4.2 Avaliação das argamassas no estado fresco

4.2.1 Reologia das argamassas

4.2.1.1 Reometria de mistura

Na Figura 18, estão expostas as curvas de mistura das argamassas geradas durante a realização do ensaio de reometria de mistura.



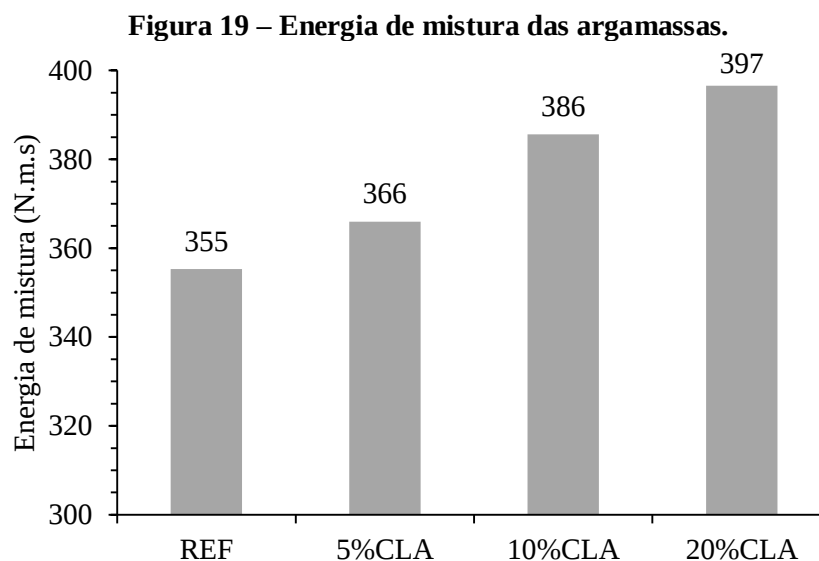
Fonte: A autora (2016).

No início da mistura, no tempo zero, é possível observar que o torque inicial de todas argamassas foi mantido dentro do intervalo determinado de $2,0 \pm 0,4$ Nm.

Durante os primeiros 30 segundos de realização do ensaio (Figura 18), é observado um aumento nos valores dos torques, atingindo um pico em todas as argamassas estudadas. Esse comportamento acontece devido à aglomeração das partículas quando as mesmas entram em contato com a água. Assim, parte da água que deveria ser utilizada para a mistura, fica presa no interior dos aglomerados. Ao longo do tempo, o cisalhamento imposto é responsável pelo rompimento dos aglomerados, liberando a água que estava em seu interior, facilitando o fluxo, e diminuindo o torque de cisalhamento. Por isso, a principal função da etapa de mistura das argamassas é romper os aglomerados de partículas gerados, para facilitar a homogeneização do sistema e melhorar as propriedades reológicas, que afetam as características finais dos produtos.

Ao final dos 120 s de realização do ensaio, todas as argamassas mantiveram-se com o torque final dentro do intervalo de $2,20 \pm 0,33$ Nm. No entanto, é possível observar, que durante a mistura, as curvas referentes a 10%CLA e 20%CLA se mantiveram por cima das curvas REF e 5%CLA, o que significa que foi necessário um torque maior para misturar estas argamassa, devido à redução da água de amassamento. E, conseqüentemente, foi necessário aumentar a energia de mistura para homogeneização adequada dos materiais.

A partir do cálculo das áreas sobre as curvas do gráfico de reometria de mistura, são quantificadas as energias de mistura das argamassas (Figura 19).



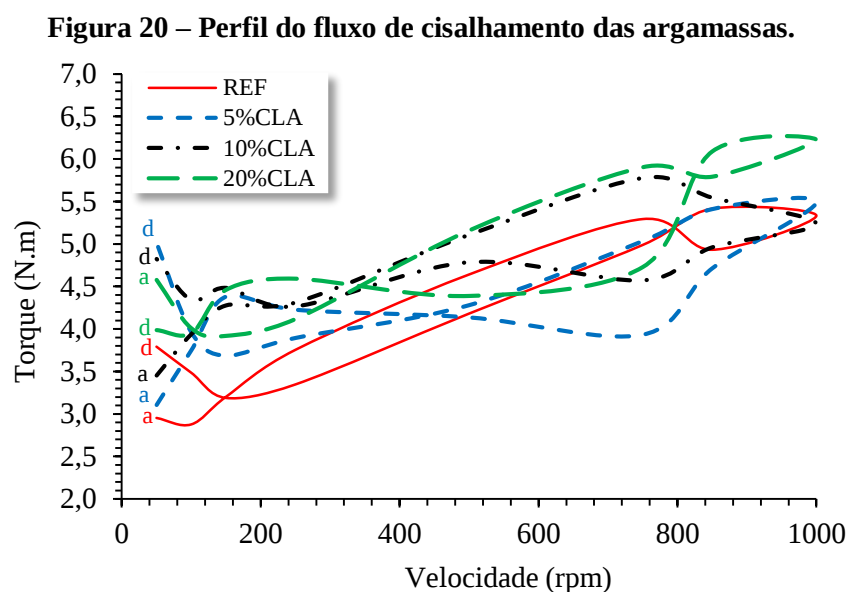
Fonte: A autora (2016).

Conforme observado (Figura 19), houve um aumento na energia de mistura ao longo do aumento da quantidade de cinza no sistema. Esses dados justificam os resultados observados na Figura 18, pois ocorreu devido a necessidade de um maior torque final de mistura, em consequência da menor quantidade de água de amassamento presente na mistura, ou seja, devido à redução da água de amassamento, há um menor molhamento das partículas, e consequentemente existe uma maior dificuldade em se homogeneizar o material, por isso a necessidade de uma maior energia de mistura, para homogeneização adequada do material durante o processamento.

O aumento da energia de mistura faz variar a consistência da argamassa. À medida que o tempo passa, as reações de hidratação vão acontecendo e o efeito da quantidade maior de cinza e menor de água de amassamento pode modificar a consistência da argamassa, exigindo maiores energias de mistura, conforme o gráfico. Esse aumento da energia de mistura vai ser analisado na prática, no ensaio de aderência inicial da argamassa no substrato, conforme as impressões do pedreiro no momento da mistura da argamassa.

4.2.1.2 Ciclo de cisalhamento

Os perfis de fluxo de cisalhamento das argamassas com substituição gradual do cimento pela cinza, encontram-se expostos na Figura 20.



Fonte: A autora (2016).

O fluxo de cisalhamento é analisado em função de duas curvas de cada argamassa. À medida que a velocidade aumenta (até 1.000 rpm) é lido o torque de cisalhamento, e assim é gerada uma curva ascendente. Em seguida, é feita a leitura do torque em função da diminuição da velocidade (até 0 rpm), gerando a curva descendente para a mesma argamassa analisada.

Nas curvas “a” ascendentes (aumento da velocidade), as argamassas 10%CLA e 20%CLA, que são as argamassas que tem mais cinza, com o aumento da velocidade, elas demandam mais torque. E, dentre elas a de 20%CLA foi a que demandou mais torque. Nas curvas “d” descendentes (diminuição da velocidade), as argamassas 10%CLA e 20%CLA também apresentaram torques superiores às demais.

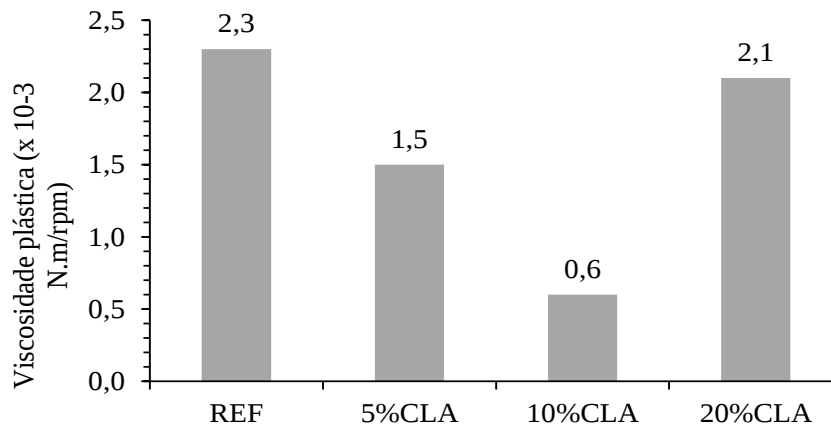
A substituição de cimento por 5% de cinza foi positivo do ponto de vista reológico, uma vez que a curva da 5%CLA está próxima a de REF, ou seja, a curva 5%CLA exigiu torques menores que o da curva REF. É possível observar que o sistema só começa a ser mais afetado com a substituição a partir de 10% de cinza.

Com relação ao torque máximo (em 1.000 rpm), a presença de 20% da cinza (20%CLA) favoreceu o aumento desse parâmetro em até cerca de 16%. Isso porque trata-se do traço que apresenta a menor quantidade de água de amassamento e maior quantidade de cinza em relação aos demais. Destaca-se ainda que, esse parâmetro não sofreu alterações significativas quando da substituição em 5% e 10%, ou seja, observa-se valores de torque máximo semelhantes para as argamassas REF, 5%CLA e 10%CLA.

De uma forma geral, as curvas REF e 5%CLA apresentam um comportamento reológico semelhante, e as curvas 10%CLA e 20%CLA apresentam também um comportamento semelhante entre si. Percebe-se que a curva 5%CLA foi a que apresentou menor torque.

Através do ensaio de ciclo de cisalhamento também é possível extrair valores da viscosidade plástica em função da substituição gradual do cimento pela cinza, conforme Figura 21.

Figura 21 – Viscosidade plástica das argamassas.



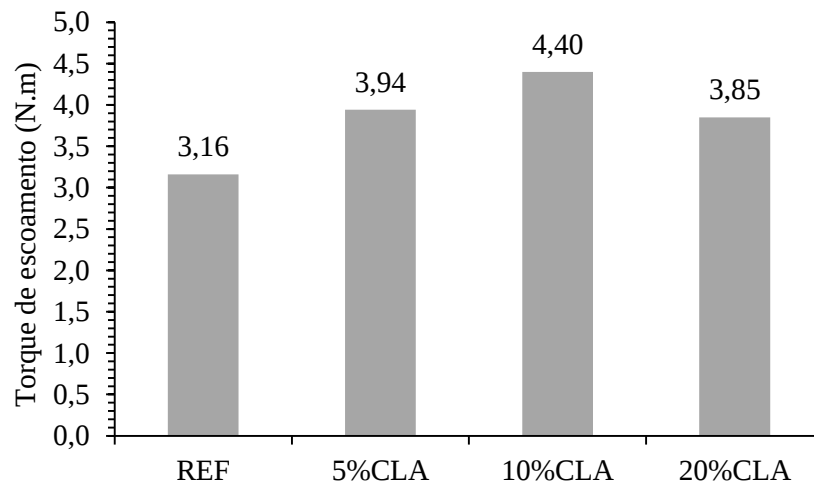
Fonte: A autora (2016).

As argamassas com incorporação de cinza de algaroba até 10%, apresentaram uma diminuição na viscosidade plástica (Figura 21) em relação à argamassa de referência (REF), o que é favorável, pois quanto menor a viscosidade, maior a facilidade de espalhamento da argamassa. No entanto, com 20% de substituição, a argamassa apresentou uma maior resistência ao escoar, ou seja, uma maior viscosidade plástica, apesar de manter-se abaixo do valor da argamassa REF.

Nesse estudo, a menor quantidade de água de amassamento contribuiu para a diminuição da viscosidade, facilitando o escoamento da argamassa. Apesar da argamassa 20%CLA não manter a continuidade deste comportamento, o valor da viscosidade se manteve abaixo do limite da argamassas REF.

Em relação ao torque de escoamento (Figura 22), há um aumento gradativo até a presença de 10% de cinza, seguido de uma redução aos 20% de cinza. Estes resultados colaboram com o fenômeno de aglomeração da água no início da mistura, reduzido significativamente a oferta de fluído, aumentando, por consequência, a tensão de cisalhamento entre as partículas constituintes das argamassas estudadas.

Figura 22 – Torque de escoamento das argamassas.



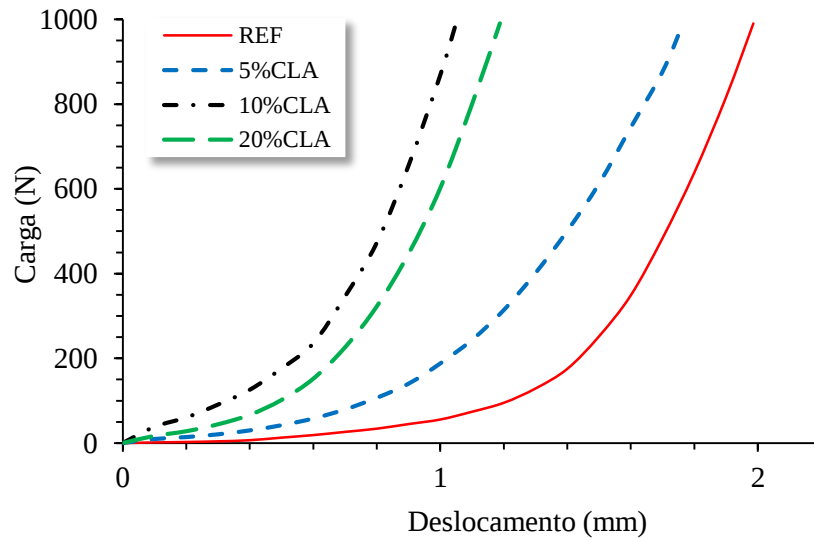
Fonte: A autora (2016).

Nas argamassas REF, 5%CLA e 10%CLA o comportamento resultou em um aumento do torque de escoamento, estando em concordância com os resultados na reometria de mistura. Esse aumento no torque até 10% de substituição, foi devido à redução da água de amassamento e aumento do teor de cinza. Já na argamassa 20%CLA, os resultados não seguiram a tendência apresentada pelas demais argamassas, houve uma redução do torque de escoamento. No entanto, todas as argamassas mantiveram-se nos limites estabelecidos pela argamassa de referência (REF).

4.2.1.3 Reometria compressiva (*squeeze flow*)

As características das argamassas sob solicitação de compressão estão ilustradas no perfil de fluxo das argamassas por *squeeze flow* na Figura 23.

Figura 23 – Perfil do fluxo de cisalhamento das argamassas por *squeeze flow*.



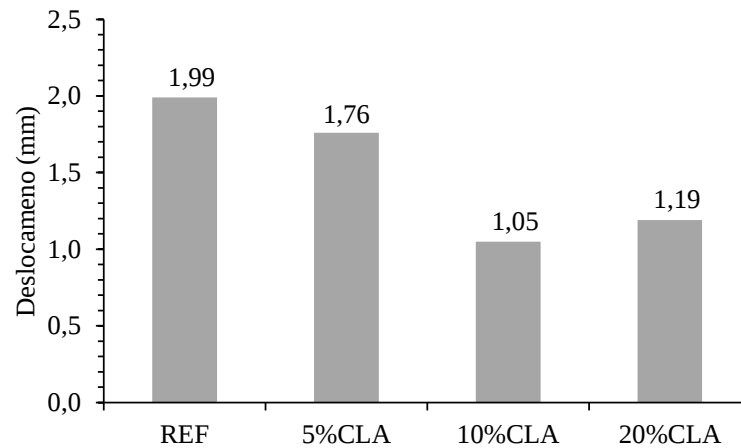
Fonte: A autora (2016).

De acordo com Cardoso, John e Pileggi (2009) e Romano (2013), existem três estágios geralmente associados às curvas típicas de ensaios de *squeeze flow* para argamassas: o estágio 1, que é o estágio elástico linear (baixa tensão); o estágio 2, onde o fluido se deforma plasticamente, devido ao aumento na força aplicada (fluxo viscoso); e o estágio 3, que é o estágio *strain hardening*, geralmente associado a grandes deformações e onde a força requerida para comprimir o material aumenta bastante. O estágio *strain hardening* é associado com altos níveis de fricção entre agregados, com segregação e com alta viscosidade. É possível observar que em todas as curvas mostradas na Figura 23, o estágio 1 está ausente, sendo presentes apenas os estágios 2 e 3.

O incremento de partículas finas na argamassa interfere nos resultados obtidos pelo ensaio de *squeeze flow*, pois para soluções concentradas com partículas finas há uma fluência heterogênea, em função da possibilidade de separação de fases líquidas e sólidas, seja a pasta que seja escoada pela estrutura formada pelos grãos, seja ainda pela segregação das partículas finas-água (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009). No entanto, ressalta-se que não foram observados fenômenos de desagregação visual de fases em nenhuma das argamassas estudadas no momento da realização do ensaio.

Os deslocamentos apresentados nas curvas da Figura 23 foram quantificados na Figura 24, de modo a facilitar a interpretação dos resultados.

Figura 24 – Deslocamentos das argamassas por *squeeze flow*.



Fonte: A autora (2016).

Comparando os resultados apresentados em ambas as figuras, é possível observar um pequeno deslocamento das curvas para a esquerda com o aumento da adição de cinza de algaroba nas argamassas até a porcentagem de 10%, caracterizado pela diminuição do deslocamento (Figura 24). A redução na quantidade de água das argamassas, com o acréscimo da cinza, contribuiu para um deslocamento maior das curvas para a esquerda, consequentemente a diminuição do deslocamento das argamassas com a solicitação da carga. Esse fenômeno já era esperado, devido aos resultados encontrados nos demais ensaios reológicos das argamassas. Esse comportamento é positivo para o sistema, pois com o aumento dos teores de cinza (até 10%CLA), há uma diminuição no deslocamento da argamassa, quando submetida a solicitações de compressão.

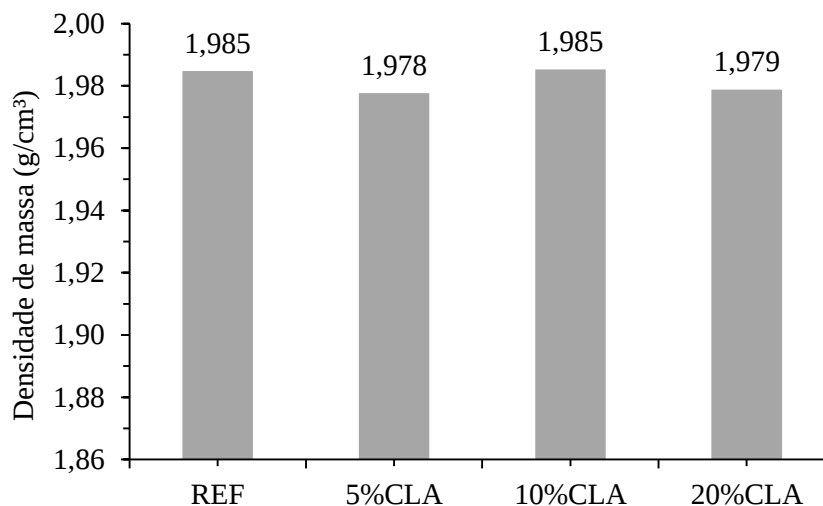
Além disso, é importante observar que na argamassa 20%CLA há um pequeno deslocamento para a direita da curva em relação ao comportamento das demais curvas, confirmado pelo pequeno aumento do deslocamento mostrado na Figura 24 em relação a 10%CLA. No entanto, mesmo assim, o deslocamento da 20%CLA manteve-se inferior ao deslocamento da REF. Segundo Cardoso et al. (2014), quanto menor o deslocamento das argamassas, maior a segregação dos materiais que a compõem. De acordo com os dados obtidos, a maior quantidade de cinza adicionada ao sistema e menor quantidade de água de amassamento contribuíram para uma maior segregação dos materiais.

4.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa ou massa específica das argamassas está diretamente relacionada com a massa específica dos materiais que as constituem e com o teor de ar incorporado que compõem a argamassa (CINCOTTO; SILVA; CASCUDO, 1995).

Como era esperado, de acordo com os dados da Tabela 11 (massa unitária, massa específica real e área superficial específica) e o gráfico da Figura 25, os valores da densidade de massa das argamassas foram praticamente os mesmos, não havendo variações significativas com a presença de CLA na composição. Apesar do cimento e a cinza terem densidades diferentes, foi substituído um valor máximo de 20% de cimento por cinza, ou seja, um valor relativamente pequeno se comparado com o volume total da argamassa, que praticamente não fez grande diferença na densidade final da argamassa.

Figura 25 – Densidade de massa das argamassas no estado fresco.



Fonte: A autora (2016).

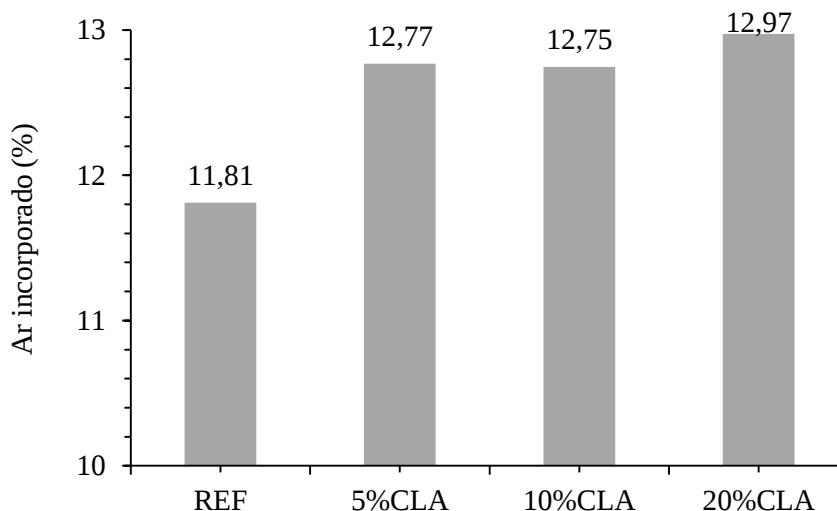
Essa característica é positiva, em termos de aplicação, pois todas as argamassas estão dentro da mesma classificação D5 (Tabela 12), segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 12 – Classificação das argamassas segundo sua densidade de massa no estado fresco.

Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)	Método de ensaio
D1	≤ 1.400	ABNT NBR 13278
D2	1.200 a 1.600	
D3	1.400 a 1.800	
D4	1.600 a 2.000	
D5	1.800 a 2.200	
D6	> 2.000	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005).

O ar incorporado é inversamente proporcional à densidade de massa, de modo que, quanto maior o teor de ar incorporado, menor a densidade de massa da argamassa. No gráfico da Figura 26 é possível identificar os valores do ar incorporado nas argamassas com diferentes teores de cinza.

Figura 26 – Teor de ar incorporado das argamassas.

Fonte: A autora (2016).

A substituição parcial do cimento pela cinza de algaroba, de um modo geral, não alterou a incorporação de ar pelo sistema. Em relação ao percentual de 5% de CLA, houve um aumento no parâmetro em 8,13% em relação ao de referência, não sendo caracterizada diferença considerável para tal parâmetro. Esse pequeno aumento na incorporação de ar (diminuição da densidade de massa) está diretamente associado com a inserção do resíduo, pois há um pequeno aumento da quantidade de finos presente nas argamassas. No entanto, depois deste pequeno aumento no valor de ar incorporado, após a adição da cinza no sistema, os valores mantiveram-se praticamente constantes para as demais argamassas.

4.2.3 *Aderência inicial das argamassas no substrato*

À medida que as argamassas iam sendo aplicadas pelo pedreiro José Manoel da Silva, algumas perguntas, para avaliação da aderência inicial das argamassas no substrato foram feitas para cada traço aplicado, a saber:

- 1) A argamassa é fácil de misturar?
- 2) A quantidade de água é suficiente para a realização da mistura?
- 3) A argamassa apresenta uma boa consistência?
- 4) Tem boa aderência inicial no substrato?
- 5) Boa para sarrafear, desempolar e dar acabamento?
- 6) Vai aparecer fissuras/rachaduras após 28 dias de cura?

A avaliação do pedreiro, segundo sua experiência profissional, para cada argamassa aplicada foi:

- Argamassa REF → “fácil de misturar; tem quantidade de água suficiente; tem boa consistência; é fácil de pegar, pega rápido, pega bem na parede; é boa pra sarrafear, desempolar e dar o acabamento; não vai rachar, porque tem areia grossa na sua mistura, tem boa liga.”
- Argamassa 5%CLA → “fácil de misturar; tem quantidade de água suficiente; tem boa consistência; fácil de pegar na parede, pega rápido, não cai muito; é boa pra sarrafear, desempolar e dar o acabamento; também não vai rachar, porque tem areia grossa na sua mistura, tem boa liga.”
- Argamassa 10%CLA → “massa muito boa, fácil de misturar; quantidade de água melhor, suficiente, o que deixou a massa mais aderente; o produto é o mesmo, mas tem diferença de uma para a outra, a quantidade de água ficou melhor; tem boa consistência; pega rápido na parede; muito prática para sarrafear, desempolar e dar o acabamento; boa mesmo, nem precisou molhar a desempoladeira pra dar o acabamento; também não vai rachar, tem boa liga.”
- Argamassa 20%CLA → “tem boa mistura; massa mais seca, menos úmida; se for mexer na betoneira, pra essa quantidade de água, a mistura evolui mais, porque mexendo com a colher, água se espalha, mas na betoneira o traço é bem traçado, demora mais batendo, aí essa quantidade de água é suficiente, e a massa fica mais aderente; mas tem boa

consistência; não pegou tão rápido na parede, não aderiu logo não, mas segura; o acabamento foi rápido e fácil; também não vai rachar, tem boa liga.”

E, após a realização do ensaio, e todas as argamassas aplicadas no substrato, mais duas perguntas foram feitas ao pedreiro:

7) Sentiu alguma diferença entre elas em alguma característica? Se sim, em qual traço e qual característica?

“Apenas na quantidade de água, que foi melhor na argamassa 10%CLA para a mistura, mas para aplicar e dar o acabamento é a mesma coisa, não tem diferença nenhuma entre as quatro.”

8) Usaria todas no seu dia a dia na obra? Se sim, por quê? Se não, qual (s) não usaria e por quê?

“Usaria todas para revestimento em construções, sem nenhum problema. O produto é bom, dá pra ser usado, qualquer uma das quatro argamassas.”

Mesmo sem conhecer a distribuição granulométrica dos materiais de partida das argamassas, apenas no momento da realização do ensaio, o pedreiro afirmou que nenhuma das argamassas iria apresentar fissuras após 28 dias de cura. Segundo ele, “devido a mistura ser feita com areia grossa, que dá a durabilidade na argamassa; se fosse feita com areia fina, racharia, mas com areia grossa, não racha.” De fato, a areia AC, usada na confecção das argamassas apresentou granulometria mais grossa do que os demais materiais (Figura 16). E, conforme afirmado pelo pedreiro, nenhuma das argamassas apresentou nenhum tipo de fissura após os 28 dias de cura (Figura 27).

Figura 27 – Aspecto final das argamassas aplicadas ao substrato após 28 dias de cura.



Fonte: A autora (2016).

Além disso, o pedreiro destacou que todas as argamassas apresentaram “boa liga”, isso significa que todas tem boa consistência, e consequentemente não proporciona o aparecimento de fissuras. No entanto, se as argamassas tivessem apresentado “muita liga”, isso significaria que haveria uma diminuição na consistência, bem como um aumento na densidade em função

do aumento do teor de CLA, o que contribuiria para o aparecimento de fissuras nas argamassas após os 28 dias de cura.

Observa-se que, com aumento do teor de cinza, a argamassa se tornou mais trabalhável, até os 10% de substituição. Visto que, segundo o pedreiro, foi a argamassa 10%CLA que apresentou melhor quantidade de água, ou seja, maior facilidade de mistura, caracterizando uma melhor trabalhabilidade em relação às demais. Além disso, conforme visto na Figura 27, a argamassa 10%CLA apresentou um melhor acabamento final em relação às demais. Nota-se que os comentários estão coerentes com os resultados laboratoriais, pois, a argamassa 20%CLA, segundo o pedreiro, foi a que apresentou uma “massa mais seca”. De fato, a argamassa 20%CLA é a que apresenta a menor quantidade de água das quatro, bem como a maior quantidade de cinza. Consequentemente, ela não “pegou tão rápido na parede”, ou seja, não apresentou uma aderência inicial igual as demais.

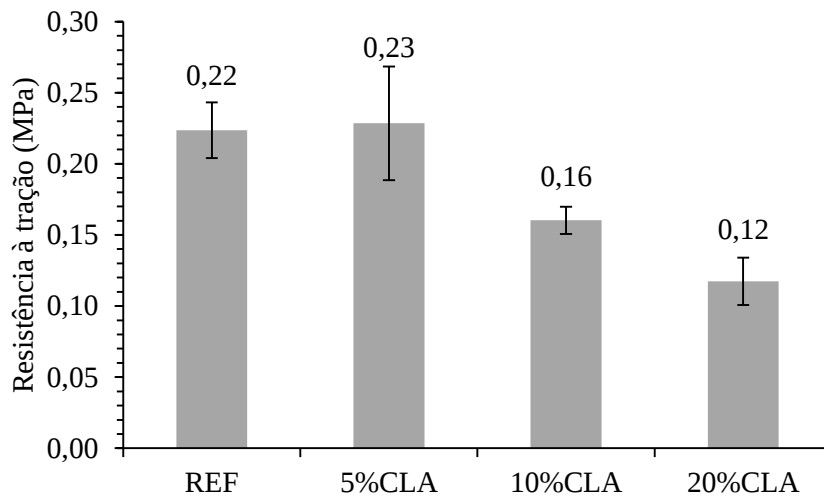
O aumento na energia de mistura, identificado no gráfico da Figura 19, não representa alterações tão significativas quando comparado com a mistura feita pelo pedreiro na prática, pois não inviabilizou a aplicação da argamassa por ele. Pelo contrário, de um modo geral, o pedreiro aprovou todas as argamassas aplicadas, e declarou que usaria qualquer uma das quatro argamassas no canteiro de obras.

4.3 Avaliação das argamassas no estado endurecido

4.3.1 Resistência à tração por compressão diametral

O desenvolvimento da resistência nas primeiras idades varia para cada argamassa, dado as condições de cura, moldagem dos CP's, aplicação da energia durante o adensamento, e como ocorrem as reações químicas rápidas da hidratação do cimento em resposta a estes fatores.

Os valores determinados para a resistência à tração por compressão diametral em função do teor de cinza, encontram-se na Figura 28.

Figura 28 – Resistência à tração por compressão diametral das argamassas.

Fonte: A autora (2016).

Para análise comparativa dos dados, foi aplicada uma análise estatística de variância (ANOVA), conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Análise estatística de variância da resistência à tração por compressão diametral.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
REF	6	1,33	0,22	0,0004		
5%CLA	6	1,33	0,23	0,0016		
10%CLA	6	0,97	0,16	0,0001		
20%CLA	6	0,71	0,12	0,0003		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	0,05	3	0,016	26,46	3,63954E-07	3,10
Dentro dos grupos	0,01	20	0,001			
Total	0,06	23				

Fonte: A autora (2016).

De acordo com a análise estatística de variância, o teor de cinza teve influência sobre a resistência à tração por compressão diametral das argamassas ($F_{\text{calc}} > F_{\text{crítico}}$), confirmando que os dados encontrados no gráfico são significativos.

Os valores para as argamassas REF e 5%CLA foram praticamente os mesmos, com um acréscimo de 4,55% de %CLA em relação a REF. No entanto, houve sim uma tendência a diminuição dos valores médios da resistência à tração por compressão diametral, quando foi aumentado o teor de cinza, nas argamassas 10%CLA e 20%CLA, redução de 27,27% e 45,45%, respectivamente, em relação a REF.

Teoricamente, um sistema com menos água, favorece o aumento da resistência mecânica, desde que a água seja suficiente para permitir a hidratação das partículas do cimento. No caso da argamassa 5%CLA, foi observado que a resistência mecânica é semelhante à argamassa de referência, devido a menor quantidade de água no sistema, e sugerindo que nessa concentração a CLA não prejudica a molhabilidade do cimento. Considerando o desvio padrão da argamassa 10%CLA em relação a 5%CLA, o máximo valor de 10%CLA se aproxima do mínimo valor de 5%CLA, o que leva a crer que até 10% de substituição são valores aceitáveis para este parâmetro, visto que a argamassa só vai trabalhar à tração ao ser solicitada para tal esforço. Já para a argamassa 20%CLA o sistema não responde bem à tração.

4.3.2 Resistência potencial aderência à tração

O aspecto final das argamassas após a realização do ensaio de resistência de aderência à tração pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 – Aspecto final das argamassas após o ensaio de resistência de aderência à tração.

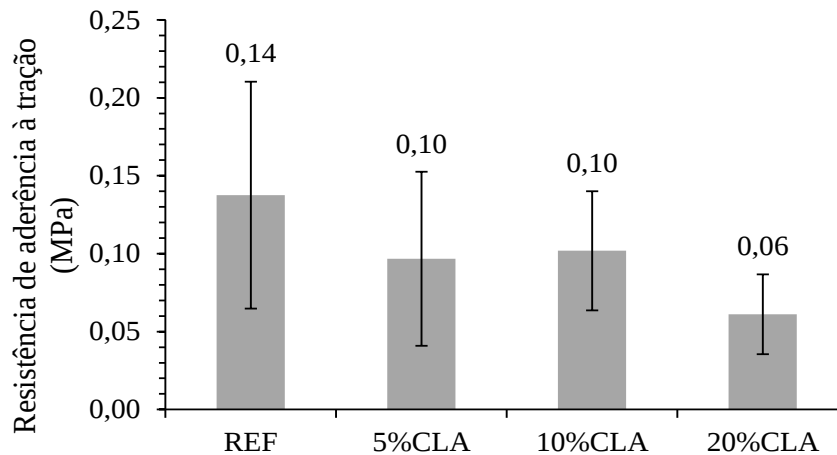


Fonte: A autora (2016).

A ruptura predominante nas argamassas com 0% de substituição foi do tipo A, com 5% de substituição foi do tipo C, com 10% de substituição foi do tipo C e com 20% de substituição foi do tipo B.

Apenas os valores obtidos no ensaio para o traço 20%CLA serem de fato o valor da resistência de aderência à tração, pois o tipo de ruptura B indica que a ruptura ocorreu na interface do substrato/argamassa. Já para os demais traços, a ruptura do CP não ocorreu totalmente na interface substrato/argamassa (situações A e C), então o valor da resistência à tração não foi determinado, estima-se que a aderência do revestimento à base seja maior do que o valor encontrado, impossibilitando a análise da influência da cinza neste parâmetro.

O ensaio de resistência de aderência à tração apresenta os resultados da resistência do revestimento a ser arrancado do substrato, parâmetro importante para aplicação de argamassa na prática, mostrados na Figura 30.

Figura 30 – Resistência de aderência à tração das argamassas.

Fonte: A autora (2016).

Para análise comparativa dos dados, foi aplicada uma análise estatística de variância (ANOVA), conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Análise estatística de variância da resistência de aderência à tração.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
REF	3	0,42	0,14	0,0053		
5%CLA	3	0,30	0,10	0,0031		
10%CLA	3	0,29	0,10	0,0015		
20%CIA	3	0,19	0,06	0,0007		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{calc}	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	0,01	3	0,002	0,80	0,53	4,07
Dentro dos grupos	0,02	8	0,003			
Total	0,03	11				

Fonte: A autora (2016).

De acordo com a análise estatística de variância, o teor de cinza não teve influência sobre a resistência potencial de aderência à tração ($F_{\text{calc}} < F_{\text{crítico}}$), confirmando que os dados encontrados no gráfico não são significativos. De fato, estima-se que a aderência do revestimento à base seja maior do que os valores encontrados, em função do tipo de ruptura encontrado na maioria dos CP's (tipos A e C).

Entretanto, estes resultados são suficientes para definir as argamassas como pertencentes à classe A1, segundo a NBR 13281 (2005) e conforme apresentado na Tabela 15, ou seja, mesmo com a presença de cinza, as argamassas se mantiveram na mesma classe A1.

Tabela 15 - Classificação das argamassas segundo sua resistência potencial de aderência à tração.

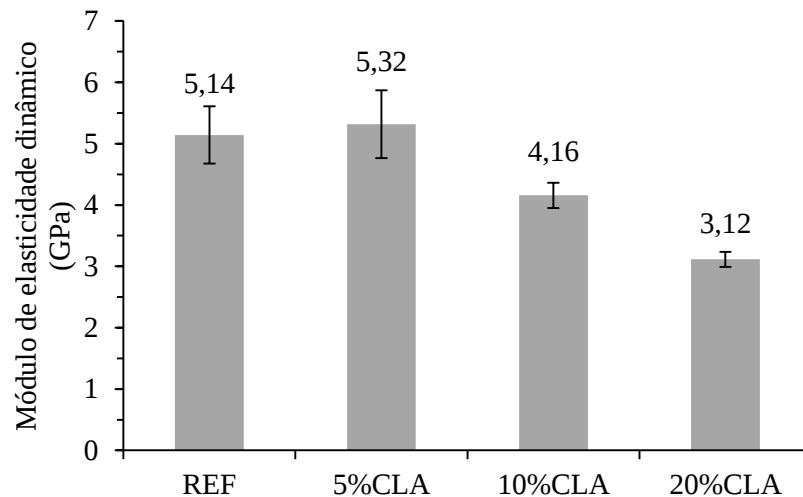
Classe	Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	Método de ensaio
A1	$< 0,20$	ABNT NBR 15258
A2	$\geq 0,20$	
A3	$\geq 0,30$	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005).

4.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico

Os valores do módulo de elasticidade para as argamassas estudadas estão apresentados na Figura 31.

Figura 31 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.



Fonte: A autora (2016).

Para análise comparativa dos dados, foi aplicada uma análise estatística de variância (ANOVA), conforme Tabela 16.

Tabela 16 – Análise estatística de variância do módulo de elasticidade dinâmico.

Grupo	Contagem	Soma	Média		Variância	
REF	6	30,84	5,14		0,218	
5%CLA	6	31,92	5,32		0,305	
10%CLA	6	24,98	4,16		0,042	
20%CLA	5	15,61	3,12		0,015	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{calc}	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	17,41	3	5,80	38,20	3,02969E-08	3,13
Dentro dos grupos	2,89	19	0,15			
Total	20,30	22				

Fonte: A autora (2016).

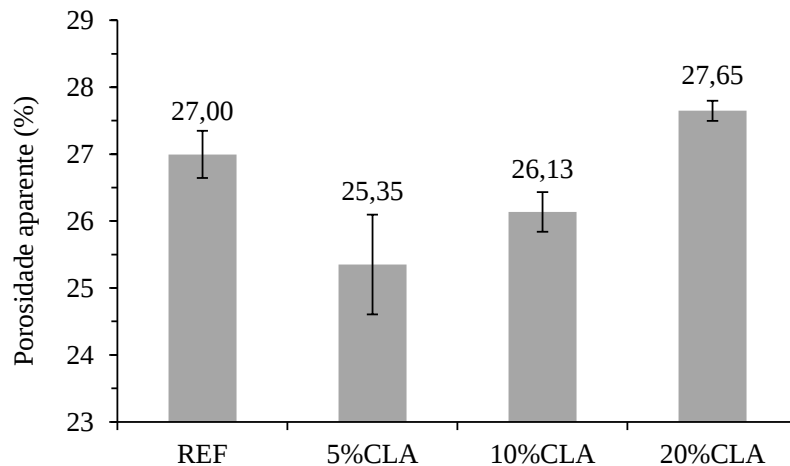
De acordo com a análise estatística de variância, o teor de cinza teve influência sobre o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas ($F_{\text{calc}} > F_{\text{crítico}}$), confirmando que os dados encontrados no gráfico são significativos.

Com a introdução do resíduo, a argamassa 5%CLA apresentou uma aumento em relação a REF de 3,5%. A partir de 10% de cinza houve uma tendência à diminuição do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, até os 20% de substituição, de 19,1% e 39,3%, respectivamente, em relação a REF.

No caso da argamassa 5%CLA, este arranjo favoreceu em manter o módulo de elasticidade dinâmico, e a menor quantidade de água ainda favoreceu o aumento do parâmetro em relação a REF. Considerando o desvio padrão da argamassa 10%CLA em relação a 5%CLA, o máximo valor de 10%CLA se aproxima do mínimo valor de 5%CLA, o que leva a crer que até 10% de substituição são valores aceitáveis para este parâmetro. Já para a argamassa 20%CLA o sistema não responde bem com 20% de substituição, o que entra em concordância com os demais ensaios no estado endurecido já analisados.

4.3.4 Porosidade

Na Figura 32, é apresentado o gráfico da porosidade aparente em função ao teor de cinza de algaroba das argamassas.

Figura 32 – Porosidade aparente das argamassas.

Fonte: A autora (2016).

Para análise comparativa dos dados, foi aplicada uma análise estatística de variância (ANOVA), conforme Tabela 17.

Tabela 17 – Análise estatística de variância da porosidade.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
REF	6	161,97	27,00	0,12		
5%CLA	6	152,10	25,35	0,55		
10%CLA	6	156,81	26,13	0,09		
20%CLA	6	165,89	27,65	0,02		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{calc}	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	18,08	3	6,03	30,51	1,16465E-07	3,10
Dentro dos grupos	3,95	20	0,20			
Total	22,04	23				

Fonte: A autora (2016).

De acordo com a análise estatística de variância, o teor de cinza influencia a porosidade das argamassas ($F_{\text{calc}} > F_{\text{crítico}}$), confirmando que os dados encontrados no gráfico são significativos.

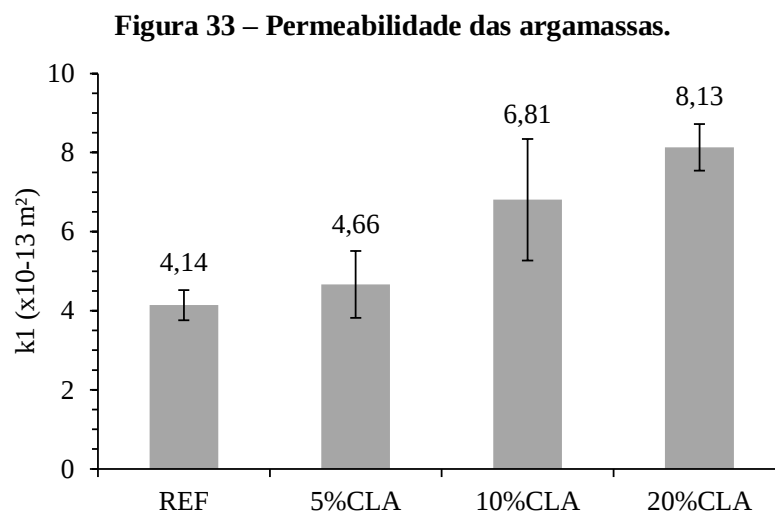
Apesar da redução inicial do valor médio de 6,11% no valor da porosidade da argamassa 5%CLA em relação a REF, através do desvio padrão é possível perceber que o máximo valor alcançado pela argamassa 5%CLA é bem próximo do valor mínimo alcançado pela argamassa REF, o que sugere que esta redução não tenha sido tão significativa. Dentro do desvio padrão, até 10% de substituição não há alterações significativas neste parâmetro. No entanto, a partir do traço 10%CLA, há uma tendência de aumento dos valores médios da porosidade até os 20% de substituição. Esse aumento da porosidade de 2,41% da argamassa 20%CLA em relação a

REF, é devido a menor quantidade de água de amassamento presente na mistura, que possivelmente pode ter interferido nas reações de hidratação do cimento e na forma de consolidação da microestrutura da argamassa endurecida.

4.3.5 Permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade que varia de acordo com a microestrutura do material estudado (quantidade de vazios existentes), distribuição, morfologia e conectividade dos poros.

Os valores de permeabilidade são representados através da constante de permeabilidade K_1 , independentemente do fluido permeante ou das variáveis de escoamento, e são apresentados na Figura 33, para cada traço estudado.



Fonte: A autora (2016).

Para análise comparativa dos dados, foi aplicada uma análise estatística de variância (ANOVA), conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Análise estatística de variância da permeabilidade.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
REF	6	24,85	4,14	0,15		
5%CLA	6	27,98	4,66	0,71		
10%CLA	6	40,85	6,81	2,37		
20%CLA	6	48,80	8,13	0,35		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{calc}	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	62,55	3	20,85	23,34	9,70011E-07	3,10
Dentro dos grupos	17,87	20	0,89			
Total	80,42	23				

Fonte: A autora (2016).

De acordo com a análise estatística de variância, o teor de cinza influencia a permeabilidade das argamassas ($F_{\text{calc}} > F_{\text{crítico}}$), confirmando que os dados encontrados no gráfico são significativos.

Analisando os valores do gráfico, é possível observar que o aumento de 12,6% da argamassa 5%CLA em relação a REF, não foi tão significativo, devido a sobreposição dos desvios padrões. No caso da argamassa 10%CLA, houve uma tendência ao aumento em relação a REF, analisando os valores médios. No entanto, o desvio padrão mostra que o máximo valor da REF se aproxima do mínimo valor da 10%CLA, o que leva a crer que existem valores com 10% de substituição próximos a referência. Comparando o de 20%CLA em relação ao REF, realmente houve um aumento da permeabilidade dos valores médios de 96,37%, o que significa que 20% de substituição contribui para uma argamassa mais permeável.

5 CONCLUSÕES

Foi possível a substituição parcial do cimento Portland por cinza de algaroba, nas proporções de 5%, 10% e 20% em termos das propriedades nos estado fresco e endurecido. A semelhança granulométrica da cinza com o cimento ratificaram a possibilidade desta substituição. Durante a moldagem, mesmo com a presença da CLA nas argamassas, não foram identificadas diferenças táteis-visuais durante o processo de conformação

As argamassas com teores de 5% de cinza preservam as propriedades do sistema compatíveis com as propriedades da argamassas de referência (sem cinza). Porém, até 10% de substituição é possível a introdução deste resíduo, beneficiado em malha 200, em termos de estado fresco e estado endurecido, sem prejuízos aos sistemas cimentícios, proporcionando alterações mínimas em relação a argamassa de referência. Os resultados mostram que o sistema não está apto à incorporação de 20% de cinza. É possível que exista um ponto ótimo de substituição entre 5% e 10% que otimiza o sistema e permite substituições além dos 5%, e abaixo dos 10%, que não comprometa o sistema e garanta as propriedades das argamassas em termos dos estados fresco e endurecido.

Além disso, a presença da cinza favoreceu, em todas as argamassas, a redução no teor de água de amassamento, de modo a manter o mesmo torque inicial de mistura para todas as argamassas.

As seguintes conclusões pontuais respondem a cada um dos objetivos específicos propostos:

- Quanto a caracterização física da cinza de algaroba, apesar da CLA e do CPV-ARI terem massas unitárias semelhantes, a massa específica real da CLA foi menor do que a do CPV-ARI, e a área superficial específica da CLA foi maior do que a do CPV-ARI. Além disso, foi verificado que a CLA possui granulometria similar à do CPV-ARI, o que foi positivo em termos de substituição. Quimicamente, a cinza é composta basicamente de carbonato de cálcio (CaCO_3), o que pode proporcionar um melhor empacotamento do sistema, atuando como *filler*.
- Mesmo o sistema com a presença da cinza indicar absorver mais água (de acordo com a análise física), com o aumento do teor de cinza na formulação das argamassas, houve uma diminuição da quantidade de água necessária para manter o mesmo torque inicial para todas as argamassas no momento da mistura. O que é extremamente positivo para influenciar as demais propriedades. Precisou de menos água porque a cinza não absorveu a água de amassamento, ela deixa a água livre no sistema para que o cimento

realize suas reações de hidratação. Se há menos cimento na mistura, haverá uma menor demanda de água pelo sistema, visto que a cinza não interfere na quantidade de água necessária para a realização das reações de hidratação. Neste sentido, a cinza favoreceu o empacotamento do sistema, contribuiu para um maior deslizamento entre as partículas, isso fez com que a argamassa demandasse menos água para atingir o mesmo torque de mistura.

- De um modo geral, as propriedades no estado fresco tiveram interferências positivas em até 10% de substituição do cimento pela cinza. No estudo reológico das argamassas, foi possível perceber, que mesmo com a presença de maiores teores de cinza no sistema e menores quantidades de água, houve uma melhora nas propriedades das argamassas em até 10% de substituição. Na reometria de mistura, as argamassas REF e 5%CLA apresentaram comportamento semelhantes, e as argamassas 10%CLA e 20%CLA também apresentaram comportamento semelhante entre si. O aumento do teor de cinza proporcionou maiores torques de mistura, sendo necessário colocar mais energia de mistura para conformação da argamassa. Mesmo assim, com maiores torques de mistura, todas as argamassas se mantiveram no intervalo de $2,20 \pm 0,33$ Nm do torque final. O torque máximo, observado no ciclo de cisalhamento, foram semelhantes para as argamassas REF, 5%CLA e 10%CLA, sendo maior na presença de 20% da cinza (20%CLA). Além disso, outros parâmetros são retirados do ensaio de reometria de cisalhamento, como viscosidade plástica e torque de escoamento. Até 10% de substituição as argamassas apresentaram uma diminuição da viscosidade plástica, ou seja, maior facilidade de espalhamento, e consequentemente aumento do torque de escoamento. No entanto, a argamassa 20%CLA, não acompanhou a mesma tendência de comportamento das demais, apresentou um aumento na viscosidade plástica e diminuição no torque de escoamento. Na reometria compressiva (*squeeze flow*), devido a menor quantidade de água no sistema, houve uma diminuição da plasticidade das argamassas para até 10% de substituição, caracterizada pela diminuição do deslocamento em função da solicitação da carga. Com 20% de substituição, há um aumento no deslocamento da argamassa. A densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas não apresentaram variações significativas quando da substituição do cimento pela cinza. Na prática, no ensaio de aderência inicial das argamassas no substrato realizado pelo pedreiro, as argamassas apresentaram boa trabalhabilidade em até 10% de substituição, sendo um pouco desfavorável com 20% de substituição. No

entanto, de um modo geral, o pedreiro declarou que usaria todas as argamassas, sem maiores problemas.

- Nas propriedades do estado endurecido, de uma forma geral, em função dos valores médios analisados, até 5% de substituição não há interferência negativa da cinza nestas propriedades. Em algumas propriedades, até 10% é observada também interferências positivas no sistema. Na resistência à tração por compressão diametral, não houve alteração significativa em relação as argamassas REF e 5%CLA, mas o parâmetro foi reduzido em 45,54% em relação a REF, quando da substituição de 20%. Na resistência potencial de aderência à tração, dentro do desvio padrão analisado, praticamente não houve alterações significativas até os 10% de substituição. Já em 20% de substituição, houve uma redução de 57% neste parâmetro em relação a REF. No entanto, todos os valores encontrados para as resistências estão em conformidade com a NBR 13281 (ABNT, 2005). Os valores médios do módulo de elasticidade das argamassas REF e 5%CLA praticamente são os mesmos, apresentando apenas uma redução da argamassa 10%CLA para a 20%CLA, sendo reduzido o parâmetro em 39,3% em relação a REF, quando da substituição de 20%. Tanto na porosidade como na permeabilidade, até os 10% de substituição não apresentaram alterações significativas. No entanto, com 20% de substituição, a argamassa torna-se mais porosa e permeável.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomendam-se para trabalhos futuros os itens que seguem:

- Avaliar a influência das substituições do cimento pela cinza entre 5% e 10%, de modo a encontrar o limite de cinza (ponto de estabilização da argamassa) que pode ser usado, sem comprometer as propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido. Sugestões de porcentagens de substituição: 5%, 6%, 7%, 8%, 9 e 10%;
- Caracterizar a cinza de algaroba pelo ensaio de potencial zeta, para analisar o quanto as partículas de cinza atraem ou repelem as partículas de água, ou seja, a afinidade do resíduo com a água;
- Realizar outros ensaios no estado fresco, para complementação dos resultados, tais como: retenção de água e calorimetria de condução isotérmica;
- Realizar outros ensaios no estado endurecido, para complementação dos resultados, tais como: resistência à compressão, resistência à flexão, absorção de água total e por capilaridade e retração/expansão;
- Avaliar o estudo reológico as argamassas mantendo a relação água/cimento (a/c) constante;
- Avaliar microestruturalmente as argamassas no seu estado endurecido através da análise de MEV; e
- Avaliar as argamassas contendo cinza de algaroba no seu estado endurecido em termos de durabilidade.

REFERÊNCIAS

- AGRA, T. M. D. S. **Desenvolvimento de argamassas com adição de até 10% de cinzas de algaroba**. 2013. 61 p. Monografia (graduação). Curso de Graduação em Engenharia Civil, UFPE, Caruaru - PE.
- AITCIN, P. **Hight-performance concrete**. Canada: Editora E & FN SPON, 2004.
- ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2005. 162p. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo - SP.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6453**: Cal virgem para construção civil – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**: Revestimento

de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15839**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

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

BEZERRA, I. M. T. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento**. 2010. 108p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UFCG, Campina Grande - PB.

BORLINI, M. C., et al. Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. Parte I: características da cinza. **Cerâmica**, v. 51, n.319, p. 192-196, 2005.

CAPELLO, G. Cimento ecológico: produto tem nível de CO₂ reduzido em sua fórmula, causando menos impactos no meio ambiente. **Arquitetura & Construção**, São Paulo, fev. 2008. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/casa/conteudo_270173.shtml>. Acesso em: fev. 2015.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 2, cap. 6, p. 1712, 2007.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 5, p. 748–753, 2009.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G.; BANFILL, P. F. G. Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p. 79–87, 2014.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. Boletim técnico da Escola politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/ 237. São Paulo, 1999.

CHEAH, C. B.; RAMLI, M. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 7, p. 669-685, 2011.

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**, v. 30, n. 0, p. 320-329, 5// 2012.

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

COSTA, M. do R. de M. M. da. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. 2006. 131p. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Urbana, USP, São Paulo - SP.

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

DE LARRARD, F. Concrete mixture proportioning. In: **Modern Concrete Technology Series**. London, p. 421, 1999.

ETIÉGNI, L.; CAMPBELL, A. G. Physical and chemical characteristics of wood ash. **Bioresource Technology**, v. 37, n. 2, p. 173-178, 1991.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: PINI, p. 341, 2002.

<<http://www.ifsertao-pe.edu.br/pronatec/index.php/noticias/103-coordenacao-do-pronatec-reune-se-com-a-reitoria-para-definir-a-oferta-de-cursos-em-2014>>. Acesso em: dez. 2015.

JOHN, V.M. Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas. In: **V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. São Paulo: Anais, p. 47-62, 2003.

JULIO, A. L.; GRUB, J.; BAGNARA, D.; DIPP, G. H.; ABREU, A. G. Utilização de cinzas provenientes da queima de madeira em caldeira de agroindústria como aditivo em argamassas para fins não estruturais. **VI Simpósio de Engenharia Ambiental do Espírito Santo - SEA**, p. 5, 2011.

KANNING, R. C. **Utilização de cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland**. 2013. 194p. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE), UFPR, Curitiba - PR.

LELOUP, W. D. A. **Efeitos da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland**. 2013. 110p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru - PE.

MARQUES, M. L.; CAMPOS, K. D. A. Estudo da adição do pó de pedra em argamassas de revestimento e assentamento. **Pindorama - Revista Eletrônica Científica do IFBA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia)** v. 3, n. 3, p. 150-164, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 1994.

MELO, F. C. A. C. D. **Análise de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinza residual de lenha de algaroba**. 2012. 103p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC), UFRN, Natal - RN.

MELO, M. C. S. D. **Estudo de argamassas adicionadas de cinza de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do Agreste Pernambucano**. 2012. 120p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru - PE.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinza de madeira de algaroba (*prosopis juliflora*) moldado sob pressão**. 2014. 123p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru - PE.

NASCIMENTO, J. E. M. F. D. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento**. 2014. 106p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru - PE.

PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. Conceitos reológicos aplicados no desenvolvimento de argamassas. **Revista de ciência e tecnologia de materiais de construção civil**. v. 3, n. 2, p. 62-76, 11// 2006.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em pasta**. 2008. 172p. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, USP, São Paulo - SP.

RAMOS, T.; MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion. **Construction and Building Materials**, v. 49, n. 0, p. 343-351, 12// 2013.

Relatório de ensaio Nº 1002 da MMC LAB – Controle Tecnológico LTDA. Ensaio de resistência de aderência à tração. 2013.

RIBASKI, J.; DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R.; NASCIMENTO, C. E. S. Algaroba (*Prosopis juliflora*): árvore de uso múltiplo para a Região Semiárida Brasileira. **Comunicado Técnico 240, Embrapa Florestas, Colombo - PR**, p. 8, 10// 2009.

ROCHA, A. K. A. **Incorporação de Resíduo de Caulim em Argamassas de Alvenaria**. 2005. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande – PB.

ROMANO, R. C. O. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**. 2013. 227p. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo - SP.

SÁ, M. D. V. V. A. D. **Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos**. 2006. 140p. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), UFRN, Natal - RN.

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

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

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

SILVA, R. D. P. **Argamassa com adição de fibra de polipropileno - Estudo do comportamento reológico e mecânico**. 2006. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo – SP.

TAYLOR, H. F. W. **The chemistry of cement**, London: Academic Press, 1997.