



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

Jônatas Elim Maciel Frutuoso do Nascimento

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA SUBSTITUIÇÃO DA CAL HIDRATADA POR
CINZAS DE ALGAROBA EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Caruaru

2014

Jônatas Elim Maciel Frutuoso do Nascimento

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA SUBSTITUIÇÃO DA CAL HIDRATADA POR
CINZAS DE ALGAROBA EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

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

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

Caruaru

2014

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Paula Silva CRB/4- 1223

N244a Nascimento, Jônatas Elim Maciel Frutuoso do.
Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento / Jônatas Elim Maciel Frutuoso do Nascimento - Caruaru: O Autor, 2014.
99f.; il.; 30 cm.

Orientador: Prof^ª Dr^ª Ana Cecília Vieira da Nóbrega.
Dissertação – Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Núcleo de Tecnologia - Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, 2014.
Inclui referências.

1. Argamassa. 2. Cal. 3. Algaroba. 4. Madeira. 5. Construção civil. I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da (Orientadora). II. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2014-001)



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

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA SUBSTITUIÇÃO DA CAL
HIDRATADA POR CINZAS DE ALGAROBA EM ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO**

Defendida por

JÔNATAS ELIM MACIEL FRUTUOSO DO NASCIMENTO

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 25 de fevereiro de 2014

ANA CECÍLIA VIERIRA DA NOBREGA – PPGECAM/UFPE
(presidente da banca)

HUMBERTO CORREIA LIMA JÚNIOR – PPGECAM/UFPE
(examinador interno)

Antônio Eduardo Martinelli – PPGECAM/UFRN
(examinador interno)

Ao Deus todo poderoso que pela sua maravilhosa graça, permitiu o desenvolvimento e conclusão desse trabalho.

A minha maravilhosa esposa Elifalety e ao meu lindo filho Levi, que compreenderam a ausência e me apoiaram nos momentos difíceis com seu amor.

Aos meus pais e avós pelos exemplos de determinação, me ensinando a nunca fraquejar nos momentos de dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Ao único **Deus**, criador e eterno, que através do dom da vida e intelectualidade a mim concedida, possibilitou alcançar meus objetivos;

A minha esposa **Elifalety** e ao meu filho **Levi**, que compreenderam os momentos de ausência;

Aos meus pais **Elias Frutuoso** e **Edilene Maciel** pelo apoio e incentivo contínuo;

A minha avó **Maria da Paz** que com seu carinho me deu força para continuar;

A minha querida sogra **Laodecia Gabriel** por suas constantes orações e incentivo a prosseguir;

Aos meus grandes amigos **Ricardo, Márcio, Germano e Mariana**, parceiros de estudo durante o mestrado, que me estimularam a fazer sempre o melhor;

Ao meu grande amigo **Eng. Dr. Cesar Romano da escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, por suas constantes e fundamentais contribuições nos conceitos e experimentos reológicos;

Ao **Prof. Dr. Rafael Pileggi (USP)**, por sua boa vontade em ser o meu tutor no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo;

À **Coordenação de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (UFPE-CAA)**, especialmente na pessoa do Prof. Dr. Humberto Correia Lima Júnior, pelo incentivo e apoio para desenvolvimento do trabalho;

À **Profa. Dra. Érika Marinho** e ao **Prof. Dr. Humberto Correia (UFPE-CAA)** pelos valorosos e pertinentes comentários durante a qualificação da dissertação;

Aos técnicos administrativos da Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (UFPE-CAA) **Samuel Kisseberg** e **Helder Caran**, pela boa vontade em resolver os problemas burocráticos;

À técnica de Laboratório de Materiais Construtivos (UFPE-CAA) **Fábiola Freire**, por colaborar com muita boa vontade na execução dos experimentos;

Ao técnico do Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, **Mario S. Takeashi**, por sua colaboração na caracterização dos materiais;

Aos amigos **Franco e Renan**, pela fundamental colaboração nos ensaios do estado endurecido;

Ao amigo e aluno bolsista de iniciação científica do curso de Engenharia Civil (UFPE_CAA), **Edmilson** pelo auxílio na execução de parte dos ensaios;

Ao **Sr. Silvano Silva**, da Lavanderia Nova Geração, pelo fornecimento das cinzas de Algaroba utilizadas no estudo realizado;

Em especial, a minha orientadora **Profa. Dra. Ana Cecília Vieira Nóbrega** (UFPE-CAA), pela dedicação incansável, corroborando com os estudos realizados em sua totalidade; dando seu apoio irrestrito na realização dos experimentos e suas respectivas discussões; os quais me permitiram chegar ao término do mestrado com segurança e entusiasmo.

À **FACEPE**, pelo apoio financeiro, bem como ao projeto **Casadinho**, por viabilizar o intercâmbio com a **UFRN** e a **USP**.

“Bem-aventurado o homem que encontra sabedoria, e o homem que adquiri conhecimento, pois ela é mais proveitosa do que a prata e dá mais lucro que o ouro (...) tudo que podes desejar não se compara a ela.”

Rei Salomão.

RESUMO

O presente trabalho investiga a influência da substituição gradual da cal hidratada CH I pela cinza de Algaroba (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) em termos de propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido, tendo-se como hipótese norteadora do estudo que essas argamassas alternativas possuem características usuais à aplicação em obra. Foi avaliado o traço em volume 1:2:x:9 (cimento, cal, cinza, areia) para duas condições: quantidade de água constante e consistência constante, tomando como base a argamassa de referência (0% de cinza). Para tanto foram avaliados no estado fresco: reologia das argamassas (reometria de mistura, reometria de cisalhamento e reometria compressiva - *Squeeze Flow*); retenção de água; calorimetria de condução isotérmica; e, densidade de massa e teor de ar incorporado. No estado endurecido: permeabilidade; porosidade; absorção capilar; e, resistências à tração diametral, à flexão e à compressão. Todos os ensaios obedeceram a preconizações da ABNT. Além disso, também foi caracterizada a cinza de Algaroba físico-química e microestruturalmente. 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 as propriedades reológicas e mecânicas das argamassas mistas. As semelhanças físico-químicas da cinza (carbonato de cálcio) com cales CH III, cujos nos componentes químicos estão inclusas quantidades significativas de CaCO_3 , ratificam essa compatibilidade da cinza de Algaroba com sistemas cimentícios em substituição à cal. A presença da cinza de Algaroba em substituição parcial da cal reduz a necessidade de água do sistema, podendo, ainda, se ter ajustes de otimização na dosagem. Por fim, ensaios de calorimetria de condução isotérmica indicaram que a presença do resíduo possibilitou a criação de novos de nucleação das fases hidratadas do cimento, com alterações nas quatro regiões de hidratação.

Palavras-chave: argamassa; cal hidratada; cálcio; Algaroba; cinza de madeira; estado fresco e endurecido.

ABSTRACT

This study investigates the influence of the gradual replacement of CH I hydrated lime by Algaroba ash (0% , 25% , 50% , 75% , 100%). It was evaluated the properties of mortars in fresh and hardened states, taking into account that these alternative mortars can be applied on building site. It was evaluated the mix by volume 1:2:x:9 (cement, lime, ash, sand) for two conditions: constant amount of water and constant consistency, based on the reference mortar (0% ash). It was carried out in the fresh state: rheology of mortars (mixture, compressive and shear rheometers - squeeze flow), water retention; isothermal conduction calorimetry, mass density and content of entrained air. In the hardened state: permeability, porosity, capillary absorption and diametrical traction, flexural and compressive strength. All tests were carried out based on the ABNT normalizations. Furthermore, the ashes were also characterized physico-chemical and microstructural. The results indicated that it is possible to replace up to 100% lime by ash sieved in the 200 mesh without compromising properties of the cementitious systems with minimal changes from the rheological and mechanical properties of composite mortars. There is a physico-chemical similarities between the ash (calcium carbonate) and the CH III limes, that contain significant amounts of CaCO_3 . This fact confirms this compatibility between the Algaroba ash and the cementitious systems in order to replace lime. Moreover, the presence of ash in partial substitution of lime reduces the need for water in the system. It is positive because may also improve adjustments in mixing optimization. Finally, isothermal calorimetry tests indicated that the presence of the residue allowed the creation of new nucleation sites to the hydrated cement phases, with were observed based on changes in four regions of hydration.

Keywords: mortar; hydrated lime; Algaroba; calcium; wood ash; fresh and hardened state.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Metodologia experimental esquematizada em diagrama de blocos.....	12
Figura 2 – Descarte da cinza no meio ambiente local. Fonte: figura do autor, 2014.	30
Figura 3 – Tratamento do cinza de Algaroba, através de peneiramento. Fonte: figura do autor, 2014.	32
Figura 4 – Aparatos usados para determinação da massa unitária das materiais primas. Fonte: Figura do autor, 2014.	33
Figura 5 – Granulômetro a laser, Malvern – Mastersizer S long bed Ver 2.19, utilizado para caracterização da distribuição dos diâmetros de partículas. Fonte: (ROMANO, R. C. D. O., 2013).	37
Figura 6 – Equipamento para medida da área de superfície específica, Gemini 2375, Micromeritics. Fonte: (ROMANO, R. C. D. O., 2013).	38
Figura 7 – Picnômetro de gás Hélio, Quantachrome MVP 5DC. Fonte: (ROMANO, R. C. D. O., 2013).	38
Figura 8 – Equipamento utilizado para realização de análise térmica, Netzsch, modelo TASC 414/4 acoplado a uma termobalança – STA409EP. Fonte:(ROMANO, R. C. D. O., 2013).....	39
Figura 9 – Difratorômetro de raio-x <i>Empyrean, Panalytical</i> utilizado para caracterização mineralógica da cinza de Algaroba. Fonte: Romano, (2013).....	40
Figura 10 – Reômetro planetário, utilizado para avaliação das propriedades reológicas das argamassas. Fonte: Mario S. Takeashi.	41
Figura 11 – Etapas para início do ensaio no reômetro. Fonte: Mario S. Takeashi. ...	42
Figura 12 – Programa de mistura do ciclo de cisalhamento. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.	42
Figura 13 – Programa de mistura utilizado para a caracterização reológica das argamassas. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.....	43
Figura 14 – Etapas da preparação da amostra de argamassa para o ensaio de <i>squeeze flow</i> . Fonte: Mario S. Takeashi.	44
Figura 15 – Ilustração do ensaio de <i>squeeze flow</i> em argamassas. Fonte: Mario S. Takeashi.....	44
Figura 16 – Preparação das amostras para realização dos ensaios de calorimetria de condução isotérmica. (a) Adição da mistura de finos e água nos recipientes, (b) Vedação, (c) Inserção dos recipientes no equipamento. Fonte: Mario S. Takeashi. .	46

Figura 17 – Equipamento para avaliação da permeabilidade de superfície, vacuum-decay. Fonte: Mario S. Takeashi.....	52
Figura 18 – Distribuição Granulométrica das matérias prima que compõem as argamassas estudadas. Fonte: figura do autor, 2014.	53
Figura 19 – Análise termogravimétrica do cimento CPV ARI. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.	54
Figura 20 – Análise termogravimétrica da cal hidratada CH I. Fonte: figura do autor , (2014).....	55
Figura 21 – Difração de raios – X do cimento CPV ARI. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.	55
Figura 22 – Difração de raios-X da cal hidratada CH I. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.	56
Figura 23 – Difração de Raios-X da cinza de Algaroba. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.	58
Figura 24 – Analise termogravimétrica da cinza de Algaroba. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.	59
Figura 25 – Microscopia eletrônica de varredura. (LELOUP, 2013).....	60
Figura 26 - Densidade no estado fresco e conteúdo em porcentagem de volume das distintas fases para argamassas mantendo quantidade de água constante. Fonte: figura do autor, 2014.	61
Figura 27 - Densidade no estado fresco e conteúdo em porcentagem de volume das distintas fases para argamassas mantendo quantidade de consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.	61
Figura 28 - Reometria de mistura (torque versus tempo) mantendo água de amassamento constante (875g) (a) e consistência constante (b). Fonte: figura do autor, 2014.	64
Figura 29 - Energia de mistura mantendo água de amassamento constante (875g) e consistência constante, comparativamente. Fonte: figura do autor, 2014.....	66
Figura 30 – Energia de Mistura vs MPT, água constante e consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.	67
Figura 31 - Perfil de fluxo de cisalhamento das argamassas mantendo água constante.....	68
Figura 32 - Perfil de fluxo de cisalhamento das argamassas mantendo consistência constante.....	68

Figura 33 - Área de Histerese mantendo água de amassamento constante (875g) e consistência constante, comparativamente.....	69
Figura 34 - Torque de escoamento mantendo água de amassamento constante (875g) e consistência constante, comparativamente.	70
Figura 35 - Perfil de fluxo de cisalhamento das argamassas por Squeeze Flow para 10 min mantendo água de amassamento constante (875g) (a) e mantendo consistência constante (b).....	71
Figura 36 - Perfil de fluxo de cisalhamento das argamassas por Squeeze Flow para 45 min mantendo água de amassamento constante (875g) (a) e mantendo consistência constante (b).....	71
Figura 37. Viscosidade aparente das argamassas mantendo água de amassamento constante (875g) (a) e mantendo consistência constante (b).....	73
Figura 38 – Retenção de água. Fonte: imagem do autor, 2014.	74
Figura 39 – Representação esquemática das curvas de calor de hidratação e critérios para determinação das variáveis. Fonte: Adaptação de (BETIOLI, 2007). ...	46
Figura 40 – Curvas de calor de hidratação das pastas. Fonte: figura do autor, 2014.	75
Figura 41 – Curvas do calor acumulado de hidratação das pastas. Fonte: figura do autor, 2014.	75
Figura 42 – Tempo de hidratação versus porcentagem de cinza na pasta. Fonte: figura do autor, 2014.	77
Figura 43 – Calor de hidratação versus porcentagem de cinza na pasta. Fonte: figura do autor, 2014.	77
Figura 44 – Taxa de reação versus porcentagem de cinza na pasta. Fonte: figura do autor, 2014.	78
Figura 45 – Densidade de massa água constante. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.	79
A Figura 46 apresenta as densidade de massas na condição de água constante; onde constatou-se que, ao substituir a cal hidratada ($2,62 \text{ g/cm}^3$) por cinza de Algaroba ($2,86 \text{ g/cm}^3$), as argamassas ficaram mais densas à medida que a fração de cinza aumenta.	79
Figura 47 - Densidade de massa consistência constante. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.	79

Figura 48 - Teor de ar incorporado mantendo água de amassamento constante (875g) e consistência constante, comparativamente. Fonte: figura do autor, 2014. .80	
Figura 49 – Permeabilidade Darciana (k_1) em função da porosidade aparente. Fonte: figura do autor, 2014.81	81
Figura 50 – Permeabilidade em função do teor de cinza água constante e consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.82	82
Figura 51 – Porosidade aparente em função do teor de cinza de Algaroba. Fonte: figura do autor, 2014.83	83
Figura 52 – Absorção de água por capilaridade, em condições de consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.....85	85
Figura 53 – Coeficiente de capilaridade, em condições de consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.85	85
Figura 54 – Resistência à tração diametral, água constante. Fonte: figura do autor, 2014.86	86
Figura 55 - Resistência à tração diametral, consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.87	87
Figura 56 – Resistência à flexão (consistência constante). Fonte: figura do autor, 2014.88	88
Figura 57 – Resistencia à compressão (consistência constante). Fonte: figura do autor, 2014.89	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exigência química das cales hidratadas no nacionais.....	27
Tabela 2 – Massas Unitárias das matérias primas anidras	33
Tabela 3 - Traços em Volume das argamassas estudadas	33
Tabela 4 – Traços em Massa para preparo de 3 kg de argamassa	34
Tabela 5 – Quantidade de água em massa utilizada nas argamassas estudadas....	34
Tabela 6 - Características químicas do cimento.....	35
Tabela 7 - Características físicas do cimento.....	35
Tabela 8 – Análise química da cal hidratada.....	36
Tabela 9 - Análise física da cal hidratada.....	36
Tabela 10 – Caracterização das matérias-primas. Fonte: tabela do autor, (2014)....	53
Tabela 11 - Parâmetros físico-químicos da cinza de Algaroba.	56
Tabela 12 - Resultados de FRX do resíduo de cinza de Algaroba.....	57
Tabela 13 – Densidade do pó, porosidade de empacotamento teórico, distância de separação interparticular (IPS), espessura teórica da camada que separa os agregados (MPT) e áreas de superfície específica (AE) e volumétrica (ASV) das argamassas estudadas no trabalho em condições de água constante.	62
Tabela 14 - Densidade do pó, porosidade de empacotamento teórico, distância de separação interparticular (IPS), espessura teórica da camada que separa os agregados (MPT) e áreas de superfície específica (AE) e volumétrica (ASV) das argamassas estudadas no trabalho em condições de consistência constante.	62
Os picos relativos ao comportamento inicial da mistura são baseados na interação entre partículas e, portanto, esse fenômeno não tem relação com os parâmetros de IPS e MPT, devido aos finos estarem aglomerados. Apesar da redução da área superficial específica da cinza em relação à cal, o aumento de densidade dos pós observados nas Tabela 15 e Tabela 16 corroborou para a aglutinação dos finos no estado inicial de mistura, proporcionando a retenção de líquidos no interior dos aglomerados. Acredita-se que a morfologia do resíduo (Figura 25, página 41) propicie a maior interação entre as partículas que a cal, com sua morfologia lamelar.	64
Tabela 17 - Período de Indução	76
Tabela 18 - Período de Aceleração.....	76

Tabela 19 - Período de Desaceleração.....	76
Tabela 20 – Classificação das argamassas, em condições de água constante, segundo resistência à aderência, conforme NBR 13281 (2005). Fonte: tabela do autor, 2014.	87
Tabela 21 - Classificação das argamassas, em condições de consistência constante, segundo resistência à aderência, conforme NBR 13281 (2005). Fonte: tabela do autor, 2014.	87
Tabela 22 – Classificação da argamassa segundo a resistência à flexão, NBR 13281 (2005).....	88
Tabela 23 - Classificação da argamassa segundo a resistência à compressão, NBR 13281 (2005).....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: *American Society for Testing Materials*

BET: Brunauer-Emmet-Teller

CP II F 32: Cimento Portland composto com *Filler* com resistência de 32 MPa aos 28 dias

C-S-H: Silicato de cálcio hidratado

C₂S: Silicato dicálcico

C₃A: Aluminato tricálcico

C₃S: Silicato tricálcico

C₄AF: Ferroaluminato tetracálcico

DRX: Difractometria ao raio-x

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

NM: Norma Mercosul

NBR: Norma Brasileira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1	Argamassas de revestimento: constituintes, propriedades e caracterizações microestruturais	16
2.1.1	Principais constituintes das argamassas de revestimento	17
2.1.2	Propriedades no estado fresco	18
2.1.3	Propriedades no estado endurecido.....	26
2.2	Uso da cal em argamassas de revestimento.....	27
2.2.1	Química do cimento relacionada às argamassas com cal	28
2.3	Uso de adições ricas em carbonato de cálcio em argamassas.....	29
2.3.1	Química do cimento das argamassas com adições ricas em carbonato de cálcio	29
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	30
3.1	Coleta e processamento das cinzas de Algaroba	30
3.2	Dosagem.....	32
3.3	Caracterização dos materiais de partida	35
3.3.1	Cimento Portland.....	35
3.3.2	Cal.....	36
3.3.3	Areia.....	36
3.3.4	Caracterização físico-química e microestrutural da cinza de Algaroba	37
3.4	Reometrias	41
3.4.1	Reometria de Mistura	41
3.4.2	Ciclo de Cisalhamento	42
3.4.3	Reômetria compressiva (squeeze flow)	43

3.5	Retenção de água (estado fresco)	45
3.6	Calorimetria de condução isotérmica	45
3.7	Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	47
3.8	Moldagem e cura dos corpos de prova	48
3.8.1	Ensaio de tração diametral.....	48
3.8.2	Ensaio de compressão, flexão e absorção total e capilar.....	48
3.9	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.....	49
3.10	Resistência à Tração na Compressão Diametral	49
3.11	Resistência à Flexão e à Compressão.....	50
3.12	Porosidade – método de imersão de Arquimedes	51
3.13	Permeabilidade das argamassas – <i>vacum-decay</i>	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Caracterização do cimento, da cal e da areia	53
4.1.1	Análises microestruturais	54
4.2	Caracterização da cinza de Algaroba.....	56
4.2.1	Análises microestruturais	57
4.3	Caracterização das argamassas	60
4.3.1	Avaliação do estado fresco	60
4.3.2	Estado endurecido	80
5	CONCLUSÕES.....	90
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
	REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

O emprego de argamassas de revestimento mistas com cal é usual na construção civil, de forma que suas propriedades reológicas no estado fresco e comportamento diferenciado no estado endurecido norteiam as condições necessárias para trabalhabilidades adequadas e durabilidade, envolvendo facilidade de homogeneização e aplicação do produto cimentício e maior resistência às intempéries.

Duas propriedades no estado fresco são melhoradas com a presença da cal hidratada nas argamassas: plasticidade e retenção de água. Ambas estão relacionadas, principalmente, com seu caráter fino de alta área superficial e forma hexagonal de cristal de Ca(OH)_2 com camadas lamelares, de modo a propiciar a formação de uma película de água ao redor das partículas de cal hidratada (gel), diminuindo a tensão superficial da pasta. Assim, efeito lubrificante de redução de atrito entre os grãos de areia, bem como capacidade de retenção de água em torno das partículas de cal, contribuindo para molhar perfeitamente os agregados, são fenômenos acrescidos ao sistema cimentício com sua presença.

A retração inicial também é minimizada. Além disso, ao reagir com o CO_2 , a água retida em torno de suas partículas é gradualmente liberada, colaborando com a hidratação do cimento nas primeiras idades. O estado endurecido também é favorecido, tanto em termos de redução no módulo de elasticidade, como em termos de carbontação lenta da cal a posteriori, o que faz com que a mesma funcione tamponando eventuais fissuras ocorridas no endurecimento, contribuindo assim para a durabilidade.

No entanto, no âmbito reológico, a cal, por conter finos lamelares, induz a um aumento na tensão de escoamento e na energia de mistura; uma vez que, ao aumentar a concentração de finos, aumenta-se também o torque necessário para homogeneizar a mesma massa de argamassa (CINCOTTO *et al.*, 1995). Além disso, a cal para ser extraída de rochas calcárias demanda uma grande quantidade de energia, eliminando no final da sinterização dióxido de carbono, corroborando com o efeito estufa.

Estudos preliminares indicam que a cinza de Algaroba é rica em carbonato de cálcio. O fato de existirem cales hidratadas cuja formulação química possui também

altos teores de carbonato de cálcio e são comumente usadas na construção civil (CH III) motivou a proposta da presente dissertação em substituir parte da cal hidratada em argamassas mistas pelo resíduo. Embora alguns autores cite a presença de óxido de cálcio (VASSILEV et al., 2010; BAN; RAMLI, 2011) em cinzas de madeira, a presença de carbono de cálcio é preponderante entre os autores (ETIÉGNI; CAMPBELL, 1991; VASSILEV et al., 2010). O carbonato de cálcio é formado a partir da queima do oxalato de cálcio a altas temperaturas produzidas durante o processo de queima da madeira, que, devido à absorção de dióxido de carbono da atmosfera que reage diretamente com o CaO, gera o carbonato de cálcio ($\text{CaO} + \text{CO}_2 (\text{ar}) \rightarrow \text{CaCO}_3$) (CHU et al., 2008).

Ressalta-se que a incorporação de cinzas de madeira em materiais cimentícios já vem sendo foco de estudos (BAN; RAMLI, 2011; CHEAH, C. B.; RAMLI, 2011; 2012; SIDDIQUE, 2012; CHEAH, C. B.; RAMLI, 2013; GARCIA; SOUSA-COUTINHO, 2013; GIRÓN et al., 2013; MODOLO et al., 2013; RAMOS; MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2013; CHEAH, C. B.; RAMLI, 2014). Os autores reportam que as cinzas de madeira vir a atuar positivamente no sistema cimentício em termos de propriedades do estado fresco e endurecido das argamassas.

A presente dissertação ratifica-se embasada no problema ambiental de descarte das cinzas de madeira de difícil destinação final (ETIÉGNI; CAMPBELL, 1991; BAN; RAMLI, 2011), geradas em grandes quantidades, seja por indústrias de madeira ou provenientes da queima de indústrias para geração de energia (BAN; RAMLI, 2011). Por ser muito fina e leve (BAN; RAMLI, 2011) tem um potencial poluidor do ar (BAN; RAMLI, 2011), água e solo, de forma que surge a necessidade de destinação ecologicamente correta do resíduo.

A Algaroba, denominada cientificamente *Prosopis Juliflor*, tem um rápido crescimento, ocupando rapidamente a área em que foi inserida, de forma que prejudica as espécies nativas. A madeira da Algarobeira é uma solução viável como matriz energética, devido a um bom rendimento gravimétrico de carbonização na ordem de 43% e geração de cinza de 1,6%. (Comunicado Técnico, 240 – EMBRAPA 2009). As indústrias têxteis do Agreste pernambucano utilizam essa biomassa como fonte de energia para aquecimento de caldeiras. Caracterizações físico-químicas e microestruturais da cinza de Algaroba indicaram que é rica em carbonato de cálcio, assim como outras cinzas de madeira, de morfologia esférica com superfície levemente enrugada e porosa.

Apesar das cinzas não terem a mesma constituição química da cal hidratada, fenômenos físicos podem interferir e reger o comportamento reológico do sistema. A hipótese é calcada no fato de ao se substituir parte da cal da argamassa pela cinza de madeira, ter-se-á melhoria ou, manutenção, nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, seja por efeito rolamento, seja por efeito de empacotamento. Além disso, o fato das cinzas de madeira serem ricas em cálcio com alta alcalinidade (pH= 9-13,5) (ETIÉGNI; CAMPBELL, 1991) também a torna positiva em termos de manutenção da alcalinidade nos materiais cimentícios, tão necessária à termodinâmica e cinética das reações de hidratação do cimento Portland, bem como sua incorporação ao sistema não estaria agregando efeito degradante.

Os ensaios que definem o comportamento das argamassas na etapa de mistura podem servir como direcionamento da qualidade e da produtividade em obra (ROMANO, R. C. O. et al., 2009b). Ensaio de reometria rotacional (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009) são empregados para identificar a mistura e ciclo de cisalhamento das argamassas, bem como *Squeeze Flow*, para reproduzir as condições de espalhamento da argamassa no substrato (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

Nesse sentido, estudos sobre a reologia de argamassas indicam um ganho de fluidez ao adicionar materiais finos que preenche vazios entre os grãos de cimento, melhorando o empacotamento (KWAN; LI, 2013), e efeito rolamento e possibilitando a redução da relação água/ligante (KWAN; LI, 2013) que influencia diretamente na resistência mecânica da argamassa após o endurecimento.

No entanto, há autores (CLAISSE; LORIMER; AL OMARI, 2001; FERRARIS; OBLA; HILL, 2001) que defendem que o aumento de empacotamento e da área superficial específica proveniente da adição de superfinos tem efeitos opostos nas propriedades reológicas da pasta de cimento, necessitando de uma demanda maior de água de amassamento (CLAISSE; LORIMER; AL OMARI, 2001), devido à redução da distância de separação entre as partículas, aumento da taxa de colisões e aumento na intensidade do movimento browniano, fazendo com que as forças de superfície (de curta distância) prevaleçam durante o fluxo (LIBERATO et al., 2012).

Nesse cenário, propõe-se avaliar a influência da substituição gradual da cal pela cinza de madeira (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) em termos de propriedades nos estados fresco e endurecido, tendo-se como hipótese norteadora do estudo que as

argamassas mistas com adição de cinza de madeira em substituição à cal hidratada possuem características usuais à aplicação em obra.

Para tanto, os seguintes objetivos específicos serão abordados:

- Caracterização físico-química e microestrutural da cinza de Algaroba;
- Formular e moldar argamassas com a substituição parcial e total de cal hidratada CH I por cinzas de Algaroba.
- Avaliação das argamassas no estado fresco;
 - Reologia das argamassas (reometria de mistura, reometria de cisalhamento e reometria compressiva - *Squeeze Flow*);
 - Retenção de água;
 - Calorimetria de condução isotérmica;
 - Densidade de massa e teor de ar incorporado;
- Avaliação das argamassas no estado endurecido;
 - Permeabilidade;
 - Porosidade;
 - Absorção capilar;
 - Resistência à tração diametral;
 - Resistência à flexão;
 - Resistência à compressão.
- Avaliar a influência do teor de água/ligante nas propriedades das argamassas de revestimento, estudando os sistemas com água constante e consistência constante.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Argamassas de revestimento: constituintes, propriedades e caracterizações microestruturais

No Brasil, o revestimento com argamassa é predominante em edifícios habitacionais, servindo como base para pintura ou outro tipo de acabamento, tornando-se um produto cimentício de grande utilização na construção civil.

A argamassa de revestimento é definida pela norma da ABNT NBR 13529 (1995), como sendo: “o revestimento de uma superfície com uma ou mais camadas superpostas de argamassa, apto a receber acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento final”. Juntos, argamassa de revestimento e acabamento decorativo deve possuir compatibilidade com a natureza da base, condição de exposição, acabamento final e desempenho previsto em projeto. Através dessa junção o revestimento formado é responsável pela vedação externa da estrutura, exercendo papel fundamental no desempenho e durabilidade do edifício.

Sabbatini (1990) e Selmo (1985) listam os principais objetivos das argamassas de revestimentos de edificações, sendo eles:

- 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, possibilitando o conforto hidrocópico, térmico e acústico do ambiente;
- 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;

Apesar das suas importantes contribuições a argamassa de revestimento é responsável por uma porcentagem significativa do custo das edificações, cerca de 2,7% a 4,3%, conforme estudo realizado em construtoras nacionais em 2011 (ZANELATTO, 2012).

Cincotto *et al.* (1995) expõem que a durabilidade da argamassa de revestimento frente ao tempo está diretamente relacionado com fatores de produção, de exposição e ação do usuário.

2.1.1 Principais constituintes das argamassas de revestimento

Tradicionalmente os edifícios são construídos por um reticulado de concreto armado e de vedações verticais, constituídas de varias partes, como: o revestimento externo em uma ou mais camadas, parede de alvenaria ou estrutura de concreto armado e revestimento interno (CANDIDA, 1998).

O revestimento quase nunca se limita à argamassa, devido ao grande número de acabamentos possíveis, como: cerâmicos, pinturas, pedras naturais, papéis de paredes e revestimentos têxteis, que são os materiais mais utilizados em combinação com argamassa no revestimento (CINCOTTO *et al.*, 1995).

As camadas que constituem o revestimento são denominadas de emboço e reboco, podendo ser executada uma preparação na base para otimizar a fixação do revestimento através da rugosidade do substrato.

Neste trabalho, denomina-se argamassa de revestimento ao material ainda no estado fresco. Após aplicação do substrato e realização de sarrafeamento, desempenho e acabamento final, o material é denominado revestimento.

Aplica-se o revestimento em uma estrutura conhecida por substrato ou base, sendo classificada pela sua função dentro da estrutura (estrutura ou vedação), seus materiais constituintes (cerâmica vermelha, concreto, etc...), sua capacidade de absorção de água, porosidade e textura superficial (CORTEZ, 1999).

Baseados nas características da base ou substrato é necessário uma preparação para melhor adequação na união desses materiais. No Brasil, um dos métodos mais utilizados como preparação é o chapisco, que serve como ancoragem para o revestimento, devido à sua superfície irregular (3 a 5 mm) e também é capaz de regular a absorção de água devido à sua característica homogênea. A NBR 7200 (1998) indica que a execução do chapisco deve ser realizado 48 horas antes da execução do revestimento e sua cura devem ser de 24 horas para obtenção de propriedades mecânicas satisfatórias.

O emboço, conforme NBR 13529 (1995), “é a camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo, ou se constitua no acabamento final”. Neste último caso, onde o emboço é o acabamento final, o revestimento é considerado de camada única.

2.1.2 Propriedades no estado fresco

Visando um bom desempenho e produtividade da argamassa de revestimento algumas características e comportamentos devem ser observados para podermos classificar o material com trabalhável ou não, são eles: fácil homogeneização dos constituintes da argamassa, características favoráveis à aplicação no substrato, fácil espalhamento do material no substrato sem trincas e desprendimento da argamassa e sarrafeamento, permitindo seu corte sem movimento de camadas (RILEM, 1982 *apud* ALVES, 2002).

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. Segundo (SABBATINI; BAÍA, 2000), “uma argamassa é considerada trabalhável quando se deixa penetrar facilmente pela colher de pedreiro (sem ser fluida), mantém-se coesa ao ser transportada, não adere a colher ao ser lançada manualmente, distribui-se facilmente, preenche todas as reentrâncias da base, bem como não endurece rapidamente ao ser aplicada”.

A forma descritiva, acima, de relatar a trabalhabilidade de uma argamassa de revestimento se mostra insuficiente devido aos fatores peculiares da observação de cada aplicador, necessitando de um estudo mais detalhado das propriedades reológicas que definem o material no estado fresco.

Nesse cenário é comum que a trabalhabilidade da argamassa seja definida pelo aplicador no momento da utilização do material (SABBATINI; BAÍA, 2000). (SILVA, 2006) informa que um problema corriqueiro nos canteiros de obra é a “correção do traço”, onde mais água é acrescentada à mistura se a massa ficar coesa ou, adição de finos, se a mesma demonstrar excessiva fluidez. Esses processos influenciam diretamente propriedades do estado endurecido do material, como: resistência mecânica, retração e durabilidade.

Fica clara a necessidade de transformar esses termos qualitativos em parâmetros mensuráveis, com o objetivo de entender melhor o comportamento do material e obter ganhos de produtividade.

Ciente da problemática tem sido intensa a busca por técnicas laboratoriais que melhor representem as condições de mistura e aplicação da argamassa de revestimento, chegando recentemente à aplicação de conceito de reologia, que serão discutidas a posteriori nesse trabalho.

2.1.2.1 Reologia das argamassas

Reologia é a ciência que estuda a deformação e o fluxo do material ao ser submetido por tensões ou solicitações mecânicas externas (WATANABE *et al.*, 1989 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2000). Essa ciência tem contribuído positivamente para entender o comportamento do material frente à morfologia do sistema multifásico, relacionando-o com o desempenho do produto.

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 produtividade adequada, 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. (SILVA, 2006) explica que cada processo de mistura possui características reológicas peculiares, tendo em vista diferentes taxas de cisalhamento entre as partículas internas.

Silva (2006) ainda destaca que o volume da argamassa e o tempo de mistura nas diferentes técnicas também influenciam as propriedades reológicas.

Outras propriedades da argamassa de revestimento no estado fresco também são entediadas e caracterizadas reologicamente:

- Aplicação da argamassa no substrato (alta ou baixa energia) necessita de uma compreensão reológica; segundo (SILVA, 2006) essa compreensão 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;
- 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. Do mesmo modo o sarrafeamento, destaca (SILVA, 2006), que em condições reológicas adequadas da massa, espera-se o corte da argamassa sem movimento de camadas.

As argamassas são consideradas uma suspensão reativa e concentrada, já que com o passar do tempo sua fluidez e comportamento ao ser deformada se alteram até o seu completo endurecimento. Duas propriedades importantes devem

ser observadas para definir o comportamento reológico das argamassas, são elas: “tensão de escoamento” e “viscosidade”.

Podemos 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 LARRAD, 1999).

JONH (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.

Os parâmetros que afetam as características reológicas da argamassa não são difíceis de prever, tendo em vista a característica multifásica desse sistema. Todavia, pode-se relacionar o empacotamento de partículas presente no material como um fator predominante nas propriedades reológicas da argamassa.

Segundo (OLIVEIRA, 2000), o índice de empacotamento de uma suspensão de sólidos consiste no volume real ocupado pelas partículas sólidas frente ao volume total do sistema, podendo-se calcular pela Equação 1.

$$\text{Empacotamento} = \frac{\text{Massa do sólido contido no recipiente} / \text{Volume do recipiente}}{\text{Massa específica do sólido}} \quad (1)$$

Quanto maior o índice de empacotamento menor a presença de vazios no material; assim, para se atingir uma menor porosidade, é preciso utilizar partículas de dimensões variadas, a fim das partículas menores se encaixarem nos vazios deixados pelas partículas maiores. Essa ação é denominada como emprego de agregados com granulometria contínua (OLIVEIRA, 2000).

A relação de empacotamento e afastamento de partículas mais finas, inferiores a 100 µm, podem ser quantificadas através do IPS - *Interparticle Size Distance*, considerando o efeito da distribuição granulométrica, conforme apresentado na Equação 2 (OLIVEIRA, 2000). Onde VSA é a área superficial

volumétrica (produto entre a área específica e a densidade real do pó), V_s é a fração volumétrica de sólidos e P_{of} é a porosidade de empacotamento das partículas.

$$IPS = \frac{2}{VSA} x \left[\frac{1}{V_s} - \left(\frac{1}{1 - P_{of}} \right) \right] \quad (2)$$

O IPS influencia diretamente no comportamento reológico da pasta. (OLIVEIRA, 2000) define IPS como sendo a distância média entre quaisquer partículas adjacentes na mistura; admitindo que não exista aglomeração no sistema, todas as partículas são entidades separadas.

Cardoso (2009) descreve que, através da distribuição granulométrica é possível reduzir a porosidade do sistema, atingindo valores maiores de IPS da pasta (considerando área e concentração constante), pois maior quantidade de líquido fica livre para separar as partículas.

Romano (2013) relaciona área superficial específica com o IPS da pasta, pois partículas com áreas superficiais específicas maiores necessitam de mais líquido para molhamento, restando menos líquido livre e resultando em IPS menores.

O conceito de IPS aplica-se as separações de partículas finas, onde o efeito das forças de superfície é predominante. Todavia, as argamassas são materiais multifásicos e os agregados estão sobre influência de forças mássicas e gravitacionais, influenciando de forma direta o comportamento do material no estado fresco (OLIVEIRA, 2000).

Nas argamassas os agregados são separados, não apenas por líquido, mas por fluidos à base de cimento. Desta forma, a distância entre os agregados é quantificada através do volume de pasta entre eles (*Maximum Paste Thickness – MPT*) (OLIVEIRA, 2000), calculada através da Equação 3.

$$MPT = \frac{2}{VSA_g} x \left[\frac{1}{V_{Sg}} - \left(\frac{1}{1 - P_{ofg}} \right) \right] \quad (3)$$

VSA_g é a área superficial volumétrica dos agregados, V_{Sg} é a concentração volumétrica dos agregados na argamassa e P_{ofg} é a porosidade dos agregados (OLIVEIRA, 2000).

O valor de MPT pode ser alterado pela variação de materiais cimentícios e pela presença de bolhas; com o aumento do valor de MPT, as argamassa tendem a se tornar mais fluidas. (CARDOSO, 2009) observou que para valores de MPT inferiores a 20 μm , as cargas compressivas aumentam devido à maior força de interação entre os agregados. Acima desse valor as cargas são elevadas progressivamente com o aumento do valor de MPT. Entretanto, é possível obter argamassas com fluidez diferentes mesmo compartilhando do mesmo valor de MPT. Isso é possível devido às diferentes condições da pasta, presença de aditivos lubrificantes e segregação de fluidos.

O fator de empacotamento está diretamente relacionado com a fluidez da argamassa, tendo em vista que, quanto melhor o empacotamento menor o número de vazios presentes, menor a quantidade de pasta necessária para preencher os vazios entre os agregados, sobrando pasta para afastá-los, o que facilita o escoamento. Esse fenômeno pode ser observado pelo aumento dos valores de MPT, conforme Equação 3, após o melhoramento do empacotamento.

Considerando que a pasta presente na argamassa inicialmente preenche os vazios e posteriormente afasta os agregados, podemos relacionar o empacotamento das partículas com o consumo da pasta, nas propriedades reológicas e nas propriedades do estado endurecido (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

Na argamassa estudada a presença da cinza em substituição da cal hidratada possibilitará uma maior diversificação de granulometria, devido a áreas específicas distintas entre os finos presentes, tendendo a melhorar o empacotamento de partículas em algumas substituições.

2.1.2.2 Reômetria compressiva (*squeeze flow*)

Esse ensaio permite estudar o comportamento do material através de diversas taxas de cisalhamento aplicadas em um único corpo-de-prova, há muito tempo vem sendo utilizado, devido à sua simplicidade, para estudar materiais altamente viscosos como o asfalto (GIBSON; TOLL, 1999). O ensaio também permite a determinação da tensão de escoamento e viscosidade, possibilitando a caracterização reológica completa da argamassa.

O método utilizado está ilustrado na Figura 15 e consiste de duas placas de aço inox lisas dispostas horizontalmente e paralelas uma em relação à outra, acoplada à uma prensa Universal.

A placa inferior é fixa, enquanto a superior, de mesmo diâmetro do material a ser ensaiado, pode se mover verticalmente mantendo uma velocidade constante, e uma carga constante ou uma taxa de cisalhamento constante, com a ajuda de um programa (GIBSON; TOLL,1999).

Na preparação para o ensaio a placa superior é posicionada logo acima do material e após um comando inicia seu movimento de compressão, provocando uma deformação axial na amostra. A altura inicial da amostra é reduzida e um espalhamento lateral do material ensaiado característico é observado. A carga de reação do corpo-de-prova é registrada pela célula de carga do equipamento (GIBSON; TOLL,1999).

O resultado do ensaio de *squeeze flow* 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.

Além desses gráficos, o ensaio possibilita, através de equações e modelos matemáticos, encontrar os parâmetros reológicos de tensão de escoamento e viscosidades, através da relação entre concentração de cargas (finos), viscosidade, tensão de escoamento ou taxa de escoamento, conforme indicado por (FERRARIS, 1999), tornando-se o ensaio de *squeeze flow* um importante ensaio para o estudo de argamassa de revestimento.

2.1.2.3 Densidade no estado fresco

O método para determinação da densidade da argamassa é descrito na NBR 13278 (1995) e consiste na razão entre a massa da argamassa de assentamento ou revestimento pelo volume ocupado. (CINCOTTO *et al.*, 1995) propõem que esse valor representa a massa unitária da argamassa, que consiste na relação entre o material sólido e o volume, incluindo vazios que não podem ser permeados a uma determinada temperatura conhecida.

O valor da densidade da argamassa de revestimento no estado fresco indica a quantidade de ar presente no material e a facilidade de aplicação no substrato.

Argamassas com menor densidade necessitam de um menor esforço no momento da aplicação.

2.1.2.4 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado está relacionado com a densidade de massa relativa da argamassa no estado fresco e endurecido. Com o aumento da presença do ar incorporado, a argamassa torna-se menos densa, influenciando sua trabalhabilidade na mistura, seu lançamento, seu espalhamento e seu sarrafeamento e, no estado endurecido, o seu decréscimo na resistência mecânica. (ROMANO, 2013)

Sua incorporação pode ocorrer através do processo natural de mistura ou através de aditivos incorporadores de ar

Com a incorporação de ar, a argamassa melhora a sua coesão, reduz a exsudação, melhora a plasticidade e reduz a quantidade de água de amassamento, possibilitando uma menor retração plástica e por secagem (ALVES, 2002).

Romano (2013) explica os fenômenos provocados pela presença do ar no sistema multifásico das argamassas, tendo em vista que a presença do ar cria mais uma fase no sistema, que altera o fluxo e o espalhamento devido ao aumento de volume e afastamento dos agregados.

A presença de ar incorporado influencia na capacidade de deformação da argamassa, aumentando a viscosidade da massa e melhorando a lubrificação dos agregados presentes na matriz (ANTUNES, 2006).

Portanto, é de fundamental importância aferir a presença de ar incorporado na argamassa de revestimento, uma vez que a influência dessas bolhas de ar é notória no estado fresco (influenciando a trabalhabilidade e aplicação) e no estado endurecido (afetando as propriedades mecânicas de resistência e retração).

2.1.2.5 Retenção de água

Cincotto *et al.* (1995) defendem que a retenção de água da argamassa corresponde à sua capacidade, no estado fresco, em manter sua consistência ou trabalhabilidade, frente a condições que favorecem a perdas de umidade (evaporação, sucção, absorção pelo componente).

Romano (2013) explica a função da água de amassamento na suspensão dos componentes constituintes da argamassa, a qual inicialmente reveste (recobre) as superfícies das partículas, para em seguida preencher os vazios deixados pelo empacotamento. Dessa forma, quando o líquido for suficiente para envolver as partículas, seu excedente começa a separar essas partículas.

As propriedades das argamassas são diretamente influenciadas pela retenção de água. (Tristão, 2003) relata que a retenção da água proporciona o molhamento dos agregados e aglomerantes, possibilitando as reações de hidratação, desenvolvimento da trabalhabilidade, melhorando aderência entre os constituintes da argamassa e o substrato onde serão aplicados, bem como a resistência mecânica.

Uma argamassa com baixa retenção de água corrobora para uma falta de produtividade do pedreiro, pois a exsudação da água reduz a trabalhabilidade, obrigando a constantemente remisturar a argamassa antes da sua aplicação no substrato. Além desse fator, existe a dificuldade no espalhamento e no sarrafeamento. Outro fator que pode ser influenciado é a resistência mecânica, uma vez que grande quantidade de água é perdida para o meio-ambiente (TRISTÃO, 2003).

Com a maior retenção de água no interior da argamassa de revestimento, a velocidade de perda de água é reduzida, principalmente nas primeiras horas de hidratação, diminuindo a retração e a fissuração (NEHDI, 1998).

A presença de finos com afinidade a água corrobora diretamente para a retenção de água conforme explicado por (NEHDI, 1998), que destaca que, quanto maior for a concentração dessas partículas, maior será o acúmulo de umidade no interior da argamassa.

Métodos distintos são empregados para aferir a retenção de água: (1) baseado na NBR 13277 (1995), denominado de papel de filtro; e, (2) baseado na NBR 9287 (1996), denominada de funil de Buchner modificado. Expressam,

geralmente, resultados distintos entre si, todavia o último expressa resultados mais convenientes aos observados na prática.

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. A determinação dessas propriedades também contribui para o controle de produção e qualidade do revestimento, tendo em vista as variáveis empíricas que circundam sua fabricação (SILVA, 2006).

Todavia, essas características do revestimento não são fáceis de serem determinadas, pois as variáveis que sustentam as propriedades no estado endurecido não se apoiam apenas nas propriedades das argamassas, mas também nas do substrato e nas condições do ambiente onde está inserido o material (SILVA, 2006).

Dessa forma, para se avaliar as propriedades mecânicas das argamassas, se faz necessário levar em conta todas essas variáveis. Tendo em vista a extensão do problema, abordou-se neste trabalho a resistência à tração diametral, resistência à compressão, resistência à flexão, porosidade total e capilar e permeabilidade.

2.1.3.1 Resistências à tração e à compressão

Apesar das propriedades de resistência à tração e compressão não retratarem com fidelidade as características da argamassa de revestimento, corroboram, quando conhecidas, para identificar o comportamento potencial da argamassa quando utilizada como revestimento após o seu endurecimento.

Silva (2006) relata algumas características do revestimento que podem ser identificadas mediante os ensaios de resistência à compressão e à tração:

- Verificar se as condições internas de solidificação possibilitam ao revestimento suportar estresse mecânico dos mais diversos;
- Procurar reproduzir em corpos de prova as mesmas condições, ambientais e de tensão, sofridas pelo revestimento ao ser solicitado

mecanicamente, identificando se o material possa ou não suportar as condições a ele exigidas;

- Através do ensaio de resistência à compressão, buscar deduzir outras propriedades intrínsecas do material, como o módulo de deformação estático e entender a resistência do revestimento as intemperes.

2.2 Uso da cal em argamassas de revestimento

O óxido de cálcio (CaO) é obtido da rocha calcária, rica em carbonato de cálcio e/ou magnésio, através do processo de calcinação da rocha em altas temperaturas. Em reação com a água a cal virgem da origem ao hidróxido de cálcio Ca(OH₂).

A norma NBR 7175 (1992) define os tipos de cal hidratada com CH I, CH II e CH III. As três cales se diferenciam entre si pelo teor de carbonato de cálcio que aumenta respectivamente, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Exigência química das cales hidratadas no nacionais

Tipo	Anidrido carbônico na fábrica	CO ₂ no depósito ou na obra
CH I	≤5	≤7
CH II	≤5	≤7
CH III	≤13	≤15

Fonte: (RANGO; CINCOTTO,1999), adaptado pelo autor, 2014

Dado o caráter de utilização até então empírico da cal nos canteiros de obras, (JOHN, 2003 *apud* QUARCIONI, 2005), após análise aprofundada da literatura atual, propôs um estudo detalhado da importância da cal na argamassa, utilizando-se de técnicas avançadas de ciência dos materiais, como: reologia, mecânica da fratura e degradação por dano progressivo. Esse autor avaliou as propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido.

Cincotto *et al.* (1995) informaram que a cal é a responsável direta por propriedades de grande valor na construção civil, conferindo melhor plasticidade à pasta ou argamassa no estado fresco e reduzindo fissuras no estado endurecido se comparado a o uso exclusivo do cimento Portland.

Para Passos Guimarães, (1997) *apud* Quarcioni, (2005) a facilidade de retenção de água da cal está diretamente relacionada à presença de microcristais

que favorecem a formação de um filme de água fortemente aderida, conferindo a argamassa mista propriedades relevantes no estado fresco e no processo de cura.

Sabbatini, (1985) *apud* Quarcioni, (2005) descreve quantitativamente as variações das propriedades das argamassas com teores de cal diferentes, mantendo proporcional a relação ligante/agregado. Esse autor constatou a interligação das propriedades de forma inversamente proporcional, de modo que, ao melhorar o módulo da elasticidade, obteve uma redução nas propriedades mecânicas, por exemplo.

Rago; Cincotto, (1999) demonstraram que cal cálcica, quando misturada com água, apresentou maior viscosidade se comparada à cal dolomítica. Os autores ainda ressaltam que, ao substituir parte da cal hidratada por materiais carbonáticos, ambas as cales apresentaram menor viscosidade.

No estado endurecido, 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 tricas formadas no endurecimento, influenciando diretamente na durabilidade do material (CINCOTTO *et al.*, 1995 *apud* CARASEK, 2007).

2.2.1 Química do cimento relacionada às argamassas com cal

Em conjunto com o cimento a cal tem a capacidade de retenção de água de amassamento por um período prolongado, conferindo um melhoramento na hidratação do aglomerante hidráulico. Essa propriedade da cal é resultado da sua grande área específica, favorecendo a retenção de água. O produto carbonatado da cal possui uma baixa solubilidade influenciando positivamente o efeito de lixiviação da argamassa com cal. (AGOPYAN, 1985 *apud* QUARCIONI, 2005).

Através dos cálculos de equilíbrio de fases, que o sulfato liberado pelo sulfoaluminato através da carbonatação da pasta, reage dando origem a etringita (MATSCHEI, 2007). A formação dessa etringita adicional é a principal responsável pelo mecanismo de preenchimento dos vazios da pasta, com redução da porosidade e permeabilidade da pasta endurecida de cimento.

2.3 Uso de adições ricas em carbonato de cálcio em argamassas

Estudos de argamassas que tiveram na sua dosagem substituição parcial do cimento por cinzas de madeira com alto teor de cálcio, obtendo melhoramentos na trabalhabilidade e resistência à flexão e sem grande prejuízos nas demais propriedades avaliadas (CHEAH, C., B E, RAMLI MAHYUDDIN, 2011).

Proporção de óxidos e carbonatos de cinzas de madeira no intervalo de queima de 538°C a 1093°C foram avaliados, observando uma diminuição dos carbonatos quando a temperatura excede os 1000°C em cinza de madeira com altos teores de cálcio. Isso influencia diretamente a redução da alcalinidade da cinza, uma vez que os carbonatos e bicarbonatos são quimicamente responsáveis pela alcalinidade (BAN; RAMLI, 2011).

2.3.1 Química do cimento das argamassas com adições ricas em carbonato de cálcio

O efeito da cal hidratada nas reações de hidratação do cimento foram estudadas. A presença da cal alterou a cinética química das reações de hidratação, mas com formação das fases de hidratação característica do cimento. Do ponto de vista físico, o *filler* carbonático e a fração insolúvel do hidróxido de cálcio presente na solução saturada de cal, promoveram a nucleação de fases de hidratação do cimento. Os efeitos físico-químicos em conjunto corroboraram para uma aceleração da hidratação do cimento, principalmente no período de indução, prevalecendo à formação de etringita e aluminatos de cálcio hidratado (QUARCIONI, A., V, 2008).

Estudos realizados para determinar a influência da calcita (CaCO_3) na mineralogia da pasta de cimento com até 5% de *filler* calcário, constatou-se que para maioria dos cimentos, com até 5% de *filler*, a calcita adicionada reage com o cimento formando um carboaluminato de cálcio. O cálculo de equilíbrio de fases aponta para dois efeitos: o *filler* como participante ativo da hidratação e o inerte (MATSCHEI, 2007).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental foi esquematizada de acordo com o diagrama de blocos da Figura 2.

3.1 Coleta e processamento das cinzas de Algaroba

O resíduo escolhido para estudo deste trabalho é a cinza proveniente da queima de madeira da Algaroba (*Prosopis Juliflo*). As empresas de lavanderia, integrantes no Arranjo Produtivo Local (APL), utilizam nas caldeiras, a lenha de Algaroba, como principal fonte de energia para aquecimento da água. No final do processo produtivo é gerada a cinza em volumes elevados e sem possibilidade de reutilização na indústria geradora, sendo descartada de forma inadequada no meio ambiente, Figura 1. A produção desse resíduo na indústria foi quantificada, todavia constatou-se que a produção de cinza é diária nas indústrias visitadas.



Figura 1 – Descarte da cinza no meio ambiente local. Fonte: figura do autor, 2014.

O resíduo foi coletado do interior dos fornos de queima da biomassa, para obtenção de um material mais fino e livre de interferência do meio ambiente, (umidade e demais resíduos sólidos).

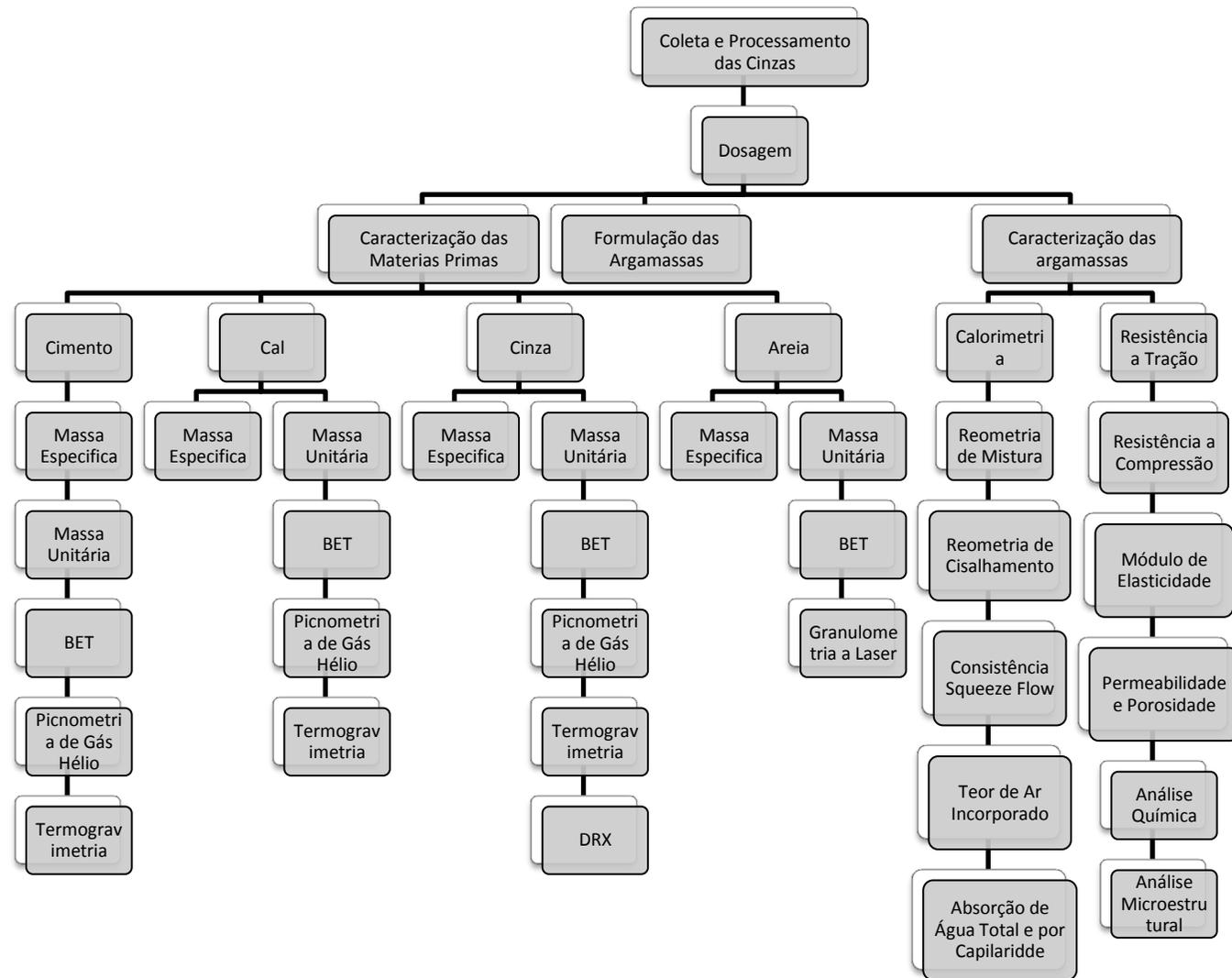


Figura 2 - Metodologia experimental esquematizada em diagrama de blocos

A lavanderia escolhida foi a Nova Geração, situada na Rua José Marcelino de Araújo, 163, bairro Cedro, Caruaru-PE, pelo fato de utilizar em sua linha de produção apenas a madeira da Algaroba e não uma mistura de diversas biomassas.

Após a coleta do resíduo na fonte geradora o material foi peneirado em malha 200, conforme Figura 3, constatando que 55% do material ficaram retidos, apresentando resíduos diversos da queima irregular.



Figura 3 – Tratamento do cinza de Algaroba, através de peneiramento. Fonte: (LELOUP, 2013) figura adaptado pelo autor, 2014.

3.2 Dosagem

O traço utilizado no estudo foi 1:2:X:9 (cimento: cal: cinza: areia), em volume, traço comumente usado como emboço. 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. Esse traço também é comumente usado como argamassa de assentamento.

Em busca do melhor entendimento dos fenômenos presentes na substituição da cal hidratada CH I por cinza de Algaroba, substituiu-se em porcentagem de 25%, 50%, 75%, 100%. A título comparativo argamassas sem substituição (0% de cinza) também foram moldadas.

Para obtenção de melhores resultados das argamassas estudadas, a massa unitária das matérias-primas utilizadas foram determinadas e os respectivos valores em volume e massa dos traços estudados encontram-se nas Tabela 2,

Tabela 3 e Tabela 4.

A determinação da massa unitária das matérias-primas presentes nas argamassas estudadas foi realizada através na norma NBR NM 45 (2006), onde os

materiais foram lançados em um recipiente de altura de 12 cm e volume conhecido, conforme Figura 4.



Figura 4 – Aparatos usados para determinação da massa unitária das matérias primas. Fonte: Figura do autor, 2014.

Tabela 2 – Massas Unitárias das matérias primas anidras

Material	Massa Unitária
Cimento CP VARI	0,862 g/cm ³
Cal CH I	0,49 g/cm ³
Cinza	0,602 g/cm ³
Areia	1,28 g/cm ³

Fonte: tabela do autor, 2014.

Tabela 3 - Traços em Volume das argamassas estudadas

Amostras	Cimento	Cal	Cinza	Areia
Referência	1	2	0	9
25% Cinza	1	1,5	0,5	9
50% Cinza	1	1	1	9
75% Cinza	1	0,5	1,5	9
100% Cinza	1	0	2	9

Fonte: tabela do autor, 2014.

Tabela 4 – Traços em Massa para preparo de 3 kg de argamassa

Amostras	Cimento (g)	Cal (g)	Cinza (g)	Areia (g)
Referência	200	228	0	2680
25% Cinza	200	170	52	2680
50% Cinza	200	114	140	2680
75% Cinza	200	56	210	2680
100% Cinza	200	0	280	2680

Fonte: tabela do autor, 2014.

A preparação das argamassas baseou-se em duas condições: (a) quantidade de água constante e (b) consistência constante, tomando como base a argamassa de referência (0% de cinza).

A estratégia usada para determinação da quantidade de água usada na argamassa de referência foi fixar o torque de mistura de argamassas tradicionais, no reômetro rotacional. O torque de mistura de argamassas tradicionais adotado foi na faixa de 2,0 N.m, comumente utilizado como padrão no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais da USP (Universidade de São Paulo).

Em condição de consistência constante, foi necessário alterar a quantidade de água, a fim de se manter fixa essa propriedade. As quantidades de água utilizadas no estudo para satisfazer as duas condições pesquisadas encontram-se exposta na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantidade de água em massa utilizada nas argamassas estudadas

Argamassas	Água Constante	Consistência Constante
Referência	875g	875g
25% Cinza	875g	875g
50% Cinza	875g	820g
75% Cinza	875g	800g
100% Cinza	875g	845g

Fonte: tabela do autor, 2014.

3.3 Caracterização dos materiais de partida

3.3.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CP V ARI, cimento Nacional da Brennan Cimentos. A escolha do emprego do CP V ARI baseou-se na necessidade de entender com fidelidade a influência da cinza em substituição a cal hidratada CH I no estado endurecido, 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 utilizado foram fornecidas pelo fabricante e encontram-se compiladas nas Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente. Com o intuito de corroborar e completar os dados fornecidos pelo fabricante, um ensaios complementares de termogravimétrica e difração de Raios-X (DRX) foram realizado, conforme metodologia descrita no item 3.3.4.3.

Tabela 6 - Características químicas do cimento

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

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

Tabela 7 - Características físicas do cimento

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 compressão 1 dia	MPa	40,4
Resistência compressão 3 dias	MPa	45,2
Resistência compressão 7 dias	MPa	48,7
Resistência compressão 28 dias	MPa	52,4

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

3.3.2 Cal

Na composição das argamassas estudadas a cal hidratada utilizada foi a CH I. O seu valor reduzido de carbonato de cálcio foi o motivo preponderante para escolha dessa matéria-prima, frente às demais cales presentes no mercado brasileiro. A marca escolhida foi a Tradical e os resultados das análises química e física, fornecidas pelo fabricante, encontram-se, respectivamente, nas Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 – Análise química da cal hidratada

Caracterização Química	Resultado (%)
CaO	71,7
MgO	0,75
Resíduo Insolúvel	1,13
Umidade	0,62
Perda ao Fogo (1.000 °C)	25,5
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 9 - Análise física da cal hidratada

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

Fonte: Boletim técnico fornecido pela Tradical (2014)

3.3.3 Areia

Utilizou-se areia lavada de rio, comumente encontrada nas regiões brasileiras, devidamente caracterizada por: massa específica, massa unitária, BET, picnometria e granulometria à laser.

A massa específica e unitária foram determinadas segundo os métodos descritos na ABNT NBR NM 52 (2009).

A distribuição granulométrica da areia foi aferida em um granulômetro à laser da marca Malven, modelo Mastersizer S long bed Ver 2.19, com range de 0,05 a 555 µm, conforme mostrado na Figura 5, com faixa de detecção de 0,05 a 555 µm.



Figura 5 – Granulômetro a laser, Malvern – Mastersizer S long bed Ver 2.19, utilizado para caracterização da distribuição dos diâmetros de partículas. Fonte: (ROMANO, 2013).

3.3.4 Caracterização físico-química e microestrutural da cinza de Algaroba

3.3.4.1 Área superficial

O ensaio de BET (Braunauer, Emmet e Teller), usado para medição da área superficial específica, baseia-se na adsorção física e dessorção de gás na superfície da amostra sólida. O ensaio foi realizado em um equipamento Gemini 2375, Micromeritics, Figura 6, com pré-tratamento das amostras em temperatura de 60 °C e pressão de 100 μ Hg por 24 horas.



Figura 6 – Equipamento para medida da área de superfície específica, Gemini 2375, Micromeritics.
Fonte: (ROMANO, 2013).

3.3.4.2 Densidade Real dos Pós

A densidade real dos pós foi determinada através de picnômetro de adsorção de gás hélio em um equipamento Multipicnômetro, da marca Quantachrome MVP 5DC, a partir de uma média de 5 determinações de cada matéria-prima. 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. O conjunto de aparato necessários para o ensaios está apresentado na Figura 7.

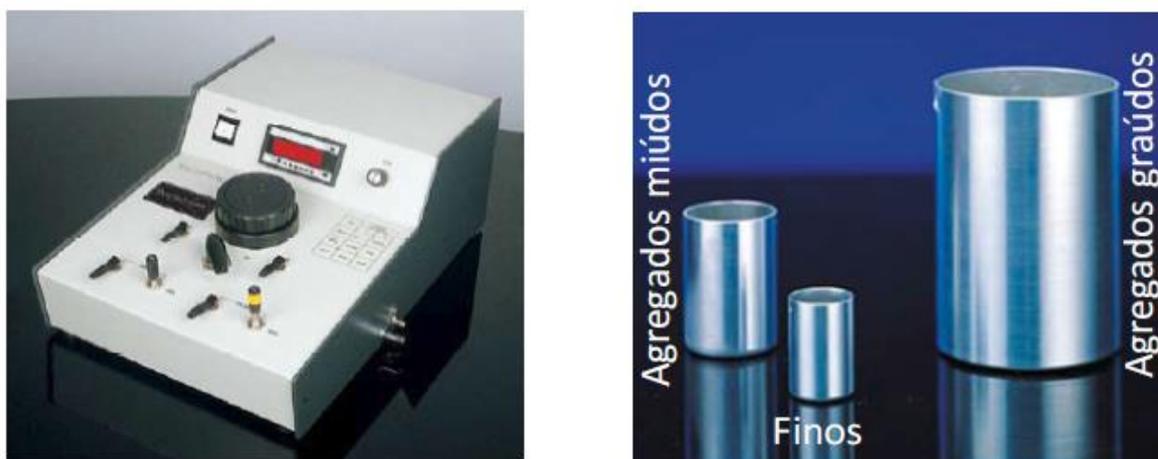


Figura 7 – Picnômetro de gás Hélio, Quantachrome MVP 5DC. Fonte: (ROMANO, 2013).

O ensaio consiste em preencher uma das duas câmaras presentes no equipamento (volume conhecido) com a amostra e a outra é a de referência. As câmaras são conectadas por uma válvula chamada de expansão.

Uma amostra com massa conhecida é colocada na câmara, inicialmente, sem comunicação com a de referência. O gás hélio é injetado na câmara de referência, em seguida, é anotado o valor de pressão atingido (P_1); dando sequência, o gás é transferido para a câmara onde se encontra a amostra e a nova pressão (P_2) é observada.

Admitindo comportamento ideal do gás hélio, o volume do sólido pode ser calculado a partir da Equação 4. Na qual, V_a é o volume da câmara da amostra, V_e = volume da câmara de expansão e V_s é o volume do sólido.

$$P_1(V_a - V_s) = P_2(V_a - V_s + V_e) \quad (4)$$

Tomando como variável conhecida a massa e o volume ocupado é possível, então, calcular a densidade real a partir da relação massa/volume.

3.3.4.3 Análise Termogravimétrica (TG), Difração de Raios-X (DRX) e Fluorescência de Raios-X

O ensaio de termogravimetria foi realizado na cinza de Algaroba, cimento e cal hidratada CH I através de uma termobalança Netzsch, modelo TASC 414/4 acoplada a uma termobalança – STA409EP. O equipamento e o porta-amostra estão ilustrados na Figura 8.

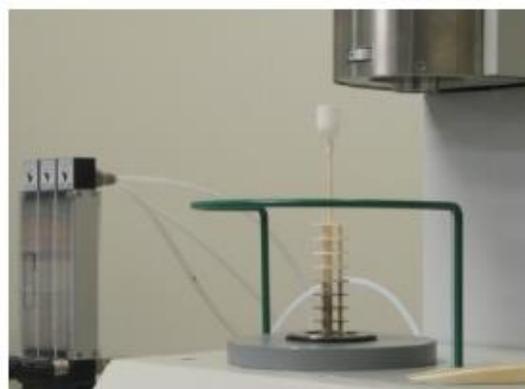


Figura 8 – Equipamento utilizado para realização de análise térmica, Netzsch, modelo TASC 414/4 acoplado a uma termobalança – STA409EP. Fonte:(ROMANO, 2013).

O ensaio de DRX foi realizado no cimento, cal e cinza de Algaroba, em um equipamento *Empyrean, Panalytical*, com detector Pxlcel3D, conforme apresentado na Figura 9.



Figura 9 – Difratorômetro de raio-x *Empyrean, Panalytical* utilizado para caracterização mineralógica da cinza de Algaroba. Fonte: Romano, (2013).

A amostra foi avaliada a partir do método de DRX convencional (no pó seco) e as variáveis do ensaio foram fixadas em: radiação de cobre, fenda automática de $0,5^\circ$, filtro de Níquel e frequência de *spinning* de 2 segundos por rotação. As medidas foram feitas com passo de $0,02^\circ$, permanecendo em cada passo por 60 segundos, no intervalo de $5^\circ < 2\theta < 70^\circ$.

O ensaio de fluorescência de raios-X (FRX) foi realizado com espectômetro por dispersão de Raios-X da marca *SHIMADZU* modelo EDX&@) com tensão no tubo de 15 KeV (Na a Sc) e 50 KeV (Ti a U), com abertura do colimador de 10 mm (abertura da área para passagem dos raios-X, atingindo a amostra).

O tempo real de integração foi 200 s, em atmosfera ambiente e detector de Si (Li), refrigerado com nitrogênio líquido. O resíduo a ser ensaiado passou por um beneficiamento, cujo procedimento consiste em aquecer a amostra por 72 horas e armazená-las em cápsulas plásticas.

3.4 Reometrias

3.4.1 Reometria de Mistura

Para a realização do ensaio de reometria de mistura, as argamassas estudadas foram preparadas em um reômetro rotacional tipo planetário construído na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, conforme Figura 10. No reômetro é possível um controle preciso da velocidade de rotação, tendo como resposta o torque ao cisalhamento aplicado. Conseqüentemente, é possível quantificar as propriedades das argamassas tanto durante a etapa de mistura quanto avaliar o perfil reológico da argamassa misturada.

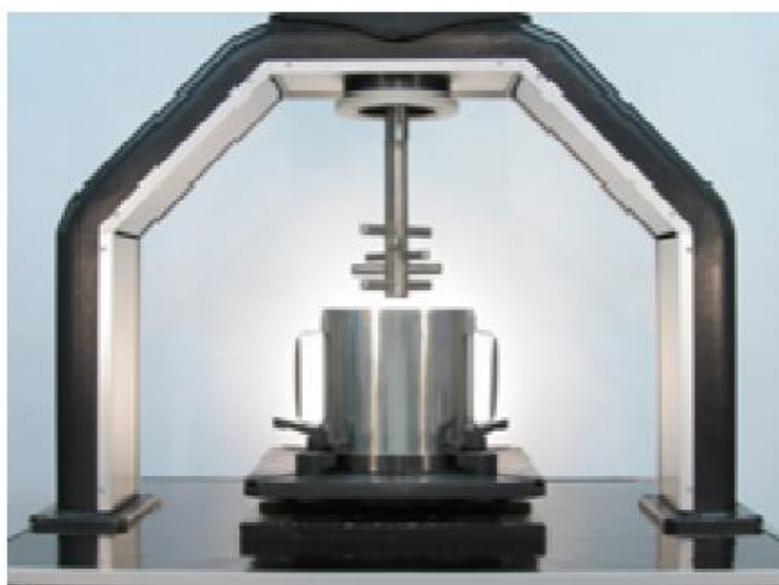


Figura 10 – Reômetro planetário, utilizado para avaliação das propriedades reológicas das argamassas. Fonte: Mario S. Takeashi.

Antecedendo a realização do ensaio de mistura, os pós foram misturados previamente em sacolas plásticas até sua completa homogeneização; em seguida, o material foi adicionado à cuba do equipamento, conforme Figura 11, juntamente com

a água necessária e o ensaio é iniciado, com variação na velocidade de rotação, até atingir o torque padrão de argamassa em torno de 2 N/m (argamassas comumente utilizadas na construção civil) ou 150 segundos. Pontos no qual as leituras referentes à reometria são mistura são finalizadas.

A quantidade de água utilizada em cada uma das argamassas avaliadas estão discriminadas na Tabela 5, já apresentada no item 3.2 na página 32. No ensaio de reometria de mistura, a velocidade de rotação foi constante em 500 rpm por 3 minutos, procedimento descrito na Figura 12.



Figura 11 – Etapas para início do ensaio no reômetro. Fonte: Mario S. Takeashi.

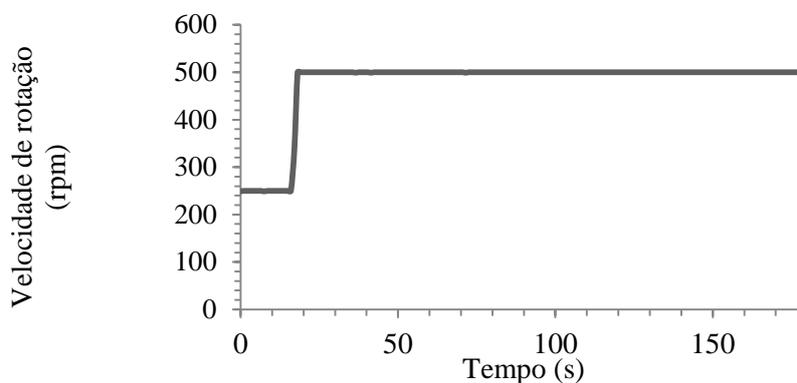


Figura 12 – Programa de mistura do ciclo de cisalhamento. Fonte: figura do autor, 2014.

3.4.2 Ciclo de Cisalhamento

Na sequência, dando continuidade ao estudo reológico do processamento da pasta, foi 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), conforme ilustrado na Figura 13. Ao final da mistura e após os ciclos foram realizados os ensaios para determinação do teor de ar incorporado a partir do método gravimétrico.

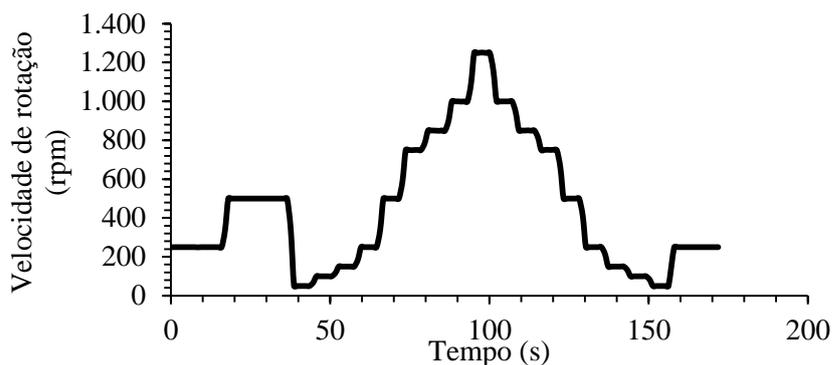


Figura 13 – Programa de mistura utilizado para a caracterização reológica das argamassas. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.

A forma de processamento da pasta (mistura entre finos e água) foi padronizada para todas as argamassas estudadas, buscando eliminar possíveis variações de mistura. Apesar de apresentar aparente simplicidade operacional, 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 (ROMANO, 2013).

3.4.3 Reômetria compressiva (*squeeze flow*)

O ensaio de *squeeze flow* foi realizado em amostras com espessuras de 10 mm e 101 mm de diâmetro. No entanto, após o preenchimento do molde o mesmo foi retirado e o punção (Figura 15) apresentou o mesmo diâmetro da amostra. As etapas para a preparação das amostras estão ilustradas na Figura 14, desde a adição da argamassa no molde até a finalização do processo.

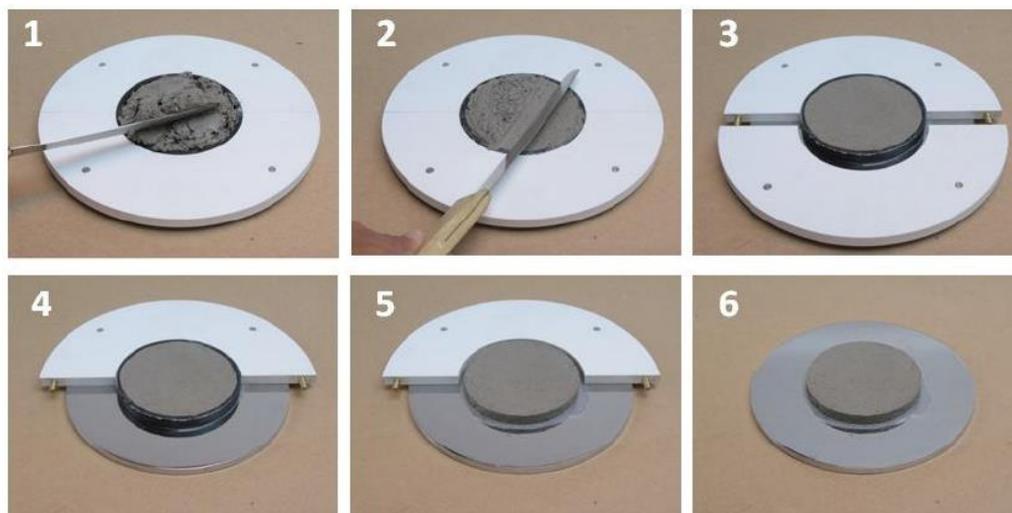


Figura 14 – Etapas da preparação da amostra de argamassa para o ensaio de *squeeze flow*. Fonte: Mario S. Takeashi.

Após a preparação da amostra aguardou-se o tempo de 10 minutos e de 45 minutos para realização em cada amostra das argamassas estudadas. Em seguida, o material é colocado na máquina de ensaio Universal, conforme ilustrado na Figura 15, quantificando-se a carga em função do deslocamento.

A compressão uniaxial das amostras de pasta ou argamassa foi realizada em uma máquina Universal de ensaios, Instron, modelo 5569, com controle de deslocamento do atuador de 0,1 mm/s.

A Figura 15 representa, respectivamente, o início e o fim do ensaio de *squeeze flow*.

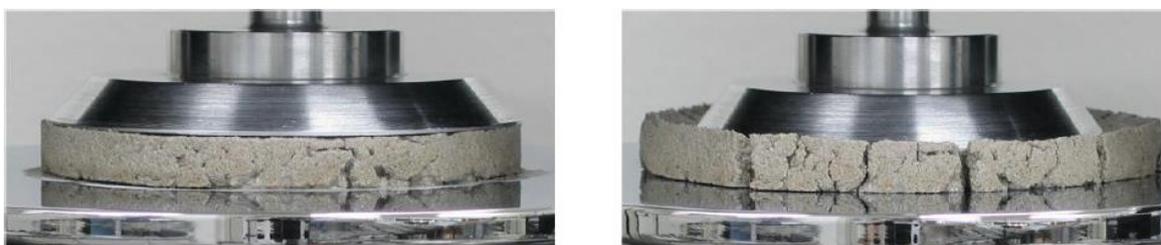


Figura 15 – Ilustração do ensaio de *squeeze flow* em argamassas. Fonte: Mario S. Takeashi.

3.5 Retenção de água (estado fresco)

O ensaio de retenção de água foi realizado conforme a norma técnica NBR 13277 (2005).

O ensaio consiste em pesar o funil de Buchner preparado com papel filtro umedecido para receber a argamassa, que é introduzida no funil, compactada com soquete e rasada com régua metálica para eliminação do excesso. Em seguida, ocorre a pesagem e as amostras foram submetidas a uma sucção correspondente à coluna de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos e, então, as amostras são pesadas, concluindo o ensaio.

A retenção de água (R_a) foi calculada através da Equação 5, sendo o fator água/argamassa fresca calculado pela equação 2. Na qual as variáveis da equação são: m_a é a massa do conjunto com argamassa, em gramas; m_s é a massa do conjunto após a sucção, em gramas; m_v é a massa do conjunto vazio, em gramas; AF é o fator água/argamassa fresca; m_w é a massa total de água acrescentada à mistura, em gramas; m é a massa de argamassa é a soma das massas dos componentes anidros, em gramas.

$$R_a = \left(1 - \frac{m_a - m_s}{AF (m_a - m_v)} \right) \times 100 \quad (5)$$

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (6)$$

3.6 Calorimetria de condução isotérmica

A aferição do fluxo de calor durante a reação de hidratação do cimento na presença da cinza de Algaroba foi realizada em um calorímetro de condução isotérmica TAMAir, com controle preciso de temperatura.

As argamassas estudadas em substituição da cal hidratada por cinza de Algaroba foram misturadas com a água em um cadinho de porcelana, com o auxílio de uma espátula tipo pão duro, de silicone, durante 1 minuto e o início do ensaio se

deu 3 minutos após o início da mistura. Todas as avaliações foram realizadas com controle preciso da temperatura a 10, 25 ou 40°C, durante 48 horas, no equipamento ilustrado na Figura 16.



Figura 16 – Preparação das amostras para realização dos ensaios de calorimetria de condução isotérmica. (a) Adição da mistura de finos e água nos recipientes, (b) Vedação, (c) Inserção dos recipientes no equipamento. Fonte: Mario S. Takeashi.

No ensaio de calorimetria de condução isotérmica, o calor liberado na hidratação do cimento é quantificado diretamente pela análise do comportamento do fluxo de calor da pasta, em condição isotérmica estável do meio circundante onde o material é inserido para o ensaio, sem sofrer alteração pelo calor liberado.

As curvas de taxa de calor liberado por tempo de hidratação possibilitam determinar as seguintes variáveis: período de indução, taxa de liberação de calor durante o período de aceleração e pico máximo de calor. A inclinação da curva de aceleração ($\text{tg } \alpha$) é determinada a partir de uma regressão linear do segmento específico da curva de fluxo de calor em função do tempo em horas, de acordo com a Figura 17.

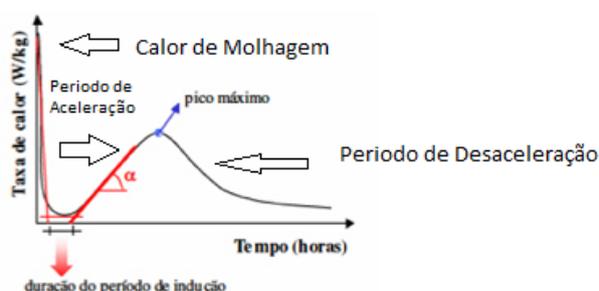


Figura 17 – Representação esquemática das curvas de calor de hidratação e critérios para determinação das variáveis. Fonte: Adaptação de (BETIOLI, 2007).

Através da Figura 17 é possível separar quatro zonas de liberação de calor: pré-indução, indução, aceleração e desaceleração. Tomando como base o intervalo horizontal, formado pela intercessão da reta extrapolada da curva do período de pré-indução (calor de molhagem) e a reta obtida por extrapolação da linha de regressão do período de aceleração, é possível calcular o período de indução.

Quanto mais reativa for a espécie química analisada, maior será o valor do coeficiente de inclinação da curva de aceleração (QUARCIONI, A., V, 2008).

Para este trabalho, adotou-se o período de desaceleração como o tempo total decorrido a partir do pico máximo da taxa de liberação de calor, com o intuito de acompanhar os resultados após um período de 48 horas de hidratação, para todas as pastas estudadas.

3.7 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado na argamassa foi realizada baseando-se no método gravimétrico, segundo a norma técnica NBR 13278 (2005), através do teor de água presente na mistura e na densidade real dos pós, obtido por picnometria de gás Hélio. A preparação das argamassas está descrita no item 3.4.

3.8 Moldagem e cura dos corpos de prova

3.8.1 Ensaio de tração diametral

Ao término dos ensaios de reometria, foram preenchidos molde cilíndricos, cujas dimensões foram: 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Para cada argamassa estudada foram confeccionados cinco corpos de prova, colocando-os em bandejas hermeticamente lacradas, na presença de umidade.

Após 24h os moldes foram retirados e os cilindros de argamassas permaneceram em cura úmida durante sete dias, em seguida foram colocados em câmara seca, completando o período de hidratação de 28 dias.

3.8.2 Ensaios de compressão, flexão e absorção total e capilar

Os materiais anidros e água foram pesados em balança analítica, conforme traço em massa, representados nas Tabela 4 e Tabela 5. Em seguida os pós foram homogeneizados e colocados na cuba do misturador mecânico junto com a água. O tempo de mistura foi de 90 segundos.

Os corpos de prova foram moldados em moldes prismáticos metálicos de 4 cm x 4 cm x 16 cm de acordo com a NBR 13279 (2005). Os moldes foram lubrificados com óleo mineral e preenchidos com as argamassas estudadas. O preenchimento ocorreu em duas camadas seguidas de 30 segundos em vibradoras com velocidade mínima, e rasadas com régua metálica.

Foram preparados 6 copos de prova para cada argamassa estudada, onde 4 deles foram destinados ao ensaio de flexão e compressão e 2 ao ensaio de absorção total e capilar.

A cura dos corpos de prova foi em duas etapas; nos primeiros 7 dias a hidratação ocorreu na presença de umidade, pois os copos de prova foram reclusos em recipiente fechado. A segunda etapa foi em condições ambiente completando o período de 28 dias de cura.

3.9 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A norma NBR 15259 (2005) deu o suporte necessário para determinação dessa propriedade nas argamassas estudadas.

Os corpos de prova, ensaiados após os 28 dias de cura, tiveram suas massas aferidas e uma de suas superfícies lixadas com lixa d'água de grão 80. Em seguida, foram colocados em contato com uma chapa metálica, em um recipiente com água cujo nível da água foi fixado em 5,6 mm em relação à face tratada do corpo de prova.

Após o período de 10 e 90 minutos as massas foram novamente aferidas e a absorção da água (A_t) foi calculada através da Equação 7. Na qual m_t é a massa do corpo-de-prova em gramas; m_0 é a massa inicial do corpo-de-prova em gramas; t corresponde aos tempos de 10 minutos e 90 minutos, em segundos; 16 é a área transversal do corpo-de-prova em centímetros quadrados.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (7)$$

O coeficiente de capilaridade foi determinado pela Equação 8, regulamentada pela NBR 14259 (2005), expresso em g/dm^2 . Onde: m_{10} – massa do corpo de prova após 10 minutos de absorção; m_{90} – massa do corpo de prova após 90 minutos de absorção.

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (8)$$

3.10 Resistência à Tração na Compressão Diametral

A resistência à tração na compressão diametral de argamassas foi determinada em uma máquina de ensaio universal, Instron, modelo 5569. O ensaio foi realizado seguindo a norma técnica NBR 7222 (2011).

Os cinco corpos de prova ensaiados apresentam uma relação diâmetro/altura de 5:2. Com a finalidade de evitar o contato direto entre o corpo-de-prova e o prato metálico, utilizou-se um papel tipo cartolina.

O teste foi realizado com controle de carregamento contínuo com uma carga de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s, evitando o impacto sobre o material avaliado.

A resistência mecânica é determinada pela Equação 9. Onde, σ_{CD} é à tração na compressão diametral, P é a carga na ruptura, em newtons, d é o diâmetro da amostra, em metros, e h é a altura, também em metros.

$$\sigma_{CD} = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (9)$$

3.11 Resistência à Flexão e à Compressão

Os quatro corpos de prova, confeccionados em moldes prismáticos, foram ensaiados à flexão e a compressão, após 28 dias de cura, conforme preconiza a norma da ABNT NBR 13279 (2005).

Os corpos de prova foram dispostos de modo que a face rasada estivesse perpendicular ao sentido da aplicação da carga.

A resistência à flexão (R_f) foi determinada conforme a Equação 10, cujo resultado é expresso em megapascal. Onde, F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons; L é a distância entre os suportes, em milímetros.

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{40^3} \quad (10)$$

O ensaio de resistência à compressão axial (R_c) foi realizado usando as duas partes dos corpos de prova advindos do ensaio de flexão; tomando o cuidado de a face rasada ficasse perpendicular ao sentido da carga aplicada. A unidade de medida do R_c é megapascal.

O cálculo da resistência à compressão foi através da Equação 11.

$$Rc = \frac{Fc}{1600} \quad (11)$$

Na qual, F_c é a carga máxima aplicada, em newtons; 1600 é a área da secção quadrada do dispositivo de carga em milímetros quadrado.

Os corpos de prova foram rompidos em prensa hidráulica manual da marca Solotest de referência 1509230.

3.12 Porosidade – método de imersão de Arquimedes

A porosidade dos materiais cimentícios curados por 28 dias foi avaliada a partir da imersão da amostra em água, segundo o ensaio de Arquimedes. Inicialmente as massas das amostras secas (m_s) foram anotadas e os corpos de prova imerso em água e submetidos ao vácuo por cerca de 2 horas para forçar a sua intrusão nos poros. Dando continuidade ao ensaio, as amostras foram pesadas imersas (m_i) e úmidas (m_u) e as porosidades calculadas a partir das Equação 12 e Equação 13.

$$PA(\%) = \frac{m_u - m_i}{m_u - m_s} \times 100\% \quad (12)$$

$$PT(\%) = (1 - \rho_{REL}) \times 100\% \quad (13)$$

Onde: PA é a porosidade aparente, PT é a porosidade total e ρ_{REL} é a densidade relativa do cimento (ou resultante dos pós que compõem as argamassas).

3.13 Permeabilidade das argamassas – *vacum-decay*

Para realização do ensaio de permeabilidade (*vacum-decay*) a ventosa, Figura 18, foi fixada ao corpo-de-prova com o auxílio de massa de calafetar, a fim de impedir a entrada de ar durante o ensaio. Em seguida, acionou-se a bomba de vácuo até a estabilização da pressão negativa, na qual foi mantida por cerca de 1 minuto. Após esse período, a bomba de vácuo foi desligada e o tempo de decaimento da pressão quantificado.



Figura 18 – Equipamento para avaliação da permeabilidade de superfície, *vacum-decay*. Fonte: Mario S. Takeashi.

A permeabilidade das argamassas foi expressa em valores de k_1 (m^2) – constante de permeabilidade Darciana, e de k_2 (m) – constante de permeabilidade não-Darciana, que representa as interações do ar com meio poroso.

Os resultados de k_1 foram obtidos a partir da equação de *Forchheimer*, Equação 14, considerando, para efeito de simplificação, duas hipóteses: compressibilidade desprezível do gás e utilização apenas do termo linear.

$$\frac{\Delta p}{L} = V_s \frac{\mu}{k_1} + V_s^2 \frac{\rho}{k_2} \quad (14)$$

Na qual: L é a espessura da amostra, μ é a viscosidade do fluido e ρ é a densidade do fluido. O termo $V_s \frac{\mu}{k_1}$ ilustra os efeitos viscosos da interação, fluido-sólido, enquanto que o termo $V_s^2 \frac{\rho}{k_2}$ representa os efeitos inerciais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do cimento, da cal e da areia

Para caracterização físico-química do cimento CPV ARI foram realizados ensaios de densidade real com o objetivo de confirmar os resultados enviados para o cimento Nacional pela Brennand Cimentos. Também foram realizados ensaios de termogravimetria, massa superficial específica e DRX. Os resultados dos ensaios realizados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Caracterização das matérias-primas. Fonte: tabela do autor, (2014)

Propriedades	Cimento	Cal	Cinza	Areia
Área superficial (m^2/g)	1,20	14,50	4,40	0,60
Densidade real (g/cm^3)	3,00	2,62	2,86	2,20

Fonte: Tabela do autor, 2014.

A distribuição granulométrica do cimento é apresentada na Figura 19, em conjunto com as demais curvas granulométricas das matérias-primas utilizadas.

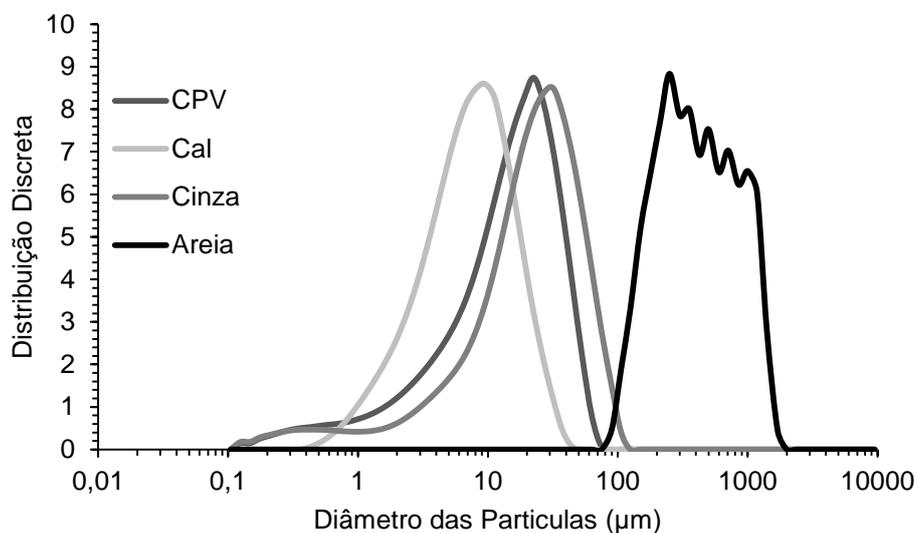


Figura 19 – Distribuição Granulométrica das matérias prima que compõem as argamassas estudadas.

Fonte: figura do autor, 2014.

Conforme pode ser visualizado na Tabela 10, a presença de materiais com alta área superficial específica como a cal ($14,50 \text{ m}^2/\text{g}$) possibilita um aumento na consistência da argamassa, levando à necessidade de maiores teores de adição de água. Com a substituição da cal hidratada pela cinza de Algaroba, cuja área superficial específica é cerca de 70% inferior, espera-se que o sistema apresenta

uma necessidade menor da água de amassamento. Além disso, observa-se que as densidades reais são semelhantes entre a cal e a cinza, o que sugere que ao se substituir parcialmente a cal ($2,62 \text{ g/cm}^3$) pela cinza ($2,86 \text{ g/cm}^3$) não acarretará em alterações na fração volumétrica dos constituintes da argamassa.

Na Figura 19 observa-se uma semelhança granulométrica entre a cinza e o cimento, possibilitando uma maior nucleação das fases hidratadas na superfície da cinza, levando a possíveis alterações no período de indução, aceleração e desaceleração da hidratação das fases cimentícias (QUARCIONI 2005).

4.1.1 Análises microestruturais

Na Figura 20 e Figura 21 são apresentadas, respectivamente, as análises termogravimétricas do cimento e cal hidratada CH I usados no estudo, cuja perda de massa foi determinada e encontra-se exposta na própria figura.

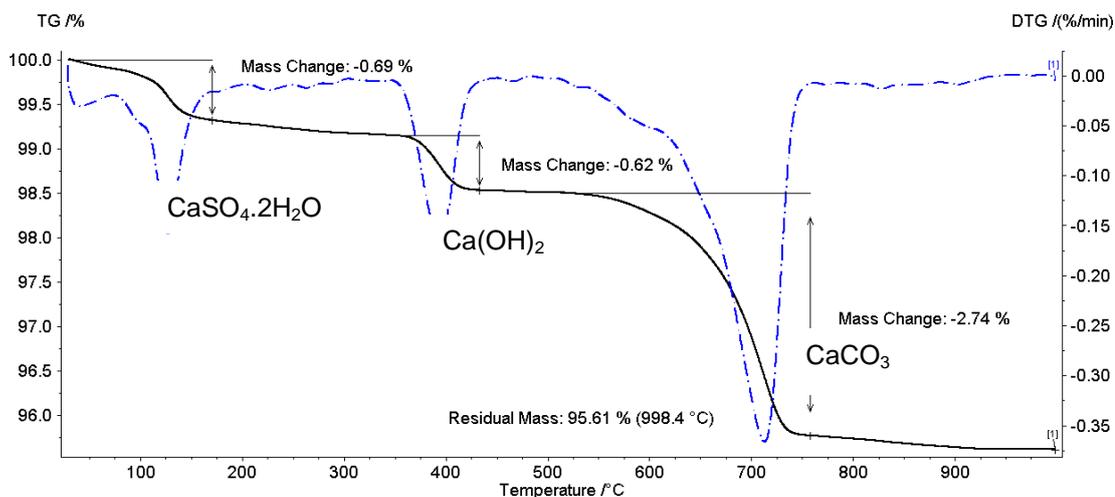


Figura 20 – Análise termogravimétrica do cimento CPV ARI. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.

No intervalo de 120°C a 180°C o pico refere-se à perda de massa relacionada à decomposição da gipsita; entre 330°C e 450°C a perda de massa foi consequência da decomposição da Portlandita; e, por fim, no intervalo de 600°C ocorre a decomposição do carbonato de cálcio.

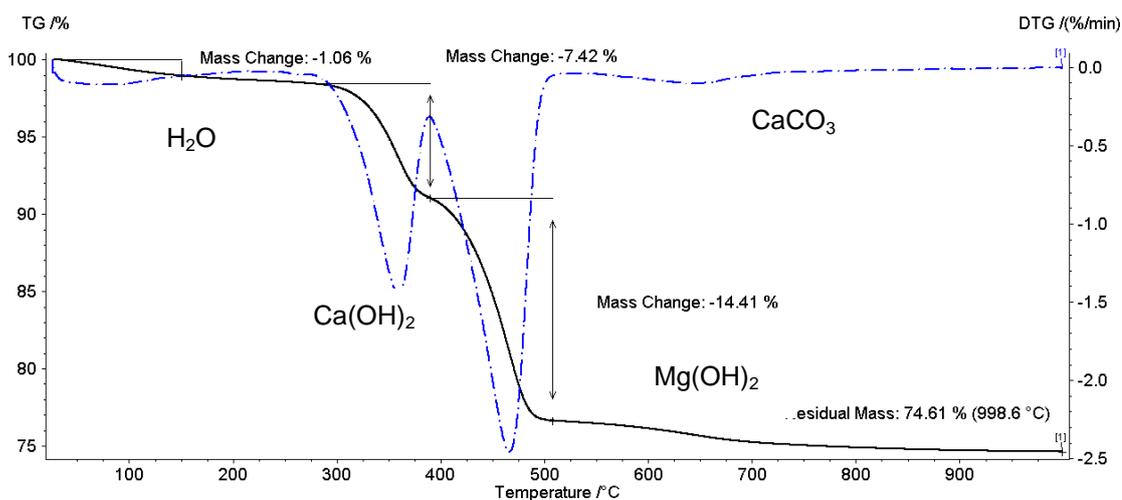


Figura 21 – Análise termogravimétrica da cal hidratada CH I. Fonte: figura do autor , (2014).

A análise termogravimétrica da Figura 21 detalha as perdas de massa da cal usada no estudo. Por volta de 100°C há uma ligeira perda de umidade; em seguida, a decomposição da Portlandita ocorre entre 300°C e 450°C; já o pico entre 450°C e 520°C refere-se ao hidróxido de magnésio; e, por fim, acima de 600°C há uma leve perda de carbonato de cálcio.

Os gráficos de DRX, Figura 22 e Figura 23, apresentam os picos característicos do cimento e da cal, respectivamente.

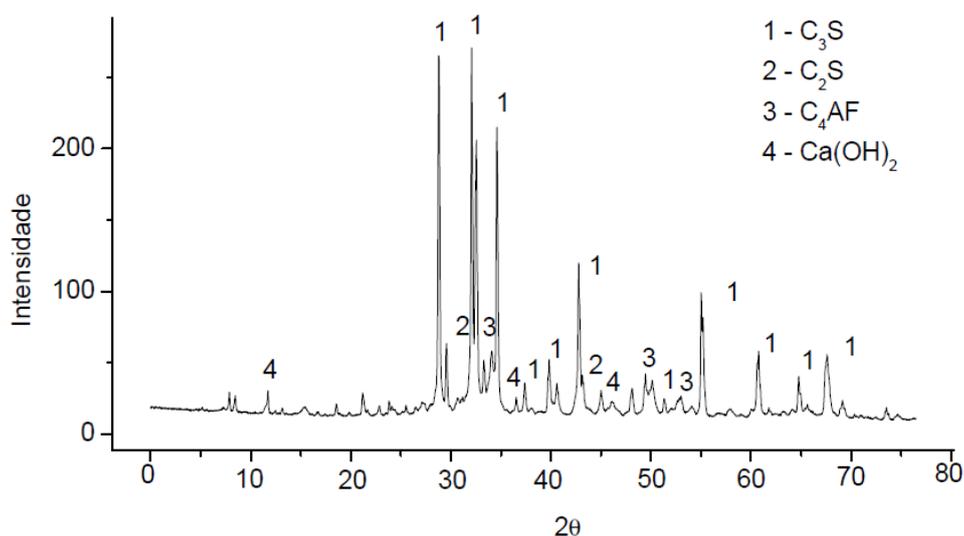


Figura 22 – Difração de raios – X do cimento CPV ARI. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.

Através da análise do difratograma do cimento foi possível constatar a presença de algumas fases anidras comum ao cimento. No pico de maior intensidade a 32° encontrasse a Alita (C_3S), seguida de um pico de menor

intensidade a 34° do C_4AF . Encontrasse também picos referentes à Belita (C_2S) e ao hidróxido de cálcio ($CH - Ca(OH)_2$). Reduzidas intensidades de picos de Portlandita e Belita ratificam a classificação do cimento como CPV ARI.

O DRX da cal hidratada apresenta picos de maior intensidade (34°) da Portlandita; bem como picos referentes ao hidróxido de magnésio (39°), também estão presentes. A não presença de carbonato de cálcio ratifica a classificação da cal hidratada CH I utilizada no presente estudo. Além disso, o fato de não ter sido identificado óxido de cálcio mostra a qualidade de seu processo produtivo.

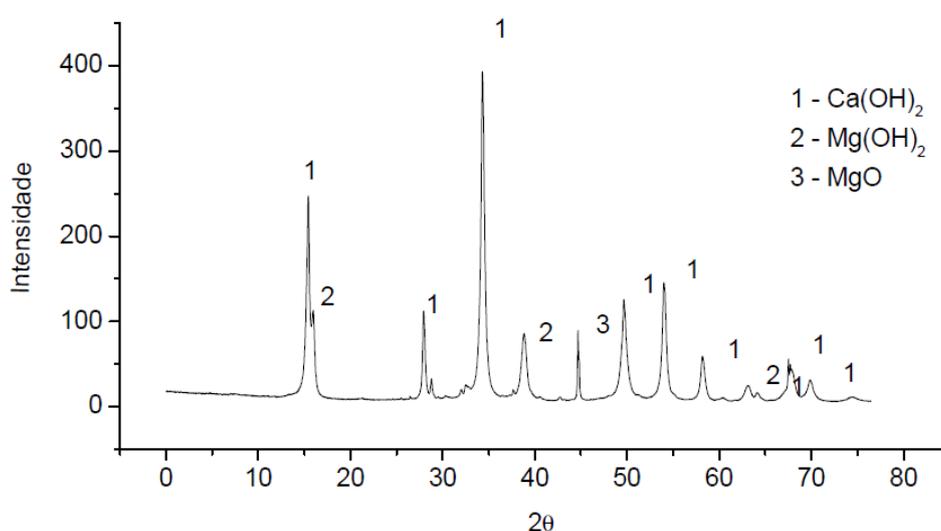


Figura 23 – Difração de raios-X da cal hidratada CH I. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.

4.2 Caracterização da cinza de Algaroba

A cinza proveniente da queima da madeira da Algaroba foi caracterizada e suas principais propriedades encontram-se expostas na Tabela 11, identificando as características físico-químicas.

Tabela 11 - Parâmetros físico-químicos da cinza de Algaroba.

Parâmetro	Resultado
Área superficial (m^2/g)	4,40
Densidade real (g/cm^3)	2,86
pH	13,50
Condutividade (mS)	77,00
Cloretos (%)	0,97
Sulfatos (mg/L)	0,05
Umidade a $105^\circ C$ (%)	0,10

Sólidos totais (%)	99,90
Sólidos fixos (%)	98,79
Sólidos voláteis (%)	1,11

Fonte: (LELOUP, 2013), adaptado pelo autor.

Conforme exposto na Tabela 11, a cinza possui pH básico, o que é positivo de ponto de vista cinético e termodinâmico nas reações de hidratação do cimento, por manter o mesmo ambiente alcalino do sistema ao substituir parcialmente a cal.

A distribuição granulométrica do resíduo encontra-se relacionada à dos demais materiais utilizados na Figura 19. A cinza de Algaroba coletada na indústria local foi peneirada em malha 200 com eficiência de 45%, a fim de possibilidade de promoção do efeito *filler*.

4.2.1 Análises microestruturais

Resultados de caracterização química da cinza de Algaroba por Fluorescência de Raio-X encontram-se expostos na Tabela 12. Verifica-se que o elemento preponderante é o cálcio (77,85%), seguido do potássio (13,81%), também havendo a presença de outros elementos mais significativos como silício e ferro.

Possui apenas 1,60% de SiO_2 e 2,14% de Fe_2O_3 , além de não apresentar presença de Al_2O_3 , o que indica que essa cinzas não possuem as condições químicas necessárias para desenvolver atividade pozolânica, segundo a NBR 12653 (1992), que preconiza o valor mínimo de 50% para o somatório dos percentuais de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 para considerar um material como pozolânico. De fato, Couceiro (2012) e Leloup (2013) avaliaram atividade pozolânica de cinzas de Algaroba da região sem sucesso.

Tabela 12 - Resultados de FRX do resíduo de cinza de Algaroba

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: (LELOUO, 2013).

O difratograma da cinza de Algaroba encontra-se representada na Figura 24, estando de acordo com os elementos presentes no FRX, Tabela 12. No pico de maior intensidade (29°) encontra-se o carbonato de cálcio; alguns picos de cloreto de potássio também estão discriminados. Potássio, cloro e magnésio são característicos da combustão de biomassas à base de celulose.

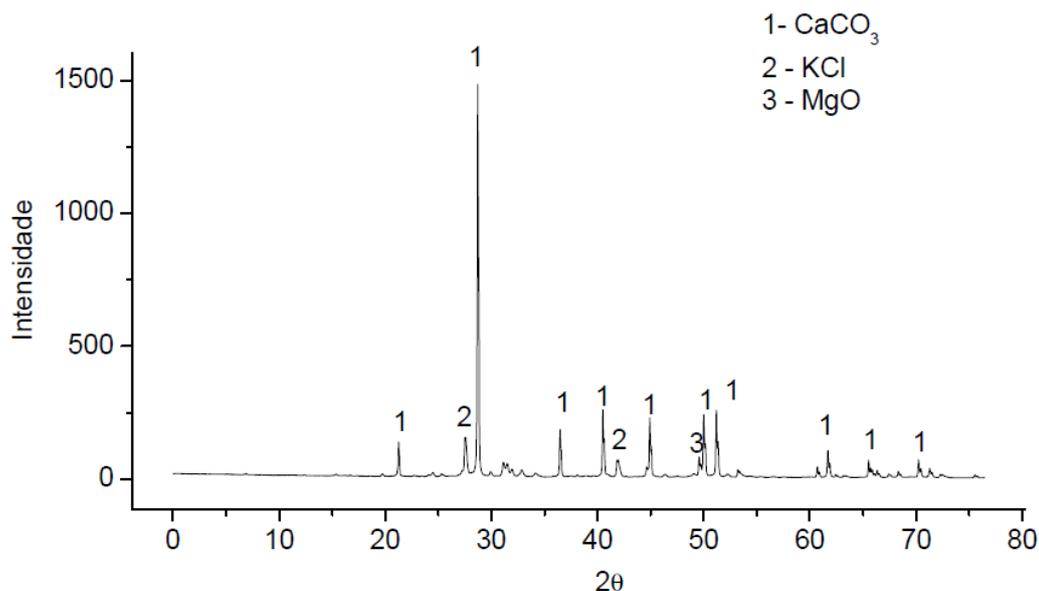


Figura 24 – Difração de Raios-X da cinza de Algaroba. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.

Corroborando com o ensaio de Difração de Raios-X, a análise termogravimétrica, Figura 20, indica a presença de uma quantidade considerável do carbonato de cálcio na cinza de Algaroba. Fator positivo, pois a presença de um composto químico inerte como o carbonato de cálcio é facilmente adicionado em produtos cimentícios, pois o mesmo é encontrado em todos os tipos de cimentos Portland.

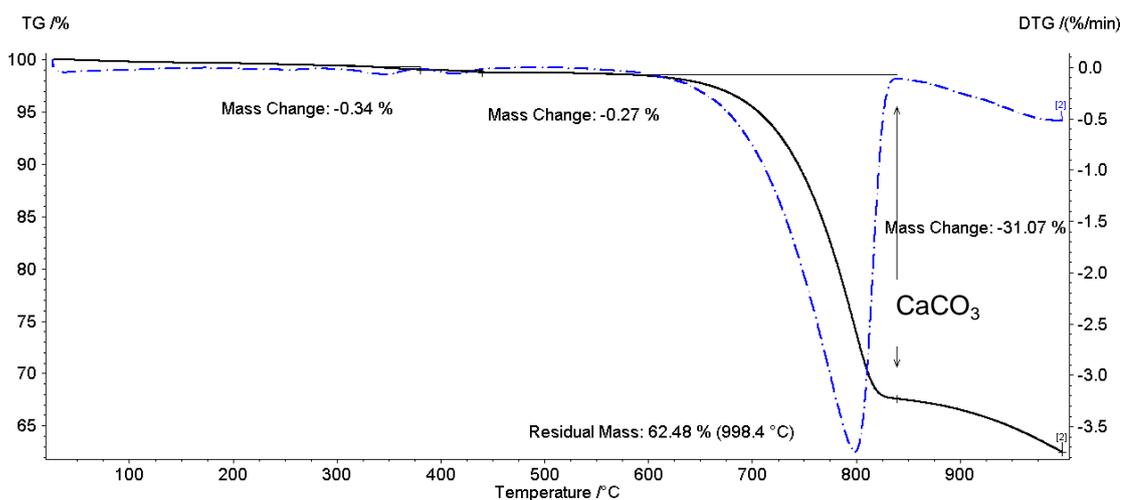


Figura 25 – Análise termogravimétrica da cinza de Algaroba. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.

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.

O fato de não ter sido identificada a presença de óxido de cálcio e nem uma quantidade expressiva de outro tipo de óxido no difratograma e termogravimetria da cinza é positivo, uma vez que os óxidos (compostos químicos expansivos), após contato com a água, possibilitaria reações de expansão tardias no sistema.

Expansões tardias caracterizam um problema do ponto de vista dos sistemas cimentícios, pois a falta de conhecimento das características e tempo de hidratação desse composto poderia levar a formação de microtrincas à medida que a hidratação fosse evoluindo e o revestimento já estivesse enrijecido; reduzindo significativamente algumas propriedades no estado endurecido: resistência a compressão, resistência a tração, permeabilidade e durabilidade.

Portanto, a cinza de Algaroba usada nesse estudo apresenta as condições necessárias para adição em argamassas de revestimento e outros produtos a base de cimento Portland.

Do ponto de vista microestrutural também foi realizada microscopia eletrônica de varredura, Figura 26, onde é possível determinar que a estrutura da cinza é arredondada com alguns aglomerados e grão na ordem de 10 µm.

Foram escolhidos pontos aleatórios para realização emprego de caracterização química qualitativa por microsonda de energia dispersiva (EDS). O

resultado determinou a presença de Ca, K, Si, corroborando com a análise de Fluorescência de Raios-X.

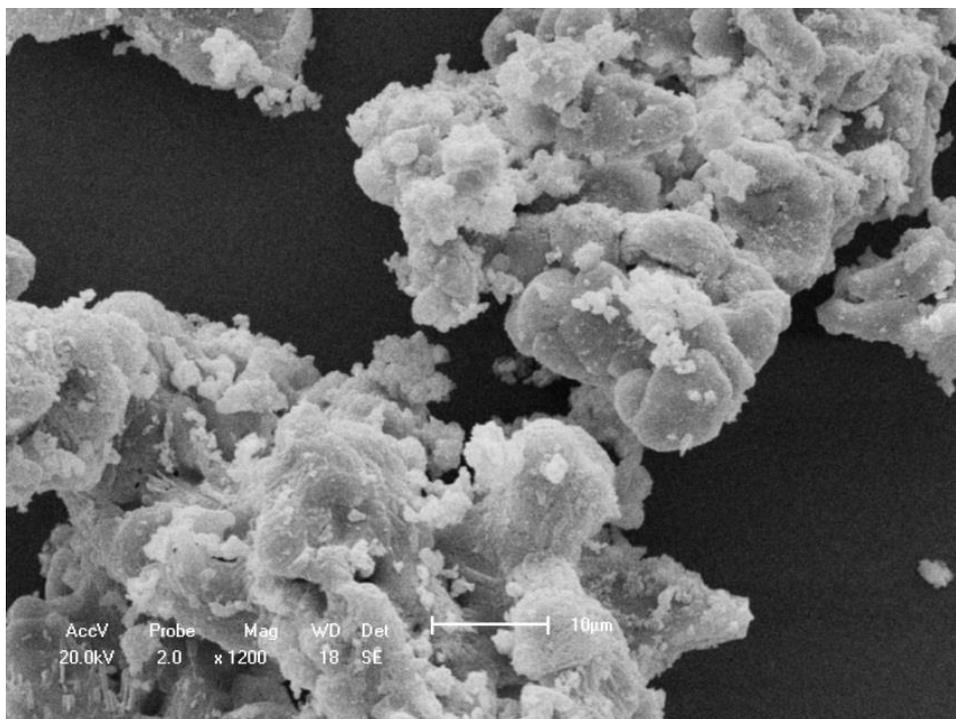


Figura 26 – Microscopia eletrônica de varredura da cinza de Algaroba. (LELOUP, 2013).

4.3 Caracterização das argamassas

4.3.1 Avaliação do estado fresco

4.3.1.1 IPS e MPT das argamassas

As proporções volumétricas das argamassas encontram-se compiladas nas Figura 27 (argamassas com água constante) e Figura 28 (argamassas com consistência constante).

Com base nessas proporções volumétricas foram calculados os valores da distância de separação interparticular (IPS) e espessura teórica da camada que separa os agregados (MPT) e os valores determinados encontram-se expostos nas Tabela 13 e Tabela 14, juntamente com porosidade de empacotamento teórico e áreas de superfície específica (AE) e volumétrica (ASV) das argamassas estudadas no trabalho.

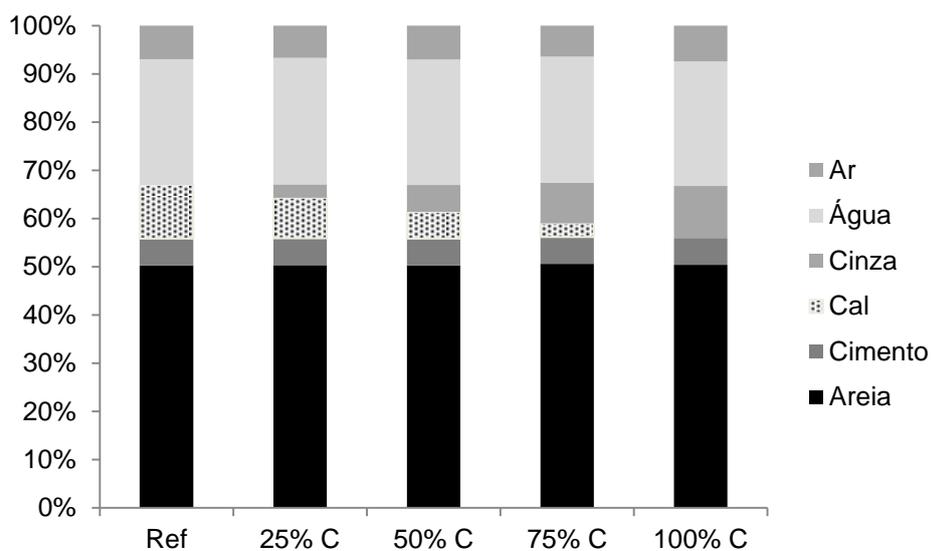


Figura 27 - Densidade no estado fresco e conteúdo em porcentagem de volume das distintas fases para argamassas mantendo quantidade de água constante. Fonte: figura do autor, 2014.

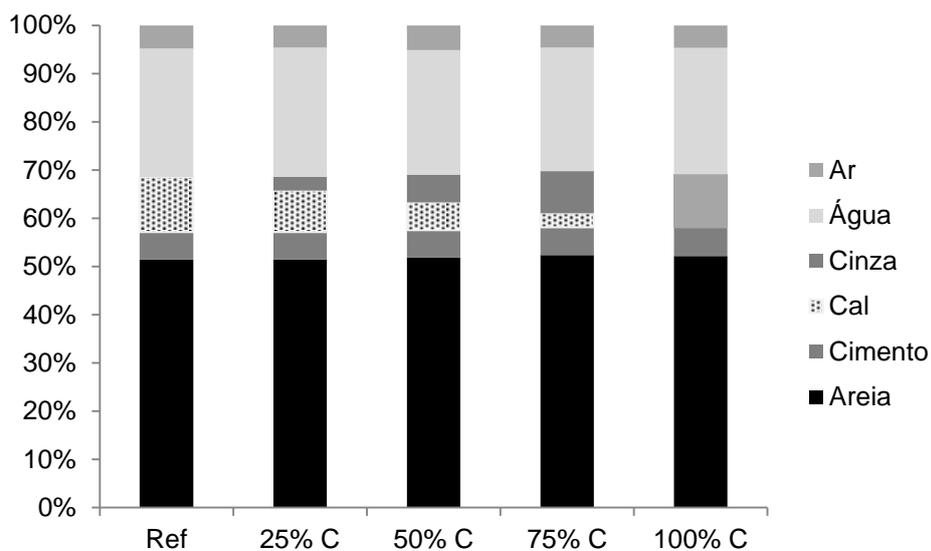


Figura 28 - Densidade no estado fresco e conteúdo em porcentagem de volume das distintas fases para argamassas mantendo quantidade de consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.

Tabela 13 – Densidade do pó, porosidade de empacotamento teórico, distância de separação interparticular (IPS), espessura teórica da camada que separa os agregados (MPT) e áreas de superfície específica (AE) e volumétrica (ASV) das argamassas estudadas no trabalho em condições de água constante.

% de cinza	Porosidade de empacotamento (%)	Densidade (g/cm ³)	IPS (μm)	MPT (μm)	AE (m ² /g)	ASV (m ² /cm ³)
Referência	18,06	1,77	0,48	1,52	1,65	3,75
25%	18,12	1,77	0,58	1,51	1,45	3,30
50%	17,96	1,78	0,67	1,54	1,31	2,98
75%	17,93	1,78	0,85	1,52	1,14	2,59
100%	17,88	1,79	1,12	1,54	0,97	2,23

Fonte: tabela do autor, 2014.

Tabela 14 - Densidade do pó, porosidade de empacotamento teórico, distância de separação interparticular (IPS), espessura teórica da camada que separa os agregados (MPT) e áreas de superfície específica (AE) e volumétrica (ASV) das argamassas estudadas no trabalho em condições de consistência constante.

% de cinza	Porosidade de empacotamento (%)	Densidade (g/cm ³)	IPS (μm)	MPT (μm)	AE (m ² /g)	ASV (m ² /cm ³)
Referência	18,06	1,77	0,48	1,52	1,65	3,75
25%	18,12	1,77	0,58	1,51	1,45	3,30
50%	17,96	1,80	0,63	1,43	1,31	2,98
75%	17,93	1,81	0,78	1,40	1,14	2,59
100%	17,88	1,8	1,1	1,42	0,97	2,23

Fonte: tabela do autor, 2014.

Analisando as Tabela 13 (argamassas com teor de água constante) e Tabela 14 (argamassas com consistência constante) conclui-se que à medida que a cinza é incorporada às argamassas os valores de área superficial específica são reduzidos e maiores valores de IPS são determinados para ambas as situações estudadas. Esse comportamento foi também observado por Romano (2013). Os maiores valores de IPS quando da adição da cinza são consequência dessa redução da área superficial específico e, com isso, esperasse uma redução da viscosidade das argamassas com adição de cinzas, já que maiores valores de IPS geram maiores afastamento dos finos.

Esse fenômeno proporciona, teoricamente, uma maior quantidade de líquido livre no sistema para separar os finos presentes. Observa-se também nas Tabela 13 (argamassas com teor de água constante) e Tabela 14 (argamassas com consistência constante) uma redução na porosidade de empacotamento em ambas as situações, mas de níveis mínimos (1,3%), à medida que a cal hidratada é substituída pela cinza de Algaroba.

A manutenção com tendência à melhoria no índice de empacotamento ao substituir cal hidratada por cinza de Algaroba nas proporções avaliadas é um importante fator, pois o empacotamento influi diretamente na quantidade de água necessária para o sistema (ROMANO, R. C. O. et al., 2009a). Se o teor de água for inferior ou igual à porosidade de empacotamento, o sistema não flui (ROMANO, R. C. O. et al., 2009a). Decaimentos na plasticidade das argamassas estão relacionados com a quantidade de água insuficiente ou diferença discrepante no tamanho de partículas (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

Por fim, avaliando-se os valores de MPT, observa-se um mantimento nos valores desse parâmetro, sendo praticamente estável a espessura teórica da camada que separa os agregados em condições de água constante. Contudo, uma pequena redução da ordem de 8% foi observada quando o teor de água foi alterado para manter a consistência constante. Reduções de MPT podem gerar um aumento na fricção dos agregados, aumento os esforços necessários para a mistura (CARDOSO, 2009).

4.3.1.2 Caracterização reológica

4.3.1.2.1 Reometria de mistura

Na Figura 29 encontram-se expostas as curvas de misturas das argamassas processadas com diferentes teores de cinzas, fixando-se a água constante com teor de água em 875 g (a) e a consistência constante (b).

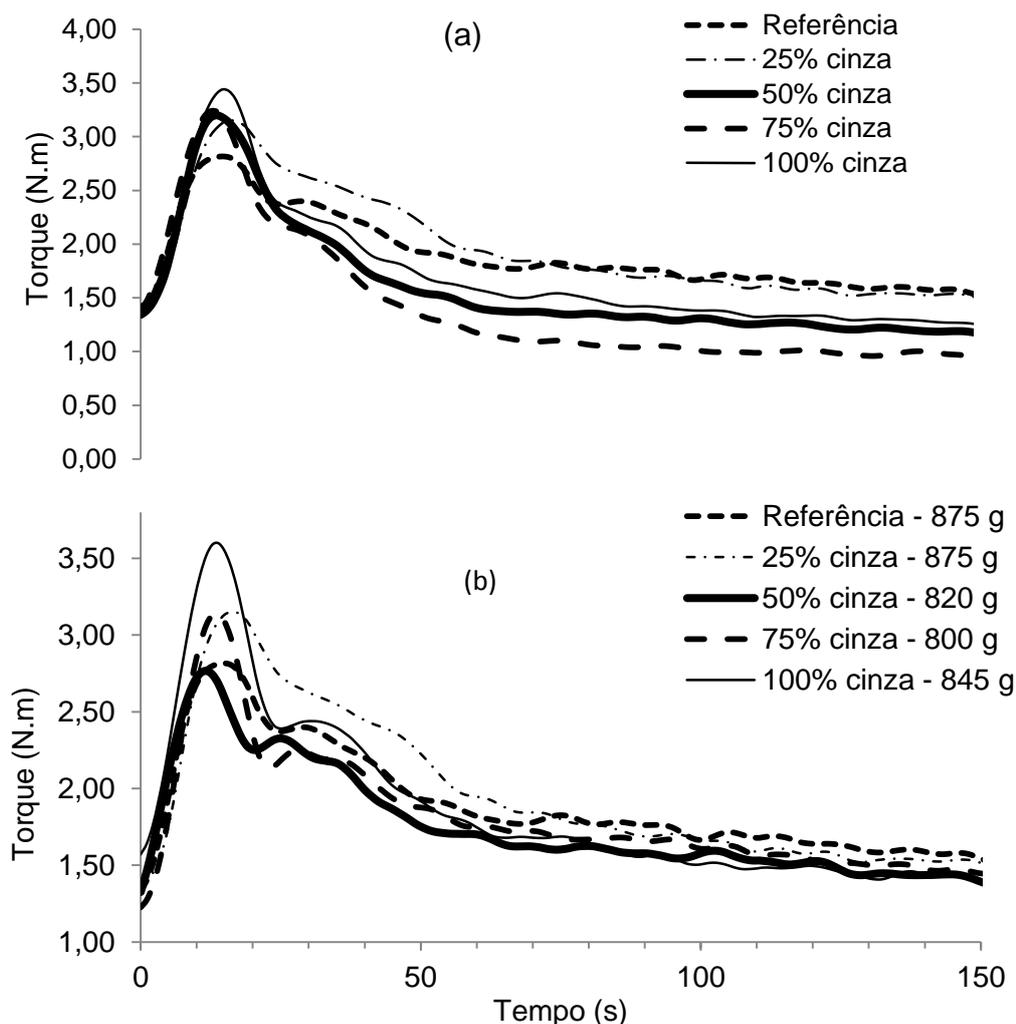


Figura 29 - Reometria de mistura (torque versus tempo) mantendo água de amassamento constante (875g) (a) e consistência constante (b). Fonte: figura do autor, 2014.

No início do ensaio de mistura, os valores dos torques aumentam rapidamente, atingindo um pico. Esse comportamento foi observado tanto na argamassa de referência, quanto nas argamassas mistas com cal hidratada para substituição gradual de cal por cinza de Algaroba (25%, 50%, 75% e 100%).

Com a manutenção da quantidade de água constante (b) verifica-se que a presença da cinza de Algaroba, a argamassa necessitou de um torque mais elevado no estado inicial da mistura, sendo mais crítico para 100% de cinza em substituição a cal hidratada que alcançou incremento de 22% quando da quantidade de água constante e 29,8% para consistência constante.

Os picos relativos ao comportamento inicial da mistura são baseados na interação entre partículas e, portanto, esse fenômeno não tem relação com os parâmetros de IPS e MPT, devido aos finos estarem aglomerados. Apesar da

redução da área superficial específica da cinza em relação à cal, o aumento de densidade dos pós observados nas Tabela 15 e Tabela 16 corroborou para a aglutinação dos finos no estado inicial de mistura, proporcionando a retenção de líquidos no interior dos aglomerados. Acredita-se que a morfologia do resíduo (Figura 26, página 60) propicie a maior interação entre as partículas que a cal, com sua morfologia lamelar.

Depois que acontece a quebra dos aglomerados, com a continuação da imposição do cisalhamento, a água de amassamento é liberada para afastar as demais partículas. A partir desse momento, a porosidade e a massa específica das partículas do sistema começam a influenciar nos valores dos parâmetros IPS e MPT, provocando nas argamassas com cinzas menores torques finais de mistura, torques necessário para homogeneização dos materiais presentes.

Quando da quantidade de água constante, todas as argamassas onde se substituiu a cal hidratada pela cinza no decorrer da mistura se mantiveram com torque inferiores à referência. Já no caso da consistência constante, sempre acabam no mesmo ponto, mantendo, no entanto, comportamento similar ao conjunto de água constante no intervalo de 25 a 50 segundos.

De fato reduções da ordem de 7,7% (50%), 4,6% (75%) e 2,4% (100%) para consistência constante das argamassas foram observadas, conforme pode ser visualizado na Figura 29b. Comportamento distinto foi observado quando da substituição em 25%, aumentando a energia de mistura em cerca de 2,7%.

Com o objetivo de mantimento da consistência constante, observou-se a necessidade da redução da água de amassamento nas argamassas com adição de cinza, devido ao fato da cinza apresentar área superficial específica da ordem de $4,40 \text{ m}^2/\text{g}$ frente à $14,50 \text{ m}^2/\text{g}$ da cal. A redução da água de amassamento em sistemas cimentícios é desejada por favorecer microestruturalmente a formação das fases hidratadas de melhor qualidade, eliminando porosidade, retração e melhorando a resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

4.3.1.2.2 Energia de mistura

Também foram quantificadas as energias de mistura para as argamassas quando se manteve a quantidade de água constante (Figura 30), onde se observou

redução mais expressiva. Esse fenômeno era esperado em função da maior quantidade de água de amassamento para manutenção da consistência.

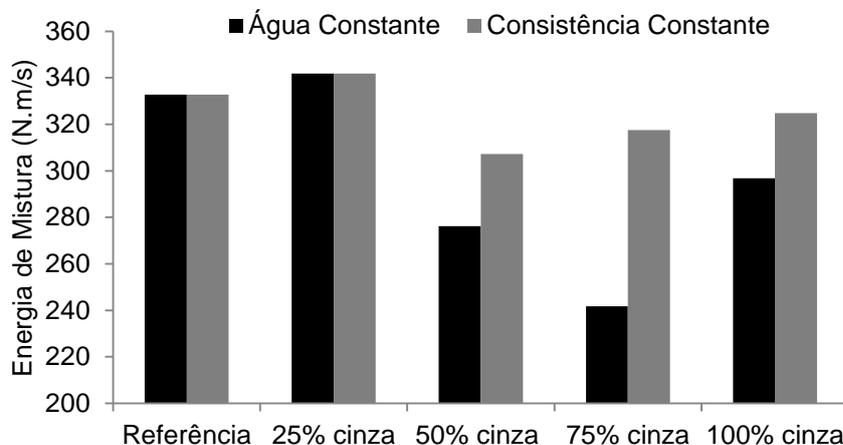


Figura 30 - Energia de mistura mantendo água de amassamento constante (875g) e consistência constante, comparativamente. Fonte: figura do autor, 2014.

A redução na energia de mistura, Figura 30, denota uma maior facilidade encontrada pelo operador ao homogeneizar o material. Energias de mistura elevadas podem diferenciar argamassas que teriam menor produtividade pela dificuldade de mistura durante o amassamento, sentida pelo operador, ou tempo maior necessário para homogeneização durante o processamento (ROMANO, R. C. O. et al., 2009a; ROMANO, R. C. O. et al., 2009b).

Verifica-se que a presença da cinza de Algaroba proporcionou uma menor energia de mistura nas duas condições estudadas. Principalmente, esse comportamento é útil na condição de consistência, pois a cinza favoreceu não só a redução da água de amassamento, como argamassas mais fáceis de homogeneizar em relação à argamassa com à argamassas de referência (0% de cinza).

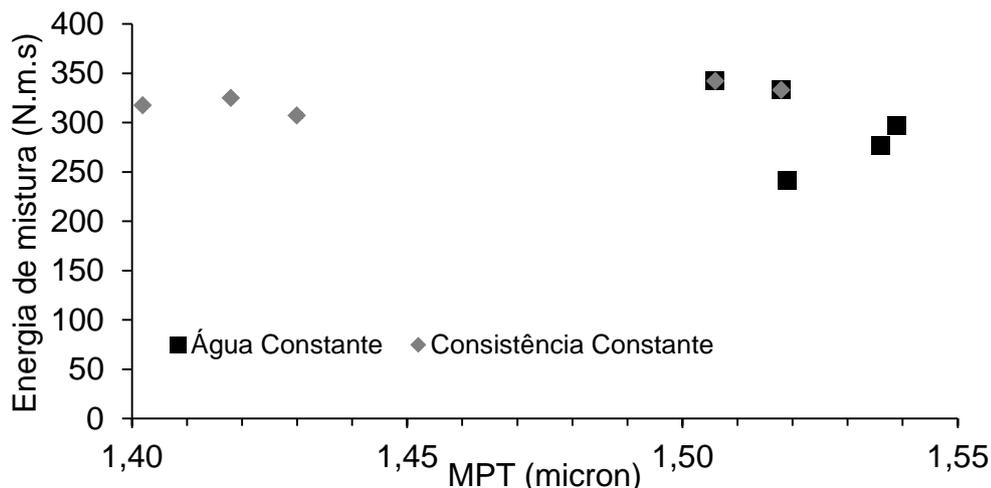


Figura 31 – Energia de Mistura vs MPT, água constante e consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.

Ao observar a relação entre energia de mistura e o MPT, Figura 31, conclui-se que para valores superiores de MPT a energia necessária para misturar os materiais, que compõem a argamassa, foi reduzida ao se manter a água constante. Já na condição de consistência constante, as argamassas mantiveram o equilíbrio da energia de mistura à medida que os valores de MPT cresceram.

4.3.1.2.3 Ciclo de cisalhamento

Os perfis de fluxo de cisalhamento das argamassas com substituição gradual da cal hidratada CH I pela cinza de Algaroba (0%, 25%, 50%, 75%, 100%), mantendo quantidade de água constante em 875 g na Figura 32, bem como mantendo consistência constante, encontram-se expostos na Figura 33.

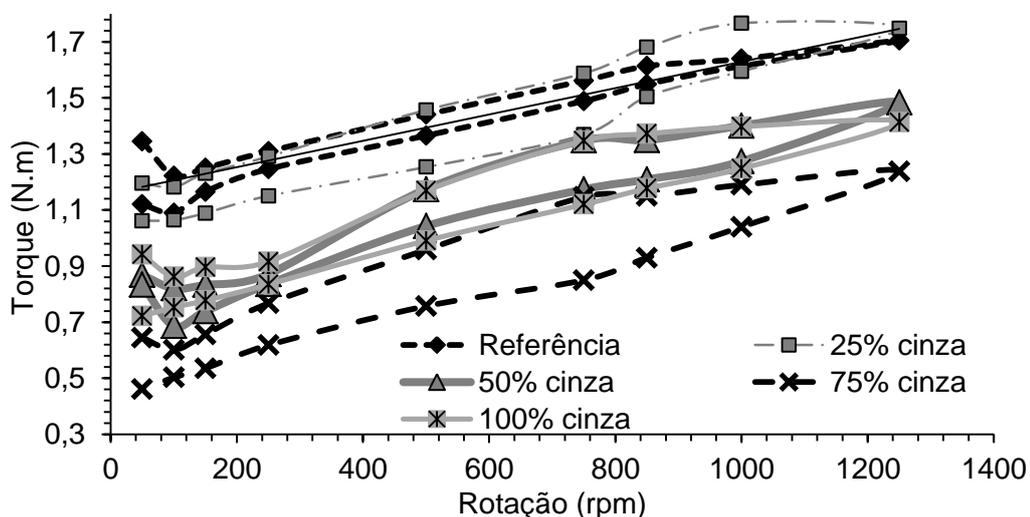


Figura 32 - Perfil de fluxo de cisalhamento das argamassas mantendo água constante.

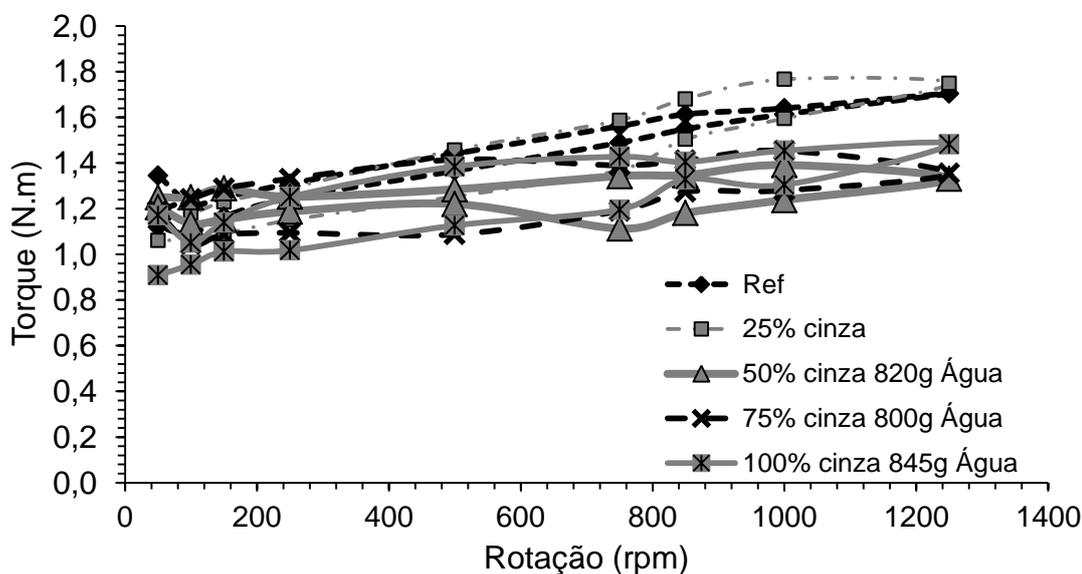


Figura 33 - Perfil de fluxo de cisalhamento das argamassas mantendo consistência constante.

Com relação ao torque máximo, a presença da cinza favoreceu a redução desse parâmetro em até cerca de 22% para o estudo mantendo consistência constante (Figura 33) e, 27% para o estudo, mantendo quantidade de água constante (Figura 32). Assim, ratifica-se que a substituição da cal pela cinza reduz o torque máximo. Destaca-se, ainda, que esse parâmetro não sofreu alterações significativas quando da substituição em 25%.

Verifica-se que a presença da cinza de madeira não alterou o caráter positivo da área de histerese (Figura 34), o que indica a continuidade dos parâmetros de mistura ao adicionar a cinza. A presença da cinza de madeira incrementou esse parâmetro (Figura 34), tanto na condição de manutenção da quantidade de água, quanto na manutenção da consistência. Incrementos para condição de água constante: 87% (25% de cinza), 27,5% (50% de cinza), 76,4% (75% de cinza), 61,8% (100% de cinza); e, incrementos para quantidade de consistência constante: 87% (25% de cinza), 50,3% (50% de cinza), 124,6% (75% de cinza) e 95,2% (100% de cinza).

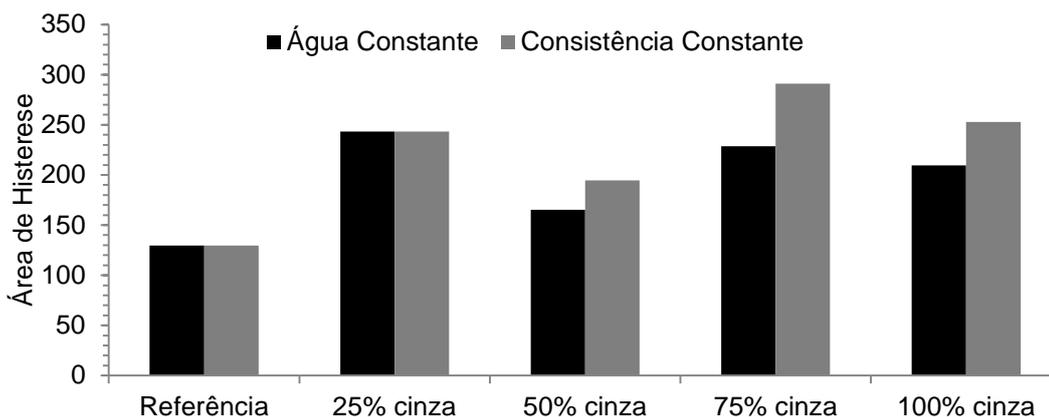


Figura 34 - Área de Histerese mantendo água de amassamento constante (875g) e consistência constante, comparativamente.

Tendência à redução no torque mínimo foi observada com base nos perfis de fluxo de cisalhamento das argamassas mantendo quantidade de água constante em 875 g (Figura 32), atingindo valor máximo de redução de cerca de 60% para 75% de substituição. No entanto, comportamento anômalo para esse parâmetro foi observado quando se manteve a quantidade de água constante. O aumento da área de histerese, ao adicionar a cinza, em relação à argamassa de referência confirma os fenômenos observados na etapa de mistura, onde aglomerados foram formados, aprisionando a umidade e, ao decorrer do ensaio, forças de cisalhamento romperam esses aglomerados resultando no retorno das curvas de cisalhamento com torques menores, Figura 32, Figura 33, em ambas as condições estudadas.

Nesse cenário, tem-se que a presença da cinza de madeira em substituição gradual da cal facilitou o fluxo, uma vez que as curvas de histerese foram todas deslocadas para baixo em relação à argamassa de referência.

Em relação ao torque de escoamento, Figura 35, este corrobora com o fenômeno de aglomeração da água no início da mistura, reduzido significativamente a oferta de fluido, aumentando, por consequência, o cisalhamento entre as partículas constituintes das argamassas estudadas; efeito esse que apresentou uma redução ao se introduzir o resíduo no sistema.

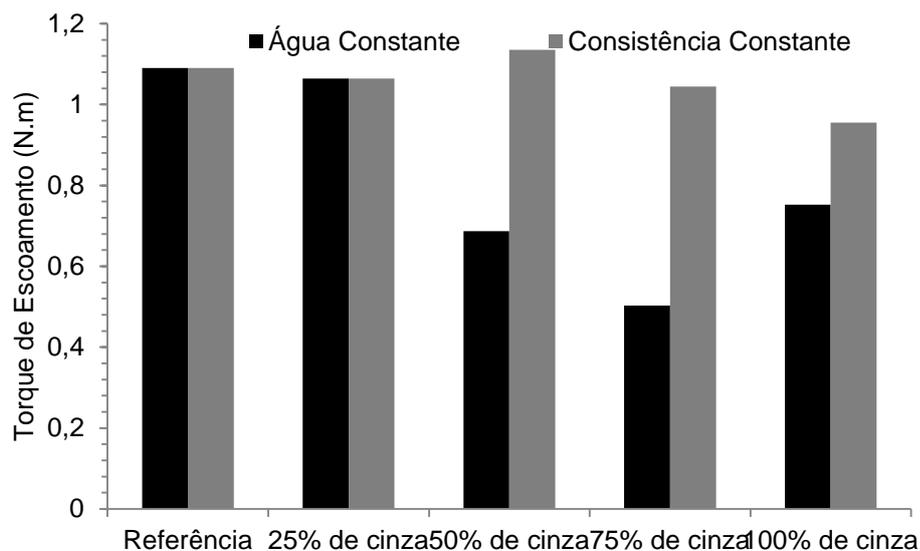
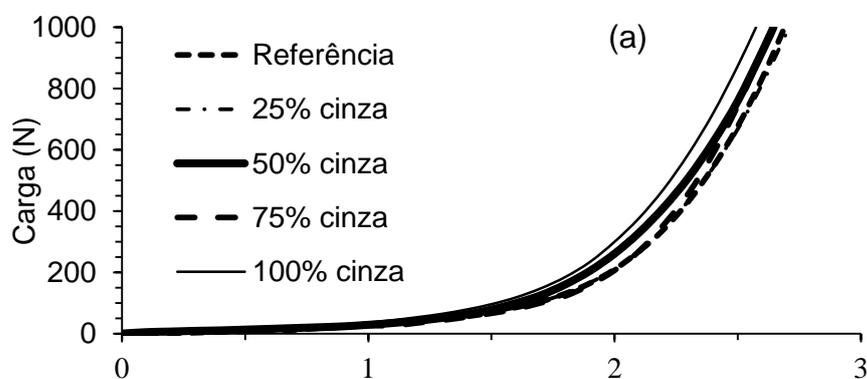


Figura 35 - Torque de escoamento mantendo água de amassamento constante (875g) e consistência constante, comparativamente.

A relação entre área de histerese e MPT não pôde ser estudada, pois o efeito de aglomeração dos finos no início da mistura vai de encontro com a teoria das equações de IPS e MPT, que exigem a não existência de aglomerados.

4.3.1.2.4 Reometria compressiva (squeeze flow)

As características das argamassas sob solicitação de compressão estão ilustradas nos resultados do perfil de fluxo das argamassas por *Squeeze Flow* nas Figura 36a (água de amassamento constante para 10 minutos), Figura 36b (consistência constante para 10 minutos), Figura 37a (água de amassamento constante para 45 minutos) e Figura 37b (consistência constante para 45 minutos).



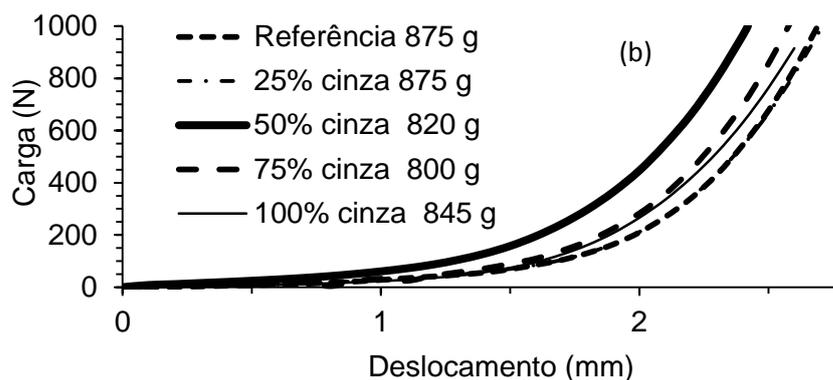


Figura 36 - Perfil de fluxo de cisalhamento das argamassas por Squeeze Flow para 10 min mantendo água de amassamento constante (875g) (a) e mantendo consistência constante (b).

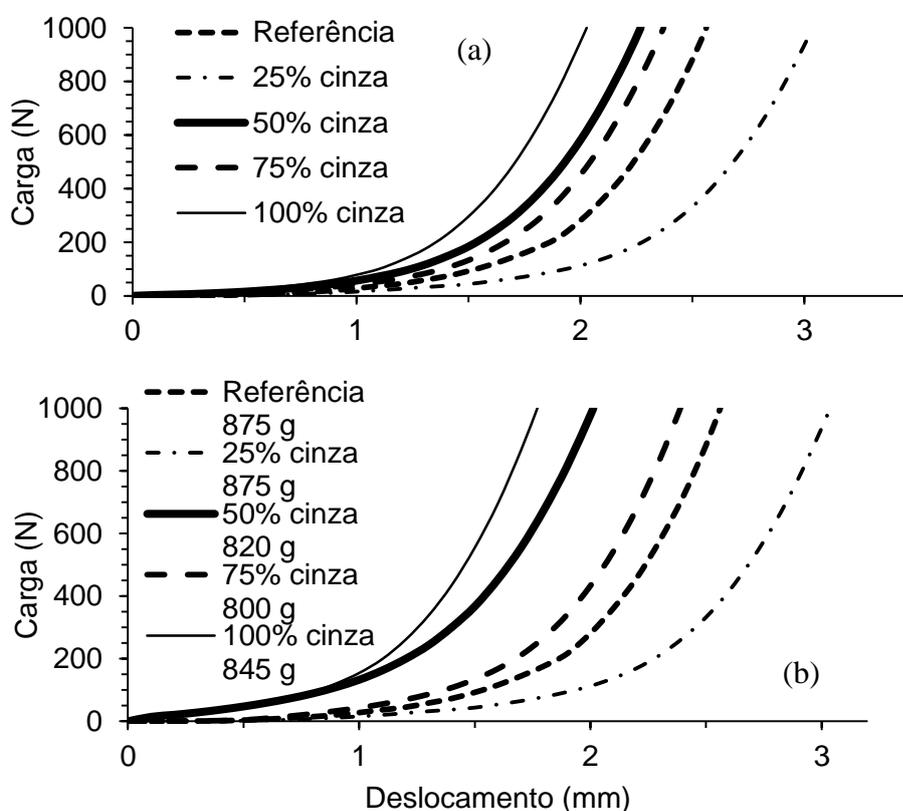


Figura 37 - Perfil de fluxo de cisalhamento das argamassas por Squeeze Flow para 45 min mantendo água de amassamento constante (875g) (a) e mantendo consistência constante (b).

Em todos os casos (Figura 36 e Figura 37) verifica-se que existem dois dos três estágios geralmente associados às curvas típicas de ensaios de *squeeze-flow* para argamassas: o estágio 2, onde o fluido se deforma plasticamente, devido ao aumento na força aplicada (fluxo viscoso) (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005; CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009; ROMANO, 2013); e, o estágio 3, o estágio *strain*

hardening (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005; CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009; ROMANO, 2013), geralmente associado a grandes deformações e onde a força requerida para comprimir o material aumenta bastante. O primeiro estágio, o estágio elástico linear (baixa tensão) está ausente (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005; CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009; ROMANO, 2013).

Strain hardening é associado com altos níveis de fricção entre agregados (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009), segregação e alta viscosidade (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009), o que ratifica o comportamento anômalo das curvas. No entanto, ressalta-se que não foram observados fenômenos de desagregação visual de fases. 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 (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009), seja a pasta que seja escoada pela estrutura formada pelos grãos, seja ainda pela segregação das partículas finas-água (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

Para o tempo de 10 minutos após a mistura com água constante (Figura 36a) observou-se um pequeno deslocamento das curvas para a esquerda com a adição de cinza de madeira. Nesse cenário, verifica-se que a quantidade de água não influenciou no deslocamento para os 10 minutos, todavia para consistência constante, Figura 36b, a cinza deslocou a curva de modo mais intenso para a esquerda, onde o grau de substituição da cal hidratada pela cinza, mediante os valores de IPS e MPT, foi responsável pelo fenômeno de redução da deformação plástica.

Em termos de consistência constante (Figura 36b), a quantidade de água é reduzida conforme o acréscimo da cinza, causando um deslocamento maior das curvas para a esquerda quando da água constante, o que caracteriza a redução da deformação plástica da argamassa. Esse fenômeno já era esperado, levando em consideração a redução nos valores de IPS e MPT, comparativamente nas argamassas com teor de água constante e argamassas com consistência constante.

Comportamento idêntico foi observado nas curvas de 45 minutos, tanto para água constante (Figura 37a), como para consistência constante (Figura 37b). Ressalta-se, no entanto, que o deslocamento foi menos acentuado se comparado aos gráficos de 10 minutos, possivelmente pela redução da quantidade de água na mistura perdida para o ambiente, devido ao tempo de espera mais elevado. A

retirada da água do sistema influenciou na redução de tempo de início do *strain hardening* (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

Além disso, ao comparar o comportamento entre 10 minutos e 45 minutos, verifica-se que houve diminuição da deformação plástica, em função de aumento na viscosidade (devido às reações água-cimento, dissolução de íons, coagulação e precipitações iniciais de hidratação das fases do cimento) (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009); bem como perda na capacidade de reduzir fricção entre as partículas (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009), em função da argamassa estar mais endurecida. Como resultado final, tem-se redução nas taxas de compressão (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

As argamassas com incorporação de cinza de madeira, acima de 25%, entraram na região de *strain hardening* antes da argamassa de referência aos 45 minutos, tanto para quantidade de água constante (Figura 37a), quanto para consistência constante (Figura 37b), confirmando a diferença na viscosidade, conforme Figura 38. A presença da cinza de madeira em substituição parcial da cal hidratada alterou os períodos de indução, aceleração e desaceleração das argamassas (ROMANO, 2013), fato posteriormente apresentando e discutido no item 4.3.1.4, página 75, mais especificamente conforme exposições na Figura 40.

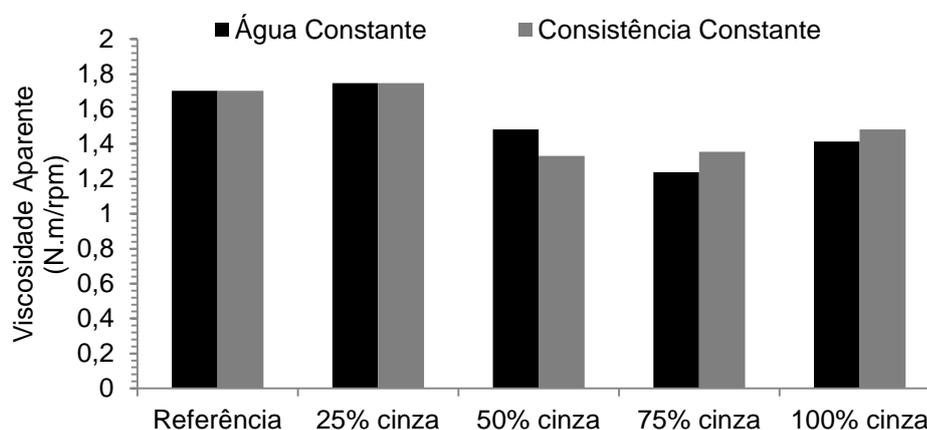


Figura 38. Viscosidade aparente das argamassas mantendo água de amassamento constante (875g) (a) e mantendo consistência constante (b).

A viscosidade das argamassas foi reduzida nas duas condições estudadas: teor de água constante e consistência constante, Figura 38, se comparadas à argamassa de referência. Esse fenômeno pode ser explicado pela elevação dos valores de IPS em ambos os casos, bem como pequenas alterações no MPT.

4.3.1.3 Retenção de água

Os resultados do ensaio de retenção de água estão demonstrados na Figura 39, onde a presença da cinza em substituição à cal hidratada nos diferentes teores avaliados, reduziu a capacidade do sistema em reter a água no seu interior. Tal fenômeno está relacionado com o fator de empacotamento do sistema (não significativas, da ordem máxima de 1%) e com a área superficial específica (área superficial da cinza é 69,7% menor que a da cal), onde o segundo parâmetro foi preponderante em relação ao primeiro.

Partículas mais finas têm a capacidade de retenção de água superior a partículas mais grossas; a cal é conhecida por sua capacidade elevada em reter água em sua superfície lamelar (PASSOS GUIMARÃES, 1997 *apud* QUARCIONI, 2005).

A medida que a cinza a substitui, parte da capacidade de retenção de água pela cal é prejudicada. Todavia, a cinza ainda possui uma área superficial específica relativamente alta em relação ao cimento, Tabela 10, onde sua influência possibilitou às argamassas com 100% de cinza de madeira terem apresentado retenção de água semelhante às argamassas de referência (0%), ver Figura 39.

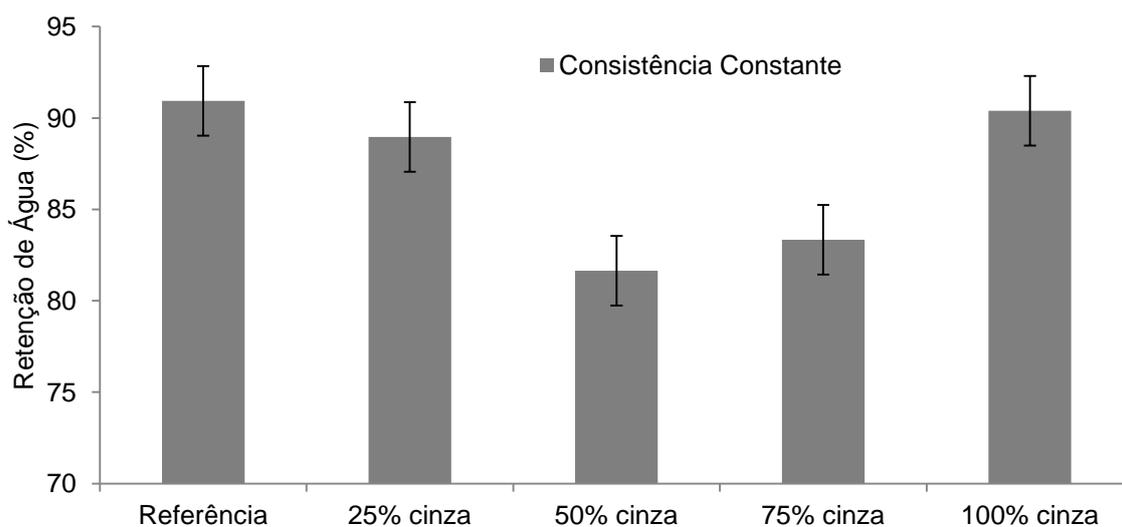


Figura 39 – Retenção de água. Fonte: imagem do autor, 2014.

4.3.1.4 Calorimetria de condução isotérmica

Por intermédio do ensaio de calorimetria de condução isotérmica, foi traçada as curvas de calor de hidratação da pasta, Figura 40, e as curvas de calor total liberado (calor de hidratação acumulado) até 48 horas de hidratação, Figura 41, por cálculo integral dos dados da Figura 40, excluindo o período de calor liberado pela molhagem e dissolução inicial das partículas.

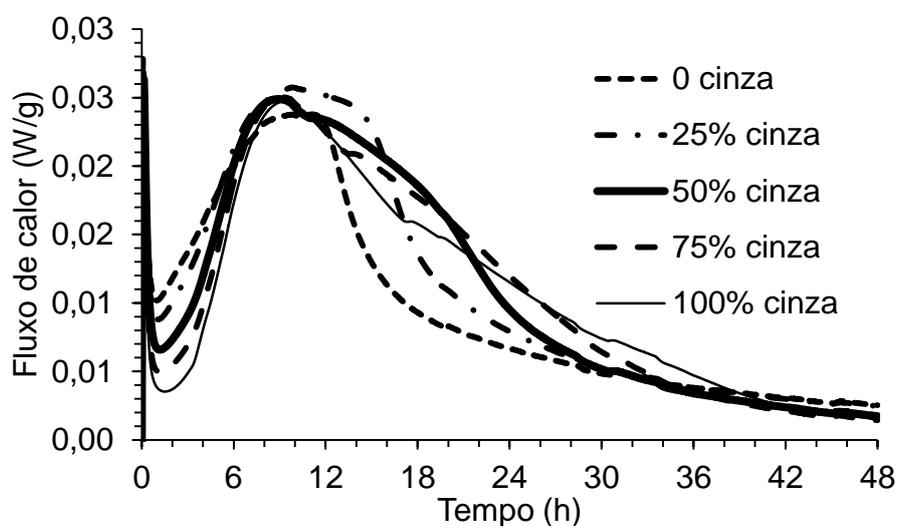


Figura 40 – Curvas de calor de hidratação das pastas. Fonte: figura do autor, 2014.

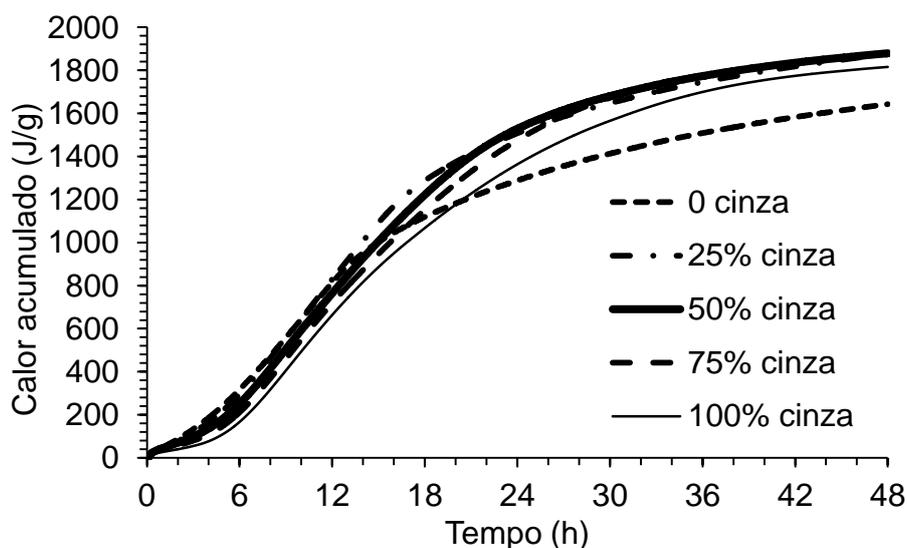


Figura 41 – Curvas do calor acumulado de hidratação das pastas. Fonte: figura do autor, 2014.

Tabela 17 - Período de Indução

Pasta	Início (h)	Termino (h)	Total (h)	Calor (J/g)
Ref.	1,0	1,1	0,1	0,9
25%	0,9	1,1	0,2	3,2
50%	1,0	1,3	0,3	9,7
75%	0,4	2,0	1,6	16,1
100%	0,8	3,0	2,3	15,9

Fonte: tabela do autor, 2014.

Tabela 18 - Período de Aceleração

Pasta	Início (h)	Termino (h)	Total (h)	Calor (J/g)
Ref.	1,1	11,4	10,4	357,3
25%	1,1	12,2	11,1	398,2
50%	1,3	9,6	8,3	246,9
75%	2,0	9,7	7,7	231,4
100%	3,0	9,5	6,5	197,8

Fonte: tabela do autor, 2014.

Tabela 19 - Período de Desaceleração

Pasta	Início (h)	Termino (h)	Total (h)	Calor (J/g)
Ref.	11,4	48,0	36,6	440,1
25%	12,2	48,0	35,8	516,3
50%	9,6	48,0	38,4	660,6
75%	9,7	48,0	38,3	676,5
100%	9,5	48,0	38,5	682,6

Fonte: tabela do autor, 2014.

As curvas que retratam o calor das reações de hidratação relatam que a cinza de Algaroba alterou o período de hidratação, modificando os três períodos de transição térmica, da seguinte forma: aumento do período de indução, redução do período de aceleração e aumento no período de desaceleração.

E possível comprovar o comportamento dos períodos de hidratação, através da análise das Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19.

As Figura 42 e Figura 43 mostram, respectivamente, o tempo de hidratação para cada pasta estudada, bem como o calor de hidratação, expondo claramente a tendência em cada período de hidratação, conforme as porcentagens de cinza de Algaroba nas pastas.

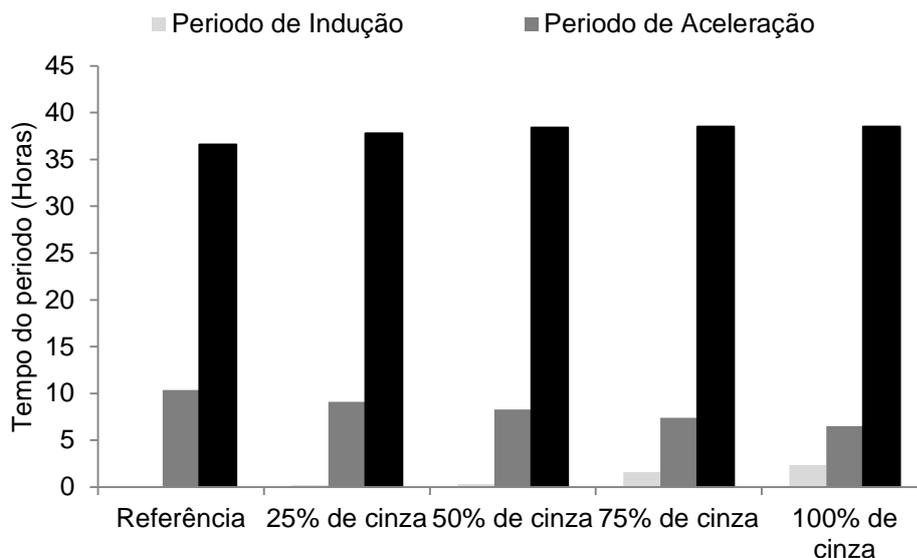


Figura 42 – Tempo de hidratação versus porcentagem de cinza na pasta. Fonte: figura do autor, 2014.

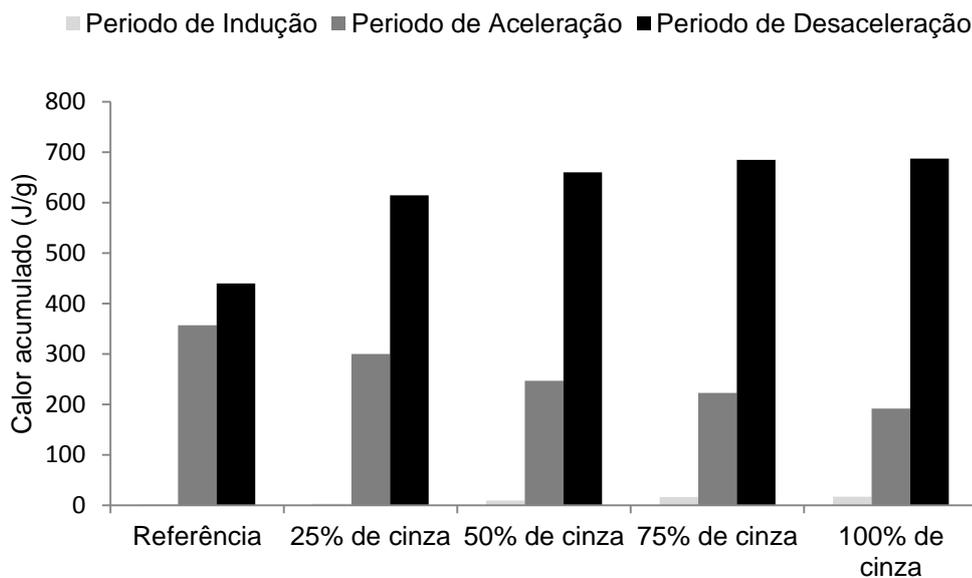


Figura 43 – Calor de hidratação versus porcentagem de cinza na pasta. Fonte: figura do autor, 2014.

A presença da cal hidratada CH I e da cinza rica em carbonato de cálcio provocou uma alteração na cinética e termodinâmica da hidratação do cimento CPV ARI. A oferta abundante de Portlandita, proveniente da cal hidratada, acelerou a precipitação das fases hidratadas do cimento e, em conjunto com o efetor *filler*, provocado pelo carbonato de cálcio presente na cinza, possibilitou um aumento de pontos de nucleação e precipitação de C-S-H. Esses dois efeitos atuam

simultaneamente e corroboram para hidratação do cimento (QUARCIONI, V. A., 2008).

O efeito da cinza é notório ao se observar o incremento da taxa de reação, Figura 44, conforme o aumento progressivo do teor de carbonato à medida que há a substituição da cal hidratada pelo resíduo (QUARCIONI, V. A., 2008).

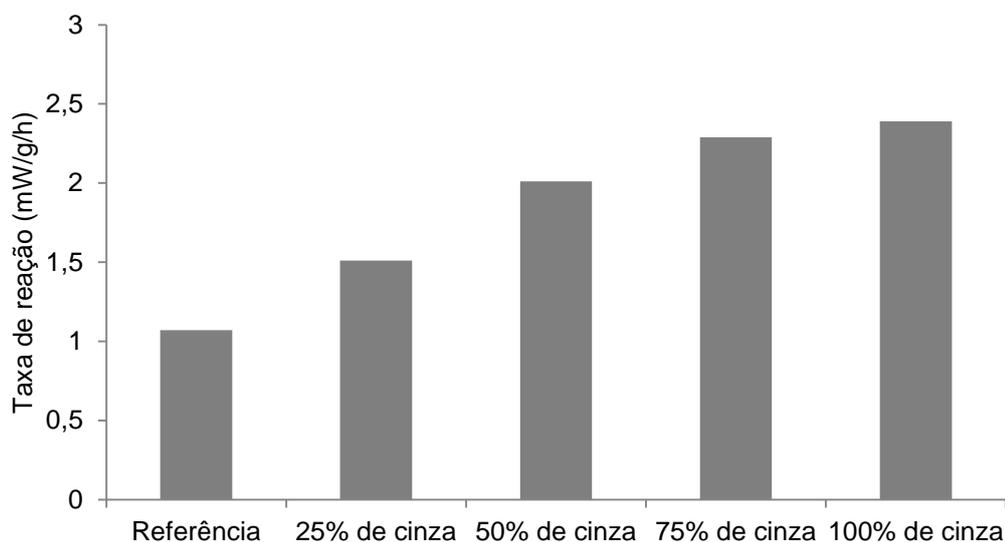


Figura 44 – Taxa de reação versus porcentagem de cinza na pasta. Fonte: figura do autor, 2014.

4.3.1.5 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa da argamassa está diretamente relacionada com as densidades dos materiais sólidos e com o teor de ar incorporado que compõem a argamassa (CINCOTTO *et al*, 1995). Dessa forma, quanto mais leve forem os materiais que compõem o produto, mais leve a argamassa se torna. A presença do ar incorporado é inversamente proporcional à densidade, de modo que, quanto maior o teor de ar, menor a densidade.

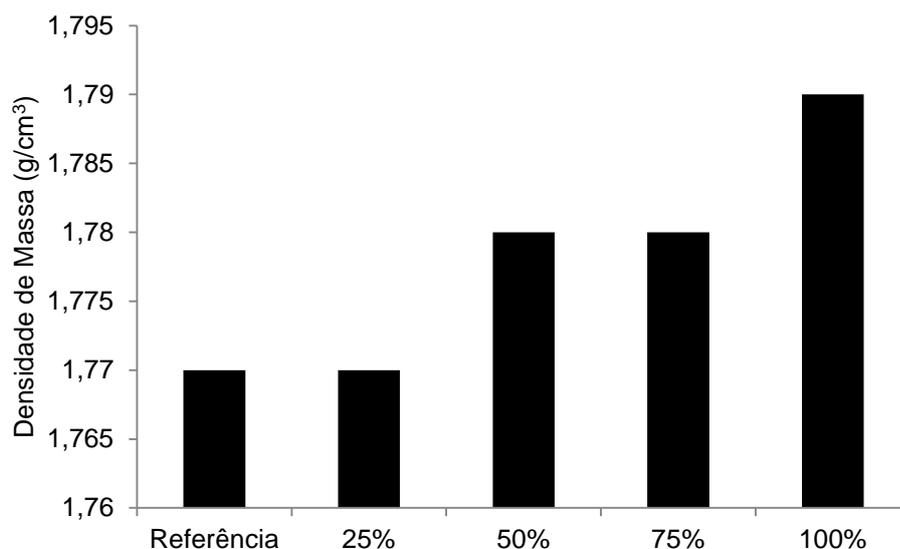


Figura 45 – Densidade de massa água constante. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.

A Figura 46 apresenta as densidades de massas na condição de água constante; onde constatou-se que, ao substituir a cal hidratada ($2,62 \text{ g/cm}^3$) por cinza de Algaroba ($2,86 \text{ g/cm}^3$), as argamassas ficaram mais densas à medida que a fração de cinza aumenta.

A Figura 47 apresenta as densidades de massa das argamassas com consistência constante, onde se percebe que a variação na quantidade de água influenciou a massa total das argamassas. Assim, é possível concluir que a argamassa com substituição de 75% de cal por cinza obteve a menor densidade e a menor quantidade de água de amassamento, Tabela 5.

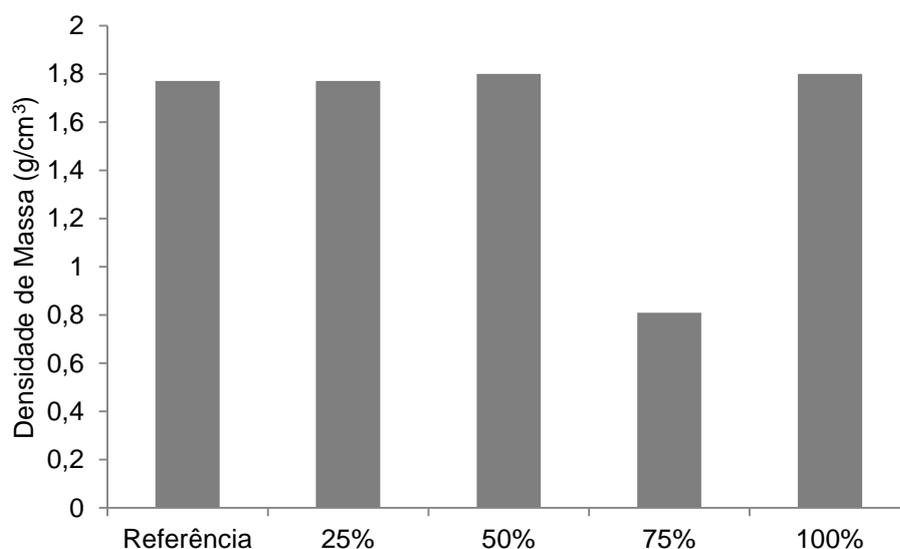


Figura 47 - Densidade de massa consistência constante. Fonte: Fonte: figura do autor, 2014.

Os valores de teor de ar incorporado, mantendo água de amassamento constante (875g) e consistência constante, comparativamente, encontram-se expostos na Figura 48.

A substituição parcial da cal hidratada pela cinza de madeira em 25% em volume não alterou a incorporação de ar pelo sistema, tanto quanto avaliado com quantidade de água constante como com consistência das argamassas constante (Figura 48). Em relação aos percentuais de 50%, 75% e 100%, as variações nos parâmetros foram de $\pm 0,50\%$, não sendo caracterizadas diferenças consideráveis para tal parâmetro (ROMANO, R. C. O. et al., 2009a).

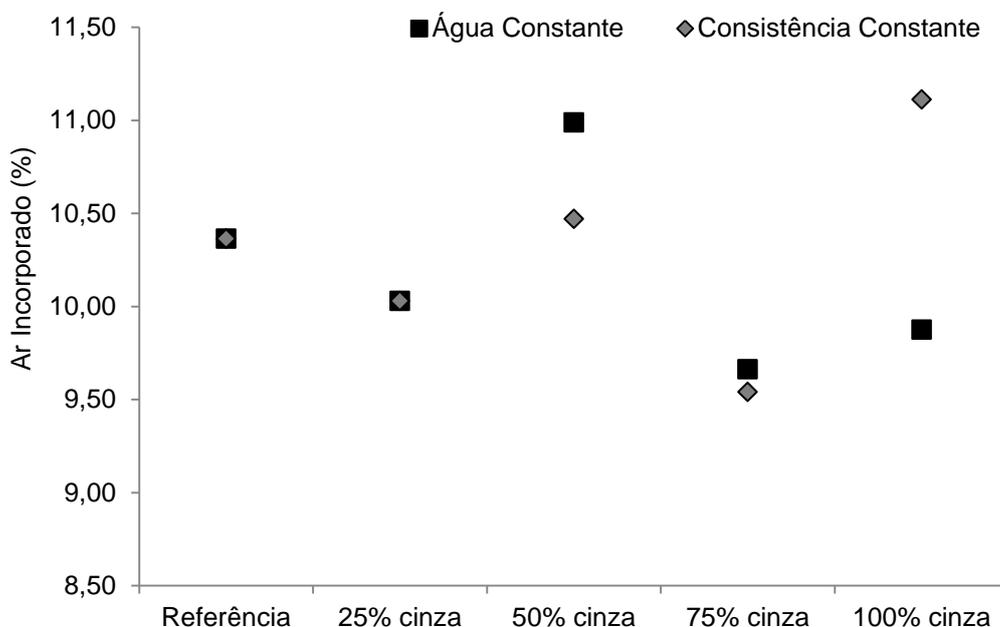


Figura 48 - Teor de ar incorporado mantendo água de amassamento constante (875g) e consistência constante, comparativamente. Fonte: figura do autor, 2014.

4.3.2 Estado endurecido

4.3.2.1 Permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade macroscópica que está diretamente relacionada com a facilidade de percolar os vazios no interior de um material poroso, através de um fluido sobre pressão controlada (ROMANO, 2013). Como é uma

medida que depende das condições estruturais do material estudado, além de ter relações diretas com a porosidade, a permeabilidade varia pela distribuição, morfologia e conectividade dos poros (SALVINI *et al*, 2000).

Os valores de permeabilidade são apresentados com parâmetros de K_1 , pois supostamente independem do fluido permeante ou das variáveis de escoamento, podendo seu valor alterar com a temperatura, devido às alterações nos poros provenientes da dilatação térmica da estrutura do material.

A presença de poros menores e mais finamente distribuídos altera de forma direta a velocidade de percolamento do ar, aumentando os valores de permeabilidade. Todavia, apenas os poros abertos e conectados entre si podem contribuir para o escoamento da argamassa (SALVINI *et al*, 2000).

Nesse cenário, encontram-se representados os valores de permeabilidade ao ar das argamassas estudadas em função da porosidade aparente na Figura 49.

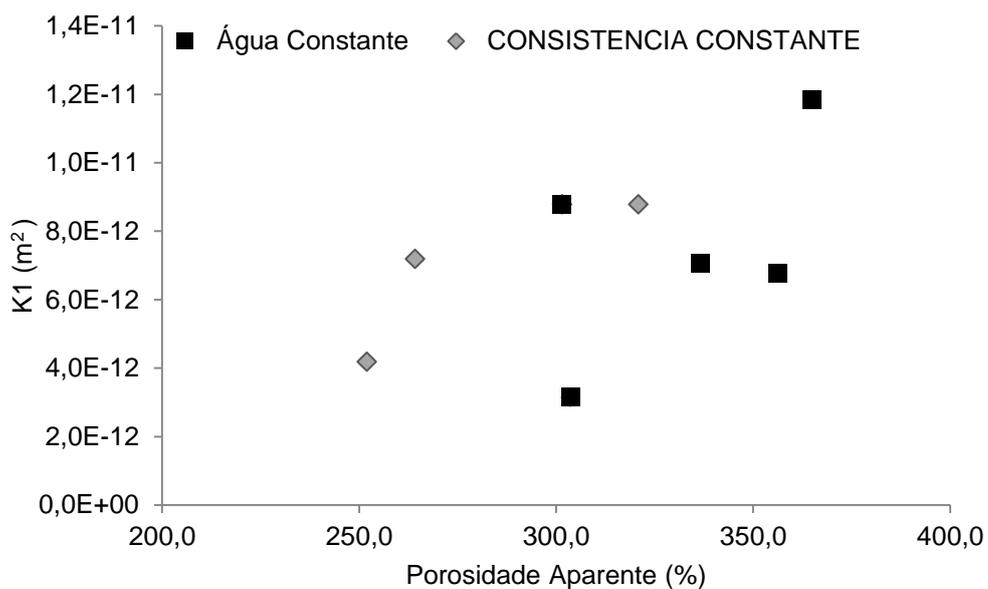


Figura 49 – Permeabilidade Darciana (k_1) em função da porosidade aparente. Fonte: figura do autor, 2014.

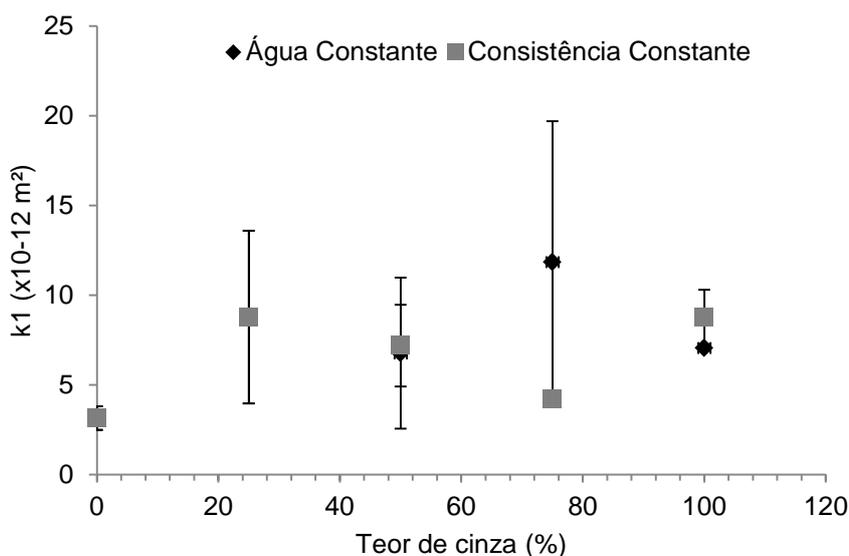


Figura 50 – Permeabilidade em função do teor de cinza água constante e consistência constante.
Fonte: figura do autor, 2014.

Analisando de forma geral os resultados expostos nas Figura 49 e Figura 50, não foram observadas alterações significativas com base no desvio-padrão de três amostras quando da substituição da cal pela cinza de Algaroba, em nenhuma das adições e condições estudadas.

4.3.2.2 Porosidade

Na Figura 51 são apresentados os gráficos de porosidade aparente em função ao teor de cinza de Algaroba das argamassas. A quantidade de água presente nas argamassas influenciou diretamente os valores da porosidade aparente. Levando em consideração a consistência constante, onde a quantidade de água nas argamassas é menor, os valores da porosidade aparente foram reduzidos e de modo considerável nas proporções de 50% e 75%.

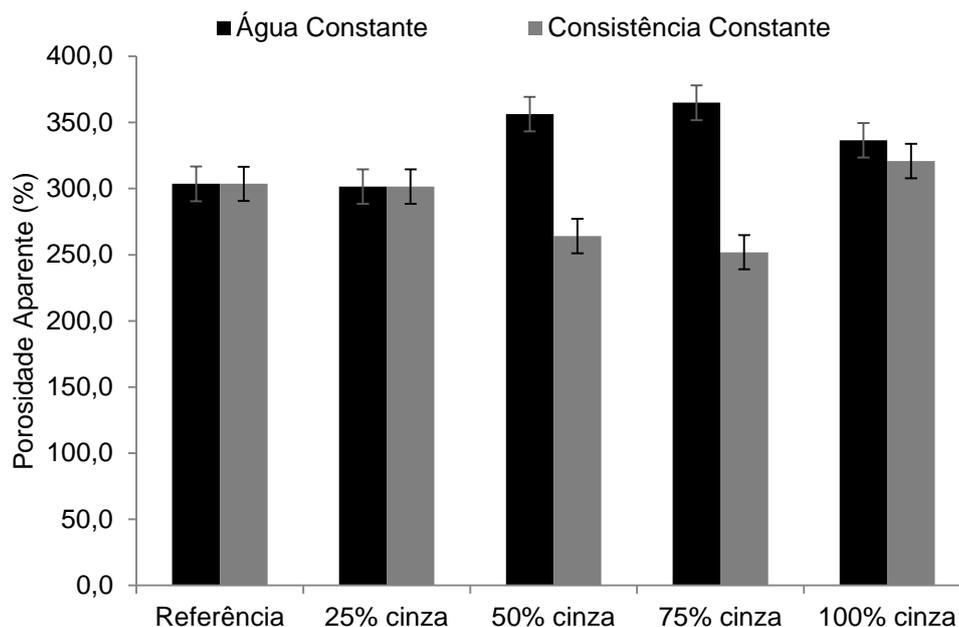


Figura 51 – Porosidade aparente em função do teor de cinza de Algaroba. Fonte: figura do autor, 2014.

O fato de a porosidade aumentar nas argamassas com água constante se deve à área superficial da cinza ser menor que a da cal, retendo menos água ao seu redor e reduzindo, assim, a quantidade de água livre, que contribui para o surgimento de poros.

Ao se substituir toda a cal hidratada por cinza os valores de porosidade ficaram acima do valor de referência, concordando com a capacidade de retenção de água de cada sistema.

4.3.2.3 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Os valores do ensaio de absorção de água por capilaridade estão demonstrados na Figura 52, na condição de consistência constante. Através da análise da figura observa-se que a influência do resíduo aumentou a absorção de água nos primeiros 10 minutos em todas as argamassas cuja cinza está presente. Após 90 minutos, o aumento foi significativo na condição de 25%; nas demais condições, as alterações foram mínimas; todavia, há tendência dos valores observados serem maiores ou iguais à argamassa de referência.

Os resultados encontrados na Figura 52 estão relacionados com os apresentados na Figura 50, onde a permeabilidade aumenta à medida que o resíduo

entra no sistema cimentício e, com o aumento da substituição de cinza por cal hidratada, os valores tendem a ser equivalentes com os da argamassa de referência, com exceção ao material com 25% e 100% de resíduo.

Esse fenômeno está de comum acordo com a teoria acerca da carbonatação da Portlandita nos revestimentos mistos com cal; já os revestimentos com substituição parcial ou total da cal por cinza não sugerem esses fenômeno por ser tratar de um carbonato de cálcio, inerte. Salienta-se que com a carbonatação, tem-se redução de porosidade.

As propriedades de absorção de água, permeabilidade e porosidade estão diretamente relacionadas ao empacotamento de partículas, relação água aglomerantes e teor de ar incorporado, (ROMANO, 2013). Portanto quanto melhor o empacotamento menor a quantidade de água de amassamento necessária para manter a trabalhabilidade, reduzindo a relação água/ligante e a quantidade de poros do sistema.

Portanto, a absorção de água está em ressonância com as propriedades de permeabilidade e porosidade das argamassas estudadas, onde a presença do resíduo melhorou o empacotamento nas substituições de cal em 50% e 75%, cujas de propriedades de referência foram mantidas.

Na Figura 53 está representado o coeficiente de capilaridade, cuja tendência da adição do resíduo é aumentá-lo. Uma leve redução de 5% foi observada na argamassa de 50% de resíduo.

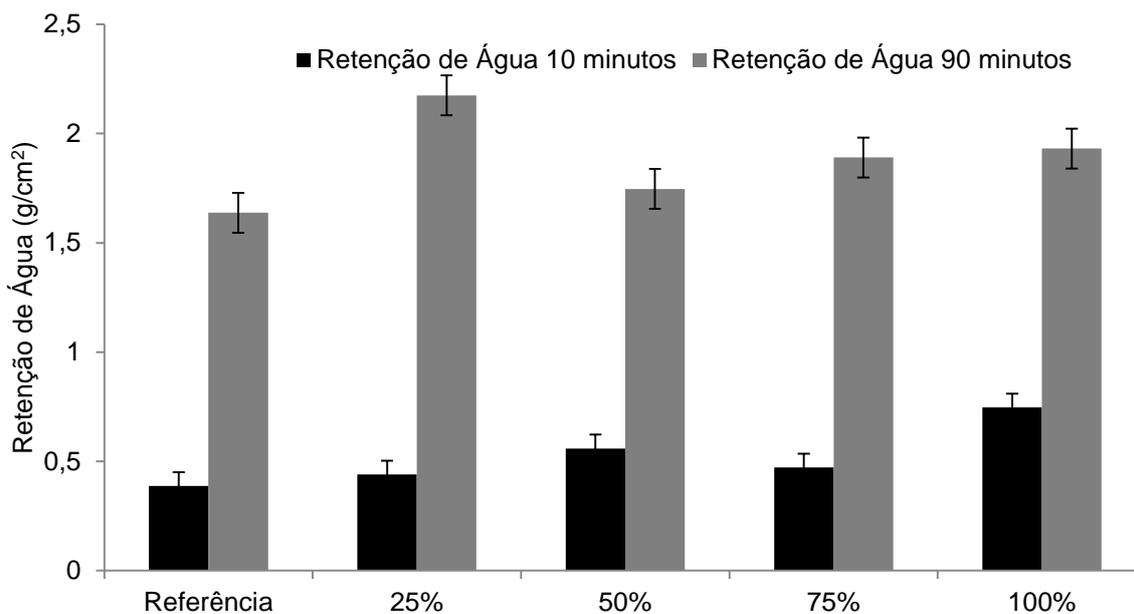


Figura 52 – Absorção de água por capilaridade, em condições de consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.

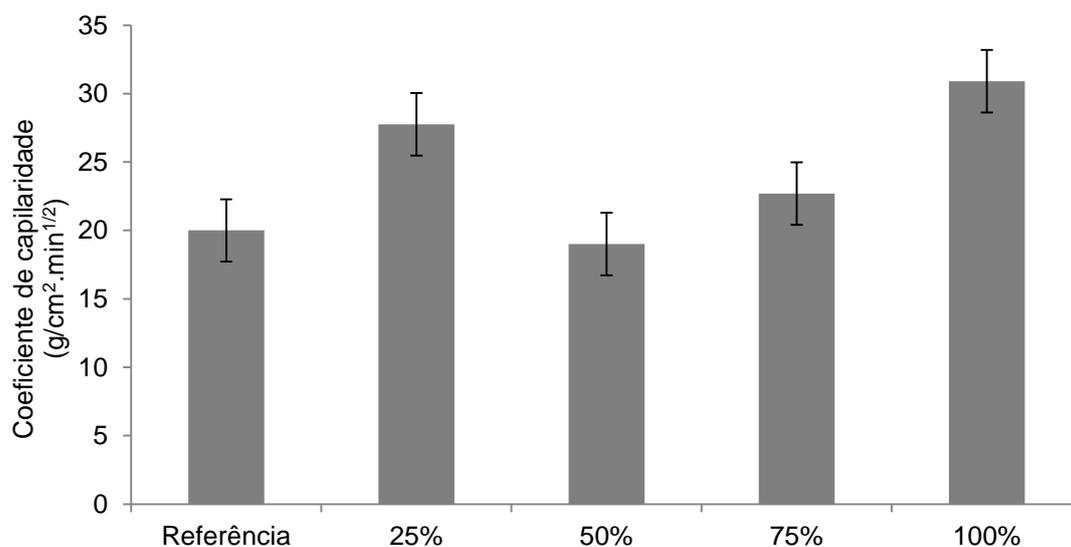


Figura 53 – Coeficiente de capilaridade, em condições de consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.

4.3.2.4 Resistência à tração diametral, flexão e compressão

O ensaio de tração diametral representa a resistência do revestimento em ser arrancado da base, e os valores determinados estão demonstrados em condições de água constante (Figura 54) e consistência constante (Figura 55). As argamassas

estudadas foram classificadas conforme a norma NBR 13281 (2005) e estão representadas nas Tabela 20 e Tabela 21.

A presença da cinza (condição de água constante) provocou uma pequena redução na propriedade estuda, todavia ao se avaliar as condições onde a consistência foi mantida constante e a relação água/ligante foi alterada, o comportamento da resistência à tração se manteve praticamente inalterado, cujo pior resultado foi observado na argamassa de 25%; nas demais substituições, as classes das argamassas estudadas mantiveram-se inalteradas, segundo a norma NBR 13281 (2005).

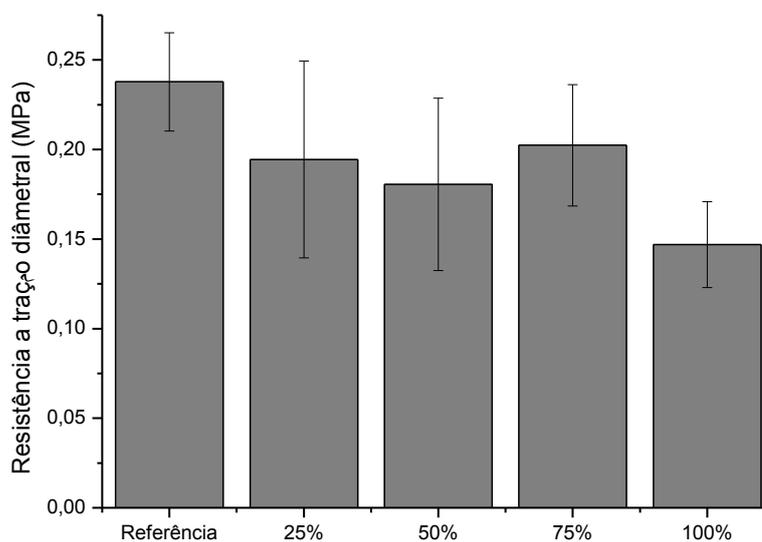


Figura 54 – Resistência à tração diametral, água constante. Fonte: figura do autor, 2014.

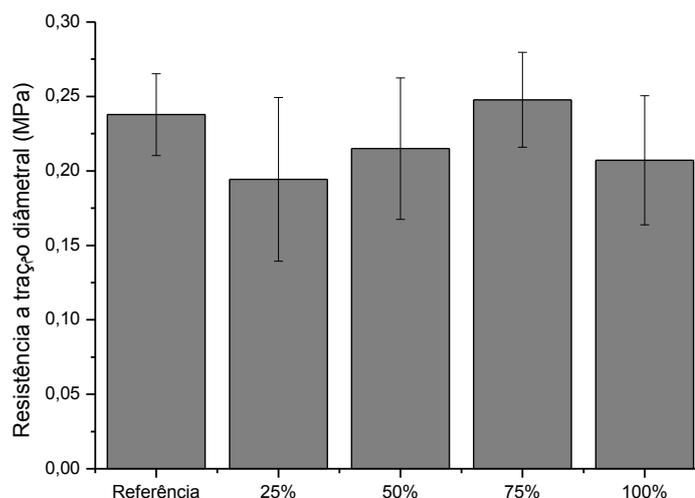


Figura 55 - Resistência à tração diametral, consistência constante. Fonte: figura do autor, 2014.

Tabela 20 – Classificação das argamassas, em condições de água constante, segundo resistência à aderência, conforme NBR 13281 (2005). Fonte: tabela do autor, 2014.

Classe	Resistencia a Tração	Tipos de Argamassas
A1	< 2,0	25%, 50%, 100%
A2	≥ 0,2	Referência (0%), 75%
A3	≥ 0,3	

Fonte: figura do autor, 2014.

Tabela 21 - Classificação das argamassas, em condições de consistência constante, segundo resistência à aderência, conforme NBR 13281 (2005). Fonte: tabela do autor, 2014.

Classe	Resistencia a Tração	Tipos de Argamassas
A1	< 2,0	25%
A2	≥ 0,2	Referência, 50%, 75%, 100%
A3	≥ 0,3	

Fonte: figura do autor, 2014.

Os resultados de resistência à flexão e resistência à compressão, apresentados nas Figura 56 e Figura 57, respectivamente, foram ensaiados mantendo a consistência constante das argamassas. Essa condição foi escolhida devido a influência negativa do excesso de água livre no sistema cimentício. Foi discutido no item 4.3.1.2.1 que a presença da cinza possibilita uma redução no teor de água de

amassamento mantendo a mesma trabalhabilidade da argamassa. Não haveria acréscimo substancial para o estudo a condição de água constante.

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão (Figura 56) mostram que a presença da cinza em substituição à cal hidratada não alterou os valores de resistência à flexão nas argamassas de 25% e 50%, contudo nas argamassas com 75% e 100% os valores caíram.

As classificações das argamassas segundo NBR 13281 (2005) estão descritas na Tabela 22. Onde todas as argamassas estudadas pertencem à mesma classificação.

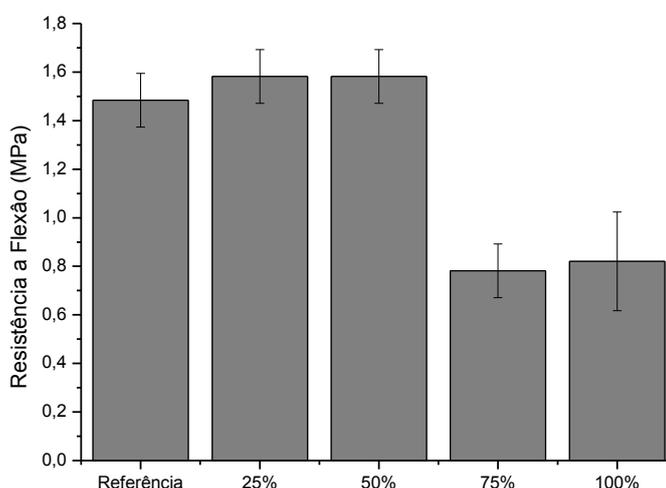


Figura 56 – Resistência à flexão (consistência constante). Fonte: figura do autor, 2014.

Tabela 22 – Classificação da argamassa segundo a resistência à flexão, NBR 13281 (2005).

Classe	Resistencia a Tração	Tipos de Argamassas
R1	$\leq 2,0$	Referência, 25%, 50%, 75% e 100%
R2	1,5 a 3,0	
R3	2,5 a 4,5	
R4	4,0 a 6,5	
R5	5,5 a 9,0	
R6	$> 8,0$	

Fonte: tabela do autor, 2014.

Os resultados referentes ao ensaio de resistência à compressão aos 28 dias encontram-se apresentados na Figura 57. Observa-se que a influência da incorporação de cinza ao sistema não segue a mesma tendência observada no ensaio de resistência à flexão. Observou-se ganho médio em torno de 10% na

argamassa de 50% de substituição de cal por cinza, bem como aumento em torno de 5% na argamassa de 75% de substituição; entretanto, nas argamassas de 25% e 100% de substituição, a redução da resistência à compressão média foi na ordem de 21% e 25%, respectivamente. Ressalta-se que, dentro do desvio-padrão analisado, não houve influência significativa na resistência à compressão das argamassas com 50% e 75% de substituição de cal por cinza.

Apesar dessas alterações, as argamassas ensaiadas por compressão mantiveram-se na mesma classificação, conforme NBR 13281 (2005). Os resultados estão demonstrado na Tabela 23.

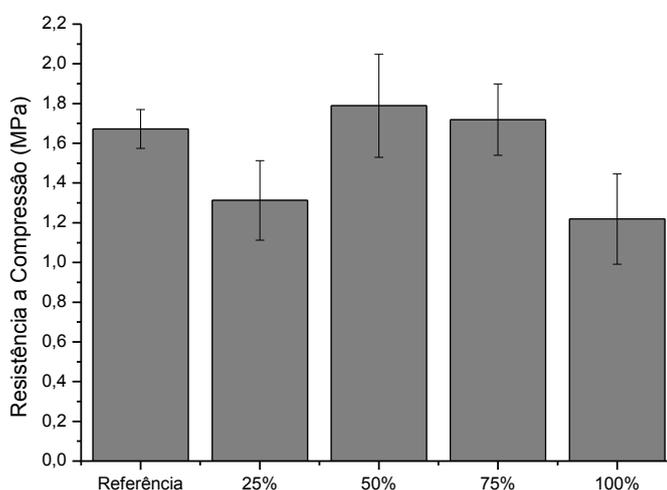


Figura 57 – Resistência à compressão (consistência constante). Fonte: figura do autor, 2014.

Tabela 23 - Classificação da argamassa segundo a resistência à compressão, NBR 13281 (2005)

Classe	Resistencia a Tração	Tipos de Argamassas
P1	$\leq 2,0$	Referência, 25%, 50%, 75% e 100%
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	$> 8,0$	

Fonte: tabela do autor, 2014.

5 CONCLUSÕES

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 as propriedades reológicas e mecânicas das argamassas mistas. As semelhanças físico-químicas da cinza (carbonato de cálcio) com cales CH III, cujos nos componentes químicos estão inclusas quantidades significativas de CaCO_3 , ratificam essa compatibilidade da cinza de Algaroba com sistemas cimentícios em substituição à cal. Além disso, a presença da cinza de Algaroba em substituição parcial da cal reduz a necessidade de água do sistema, podendo, ainda, se ter ajustes de otimização na dosagem. Por fim, ensaios de calorimetria de consução isotérmica indicaram que a presença do resíduo possibilitou a criação de novos de nucleação das fases hidratadas do cimento, com alterações nas quatro regiões de hidratação.

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

- **Caracterização físico-química e microestrutural da cinza de Algaroba:** A cinza de Algaroba é rica em carbonato de cálcio, não apresentando óxidos expansivos e de morfologia esférica com superfície irregular. Apresenta área superficial específica superior à área do cimento e inferior à área cal hidratada e densidade real superior à densidade do cimento e à densidade da cal.
- **Formular e moldar argamassas com a substituição parcial e total de cal hidratada CH I por cinzas de Algaroba:** Argamassas com substituição parcial (25%, 50%, 75%) e total de cal hidratada CH I por cinza de Algaroba foram possíveis de serem conformadas, sem significativas diferenças táteis-visuais durante a moldagem.
- **Avaliação das argamassas no estado fresco**
 - **Reologia das argamassas**
 - **reometria de mistura:** apesar de proporcionar maiores torque no início da mistura, as condições posteriores são

favoráveis para as argamassas com a substituição da cal hidratada por cinza.

- **reometria de cisalhamento:** Quando se aumenta a rotação de cisalhamento, as argamassas com teores de cinza apresentaram redução nos torques de cisalhamento.
- **reometria compressiva - *Squeeze Flow*:** A presença da cinza em substituição parcial e total da cal ocasionou uma redução na plasticidade da argamassa, sem atingir, no entanto, valores críticos para a zona de *Strain Hardening*. Todavia, a substituição de 25% possibilitou uma melhora considerável na plasticidade do sistema.
- **Retenção de água:** houve uma tendência à redução da retenção de água das argamassas com a presença da cinza. No entanto, tais reduções não são significativas e nem implicam em impossibilidade de uso em obra. 100% de cinza apresentou comportamento semelhante ao referênci
- **Calorimetria de condução isotérmica:** a presença da cinza alterou o período de hidratação das fases do cimento, modificando os três períodos de transições térmicas: aumento do período de indução (mais pontos de nucleação), redução no período de aceleração e aumento do período de desaceleração.
- **Densidade de massa e teor de ar incorporado:** a densidade das argamassas com cinzas sofreu incremento em função da sua maior densidade real. Não foram detectadas mudanças significativas quando do uso da cinza em termos de ar incorporado.
- **Avaliação das argamassas no estado endurecido;**
 - **Permeabilidade:** Não foram detectadas mudanças significativas quando do uso da cinza em termos de permeabilidade, com uma leve tendência a um crescimento.
 - **Porosidade:** na condição de consistência constante concluiu-se uma tendência ao mantimento da porosidade. Já na condição de

água constante, houve aumento na porosidade, em virtude da quantidade de água livre no sistema.

- **Absorção capilar:** houve aumento da absorção capilar de água nos primeiros 10 min, bem como aos 90 min, sendo observado um mantimento de valores no coeficiente de capilaridade.
 - **Resistência à tração diametrial:** não houve alteração significativa quando da substituição da cal pela cinza em todos os teores estudados.
 - **Resistência à flexão:** não houve alteração significativa nas substituições de 25% e 50%; no entanto, para teores de 75% e 100% foi observada tendência à redução.
 - **Resistência à compressão:** não houve alteração significativa quando da substituição da cal pela cinza em todos os teores estudados.
- **Avaliar a influência do teor de água/ligante nas propriedades das argamassas de revestimento, estudando os sistemas com água constante e consistência constante:** observou-se que houve redução na plasticidade quando da substituição parcial da cal pela cinza, necessitando assim, menos água para um mantimento da consistência padrão.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Trabalhar com cinza de Algoroba beneficiadas através de peneiramento em malha 300.
- Realizar ensaios de aderência (arrancamento) em paramentos.
- Realizar variação dimensional por retração/expansão das argamassas.
- Avaliar microestruturalmente as argamassas endurecidas.

REFERÊNCIAS

- _____. **NBR 7215**: cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **NBR 10004**: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 12653**: materiais pozolânicos — requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 13277**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **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.
- _____. **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.
- _____. **NBR 13280**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15259**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15630**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 15895**: materiais pozolânicos – determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR NM 23:** cimento portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 49:** agregado miúdo - determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52:** agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248:** agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento.** Dissertação, Universidade de Brasília, Brasília, 2002. 175 p.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa.** Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BAN, C. C.; RAMLI, M. Properties of high calcium wood ash and densified silica fume blended cement. **International Journal of Physical Sciences** v. 6, n. 28, p. 6596 - 6606, 2011.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento portland.** Doutorado, universidade federal de santa catarina, Florianópolis, 2007.

CANDIDA, M. C. **Contribuição ao estudo de técnicas de preparo da base no desempenho dos revestimentos de argamassa.** Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 198 p.

CARASEK, H.; OLIVEIRA, A. M.; ARAÚJO, J. Influência da maturação da cal hidratada na trabalhabilidade de argamassas. In.: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, 7. Recife, SBTA, 2007.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de Squeeze-flow. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas VI SBTA, 2005, Florianópolis -SC, p.

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. **Método de formulação de argamassa de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico.** Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CHEAH, C., B E, RAMLI MAHYUDDIN. . Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v., n., p. 321, 2011.

- 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, 2012.
- CHEAH, C. B.; RAMLI, M. The structural behaviour of HCWA ferrocement–reinforced concrete composite slabs. **Composites Part B: Engineering**, v. 51, n. 0, p. 68-78, 2013.
- CHEAH, C. B.; RAMLI, M. The fluid transport properties of HCWA–DSF hybrid supplementary binder mortar. **Composites Part B: Engineering**, v. 56, n. 0, p. 681-690, 2014.
- CHU, V.; REGEV, L.; WEINER, S.; BOARETTO, E. Differentiating between anthropogenic calcite in plaster, ash and natural calcite using infrared spectroscopy: implications in archaeology. **Journal of Archaeological Science**, v. 35, n. 4, p. 905-911, 2008.
- CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C; CARASEK, H. **Argamassas de revestimento: Características, propriedades, e métodos de ensaios**. Boletim 68 IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1995. 118p.
- CLAISSE, P. A.; LORIMER, P.; AL OMARI, M. Workability of cement pastes. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 476-482, 2001.
- CORTEZ, I. M. M. **Contribuição ao estudo dos sistemas de revestimento com a incorporação de fibras sintéticas**. Dissertação, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- DE LARRARD, F. Concrete mixture proportioning. In: *Modern Concrete Technology Series*. London, p, 421, 1999.
- Do quicklime properties depend on limestone structures? An attempt to derive functional connections between selected quantities : Butenuth, G; Kasig, W; Frey, M L Proc International Chalk Symposium, Brighton, 4–7 September 1989P95–102. Publ London: Thomas Telford, 1990. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 28, n. 2–3, p. A145, 1991.
- ETIÉGNI, L.; CAMPBELL, A. G. Physical and chemical characteristics of wood ash. **Bioresource Technology**, v. 37, n. 2, p. 173-178, 1991.

FERRARIS, C. F.; OBLA, K. H.; HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 245-255, 2001.

GARCIA, M. D. L.; SOUSA-COUTINHO, J. Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. **Construction and Building Materials**, v. 41, n. 0, p. 897-910, 2013.

GIRÓN, R. P.; RUIZ, B.; FUENTE, E.; GIL, R. R.; SUÁREZ-RUIZ, I. Properties of fly ash from forest biomass combustion. **Fuel**, v. 114, n. 0, p. 71-77, 2013.

GRUNEWALD, S. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. Technische Universiteit Darmstadt, Duitsland, p.233, 2004.

KWAN, A. K. H.; LI, Y. Effects of fly ash microsphere on rheology, adhesiveness and strength of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 42, n. 0, p. 137-145, 2013.

JONH, V.M. Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V. São Paulo: **Anais**, p. 47-62, 2003.

LELOUP, W. D. A. **EFEITO DA ADIÇÃO DE LODO TÊXTIL E CINZAS DE LENHA GERADOS NO APL DE CONFECÇÃO PERNAMBUCANO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru Pernambuco, 2013.

LIBERATO, C. C.; ROMANO, R. C. D. O.; MONTINI, M.; GALLO, J. B.; GOUVEA, D.; PILEGGI, R. G. Efeito da calcinação do resíduo de bauxita nas características reológicas e no estado endurecido de suspensões com cimento Portland. **Ambiente Construído**, v. 12, n., p. 53-61, 2012.

MATSCHEI, T. L., B.; GLASSER, F. P. The role of calcium carbonate in cement hydration. **Cement and concrete research**, v. 37, n. 4, p. 551-558, 2007.

MODOLO, R. C. E.; FERREIRA, V. M.; TARELHO, L. A.; LABRINCHA, J. A.; SENFF, L.; SILVA, L. Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. **Construction and Building Materials**, v. 45, n. 0, p. 275-281, 2013.

NEHDI, M. M., S.; AITCIN, P. C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. **Cement and concrete research**, v. 28, n. 5, p. 687-697, 1998.

OLIVEIRA, I. R. S., A.R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELL, V.C.I. **Dispersão e empacotamento de partículas**. São Paulo, 2000 (Princípios e aplicações em processamento cerâmico)

QUARCIONI, A., V. ; **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – estudo em pasta**. Tese, Univerisdade de São Paulo, São Paulo, 2008.

QUARCIONI, V. A. **influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação da cimento portland - estudo em pasta**. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, Escola Politecnica, 2008.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. Influencia do tipo de cal hidratada na reologia de pasta. São Paulo, BT/PCC – Universidade de São Paulo, 1999.

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, 2013.

ROMANO. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**. Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. 227 p.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H.; SILVA, F. B.; CARDOSO, F. A.; BARROS, M. M. S. B.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Sensibilidade de argamassas de revestimento ao procedimento de mistura. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas - VII SBTA, 2009a, Curitiba - PR, p.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H.; SILVA, F. B.; CARDOSO, F. A.; BARROS, M. M. S. B.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Impacto do tipo de misturador e do tempo de mistura nas propriedades de argamassas industrializadas. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 109-118, 2009b.

SABBATINI, F.H.; BARROS, M.M.S.B. Desenvolvimento de um novo processo construtivo em alvenaria estrutural não armada em blocos de concreto. São Paulo-Escola Politecnica, Universidade de São Paulo. Convênio Epusp/Encol, projeto EP/EM-06. São Paulo, 1990.

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.

SIDDIQUE, R. Utilization of wood ash in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 67, n. 0, p. 27-33, 2012.

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

TRISTÃO, F.A.; MACHADI, V.K.C.B.L. Análise de métodos de retenção de água e consistência em argamassas. In.: Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas, 5. São Paulo, p.215-224, 2003.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010.