



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

**Wilma de Albuquerque Leloup**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE LODO TÊXTIL E CINZAS DE LENHA  
GERADOS NO APL DE CONFECÇÕES PERNAMBUCANO EM  
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

**Caruaru**

**2013**

**Wilma de Albuquerque Leloup**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE LODO TÊXTIL E CINZAS DE LENHA GERADOS  
NO APL DE CONFECÇÕES PERNAMBUCANO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO  
PORTLAND**

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<sup>a</sup>. Ana Cecília Vieira da Nóbrega**

**Co-orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Érika Pinto Marinho**

**Caruaru**

**2013**

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Simone Xavier CRB4 - 1242

L543e Leloup, Wilma de Albuquerque.  
Efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland. / Wilma de Albuquerque Leloup.  
- Caruaru: O autor, 2013.  
108f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2013.  
Inclui bibliografia.

1. Argamassa. 2. Resíduos. 3. Estabilização - Solidificação. 4. Lodo têxtil. I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da (orientadora). II. Título.

620 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2013-39)



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

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**EFEITO DA ADIÇÃO DE LODO TÊXTIL E CINZAS DE LENHA GERADOS  
NO APL DE CONFECÇÕES PERNAMBUCANO EM ARGAMASSA DE  
CIMENTO PORTLAND**

defendida por

WILMA DE ALBUQUERQUE LELOUP

Considera a candidata APROVADA

Caruaru, 1º de julho de 2013

---

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

---

Antônio Eduardo Martinelli – Dep. Eng. de Materiais/UFRN  
(examinador externo)

---

Júlio Cezar De Oliveira Freitas – Instituto de Química/UFRN  
(examinador externo)

---

Humberto Correia Lima Júnior – PPGECAM/UFPE  
(examinador interno)

*Ao Deus do meu coração, pela vida e pelos anjos que envia em meu auxílio nos momentos mais difíceis.*

*Ao meu marido Patrick, pela força, paciência e companheirismo sem igual.*

*Aos meus pais, por ensinarem através de exemplos e pela mais valiosa herança: o amor.*

*Aos meus irmãos, sobrinhos e avó, pelo apoio, amizade e por me fazerem enxergar a beleza nas coisas mais simples.*

## AGRADECIMENTOS

À orientadora, Prof.<sup>a</sup> Ana Cecília Viera da Nóbrega pela confiança em mim depositada.

À co-orientadora, Prof.<sup>a</sup> Érika Pinto Marinho por aceitar participar deste trabalho e por me assistir com tanta presteza, inclusive durante suas férias e licença maternidade.

À Prof.<sup>a</sup> Sávia Gavazza que me deu um grande suporte, mesmo enquanto estive fisicamente longe do Campus.

Aos professores Silvana e Humberto, que no exercício da função de coordenador (a) da pós, responderam dúvidas, atenderam a pedidos e agilizaram processos.

Ao Prof. Antônio Eduardo Martinelli pela recepção calorosa no Laboratório de Cimentos, orientação e permissão para disfrutar de suas aulas como aluna ouvinte no tempo em que estive na UFRN.

A Prof.<sup>a</sup> Dulce Maria de Araújo Melo, pela paciência, dicas, e autorização de várias análises no NUPPRAR.

A todos que fazem parte do Labcim, UFRN, pela maravilhosa acolhida e ajuda com experimentos, principalmente a Marcos pela gigantesca ajuda com programas gráficos e paciência, prof. Júlio Freitas, Amanda, Moisés, Pablo, Paulo Henrique, Zodínio, Filipe, Leck, Luana, Lorna e Sharlon.

A todo o pessoal do NUPPRAR, UFRN, que me ajudou: Rodrigo Melo, Rodolfo, Tiago, Alexandre e José Antônio. E a Lídia Gabriela pela descontração e enorme gentileza.

À professora Maria das Vitórias, sua aluna Andreza e aos técnicos Sandro e Chico (seu Chico), do laboratório de materiais de construção da UFRN, pela ajuda com experimentos.

À técnica Samara, do laboratório de física, pela ajuda com experimentos.

Ao professor Wanderson e aos técnicos Hudson, Henrique e Roberto, do laboratório de metais e ensaios mecânicos da UFRN, pela ajuda com experimentos.

Ao professor Clístenes Nascimento, do Departamento de Agronomia da UFRPE, pela análise de metais e pelo esclarecimento de dúvidas.

Ao professor Arnaldo Carneiro por permitir que realizasse alguns experimentos no laboratório de construção civil do Campus Recife. Também a

Elaine, doutoranda, e aos técnicos, Ezequiel e Cazuza, que ali trabalham e que me ajudaram com muita boa vontade.

A todos do Laboratório de Química, Engenharia Ambiental e de Construção Civil, do CAA. Em especial, a técnica Fabíola, dona de muita disposição, criatividade e bom humor, pela ajuda inestimável com os experimentos e momentos de descontração. Também agradeço imensamente aos técnicos do LQ Agilson, Henrique, Amanda e Claudete, pela colaboração e agradável ambiente de trabalho favorecido.

Ao secretário Samuel por toda informação, paciência, gentileza e serviço prestado.

A todos os colegas do CAA que suam a camisa nos laboratórios, principalmente à Gabriela Albuquerque, que assumiu experimentos importantes na minha ausência, Venâncio, que sempre foi muito solícito, Jéssica Lyneker e Manuelle.

A Antônio Romão pelas caronas, troca de ideias e informações, e companhia às lavanderias de jeans de Caruaru.

Aos donos de lavanderias que me receberam tão bem em suas empresas, sobretudo ao dono da Nova Geração, Silvano, que junto com seus filhos, estavam sempre dispostos a ajudar no que fosse preciso.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a concretização deste trabalho: funcionários e prestadores de serviços dos *Campi* onde passei, alunos de graduação, mestrado e doutorado, professores e amigos.

À FACEPE pelo apoio financeiro e ao projeto Casadinho por viabilizar o intercâmbio com a UFRN.

*“A falsa ciência gera ateus; a verdadeira ciência leva os homens a se curvar diante da divindade”*

*Voltarie.*

## RESUMO

O arranjo produtivo local (APL) de confecções do Agreste Pernambucano é atualmente o segundo maior do país e cresce com taxas superiores às médias estadual e nacional. Do aumento da produção deste setor, cresce também a geração de resíduos. Dentre outros resíduos, o lodo têxtil e a cinza de lenha de algaroba, produzidos nas lavanderias do APL, durante as atividades de lavagem e beneficiamento do jeans, foram selecionados para serem introduzidos na argamassa de cimento Portland utilizada na construção civil, com o intuito de viabilizar uma alternativa de disposição para estes. O principal resíduo utilizado foi o lodo têxtil, pelo seu potencial poluidor, relativamente aos outros resíduos produzidos na indústria têxtil. A argamassa foi selecionada como material para incorporação dos resíduos devido ao cimento ser um agente estabilizador/solidificador com o poder de encapsular os possíveis contaminantes dos resíduos. Vários ensaios foram realizados para determinar as propriedades físico-químicas dos resíduos e sua influência nas argamassas, que foram dosadas com 1, 2 e 3% de lodo em substituição da areia. Os mesmos teores foram testados com a introdução concomitante de 1% de cinza de algaroba, também como substituição, para verificar sua interação com o sistema. Uma dosagem sem resíduos foi elaborada para fins de comparação. Os experimentos realizados indicam que a inclusão dos resíduos viabiliza a utilização das argamassas no mercado da construção civil. Os valores de resistência à compressão mostram uma redução da ordem de 40% nas argamassas com resíduos, porém, satisfazem o requisito para seu emprego em fins não estruturais. Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização atestam a imobilização dos contaminantes contidos nos resíduos. Assim, a incorporação de até 4% dos resíduos têxteis estudados em argamassa, garante uma alternativa segura de disposição para estes, e possibilita a aplicação do produto para assentamento de blocos e/ou revestimento.

Palavras-chave: argamassa, resíduos, estabilização/solidificação, cinza, lodo têxtil.

## ABSTRACT

The local textile operation (Arranjo Produtivo Local - APL) in the Agreste region of Pernambuco is the second largest in the country and is growing at rates higher than state and national averages. With the increase of the production of this sector, there is a growing waste generation. From among the various waste materials that APL produces while washing and processing jeans, textile sludge and wood ash from Algaroba trees were chosen to be introduced into Portland cement mortars thus proposing a safe disposal alternative for them. Textile sludge was used primarily because it is more highly pollutant relative to the others textile industry wastes. The waste was incorporated into the mortar because cement is a solidifying and stabilizing agent capable of encapsulating its possible contaminants. Several tests were conducted to determine the physical-chemical properties of the waste and their influence on the mortar at different ratios. Tests were done with 1, 2 and 3% of textile sludge replacing sand, and also with 1, 2 and 3% of the sludge combined with 1% of wood ash, to determine their integration into the system. A control group, mortar without waste mixed in, was also tested to give reference for all parameters experimented. Results showed that residues can be incorporated into cement mortar destined to be used for civil construction. The compressive strength values shows a decrease of approximately 40% of the mortar with residues, however, satisfy the requirements for its use in non-structural purposes. The results of leaching tests attest immobilization of contaminants contained in the waste. The incorporation of up to 4% of the textile wastes in mortar tested ensures a safe alternative for them and enables the application of the product for laying blocks and/or masonry mortars.

Keywords: mortar, waste, solidification/stabilization, wood ash, textile sludge.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do APL de confecções do Agreste pernambucano .....	19
Figura 2 - Metodologia experimental esquematizada em diagrama de blocos.....	29
Figura 3 – Queima de lenha de agaroba em forno industrial. Foto da autora. ....	30
Figura 4 - Lodo têxtil em leito de secagem. Foto da autora. ....	30
Figura 5 - Descarte indevido dos resíduos provenientes das lavanderias. Foto da autora. ....	31
Figura 6 - Lodo têxtil após secagem em estufa. Foto da autora.....	32
Figura 7 - Cinza de lenha de algaroba. Foto da autora. ....	32
Figura 8 - Cinza de lenha retida e passante na peneira 0,6 mm. Foto da autora.....	33
Figura 9 - Preparação das amostras para determinação de sólidos suspensos. Foto da autora. ....	40
Figura 10 - Agitador rotativo para lixiviação. Foto da autora. ....	41
Figura 11 - Corpos de prova prismáticos. Foto da autora. ....	45
Figura 12 - Ensaio de absorção de água por capilaridade. Foto da autora.....	46
Figura 13 - Aparelho comparador de comprimento. Foto da autora.....	48
Figura 14 - Equipamento de ultra-som. Foto da autora.....	50
Figura 15 - Permeabilímetro a gás nitrogênio. Foto da autora. ....	51
Figura 16 - Porosímetro de gás hélio. Foto da autora.....	51
Figura 17 - Curva granulométrica da areia.....	54
Figura 18 – Comparação de cor entre solução padrão e filtrado de duas amostras de agregado miúdo. Foto da autora. ....	55
Figura 19 - Curva granulométrica do lodo têxtil para partículas entre 0,15 e 4,8 mm. ....	56
Figura 20 - Curva granulométrica do lodo têxtil para partículas entre 0,3 $\mu\text{m}$ e 150 $\mu\text{m}$ . ....	57
Figura 21 - Difração de raios-X (DRX) do lodo têxtil .....	61
Figura 22 - Curva TG/DTG do lodo têxtil.....	62
Figura 23 - Lodo têxtil no microscópio eletrônico de varredura, com aumento de 1200 vezes.....	63
Figura 24 - Curva granulométrica da cinza de algaroba.....	64
Figura 25 - Curva granulométrica da cinza para partículas entre 0,3 $\mu\text{m}$ e 150 $\mu\text{m}$ . ..	65
Figura 26 - Difração de raios-X (DRX) da cinza de algaroba .....	69

Figura 27 - Curvas de TG e DTG da cinza de algaroba .....	70
Figura 28 - Cinza de lenha no microscópio eletrônico de varredura, com aumento de 1200 vezes .....	71
Figura 29 - Índice de consistência das argamassas com e sem adição de resíduos	72
Figura 30 – Retenção de água das argamassas com e sem adição de resíduos .....	73
Figura 31 - Densidade de massa .....	74
Figura 32 - Teor de ar incorporado.....	75
Figura 33 - Densidade de massa aparente .....	76
Figura 34 - Absorção de água por capilaridade.....	77
Figura 35 - Coeficiente de capilaridade.....	78
Figura 36 - Variação dimensional.....	79
Figura 37 - Variação de massa .....	80
Figura 38 - Resistência à tração.....	81
Figura 39 - Resistência à compressão com cura controlada.....	81
Figura 40 - Módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. ....	82
Figura 41 - Permeabilidade das argamassas.....	83
Figura 42 - Porosidade das argamassas.....	84
Figura 43 - Difração de raios-X das argamassas de referência e com 1, 2 e 3% de lodo. ....	87
Figura 44 - Difração de raios-X (DRX) das argamassas de referência e com substituição concomitante de cinza e lodo .....	88
Figura 45 - Imagens de microscópio eletrônico de varredura em argamassas em modo SE com ampliação de 1000 vezes. ....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade.....	21
Tabela 2 - Massas do material anidro em cada dosagem para o preparo de 2,5 Kg de argamassa.....	34
Tabela 3 - Características químicas do cimento.....	35
Tabela 4 - Características físicas do cimento.....	35
Tabela 5 - Distribuição granulométrica da areia.....	53
Tabela 6 - Distribuição granulométrica do lodo têxtil.....	56
Tabela 7 - Parâmetros físico-químicos do lodo têxtil.....	58
Tabela 8 – Percentuais de metais presentes no lodo têxtil em relação aos sólidos fixos.....	59
Tabela 9 - Resultados de FRX do resíduo de lodo têxtil.....	59
Tabela 10 – Concentrações de metais nos extratos solubilizado e lixiviado do lodo têxtil.....	60
Tabela 11 - Distribuição granulométrica da cinza de algaroba.....	64
Tabela 12 - Parâmetros físico-químicos da cinza de algaroba.....	66
Tabela 13 - Percentuais de metais presentes na cinza de algaroba em relação aos sólidos fixos.....	66
Tabela 14 - Resultados de FRX do resíduo de cinza de algaroba.....	67
Tabela 15 - Concentrações de metais nos extratos solubilizado e lixiviado da cinza de algaroba.....	68
Tabela 16 - FRX das argamassas.....	85
Tabela 17 – Concentrações de metais nos extratos lixiviados das argamassas.....	86
Tabela 18 – Concentrações de metais nos extratos solubilizados das argamassas.....	86
Tabela 19 – Comparativo entre as propriedades da argamassa padrão e da argamassa com 4% de substituição de areia pelos resíduos.....	90
Tabela 20 – Resultado do ensaio de consistência.....	100
Tabela 21 – Resultado dos ensaios de densidade no estado fresco, de teor de ar e de retenção de água.....	100
Tabela 22 – Resultado do ensaio de densidade de massa aparente em argamassas.....	101

Tabela 23 – Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade em argamassas.....	102
Tabela 24 – Resultados do ensaio de variação dimensional .....	103
Tabela 25 – Resultados do ensaio de variação de massa .....	104
Tabela 26 – Resistência à tração na flexão.....	105
Tabela 27 – Resistência à compressão .....	106
Tabela 28 – Resultados do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica .....	107
Tabela 29 – Resultados dos ensaios de permeabilidade e porosidade em argamassas.....	108

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: *American Society for Testing Materials*

BET: Brunauer-Emmet-Teller

CP I 32: Cimento Portland comum com resistência de 32 MPa aos 28 dias

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

CP II Z 32: Cimento Portland composto com pozolana com resistência de 32 MPa aos 28 dias

C-S-H: Silicato de cálcio hidratado

C<sub>2</sub>S: Silicato dicálcico

C<sub>3</sub>A: Aluminato tricálcico

C<sub>3</sub>S: Silicato tricálcico

C<sub>4</sub>AF: Ferroaluminato tetracálcico

DRX: Difractometria ao raio-X

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ICP: *Inductive Coupled Plasma*

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

NM: Norma Mercosul

NBR: Norma Brasileira

S/E: Solidificação/estabilização

SEBRAE: Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas

USEPA: *United States Environmental Protection*

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	O APL de Confecções do Agreste Pernambucano e seus resíduos ..	19
2.2	Tratamentos de resíduos sólidos .....	22
2.2.1	Solidificação/estabilização (S/E) .....	23
2.2.2	Estudos do aproveitamento do lodo e das cinzas de lenha em materiais cimentícios de construção civil .....	24
2.3	Argamassas .....	27
2.3.1	Propriedades das argamassas.....	27
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	29
3.1	Coleta e processamento dos resíduos .....	30
3.2	Dosagem.....	33
3.3	Caracterização dos materiais de partida .....	34
3.3.1	Cimento Portland.....	34
3.3.2	Areia.....	36
3.3.3	Caracterização físico-química dos resíduos.....	37
3.3.4	Determinação da condutividade iônica.....	38
3.3.5	Análises microestruturais .....	42
3.4	Caracterização das argamassas .....	42
3.4.1	Índice de consistência (estado fresco) .....	42
3.4.2	Retenção de água (estado fresco) .....	42
3.4.3	Densidade de massa e teor de ar incorporado (estado fresco)....	43
3.4.4	Moldagem e cura dos corpos de prova .....	44
3.4.5	Densidade de massa aparente .....	45
3.4.6	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade	45

3.4.7	Variação dimensional e variação de massa .....	47
3.4.8	Resistência à tração e compressão .....	48
3.4.9	Módulo de elasticidade dinâmico .....	49
3.4.10	Permeabilidade .....	50
3.4.11	Porosidade .....	51
3.4.12	Análise química.....	52
3.4.13	Análise microestrutural.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
4.1	Caracterização do cimento e da areia .....	53
4.2	Caracterização dos resíduos.....	55
4.2.1	Lodo têxtil.....	55
4.2.2	Cinza de algaroba .....	63
4.3	Caracterização das argamassas .....	71
4.3.1	Consistência (estado fresco).....	71
4.3.2	Retenção de água (estado fresco) .....	73
4.3.3	Densidade de massa e teor de ar incorporado (estado fresco)....	74
4.3.4	Densidade de massa aparente .....	75
4.3.5	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade	76
4.3.6	Variação dimensional e variação de massa .....	78
4.3.7	Resistência à tração na flexão e à compressão .....	80
4.3.8	Módulo de elasticidade dinâmico .....	82
4.3.9	Permeabilidade .....	83
4.3.10	Porosidade .....	84
4.3.11	Análise química.....	85
4.3.12	Análise microestrutural.....	86
4.4	Discussões .....	89
5	CONCLUSÕES.....	92

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
REFERÊNCIAS.....	95
ANEXO.....	100

## 1 INTRODUÇÃO

O grande crescimento tecnológico dos últimos anos provocou um aumento significativo na produção de bens industrializados e com isso um aumento consequente da geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, que impactam o sistema físico-ecológico que nos circunda, comprometendo o equilíbrio do planeta (CALMON, 2010).

O setor têxtil do Agreste pernambucano, chamado Arranjo Produtivo Local (APL) é o segundo maior polo têxtil do país, empregando cerca de 100 mil pessoas e com produção de cerca de 900 milhões de peças por ano, perdendo apenas para São Paulo. Porém, para manter sua importância e conquistar novos mercados, é fundamental que o APL adote ações que garantam a sustentabilidade ambiental. Grandes geradoras de resíduos, as lavanderias de jeans já deixaram o rio Capibaribe, manchado de azul, porém, atualmente, grande parte delas se interessa em ter um selo verde que ateste sua adequação à regulamentação ambiental (ESTADÃO, 2013).

Dentre outros resíduos, as lavanderias geram grandes quantidades de lodo têxtil, provenientes do processo físico-químico dos efluentes. De composição variável, este resíduo pode conter concentrações de substâncias químicas agressivas ao ambiente e aos seres vivos. Essas empresas também são grandes geradoras de cinzas, provenientes da queima de lenha de algaroba para o aquecimento da água utilizada nos seus diversos processos.

Ainda não existem sistemas para recuperação desses resíduos ou controle eficaz da sua disposição por parte da maioria das lavanderias. Por isso buscou-se neste trabalho caracterizá-los, para se obter conhecimento do seu potencial poluente e oferecer uma alternativa de disposição segura através da sua utilização em argamassa de cimento para uso na construção civil. A matriz cimentícia será responsável pela imobilização de eventuais agentes tóxicos presentes nos resíduos através da solidificação/estabilização, técnica de tratamento recomendada.

O desafio aqui consiste, antes de tudo, na conscientização da urgência do tratamento desses resíduos, preservando não só o meio ambiente como também a imagem da indústria têxtil local, que deve assumir o prejuízo ecológico fruto de suas atividades.

O objetivo deste trabalho é o estudo do efeito da adição de resíduos de lodo têxtil e cinza de lenha, provenientes das lavanderias do APL de Confecções do Agreste Pernambucano, nas propriedades de argamassas de cimento Portland para uso na construção civil.

Para atingir este objetivo algumas atividades serão prioritariamente executadas:

- Caracterizar físico-quimicamente o lodo têxtil e as cinzas de lenha;
- Verificar a atividade pozolânica dos resíduos;
- Avaliar as propriedades das argamassas com resíduos comparativamente a uma padrão;
- Caracterizar microestruturalmente resíduos e argamassas;
- Avaliar a capacidade de estabilização dos resíduos incorporados através dos ensaios de lixiviação e solubilização.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O APL de Confeções do Agreste Pernambucano e seus resíduos

O Arranjo Produtivo Local de confeções do Agreste pernambucano envolve 10 municípios: Caruaru, Toritama, Santa Cruz do Capibaribe, Surubim, Brejo da Madre de Deus, Agrestina, Cupira, Vertentes, Riacho das Almas e Taquaritinga do Norte. Os três primeiros municípios, ilustrados na Figura 1, concentram 77% do total de pessoas ocupadas nas unidades produtivas (SEBRAE, 2013).

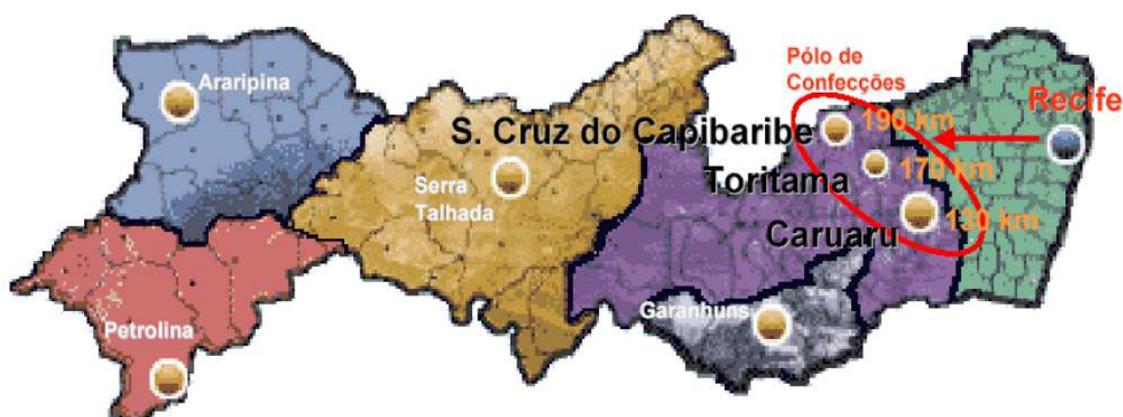


Figura 1 - Localização do APL de confeções do Agreste pernambucano  
Fonte: SEBRAE (2004)

Por unidade produtiva se entende qualquer conjunto de pessoas envolvidas na produção de confeções e/ou seus componentes. No APL, em 2012, havia 18.803 unidades produtivas, que empregavam cerca de 107 mil pessoas (formalmente e informalmente). Como comparação, toda a indústria pernambucana emprega, formalmente, pouco mais de 200 mil pessoas (SEBRAE, 2013).

Em termos demográficos o APL do Agreste pernambucano cresceu, entre 2000 e 2010, 2,2 vezes mais rapidamente do que o Brasil e 2,4 vezes do que o Nordeste e Pernambuco. Em 2010 a população total do APL era de 650 mil habitantes, que representava 7% da população estadual (SEBRAE, 2013).

Em termos econômicos, entre 2000 e 2009, o Produto Interno Bruto Real (descontada a inflação) do APL cresceu 1,5 vezes mais rápido que o do Brasil, 1,2 vezes que o do Nordeste e 1,3 que o de Pernambuco. Em 2009 o PIB do APL foi de

R\$ 3,9 bilhões, equivalente a 5% do PIB pernambucano no mesmo ano. Em 2011 o APL produziu cerca de 842,5 milhões de peças, com faturamento total anual de R\$ 1,102 bilhões (SEBRAE, 2013).

As indústrias são particularmente responsáveis pela poluição do meio-ambiente devido à geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos frutos de suas atividades. Segundo Silva Filho (2013) o APL comporta mais de 200 unidades de lavanderias de jeans, sendo a maioria delas localizadas em Caruaru (83 unidades) e Toritama (77 unidades). Na indústria têxtil local, as lavanderias são responsáveis pela lavagem e beneficiamento do jeans. Os principais processos realizados nas lavanderias são: recepção das peças, desengomagem (retirada da goma), lavagem, tingimento, amaciamento, secagem, acabamento e expedição (FERRAZ JUNIOR, 2010).

Os resíduos sólidos produzidos pelas lavanderias são principalmente os listados a seguir:

- argila expandida desgastada – utilizada na lavagem das peças para retirada de fragmentos dos tecidos pelo processo de abrasão;
- fibras do material têxtil (restos de fios e tecidos) – produtos do corte e da abrasão;
- cinzas– produto da queima de lenha de algaroba e/ou briquete de cana de açúcar para aquecimento das caldeiras geradoras de vapor utilizado nos processos;
- Lodo têxtil – proveniente do tratamento físico-químico dos efluentes.

A algaroba (*Prosopis juliflora*) é uma árvore da família das leguminosas. É uma planta xerófila, ou seja, que possui estrutura adaptável à falta de água, razão pela qual se adequa a lugares secos como a caatinga e os desertos. É nativa do deserto de Piura no Peru e por ser exótica, tem seu corte liberado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (GOMES; GOMES, 2008).

O lodo têxtil tem sua composição atrelada à composição química do efluente e ao tratamento a ele aplicado. Nem todas as lavanderias efetuam todos os processos anteriormente citados. É comum encontrar lavanderias que não efetuam tingimento nas peças, por exemplo. Quanto ao tratamento, dois tipos diferentes são

executados: um deles com a adição de sulfato de alumínio e hidróxido de cálcio, e o outro com a utilização de tanino.

De acordo com a ABNT NBR 10004 resíduos sólidos são definidos como:

“resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

A mesma norma também estabelece os critérios de classificação dos resíduos sólidos de acordo com suas características, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade

Tipo	Características
Classe I- Perigosos	Resíduos que apresentam riscos à saúde pública, provocando ou acentuando índices de mortalidade ou incidência de doenças, e ao meio-ambiente, quando gerenciados de forma inadequada. Ou resíduos que possuem uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
Classe II A - Não perigosos e não inertes	Resíduos que não se enquadram na classe I ou na classe II B. Os resíduos desta classe podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
Classe II B - Não perigosos e inertes	Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABN NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada e desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da ABNT NBR 10004.

Fonte: ABNT NBR 10004, adaptado pela autora.

O processo de classificação dos resíduos, segundo esta norma, é realizado de duas maneiras: (I) mediante a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e (II) determinação de seus constituintes e características comparados com as listagens, fornecidas nesta norma, de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio-ambiente é conhecido.

A adição de resíduos pode favorecer, restringir ou não influenciar as reações de hidratação do cimento. De acordo com Chen *et al* (2009), metais pesados geralmente alteram o curso das reações de hidratação do cimento. A hidrólise dos metais pesados resulta na redução do pH e acelera a hidratação do cimento podendo influenciar na formação e propriedades (estrutura e permeabilidade) da camada hidratada protetora na superfície da partícula de cimento. Mais tarde influencia a nucleação e crescimento dos produtos de reação.

Partículas leves como silte, argila ou poeira de carvão podem revestir as partículas do cimento impedindo o crescimento dos cristais de silicato de cálcio hidratado. Materiais como solos ou fluoreto de cálcio geralmente não participam das reações de cimentação diretamente, mas podem ficar aprisionados na matriz sólida. (CONNER; HOEFFNER, 1998 apud SILVA, 2007)

## 2.2 Tratamentos de resíduos sólidos

Tratamento de resíduos sólidos é um processo que altera as características, composição ou propriedades dos resíduos procurando conseguir a sua destruição ou tornar sua disposição final menos impactante (LORA, 2000 apud SILVA, 2007).

Segundo Prim (1998) as principais formas de tratamento para resíduos sólidos são:

- Secagem e desidratação de lodos;
- Incineração;
- Aterros;
- *Landfarming* (fazendas de lodo);
- Compostagem;
- Solidificação/estabilização.

A secagem e desidratação tem como objetivo fazer evaporar a água presente no resíduo para facilitar sua disposição final. A incineração é um processo de combustão controlada para transformação dos resíduos em gases, calor e materiais

inertes. Os aterros são áreas planejadas com terrenos impermeabilizados para evitar a contaminação do solo, águas subterrâneas e superficiais. As fazendas de lodo promovem a biodegradação, destoxificação, a transformação e a imobilização dos constituintes dos resíduos através das propriedades físicas e químicas do solo e da atividade microbiana deste meio. A compostagem é a decomposição e/ou transformação de material orgânico sob a ação de microrganismos (CASTRO, 2010).

O tipo de tratamento vai depender das características dos resíduos. Segundo Minocha, Jain e Verma (2003), o processo de solidificação/estabilização é viável para a maioria dos resíduos inorgânicos contaminados por metais. Este processo envolve a mistura de resíduo com um material encapsulante para melhorar as propriedades físicas e a imobilização dos contaminantes que podem ser prejudiciais ao meio ambiente. Desta forma este tratamento foi selecionado para os resíduos utilizados neste trabalho.

### **2.2.1 Solidificação/estabilização (S/E)**

Solidificação transforma resíduo líquido, lodo semi-sólido ou um pó numa forma monolítica ou material granular que permitirá mais facilmente o manuseio e transporte destes para os lugares onde serão dispostos. Estabilização é o processo de converter resíduo tóxico numa forma mais estável física e quimicamente, isto é, altera resíduo perigoso num resíduo menos tóxico ou com menor mobilidade (CHEN *et al*, 2009).

Os processos de S/E dividem-se em orgânicos e inorgânicos dependendo da natureza dos seus agentes ligantes. Os agentes inorgânicos são mais utilizados nesses processos devido ao custo e a facilidade de aplicação. Dentre eles o mais utilizado é o cimento Portland (SILVA, 2007).

Dados de resistência à compressão são frequentemente usados para prover uma base de comparação entre resíduos estabilizados e não estabilizados. Materiais de resíduos não estabilizados não exibem uma boa resistência ao cisalhamento, entretanto, se o resíduo estiver estabilizado numa matriz cimentícia, pode ser esperado um aumento das características de compressão. Valores mínimos de resistência à compressão para um material solidificado/estabilizado devem ser avaliados com base nas cargas de projeto (MALVIYA; CHAUDHARV, 2006).

A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (USEPA) considera um material solidificado/estabilizado com uma resistência de 0,35 MPa para ter uma resistência a compressão satisfatória. Este valor mínimo guia tem sido sugerido para prover uma base estável para materiais colocados em um aterro. No Reino Unido um resistência de 0,7 MPa aos 28 dias é aceitável, mas um valor tão abaixo quanto 0,35 MPa também é considerado dependendo da espécie testada (MALVIYA; CHAUDHARV, 2006).

### **2.2.2 Estudos do aproveitamento do lodo e das cinzas de lenha em materiais cimentícios de construção civil**

A reciclagem e reutilização de resíduos provenientes de diversos processos industriais, como materiais de construção civil, têm sido cada vez mais frequentes. Diversos tipos de resíduos como cinza de bagaço de cana, areia de fundição, entulhos da construção civil, entre outros, têm sido amplamente estudados com abordagem voltada ao desempenho do material proposto (PIETROBON *et al*, 2004).

Os lodos e as cinzas de lenha também foram objeto de várias pesquisas para verificação da viabilidade de sua inserção em materiais de construção. A seguir, serão apresentados alguns desses estudos.

Pietrobon *et a.* (2002) estudaram a solidificação/estabilização de lodo de tratamento de lavanderia têxtil em pastas e argamassas de cimento (em substituição ao cimento), avaliando um estudo de caso para Maringá- PR, caracterizando-as em termos de resistência a compressão e lixiviação. O lodo foi incorporado em pastas de cimento CP I 32 nas porcentagens de 0, 10, 15 e 20%. Nas argamassas com cimento CP II Z os percentuais de substituição foram 0, 10, 20, 25 e 30%.

Os resultados demonstraram que em todas as pastas de cimento e lodo e nas argamassas com substituição de até 25%, os valores de resistência à compressão aos 28 dias atingiram valores maiores que 10 MPa (cerca de 40% da resistência da argamassa padrão), o que permite sua utilização como material de construção civil secundário, sem função estrutural. Também de maneira geral, a lixiviação ocorrida nos corpos de prova de argamassa sem lodo incorporado foi da mesma ordem de grandeza daquela encontrada nos corpos de prova contendo lodo. Isso levou à conclusão de que as argamassas permitiram uma incorporação segura dos metais detectados no lodo de lavanderia. Os autores alertam que é necessário avaliar a

influência de matéria orgânica na durabilidade do compósito (PIETROBON *et al.*, 2002).

Pietrobon *et al* (2004) realizaram estudos sobre a lixiviação de contaminantes de compostos lodo-cimento. Além da lixiviação, ensaios de consistência, tempo de pega e resistência à compressão foram efetuados. O lodo têxtil foi incorporado como adição em relação à massa de cimento. Alguns corpos de prova foram confeccionados com cimento CP II F 32 com percentuais de lodo têxtil de 0, 10, 15 e 20%. Outros corpos de prova foram moldados com cimento CP II Z e percentuais de lodo têxtil de 0, 10, 20 e 30%. Os resultados mostraram que na amostra com 30% de lodo têxtil, as concentrações dos elementos presentes no extrato lixiviado ficaram abaixo dos limites estabelecidos na ABNT NBR 10004, o que comprovou a eficiência da solidificação/estabilização do resíduo com cimento. Quanto aos demais ensaios, concluiu-se que apesar de o lodo têxtil ter afetado negativamente os resultados, não comprometeu a utilização das pastas em aplicações na construção civil.

Balasubramanian *et al* (2006) avaliaram a substituição parcial de 30% do cimento por lodo têxtil (proveniente de indústrias com foco em lingerie e malhas) na formulação de argamassas e constataram que tal substituição não era apropriada para aplicações estruturais conforme as diretrizes da *Bureau of Indian Standards* e da ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Yan, Sagoe-Crentsil e Shapiro (2011) pesquisaram a utilização de lodo proveniente da indústria de reciclagem de papel em argamassas de cimento. A proporção cimento/areia utilizada foi 1/3 em massa. O lodo foi inserido nas argamassas como adição com percentuais de 0, 2,5, 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de areia. Foi verificada uma redução da trabalhabilidade com o aumento dos percentuais de adição, para um mesmo fato água/cimento. Também, com a inserção do resíduo, houve aumento do tempo de pega, da absorção, da porosidade e da retração das argamassas. Houve diminuição nos valores de resistência à compressão. No entanto, o estudo conclui que a utilização de até 2,5% de lodo na argamassa não afeta significativamente as suas propriedades físicas, o que torna possível seu uso em conjunto com alvenarias.

Patel e Pandey (2012) estudaram o comportamento de pastas de cimento Portland pozolânico com inclusão de lodo têxtil em percentuais de 0, 30, 40 50, 60 e 70% em substituição à massa de cimento. Foi verificada a diminuição da resistência à compressão e da densidade aparente com o aumento do percentual de lodo

inserido na pasta. As concentrações encontradas dos metais nos extratos lixiviados ficaram abaixo dos limites estabelecidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA). Concluiu-se que o lodo tem potencial para ser utilizado em materiais de construção depois de sua solidificação/estabilização.

Prim (1998) utilizou lodo têxtil e cinza pesada de termelétrica em argamassas de cimento. A introdução dos resíduos foi feita em substituição ao cimento com 10, 20, 30 e 40% de lodo. Também foram confeccionadas argamassas com substituição concomitante de cinza pesada da seguinte maneira: percentual fixo de lodo em 30 % e percentuais de cinza variáveis (10, 20, 30 e 40%); e percentual fixo de lodo em 40% e percentuais de 10, 20, 30 e 40% de cinza. A autora concluiu, baseada dos resultados de resistência à compressão, lixiviação e solubilização, que as argamassas com resíduos podem ser utilizadas na construção civil para fins não estruturais.

Cheah e Ramly (2011) fazem uma compilação de vários trabalhos sobre a utilização de cinza de lenha em argamassas de cimento e concreto. Como a composição química do resíduo depende das características da madeira utilizada, eles recomendam uma vigorosa caracterização do resíduo. Em geral ficou concluído que a incorporação de cinza de lenha em substituição de até 10% da massa total dos componentes da argamassa e do concreto, produz material com resistência aceitáveis de acordo com as normas vigentes de cada país.

Maschio *et al* (2011) estudaram a substituição de massa de cimento por cinza de abeto (árvore conífera) em percentuais de 5, 10, 20 e 30%. Eles concluíram que substituições de até 5% não comprometem a resistência à compressão e absorção de água das argamassas em relação a uma argamassa padrão.

Melo (2012) estudou cinza proveniente da queima de algaroba em argamassa de cimento pozolânico e cal para uso como revestimento. A cinza foi incorporada nas argamassas como adição com percentuais de 0, 10, 20, 30, 40 e 50% em relação à massa de cimento. O autor concluiu que adições de até 40% são tecnicamente viáveis para o uso proposto.

Por tratarem de resíduos distintos e selecionarem metodologias específicas, os autores citados encontraram diferentes resultados (percentuais de adição ou substituição, aplicações) entre si.

## 2.3 Argamassas

A ABNT NBR-7200 define argamassa como a mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante e água, contendo ou não aditivos e adições com propriedades de aderência e endurecimento. O aglomerante utilizado neste trabalho trata-se de cimento Portland.

### 2.3.1 Propriedades das argamassas

Segundo Carasek (2010), as propriedades das argamassas variam de acordo com sua interação com os substratos onde serão aplicadas. Nas próximas linhas encontra-se uma breve definição das principais propriedades utilizadas neste trabalho para a avaliação das argamassas em estudo.

Consistência (estado fresco) consiste na maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas. Está relacionada com a trabalhabilidade das argamassas (CARASEK, 2010).

Retenção de água (estado fresco) é a capacidade da argamassa de manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda da água de amassamento por evaporação ou absorção. O conhecimento da retenção de água de uma argamassa é muito importante tendo em vista a sua aplicação em algum tipo de substrato, pois a superfície em contato com a argamassa poderá sugar a água de amassamento modificando assim as suas condições de secagem (CARASEK, 2010).

Densidade de massa e teor de ar incorporado (estado fresco) é a relação entre a massa e o volume do material. Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável em longo prazo ela será. Esta propriedade varia com o teor de ar incorporado nas argamassas e com a massa específica dos materiais que a compõem (CARASEK, 2010).

Densidade de massa aparente é a relação entre massa e volume do material no estado endurecido. Esta propriedade terá valores ligeiramente menores que no estado fresco devido a perda de água do sistema. Observa-se uma relação direta entre o teor de água da argamassa e a redução de sua densidade com a secagem (CARASEK, 2010).

Variação dimensional é a diferença entre as dimensões da argamassa durante o processo de cura. A pasta de cimento retrai ao perder a água em excesso de sua composição. Assim a retração das argamassas dependerá da quantidade de pasta nelas contidas e também do teor de finos do agregado miúdo já que o aumento da superfície específica demandará uma maior quantidade de água no sistema (CARASEK, 2010).

Resistência é a capacidade do material de resistir uma tensão sem se romper e módulo de elasticidade é a razão entre a tensão e deformação reversível (MEHTA, 2008).

Porosidade é a razão entre o volume de vazios e o volume total de um corpo. Já a permeabilidade está relacionada com as dimensões e interligações dos poros, sendo definida como a propriedade que permite o escoamento de um fluido através de um corpo (CAPUTO, 1996).

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

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

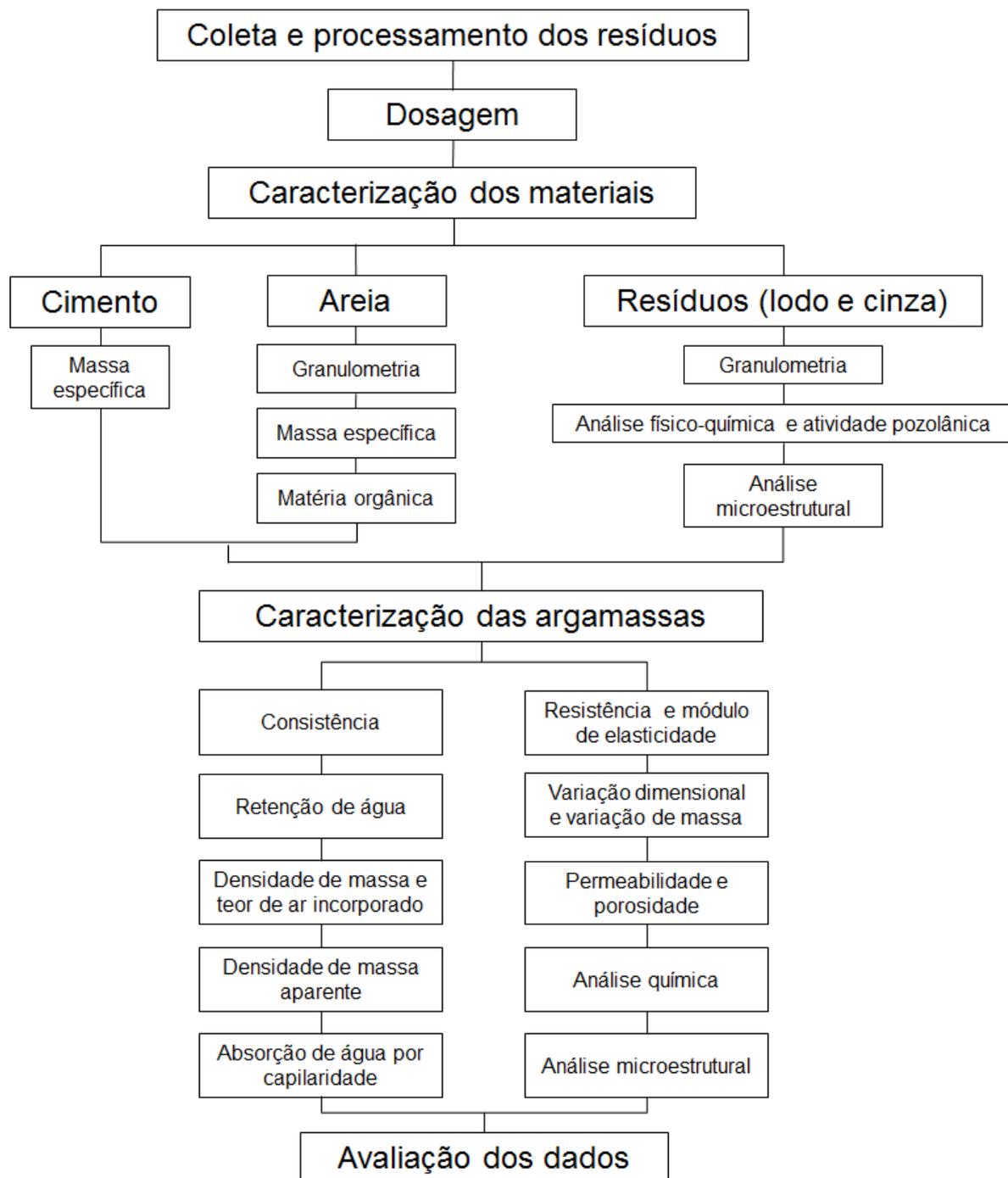


Figura 2 - Metodologia experimental esquematizada em diagrama de blocos

### 3.1 Coleta e processamento dos resíduos

Os resíduos selecionados como objeto de estudo deste trabalho são as cinzas provenientes da queima de algaroba (Figura 3) e o lodo têxtil (Figura 4), devido à quantidade produzida, ao potencial poluidor e ao frequente descarte irregular, com ilustra a Figura 5. A produção desses resíduos não é quantificada. O que se constatou durante as visitas às lavanderias é que a produção de cinza é diária e a de lodo semanal.



Figura 3 – Queima de lenha de algaroba em forno industrial. Foto da autora.



Figura 4 - Lodo têxtil em leito de secagem. Foto da autora.



Figura 5 - Descarte indevido dos resíduos provenientes das lavanderias. Foto da autora.

A coleta dos resíduos foi realizada na lavanderia Nova Geração situada na Rua José Marcelino de Araújo, 163, bairro Cedro, Caruaru-PE, de acordo com a norma de amostragem de resíduos sólidos – ABNT NBR 10007.

A escolha da lavanderia se deu pelo fato da mesma utilizar apenas algaroba na queima dos fornos e não uma mistura de materiais combustíveis. Além disso, esta lavanderia possui o tingimento entre seus processos, o que implica o uso de sais para fixação dos corantes, e trata seus efluentes com sulfato de alumínio e hidróxido de cálcio, o que acontece na maioria das lavanderias e representa a condição mais desfavorável para a composição química do lodo.

O lodo têxtil foi coletado num dos leitos de secagem da lavanderia de jeans supracitada e levado para o laboratório de materiais da UFPE-CAA e submetido a uma temperatura de 100°C em estufa por 24 horas. Depois de seco e frio, como retrata a Figura 6, foi moído em moinho de bolas de marca PAVITEST, modelo I-4205 por cerca de 1 hora. Assim, o resíduo apresentou características mais homogêneas para sua inserção em argamassa de cimento Portland.



Figura 6 - Lodo têxtil após secagem em estufa. Foto da autora.

Após a coleta da cinza de lenha no forno da lavanderia Nova Geração, este resíduo foi transportado para laboratório e submetido a um peneiramento prévio na peneira de malha 4,75 mm. Na Figura 7 são exibidas lenhas de algaroba ao fundo e as cinzas produzidas pela queima delas.



Figura 7 - Cinza de lenha de algaroba. Foto da autora.

Ao utilizar a série normal de peneiras para realização da granulometria dos resíduos, percebeu-se que, no caso das cinzas, o que ficava retido na peneira de

600µm era um material bem heterogêneo, composto de carvão, diferentes pedrinhas, etc., como se pode visualizar na Figura 8. Então se tomou a decisão de excluir esta parte do resíduo e utilizar todo o material passante na peneira 600 µm, que tem aspecto mais uniforme, mais cinza e que corresponde a quase 80% deste resíduo, como será verificado nos resultados.

Para manter um padrão na execução do experimento, decidiu-se utilizar também em relação ao lodo, o material passante na mesma peneira, o que corresponde a 86% deste resíduo.



Figura 8 - Cinza de lenha retida e passante na peneira 0,6 mm. Foto da autora.

### 3.2 Dosagem

A escolha da proporção entre aglomerante e agregado miúdo foi baseada nos trabalhos de Fiorito (1994) e Carasek (2010), que expõem um quadro de traços da ASTM C 270, onde se verifica uma proporção de um volume de aglomerante para dois e meio a três volumes de agregado miúdo para argamassas de assentamento. Adotou-se o traço de 1:4 (cimento:areia) em massa.

Em busca da melhor maneira de inserir os resíduos nas argamassas, decidiu-se substituí-los por percentuais de areia para manter a relação

aglomerante/agregado. Os percentuais de lodo selecionados foram 1, 2 e 3%. E optou-se também pela confecção de traços com os mesmos percentuais de lodo mais 1% de cinza, para fins de comparação.

As argamassas foram então preparadas em sete traços distintos, identificadas neste trabalho de acordo com o teor de substituição conforme apresentado na Tabela 2. Para a realização dos ensaios de caracterização das argamassas, foi utilizado 2,5 kg de material seco para cada mistura, conforme recomendado na ABNT NBR 13276.

Tabela 2 - Massas do material anidro em cada dosagem para o preparo de 2,5 Kg de argamassa.

Traços	Massa (g)			
	Cimento	Areia	Lodo	Cinzas
0%	500	2000	0	0
1%L	500	1980	20	0
2%L	500	1960	40	0
3%L	500	1940	60	0
1%C1%L	500	1960	20	20
1%C2%L	500	1940	40	20
1%C3%L	500	1920	60	20

Fonte: tabela da autora, 2013

A determinação da quantidade de água foi feita através do ensaio de consistência. O valor encontrado para a argamassa de referência (0% de substituição) foi de 435 ml de água (diâmetro médio de 259 mm) para 2,5 Kg de material seco e foi utilizado nos demais traços.

### 3.3 Caracterização dos materiais de partida

#### 3.3.1 Cimento Portland

O cimento utilizado na confecção dos corpos de prova foi o CP II Z 32 do fabricante Nassau, mais comumente utilizado e disponibilizado no mercado da construção civil na cidade de Caruaru-PE. Segundo Silva (2007) materiais pozolânicos são utilizados separadamente ou em conjunto com o cimento nos processos S//E, o que foi mais um motivo para a escolha deste tipo de cimento. Como a maior parte dos experimentos realizados foram com corpos de prova com

até 28 dias de idade, o efeito da pozolanicidade deste cimento nas argamassas não foi avaliado.

As características físicas e químicas do cimento utilizado foram fornecidas pelo fabricante, e encontram-se na Tabela 3 e na Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3 - Características químicas do cimento

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

Fonte: Cimentos Nassau

Tabela 4 - Características físicas do cimento

<b>Características físicas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	3,01
Área específica	m <sup>2</sup> /kg	418
Consistência normal	%	28,3
Início de pega	horas	4,15
Fim de pega	horas	5,20
Resistência compressão 1 dia	MPa	12,6
Resistência compressão 3 dias	MPa	23,1
Resistência compressão 7 dias	MPa	28,1
Resistência compressão 28 dias	MPa	38,1

Fonte: Cimentos Nassau

Mesmo com os dados fornecidos pelo fabricante, o ensaio de massa específica foi realizado em laboratório de acordo com a ABNT NBR NM 23.

O frasco de Le Chatelier foi preenchido com, auxílio de funil, com querosene até a marca correspondente a 0 cm<sup>3</sup> e em seguida foi introduzida uma massa

conhecida do material de ensaio que provocou o deslocamento do líquido na marca correspondente a (entre 18cm<sup>3</sup> e 24cm<sup>3</sup>).

A massa específica do material ( $\rho$ ) foi encontrada utilizando-se a equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Na qual:

- $m$  é a massa do material ensaiado em gramas
- $V$  é o volume deslocado pela massa do material ensaiado em centímetros cúbicos

### 3.3.2 Areia

Para a confecção dos corpos de prova utilizou-se areia lavada de rio, comumente encontrada nos armazéns da cidade de Caruaru e arredores.

Os experimentos que caracterizaram a areia utilizada foram: granulometria, massa específica e matéria orgânica.

A composição granulométrica foi determinada de acordo com a ABNT NBR NM 248. Para a realização deste ensaio foi utilizada a série normal de peneiras com as aberturas de malha a seguir: 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 600 $\mu$ m, 300 $\mu$ m e 150 $\mu$ m. Duas amostras de 300g de areia, secas em estufa a 105°C e esfriadas à temperatura ambiente, foram peneiradas na série de peneiras selecionada com a ajuda de um agitador eletromagnético da marca Contenco durante 15 minutos com 100% da agitação permitida pelo equipamento.

A massa específica da areia foi determinada de acordo com a ABNT NBR NM 52.

A determinação das impurezas orgânicas da areia foi realizada de acordo com a NBR NM 49. Primeiramente prepararam-se três soluções:

- Solução de hidróxido de sódio a 3 % (30g de hidróxido de sódio e 970g de água destilada);
- solução padrão de ácido tânico a 2% (2g de ácido tânico, 10cm<sup>3</sup> de álcool e 90 cm<sup>3</sup> de água destilada);
- solução padrão adicionando 3cm<sup>3</sup> da solução de ácido tânico a 2%, a 97cm<sup>3</sup> da solução de hidróxido de sódio.

Em seguida procedeu-se a agitação de dois frascos erlenmeyer (ensaio em duplicata), cada um contendo 200g de areia seca ao ar e 100cm<sup>3</sup> da solução de hidróxido de sódio. Tais misturas, assim como a solução padrão, ficaram em repouso em ambiente escuro durante 24 horas. Findo este período, as soluções em contato com o agregado miúdo foram filtradas em tubos de ensaio com a utilização de papel filtro qualitativo.

### **3.3.3 Caracterização físico-química dos resíduos**

A caracterização físico-química dos resíduos lodo têxtil e cinza de algaroba consistiu na determinação dos parâmetros: área superficial, massa específica, pH, condutividade, teor de sólidos, sólidos suspensos, concentrações de sulfato e cloreto, difração de raios X, análise de metais por fluorescência de raios X e pelo método ICP (*Inductively Coupled Plasma*) e análise de pozolanicidade.

Todas as cápsulas de porcelana utilizadas nos experimentos foram previamente calcinadas em mufla a 600°C durante uma hora e esfriadas em dessecador por aproximadamente 45 minutos.

#### **3.3.3.1 Área superficial**

As áreas superficiais específicas foram calculadas através do método Brunauer-Emmett-Teller (BET) para obter isotermas de adsorção/dessorção de N<sub>2</sub> a baixas temperaturas utilizando um equipamento da Micromeritics, modelo ASAP 2020.

A primeira etapa do processo consistiu em tratar a amostra para retirar qualquer umidade presente. Uma massa equivalente a 0,2 g de amostra é aquecida até 90 °C a 10 °C/min-1 durante 2 horas. Logo que encerrada essa primeira rampa, a temperatura é aumentada para 350°C, na mesma razão de aquecimento anterior e permanece nessa temperatura por 3 horas.

Durante a análise, o porta-amostra contendo a amostra é mergulhada em N<sub>2</sub> líquido (-196 °C) e vinte pontos de medida são obtidos. Em média essa etapa dura de 4 a 5 horas.

### **3.3.3.2 Massa específica**

A massa específica dos resíduos foi realizada em consonância com a ABNT NBR NM 23. O resumo do procedimento de ensaio é o mesmo que o descrito no item 3.3.1. O reagente utilizado para o lodo foi querosene e para a cinza foi água.

### **3.3.3.3 Potencial hidrogeniônico (pH)**

Em um béquer de 100 ml colocou-se 10g do resíduo seco e adicionado 50 ml de água deionizada fervida (isenta de gás carbônico) e resfriada a temperatura ambiente, obtendo assim uma pasta de consistência bem mole que permaneceu em repouso por três horas. Em seguida mergulhou-se na suspensão o eletrodo do pHmetro, devidamente calibrado com soluções tampões padrões de pH 4,0 e pH 7,0 conforme instrução do fabricante.

### **3.3.4 Determinação da condutividade iônica**

Num béquer com 10 g de resíduo e água deionizada onde foi feita a determinação do pH, foi mergulhado o eletrodo do equipamento medidor da condutividade devidamente calibrado. A leitura da condutividade se deu depois de ligeira homogeneização seguida de um intervalo para estabilização.

#### **3.3.4.1 Determinação de cloretos**

A determinação de cloretos foi realizada através do método argentométrico (método de Mohr) que consiste na titulação de uma solução padrão de nitrato de prata. Durante a titulação os íons cloreto são precipitados na forma de cloreto de prata. Cromato de potássio é usado como indicador do ponto final de reação.

A concentração de cloreto na amostra é calculada através da equação 2:

$$Cl^{-}(mg/l) = \frac{(A-B).N.35450}{VA} \quad (2)$$

Na qual:

- A é o volume gasto para titular a prova que contém a amostra, em mililitros;
- B é o volume gasto para titular a amostra em branco, em mililitros;
- N é a normalidade do nitrato de prata;
- VA é o volume da amostra, em mililitros.

### 3.3.4.2 Determinação de sulfatos

A determinação de sulfatos nos resíduos foi feita de acordo com o Standard Methods for Examination of Water & Wastewater (EATON *et al*, 2005).

O sulfato é precipitado em presença de HCl a sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ ), pela adição de Cloreto de bário ( $\text{BaCl}_2$ ) à solução. O precipitado é cuidadosamente mantido próximo à temperatura de ebulição, e após um período de digestão é filtrado em um cadinho de porcelana previamente tarado, e conduzido a altas temperaturas ( $800^\circ\text{C}$ ), sendo esfriado em dessecador, e novamente pesado (cadinho+ $\text{BaSO}_4$ ). Por diferença de peso, tem se a massa de sulfato presente na amostra.

### 3.3.4.3 Umidade, sólidos totais, fixos e voláteis a $105^\circ\text{C}$

Cápsulas contendo resíduos foram colocadas em estufa a  $105^\circ\text{C}$  por uma hora, retidas, pesadas e coladas em mufla a  $550^\circ\text{C}$ , onde foi aquecida lentamente até que a temperatura se estabilizasse.

A umidade e os sólidos totais, fixos e voláteis foram determinados segundo as equações 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

$$\text{Umidade} = \frac{(P_2 - R_s)}{P_2} * 100 \quad (3)$$

$$\text{Sólidos totais} = \frac{(P_4 - P_1)}{P_2} * 100 \quad (4)$$

$$\text{Sólidos fixos} = \frac{(P_5 - P_1)}{P_2} * 100 \quad (5)$$

$$\text{Sólidos voláteis} = \frac{(P_4 - P_5)}{P_2} * 100 \quad (6)$$

Nas quais:

- $R_s$  é a massa de resíduo seco a 105°C
- $P_1$  é o peso da cápsula vazia
- $P_2$  é a massa da amostra úmida
- $P_4$  é a massa da cápsula+resíduo seco a 105°C
- $P_5$  é a massa de resíduo seco a 550°C

#### 3.3.4.4 Sólidos suspensos totais, fixos e voláteis

Esta determinação foi realizada apenas para o lodo têxtil, utilizando-se 50 ml de lodo em 4 tubos diferentes que foram centrifugados a 400 rpm por 15 minutos em centrífuga Rotofix 32 da marca Hettich (Figura 9). Em seguida, o sobrenadante das amostras é desprezado e o procedimento para a determinação de sólidos se dá da mesma forma que o descrito anteriormente no item 3.3.4.3



Figura 9 - Preparação das amostras para determinação de sólidos suspensos. Foto da autora.

#### 3.3.4.5 Pozolanicidade

A pozolanicidade dos resíduos foi realizada depois da obtenção de alguns parâmetros físico-químicos para efeitos de comparação com as tabelas referentes às exigências químicas e físicas para materiais pozolânicos da ABNT NBR 12653.

### **3.3.4.6 Obtenção dos extratos solubilizado e lixiviado**

O extrato solubilizado foi obtido de acordo com a ABNT NBR 10006.

Amostras dos resíduos foram colocadas em estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 42°C durante 6 horas. Depois do material ter esfriado, pesou-se 250g de resíduo num béquer de 1500 ml, adicionando 1000ml de água destilada deionizada e isenta de orgânicos. A mistura foi levemente agitada para sua homogeneização, coberta com filme de PVC e deixada em repouso por 7 dias em temperatura de aproximadamente 25°C. Passados os sete dias a solução foi filtrada em aparelho de filtração munido de membrana filtrante com 0,45 µm de porosidade. O filtrado obtido (extrato solubilizado) foi enviado para análise de metais em espectroscópio ICP-OES, da marca Perkin Elmer, 700 DV.

O extrato lixiviado foi obtido conforme a ABNT NBR 10005.

A solução de extração foi determinada em função de uma medida de pH das amostras e em seguida preparada para ser introduzida no frasco de lixiviação juntamente com as amostras, onde foram agitadas em agitador rotativo TE-743 da marca Tecnal (Figura 10) durante 19 horas à temperatura ambiente com uma rotação de 30 rpm. Depois disso, as amostras foram filtradas em aparelho de filtração a vácuo. O filtrado obtido (extrato lixiviado) foi enviado para análise de metais em espectroscópio ICP-OES, da marca Perkin Elmer, 700 DV.



Figura 10 - Agitador rotativo para lixiviação. Foto da autora.

### **3.3.5 Análises microestruturais**

A microscopia foi realizada em microscópio eletrônico de varredura SSX – 500 da marca Shimadzu. As amostras foram fixadas em um porta amostra com fita de carbono depois de passarem por um processo de metalização em metalizador de ouro IC-50, da Shimadzu, por 5 minutos, com uma variação de potencial de 1.8 kV

## **3.4 Caracterização das argamassas**

### **3.4.1 Índice de consistência (estado fresco)**

O índice de consistência foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 13276, utilizando-se mesa para índice de consistência conforme recomenda a norma ABNT NBR 7215, no anexo B.

De acordo com a norma ABNT NBR 13276, quando da falta da quantidade de água a ser adicionada a mistura da argamassa, recomenda-se adotar a água necessária para o índice de consistência de  $(260\pm 5)$  mm.

A argamassa foi preparada juntando-se os materiais anidros à água em misturador mecânico. Depois da homogeneização em baixa velocidade por 90 s, a mistura foi deixada em repouso por 15 min, quando então faz-se uso de uma espátula. Em seguida a argamassa é vertida em molde tronco-cônico em 3 camadas sucessivas seguidas de 15, 10 e 5 golpes com soquete, respectivamente. Após o rasamento, o molde é locado de modo centralizado na mesa para índice de consistência e sua manivela acionada de modo que a mesa sofra 30 quedas em 30 s. O índice de consistência é a média das medidas de três diâmetros do espalhamento da argamassa sobre a mesa.

### **3.4.2 Retenção de água (estado fresco)**

A determinação da retenção de água foi realizada de acordo com a ABNT NBR 13277.

Primeiramente, pesou-se o funil de Buchner preparado com papel filtro umedecido. Em seguida, as argamassas foram introduzidas no funil, adensadas com soquete e rasadas com régua metálica para eliminação do excesso. Uma segunda pesagem é efetuada então. Depois as amostras foram submetidas a uma sucção correspondente à coluna de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos e pesadas pela terceira vez.

A retenção de água ( $R_a$ ) foi calculada através da equação 7, sendo o fator água/argamassa fresca calculado pela equação 8.

$$R_a = \left(1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF(m_a - m_v)}\right) \times 100 \quad (7)$$

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (8)$$

Nas quais:

- $m_a$  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.

O ensaio foi realizado apenas uma vez para cada traço e por isso não há indicação de desvio padrão no gráfico final.

### 3.4.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado (estado fresco)

A determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado foi realizada conforme as prerrogativas da ABNT NBR 13278.

O procedimento consiste em introduzir argamassa fresca num recipiente de peso e volume conhecidos, adensá-la, rasá-la e pesá-la.

A densidade de massa, expressa em  $\text{kg/m}^3$  foi calculada de acordo com a equação 9.

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \times 1000 \quad (9)$$

Na qual:

- $m_c$  é a massa do recipiente contendo a argamassa, em gramas;
- $m_v$  é a massa do recipiente vazio, em gramas;
- $v_r$  é o volume do recipiente, em centímetros cúbicos

O cálculo do teor de ar incorporado ( $A$ ), expresso em porcentagem, foi feito de acordo com a equação (10).

$$A = 100 \times \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (10)$$

Na qual:

- $d$  é o valor da densidade de massa, em gramas por centímetro cúbico
- $d_t$  é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, em gramas por centímetro cúbico, sem vazios

#### 3.4.4 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados em moldes prismáticos metálicos de 4 cm x 4 cm x 16 cm de acordo com a ABNT NBR 13279. Os moldes foram untados com óleo mineral e em seguida preenchidos com argamassa, em duas camadas, cada uma delas seguida de 30 golpes na mesa de adensamento, e rasados com régua metálica a um ângulo de 45°. Também foram moldados corpos de prova prismáticos com 25 mm x 25 mm x 285 mm, conforme a ABNT NBR 15261 (Figura 11).

Na ausência de câmara úmida que permitisse controle de temperatura e umidade conforme prescrito na ABNT NBR 13279, a cura dos corpos de prova moldados se deu com a imersão dos mesmos em água, por se tratar de um procedimento comumente utilizado e recomendado na versão anterior da mesma norma.



Figura 11 - Corpos de prova prismáticos. Foto da autora.

### 3.4.5 Densidade de massa aparente

A densidade de massa foi determinada de acordo com a ABNT NBR 13280.

Foram utilizados três corpos de prova moldados e curados até a idade de 28 dias de massas conhecidas. Com ajuda de paquímetro foram determinadas as alturas, larguras e comprimentos para cálculo do volume dos corpos de prova.

A densidade de massa, em quilogramas por metro cúbico, foi calculada através da equação 11.

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{m}{v} 1000 \quad (11)$$

Na qual:

- $m$  = massa do corpo de prova
- $v$  = comprimento x altura x largura

### 3.4.6 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Para a determinação destas propriedades fez-se uso da ABNT NBR 15259.

Os corpos-de-prova, ensaiados aos 28 dias de idade, tiveram suas superfícies lixadas com lixa grossa e limpas com pincel. Em seguida, suas massas

iniciais determinadas e os corpos de prova posicionados sobre suporte metálico em tanque com nível de água 5,6 mm acima da face em contato com a água conforme a Figura 12.

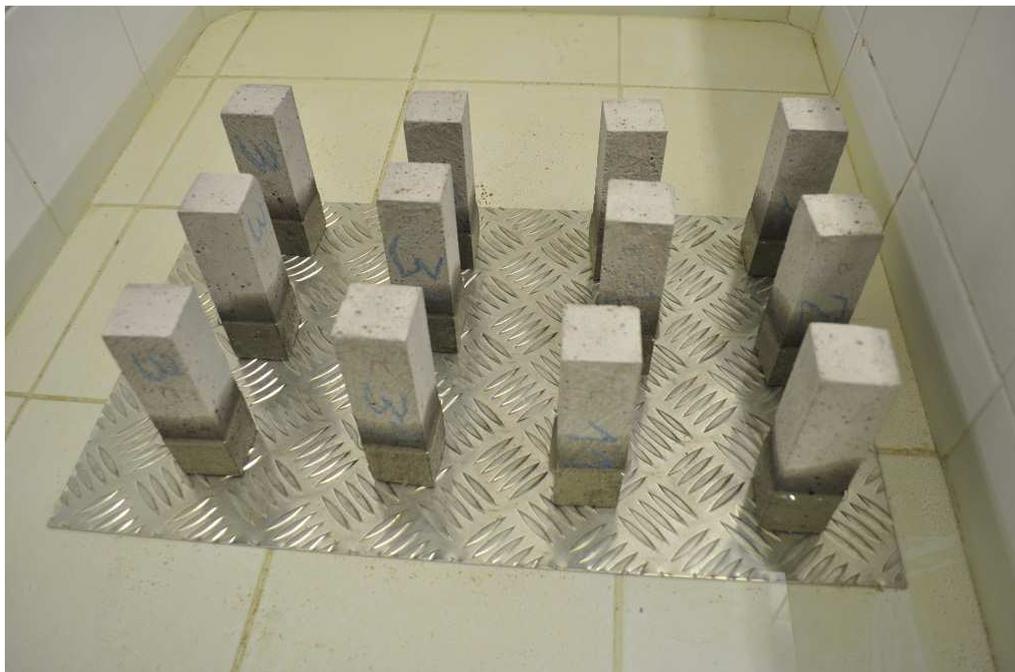


Figura 12 - Ensaio de absorção de água por capilaridade. Foto da autora.

A partir da colocação dos corpos de prova em contato com a água, suas massas foram novamente determinadas depois de 10 e 90 minutos.

A absorção de água ( $A_t$ ), expressa em gramas por centímetro quadrado, foi calculada para cada tempo através da equação 12.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (12)$$

Na qual:

- $m_t$  é a massa do corpo de prova em cada tempo em gramas
- $m_0$  é a massa inicial do corpo de prova em gramas
- $t$  corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos
- 16 é a área transversal do corpo de prova em centímetros quadrado

### 3.4.7 Variação dimensional e variação de massa

A determinação das variações dimensional e de massa foram realizadas de acordo com a ABNT NBR 15261.

A moldagem dos corpos de prova para este ensaio foi feita em moldes específicos de 25 mm x 25 mm x 285 mm, em duas camadas, aplicando golpes de soquete em cada um delas. Foram feitos três corpos de prova para cada traço.

Logo após a desforma, feita 48 horas depois da moldagem, os corpos de prova tiveram suas massas determinadas e uma leitura inicial de seus comprimentos com ajuda de aparelho comparador munido de relógio comparador, como ilustra a Figura 13.

Leituras de comprimentos e determinações de massa foram feitas também nas idades de 1, 7 e 28 dias a contar da leitura inicial.

A variação dimensional, expressa em milímetros por metro, foi calculada a segundo a equação 13.

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (13)$$

Na qual:

- $L_i$  é a leitura efetuada na idade final, em milímetros
- $L_0$  é a leitura após a desforma, em milímetros
- $i$  é a idade da leitura

A variação de massa ( $\Delta m$ ) foi calculada a partir da equação 14.

$$\Delta m_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad (14)$$

Na qual:

- $m_i$  é a massa na idade final, em gramas
- $m_0$  é a massa após a desforma do corpo de prova, em gramas.



Figura 13 - Aparelho comparador de comprimento. Foto da autora.

### 3.4.8 Resistência à tração e compressão

Três corpos de prova prismáticos foram rompidos à flexão e compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias, conforme a ABNT NBR 13279.

Os corpos-de-prova foram posicionados de maneira tal que a face rasada ficasse perpendicular ao sentido da carga aplicada.

A resistência à tração ( $R_f$ ), expressa em megapascal, foi calculada seguindo a equação 15.

$$R_f = \frac{1,5.F_f.L}{40^3} \quad (15)$$

Na qual:

- $F_f$  é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;
- $L$  é a distância entre os suportes, em milímetros.

A resistência à compressão axial ( $R_c$ ), expressa em megapascal, foi determinada utilizando-se as duas metades dos corpos-de-prova do ensaio de flexão de modo que a face rasada ficasse também perpendicular ao sentido da carga aplicada.

A resistência à compressão foi calculada de acordo com a equação 16.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (16)$$

Na qual:

- $F_c$  é a carga máxima aplicada, em newtons;
- 1600 é a área da seção quadrada do dispositivo de carga, em milímetros quadrado.

A primeira série de corpos de prova foi rompida em prensa hidráulica manual da marca Solotest de referência 1509230. A segunda e a terceira série de corpos de prova foram rompidos em prensa universal da marca Shimadzu, modelo Autograph AG-X 300KN.

### 3.4.9 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade das argamassas foi determinado conforme a ABNT.NBR 15630 e ilustrado na Figura 14

Os três corpos de prova utilizados neste ensaio, com 28 dias de idade, tiveram suas extremidades lixadas e limpas e untadas com gel para o contato com os transdutores do equipamento de ultrassom.

Três leituras foram efetuadas para cada corpo de prova, sendo a menor delas considerada para efeito de cálculo, efetuado de acordo com a equação 17.

$$E_d = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}{1-\mu} \quad (17)$$

Na qual:

- $E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico em megapascal;
- $v$  é a velocidade de propagação da onda ultra-sônica, em milímetros por microssegundos;
- $\rho$  é a densidade de massa aparente do corpo de prova em quilograma por metro cúbico
- $\mu$  é o coeficiente de Poisson. Adota-se nesta equação 0,2.



Figura 14 - Equipamento de ultra-som. Foto da autora.

### 3.4.10 Permeabilidade

A permeabilidade das argamssas foi determinada em permeabilímetro a gás nitrogênio da marca Core Lab, como ilustra a Figura 15, com o auxílio do programa Ultra Perm 500 que permite determinar a permeabilidade numa faixa de 0,001 mD a 30 000 mD, utilizando a equação 18 (equação de Darcy).

$$Q = \frac{K.A.(P_1 - P_2)}{\mu.L} \quad (18)$$

Na qual:

- $k$  = permeabilidade (Darcies)
- $\mu$  = viscosidade do fluído (centipoises)
- $Q$  = taxa de fluxo ( $\text{cm}^3/\text{seg}$ )
- $A$  = área da seção transversal da amostra ( $\text{cm}^2$ )
- $P_1$  = pressão montante (atm)
- $P_2$  = pressão jusante (atm)



Figura 15 - Permeabilímetro a gás nitrogênio. Foto da autora.

### 3.4.11 Porosidade

O ensaio de porosidade foi realizado em porosímetro Ultrapore 300, da marca Core Lab, que utiliza a injeção de gás hélio no compartimento onde fica confinado o corpo de prova (Figura 16).



Figura 16 - Porosímetro de gás hélio. Foto da autora.

### 3.4.12 Análise química

A análise química dos metais nos resíduos e nas argamassas foi realizada através de fluorescência de raios X, espectroscopia de emissão ótica e ensaios de solubilização e lixiviação.

A fluorescência de raios X (FRX) foi realizada com espectrômetro por dispersão de Raios X de marca SHIMADZU modelo EDX720 com Tensão no tubo de 15 keV (Na a Sc) e 50 keV (Ti a U), com abertura do colimador de 10 mm (tamanho da área em que o Raio X atinge a amostra), tempo real de integração de 200 s, sob atmosfera ambiente(ar) e detector de Si (Li), refrigerado com nitrogênio líquido. Foram utilizadas pequenas porções de resíduos previamente secos em estufa por 72 horas e armazenadas em cápsulas plásticas.

Também foram realizados ensaios de solubilização conforme a ABNT NBR 10006 e de lixiviação conforme a ABNT NBR 10005. Os extratos solubilizados e lixiviados foram encaminhados para análise de metais em espectroscópio ICP-OES, da marca Perkin Elmer, 700 DV.

### 3.4.13 Análise microestrutural

A análise microestrutural foi composta por difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura.

As análises de difração foram realizadas em um equipamento Shimadzu modelo XRD-7000 utilizando-se uma fonte de radiação de  $\text{CuK}\alpha$  com voltagem de 30kV, corrente de 30 mA. Os dados foram coletados na faixa de  $2\theta$  de 10 a 80 graus. As fases cristalinas foram identificadas com a utilização do programa Phillips X'pert High Score Plus. Esta técnica foi utilizada para avaliar as fases cristalinas que compõem as argamassas de cimento, bem como a possível influência da adição de cinza de lenha e lodo têxtil nas argamassas.

A microscopia eletrônica foi realizada conforme descrito no item 3.3.5.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização do cimento e da areia

Para o cimento foram realizadas três determinações para a massa específica e a média encontrada, coincide com o valor fornecido pelo fabricante Nassau que foi de  $3,0 \text{ g/cm}^3$ .

A distribuição granulométrica da areia está apresentada na Tabela 5 e sua curva, ilustrada na Figura 17. A dimensão máxima característica desta areia foi 2,4 mm e seu módulo de finura igual a 2,22.

Tabela 5 - Distribuição granulométrica da areia

Diâmetro da peneira(mm)	Retido (g)	Porcentagem (%)		
		Retida	Acumulada	Passante
4,8	0,00	0,00	0,00	100,00
2,4	11,00	3,67	3,67	96,33
1,2	36,60	12,20	15,87	84,13
0,6	65,80	21,93	37,80	62,20
0,3	102,70	34,23	72,03	27,97
0,15	61,90	20,63	92,67	7,33
Fundo	22,00	7,33	100,00	0,00
Total	300,00	100,00		

Fonte: tabela da autora, 2013

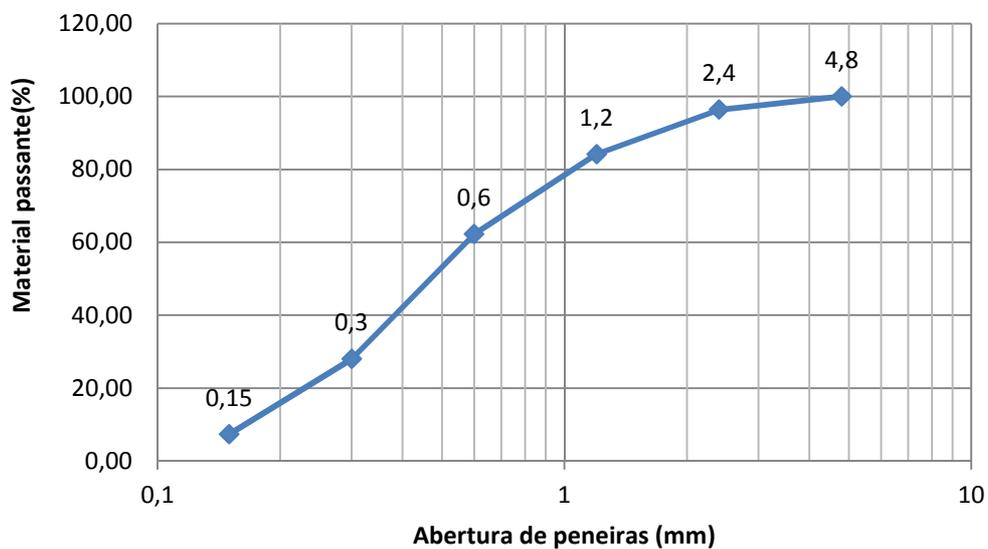


Figura 17 - Curva granulométrica da areia

A massa específica encontrada para a areia foi  $2,6 \text{ g/cm}^3$ .

A determinação das impurezas orgânicas da areia foi realizada através da avaliação do índice de cor, que se deu com a comparação entre as cores da solução padrão e as soluções filtradas que ficaram em contato com a areia. Estas, sendo mais claras que a solução padrão (como pode ser visto na Figura 18) indica que a quantidade de impurezas orgânicas da areia não inviabiliza seu uso em argamassas.

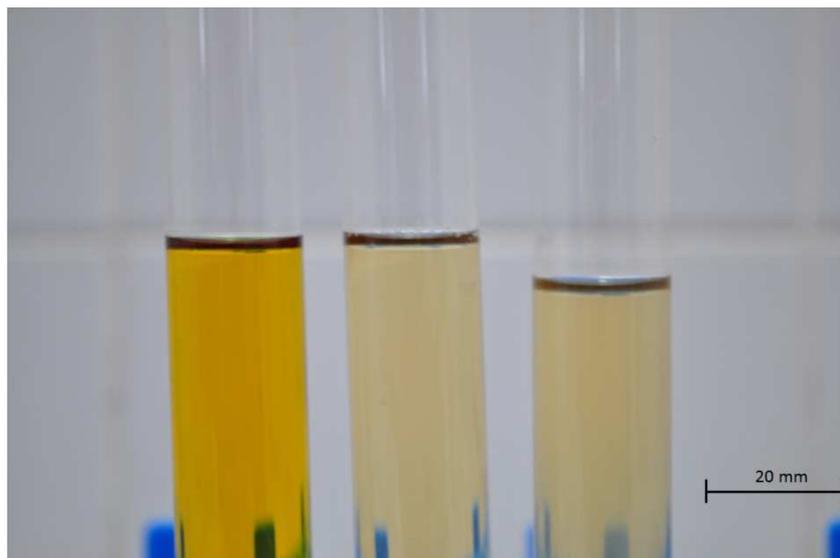


Figura 18 – Comparação de cor entre solução padrão e filtrado de duas amostras de agregado miúdo.

Foto da autora.

## 4.2 Caracterização dos resíduos

### 4.2.1 Lodo têxtil

#### 4.2.1.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica do lodo têxtil coletado em leito de secagem, realizada com a série normal de peneiras, pode ser visualizada através da Tabela 6, assim como da Figura 19. A dimensão máxima característica para este lodo é 2,4 mm e seu módulo de finura é 0,93.

Na Figura 20, apresenta-se a granulometria realizada por difração de raios laser, para o material passante na peneira com malha de 0,15 mm, com diâmetro médio de 13,69  $\mu\text{m}$ .

Vale aqui lembrar que a faixa granulométrica selecionada para ser inserida nas argamassas envolve todo o material passante na peneira de 0,6 mm, o que corresponde a 86,46% da massa inicial de lodo. Como este material foi usado para substituir a areia, de granulometria mais grossa, espera-se que haja um melhor empacotamento por unidade de volume nas argamassas com a incorporação do resíduo, que será fenomenologicamente constatado mais adiante com base nos resultados dos ensaios de argamassas endurecidas.

Tabela 6 - Distribuição granulométrica do lodo têxtil

Diâmetro da peneira (mm)	Retido (g)	Porcentagem (%)		
		Retida	Acumulada	Passante
4,8	0,90	0,30	0,30	99,70
2,4	5,20	1,73	2,03	97,97
1,2	11,70	3,90	5,93	94,07
0,6	22,90	7,63	13,57	86,43
0,3	41,80	13,93	27,50	72,50
0,15	47,80	15,93	43,43	56,57
Fundo	169,70	56,57	100,00	0,00
Total	300,00	100,00		

Fonte: tabela da autora, 2013

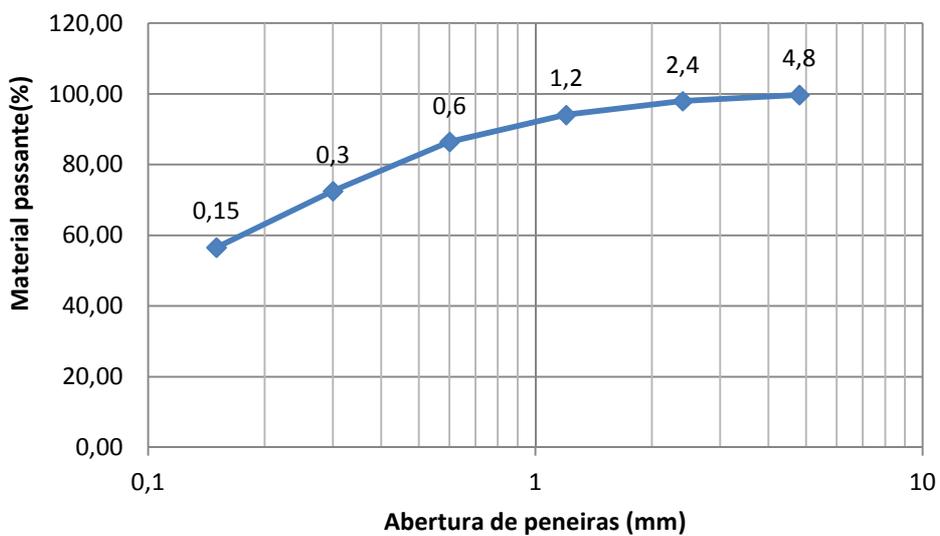


Figura 19 - Curva granulométrica do lodo têxtil para partículas entre 0,15 e 4,8 mm.

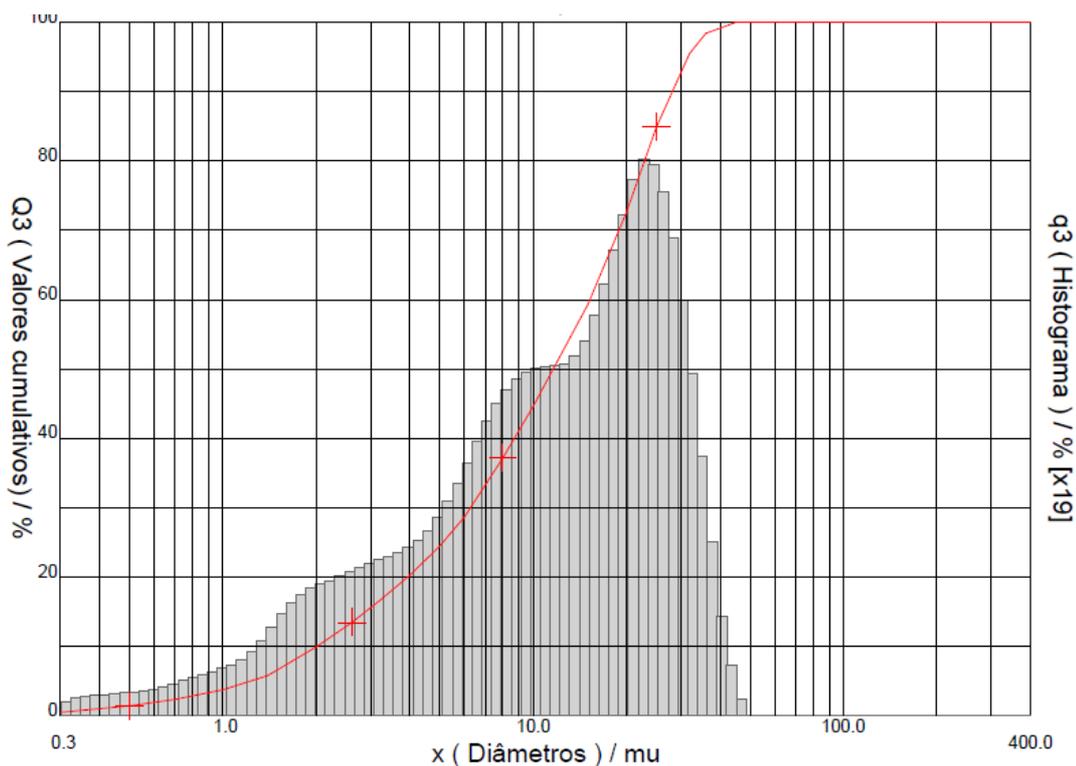


Figura 20 - Curva granulométrica do lodo têxtil para partículas entre 0,3  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.1.2 *Análise físico-química e atividade pozolânica*

A composição química do lodo é variável, visto que, é resultado da soma da composição química do efluente têxtil mais a composição química do tratamento utilizado neste. Contudo, estudo anterior com lodo proveniente de lavanderia da região, não apresentou concentrações significantes de agentes tóxicos (SANTOS, 2006).

Na Tabela 7 se encontram os parâmetros físico-químicos do lodo têxtil em estudo tal qual coletado no leito de secagem.

A área superficial do lodo de 25  $\text{m}^2/\text{g}$  contrasta com a área superficial do cimento utilizado que é de 0,418  $\text{m}^2/\text{g}$ . Espera-se uma grande demanda de água nas argamassas que tiverem areia substituída por lodo têxtil em sua composição.

A massa específica do lodo corresponde a 68% da massa específica da areia (1,78  $\text{g}/\text{cm}^3$  do lodo contra 2,6  $\text{g}/\text{cm}^3$  da areia). Desta forma, é esperado que haja uma diminuição da densidade das argamassas que tiverem a areia substituída por lodo.

Tabela 7 - Parâmetros físico-químicos do lodo têxtil

Parâmetro	Resultado
Área superficial (m <sup>2</sup> /g)	25,00
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,78
pH	7,41
Condutividade (mS)	6,66
Cloretos (%)	1,78
Sulfatos (mg/L)	1,30
Umidade a 105°C (%)	5,54
Sólidos totais (%)	94,46
Sólidos fixos (%)	54,76
Sólidos voláteis (%)	39,69
Sólidos suspensos totais (g/L)	76,55
Sólidos suspensos fixos (g/L)	43,13
Sólidos suspensos voláteis (g/L)	33,42

Fonte: tabela da autora, 2013

Os quase 40% de sólidos voláteis resultaria numa quantidade relativamente alta de cinzas caso o lodo fosse incinerado e por isso esta não seria uma forma de disposição recomendada, como também observaram Pietrobon *et al* (2004).

Também foi realizada análise de metais através de espectroscopia de plasma ICP, por se tratar de um método bastante preciso. O lodo enviado para análise foi o de granulometria utilizada nas argamassas (passante na peneira 0,6 mm). Os metais analisados foram: Ba, Ti, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Ag, Co, Mn, Cr, V, Zn, Sb, Mo e Pb.

Na Tabela 8 encontram-se os percentuais de metais do lodo têxtil em relação aos sólidos fixos. Todos os metais encontrados representam 1,14% dos sólidos fixos.

Para a análise feita por fluorescência de raios-X, exibida na Tabela 9, foi utilizado o lodo com as mesmas características descritas no parágrafo anterior.

Tabela 8 – Percentuais de metais presentes no lodo têxtil em relação aos sólidos fixos

Metal	Percentual (%)	Metal	Percentual (%)
Ba	0,02288	Co	0,00024
Ti	0,01908	Mn	0,32965
Fe	0,65300	Cr	0,01133
Ni	0,00633	V	0,03170
Cu	0,04073	Zr	0,00042
Zn	0,02016	Sb	0,00041
Cd	0,00004	Mo	0,00058
Ag	0,00104	Pb	0,00008

Fonte: tabela da autora, 2013

A predominância de silício no lodo se deve ao uso de argila expandida (cinasita) durante o processo de beneficiamento do jeans e o alumínio é basicamente proveniente do agente floculante ( $Al_2(SO_3)$ ) utilizado no tratamento químico do efluente da lavanderia.

Tabela 9 - Resultados de FRX do resíduo de lodo têxtil

Óxidos	Percentual (%)
SiO <sub>2</sub>	36,82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,13
SO <sub>3</sub>	11,07
CaO	8,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7,23
K <sub>2</sub> O	3,49
MnO	1,55
Outros elementos	0,63

Fonte: tabela da autora, 2013

Na análise de metais com ICP dos extratos solubilizados e lixiviados, os seguintes metais foram analisados: Ba, Cu, Ni, Cd, Cr, Pb, V, Zn, Sb, Ag, Co, e Mo. As concentrações correspondentes estão apresentadas na Tabela 10.

As concentrações encontradas no ensaio de lixiviação do lodo estão abaixo do limite máximo estabelecido pela norma de classificação dos resíduos sólidos

ABNT NBR 10004, anexo F. Por isso, apesar de o lodo possuir mais de uma substância constante no anexo C desta mesma norma, não é caracterizado como tóxico.

No entanto, a concentração de cádmio encontrada pela análise de ICP no extrato solubilizado está acima da estabelecida no anexo G da norma já referida (0,007 contra 0,005 mg/L), o que classifica o resíduo como não-inerte classe II A.

Tabela 10 – Concentrações de metais nos extratos solubilizado e lixiviado do lodo têxtil

Metais	Concentração (mg/L)	
	solubilizado	Lixiviado
Ba	0,301	1,077
Cu	0,001	0,017
Ni	0,055	0,118
Cd	0,007	0,003
Cr	0,026	0,05
Pb	0	0
V	0,100	0,339
Zn	0,123	4,402
Sb	0,075	0
Ag	0,009	0,777
Co	0,006	0,012
Mo	0	0,003

Fonte: tabela da autora, 2013

Quanto à atividade pozolânica, o lodo têxtil não atende às condições específicas (exigências químicas) da norma de materiais pozolânicos ABNT NBR 12653. Os teores de SO<sub>3</sub>, umidade e perda ao fogo, encontrados para o lodo têxtil (11,07%, 5,54% e 39,69%) são superiores aos valores máximos estabelecidos pela norma referida (5%, 3% e 6%). Assim sendo não pode ser considerado um material pozolânico.

#### **4.2.1.3 Análises microestruturais**

No gráfico de difração de raios-X (DRX), ilustrado na Figura 21 pode-se verificar que o lodo têxtil contém material amorfo devido ao formato de halo da curva. No entanto também se pode constatar a presença de materiais cristalinos

como o quartzo, com  $2\theta$  de maior intensidade (pico de 100%) em  $26,75^\circ$ , sulfato de alumínio em  $25,44^\circ$  e óxido de ferro em  $32,80^\circ$ .

Os três elementos mais abundantes detectados no FRX (Si, Al e S) estão identificados no DRX devidamente combinados. A fase quartzo é possivelmente proveniente do desgaste das argilas expandidas utilizadas no beneficiamento do jeans.

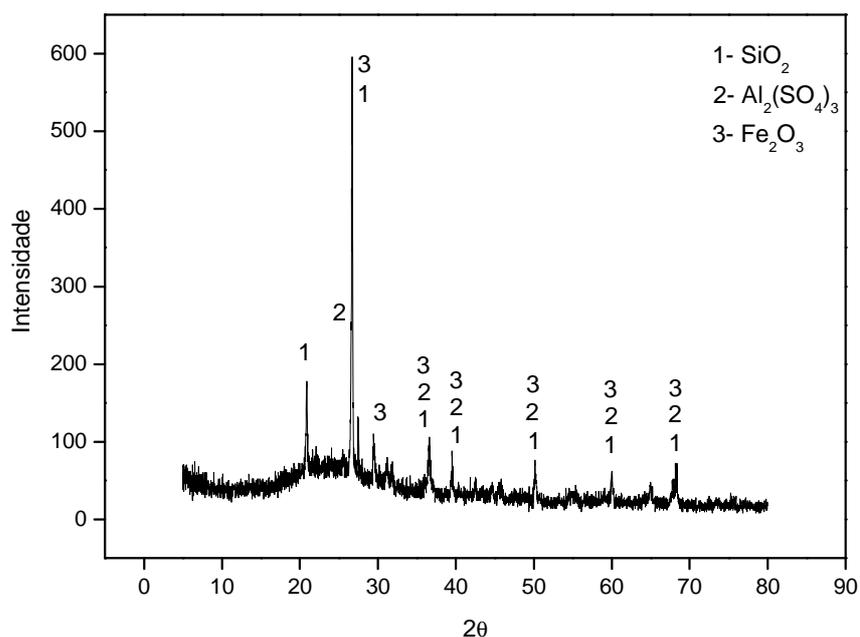


Figura 21 - Difração de raios-X (DRX) do lodo têxtil

Na curva de análise térmica (TG) da Figura 22, a perda de massa total do material na faixa de temperatura ambiente a  $590^\circ\text{C}$  foi de 33,14%. A primeira perda (4,74%), da temperatura ambiente até  $170^\circ\text{C}$ , se deve a perda de água. A segunda perda (12,82%) de  $170$  a  $355^\circ\text{C}$  corresponde à degradação de elementos de maiores massas moleculares ali contidos (matéria orgânica). E a terceira perda (15,58%), de  $355$  a  $590^\circ\text{C}$ , ao carbono contido na amostra oxidando para  $\text{CO}_2$ . Comportamento térmico semelhante foi encontrado por Yan, Sagoe-Crentsil e Shapiro (2011), que também usaram lodo em argamassas.

A curva DTG auxilia a visualização de início e fim dos eventos ocorridos.

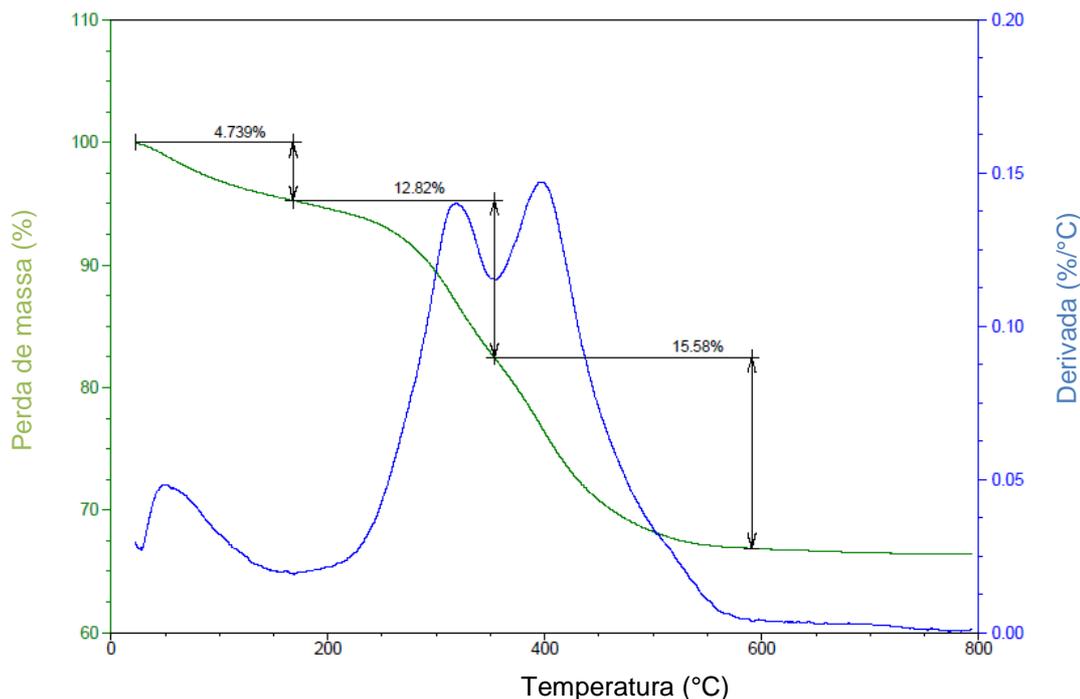


Figura 22 - Curva TG/DTG do lodo têxtil

De acordo com a análise térmica pode-se concluir que a utilização do lodo em materiais cerâmicos ou outros materiais que sejam submetidos a altas temperaturas, sofreria uma volatilização deste resíduo, o que poderia incorrer em aumento de porosidade e consequente perda de resistência do material. Aqui está uma das vantagens da utilização do lodo têxtil em argamassa de cimento, que é um material fabricado em baixas temperaturas (ambiente): aproximadamente 33% da massa de lodo, que seria transferida para a atmosfera através da sua queima, ficará então retida na matriz cimentícia.

Na imagem feita em microscópio eletrônico de varredura (MEV), com aumento de 1200 vezes, exibida na Figura 23, vê-se que o lodo tem estrutura fibrosa e lamelar, com partículas da ordem de 10  $\mu\text{m}$  e partículas ainda menores aglomeradas com partículas maiores.

Em todos os pontos onde se fez uso de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para identificação da composição química, encontrou-se predominantemente Si, Al e Fe na amostra de lodo, o que está de acordo com a análise de fluorescência de raios-X.

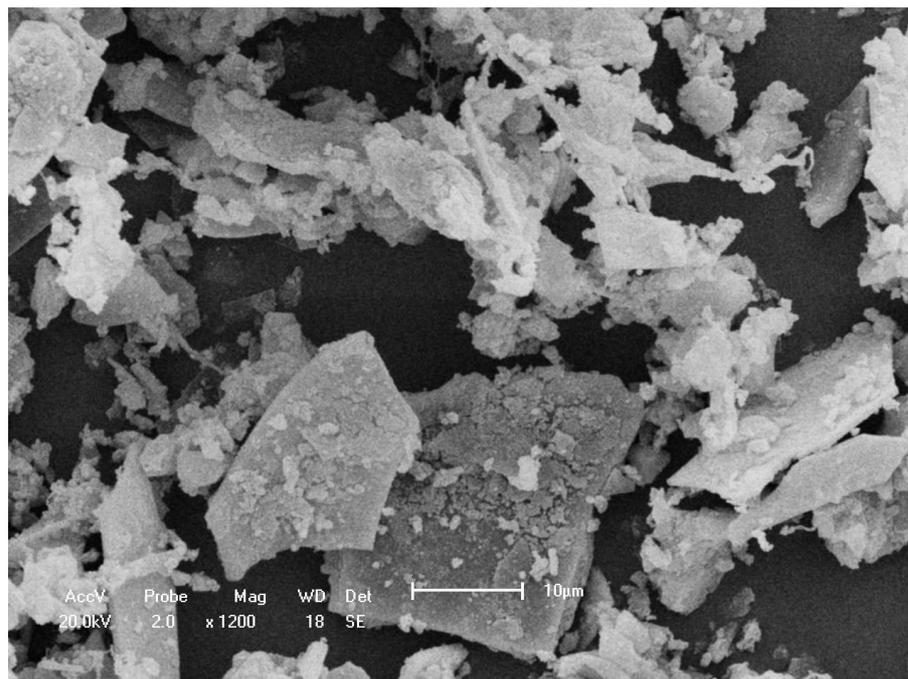


Figura 23 - Lodo têxtil no microscópio eletrônico de varredura, com aumento de 1200 vezes.

## 4.2.2 Cinza de algaroba

### 4.2.2.1 Granulometria

A distribuição granulométrica da cinza de lenha pode ser visualizada através da Tabela 11, assim como da Figura 24, realizada com a utilização da série normal de peneiras. A dimensão máxima característica para esta cinza é 2,4 mm e seu módulo de finura é 1,30.

A Figura 25 representa a granulometria realizada por difração de raios laser, para o material passante na peneira na 0,15 mm, com diâmetro médio de 24,51  $\mu$ m.

A faixa granulométrica selecionada para ser inserida nas argamassas envolve todo o material passante na peneira de 0,6 mm, o que corresponde a 77,43% das cinzas de lenha.

Assim como o lodo, a cinza tem mais finos que a areia que substituem, o que provavelmente implicará num arranjo diferente das partículas nas argamassas com cinza. Comparativamente ao lodo têxtil, as cinzas de algaroba são mais grossas, com 45,67% passante na peneira 0,15 mm contra 56,57% de material passante na mesma peneira para o lodo têxtil.

Tabela 11 - Distribuição granulométrica da cinza de algaroba

Diâmetro da peneira (mm)	Retido (g)	Porcentagem (%)		
		Retida	Acumulada	Passante
4,8	4,30	1,43	1,43	98,57
2,4	10,40	3,47	4,90	95,10
1,2	17,70	5,90	10,80	89,20
0,6	35,30	11,77	22,57	77,43
0,3	40,90	13,63	36,20	63,80
0,15	54,40	18,13	54,33	45,67
Fundo	137,00	45,67	100,00	0,00
Total	300,00	100,00		

Fonte: tabela da autora, 2013.

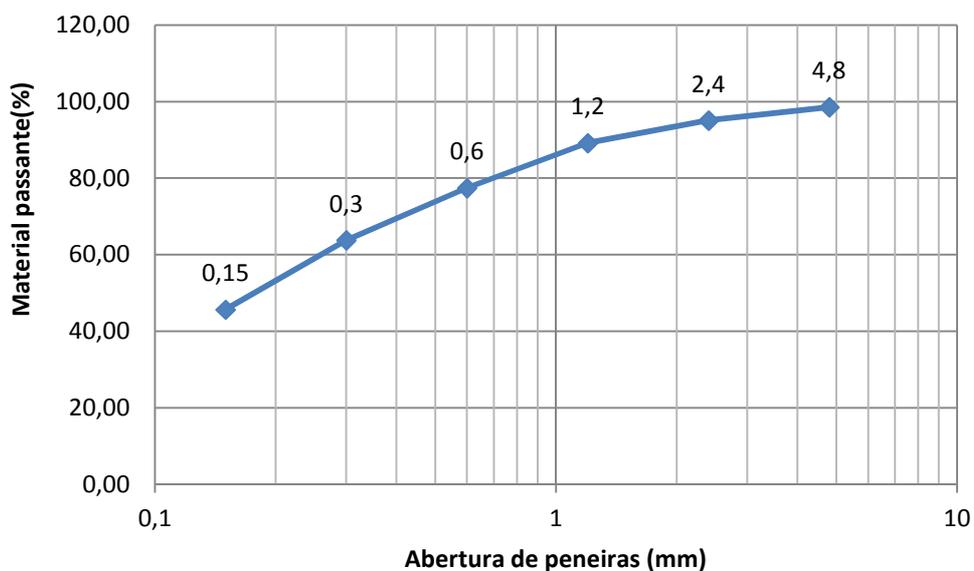


Figura 24 - Curva granulométrica da cinza de algaroba.

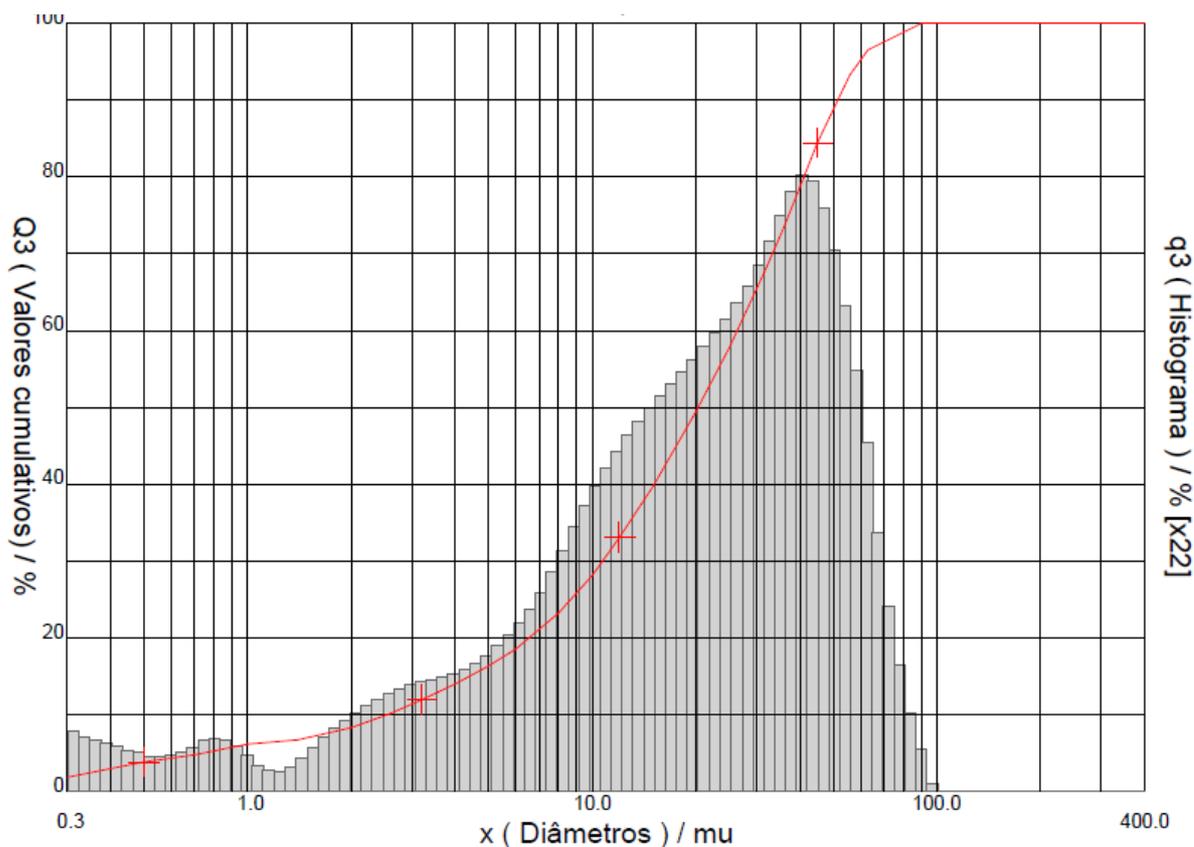


Figura 25 - Curva granulométrica da cinza para partículas entre 0,3 μm e 150 μm.

#### 4.2.2.2 Análise físico-química e atividade pozolânica

A Tabela 12 contém os parâmetros físico-químicos da cinza tal qual coletada na lavanderia.

Os sólidos fixos de 98,79% se devem ao fato de que a cinza já ser proveniente de uma queima. E o pH alcalino será favorável às reações de hidratação do cimento Portland na argamassa.

A área superficial da cinza de 4 m<sup>2</sup>/g é mais de 9 vezes maior que a do cimento utilizado, que é de 0,418 m<sup>2</sup>/g. Ainda que a área superficial da cinza esteja bem a baixo da do lodo (25 m<sup>2</sup>/g), espera-se maior demanda de água nas argamassas que tiverem areia substituída por cinza em sua composição.

A massa específica da cinza corresponde tem valor aproximado ao da areia (2,89 g/cm<sup>3</sup> da cinza contra 2,6 g/cm<sup>3</sup> da areia), sendo os dois materiais mais densos que o lodo (1,78 g/cm<sup>3</sup>). Com base apenas nesse dado não seria esperado uma diferença significativa de densidade nas argamassas com areia substituída por cinza de algaroba.

Tabela 12 - Parâmetros físico-químicos da cinza de algaroba

Parâmetro	Resultado
Área superficial (m <sup>2</sup> /g)	4,00
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,89
pH	13,50
Condutividade (mS)	77,00
Cloretos (%)	0,97
Sulfatos (mg/L)	0,05
Umidade a 105°C (%)	0,10
Sólidos totais (%)	99,90
Sólidos fixos (%)	98,79
Sólidos voláteis (%)	1,11

Fonte: tabela da autora, 2013

Também foi realizada análise de metais através de espectroscopia de plasma ICP, por se tratar de um método preciso. A amostra de cinza enviada para análise foi a de granulometria utilizada nas argamassas (passante na peneira 0,6 mm). Os metais analisados foram: Ba, Ti, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Ag, Co, Mn, Cr, V, Zn, Sb, Mo e Pb. Dentre eles apenas Ag não foi detectado.

Na Tabela 13 encontram-se os percentuais de metais da cinza de algaroba em relação aos sólidos fixos. Todos os metais encontrados representam 0,64% dos sólidos fixos.

Tabela 13 - Percentuais de metais presentes na cinza de algaroba em relação aos sólidos fixos

Metal	Percentual (%)	Metal	Percentual (%)
Ba	0,03837	Co	0,00018
Ti	0,05178	Mn	0,02504
Fe	0,49798	Cr	0,00079
Ni	0,00089	V	0,00049
Cu	0,00811	Zr	0,00052
Zn	0,01511	Sb	0,00010
Cd	0,00004	Mo	0,00050
Ag	0,00000	Pb	0,00029

Fonte: tabela da autora, 2013

Para a análise feita por fluorescência de raios-X, exibida na Tabela 14, foi utilizada também cinza passante na peneira 0,6 mm.

Tabela 14 - Resultados de FRX do resíduo de cinza de algaroba

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

Fonte: tabela da autora, 2013

Os resultados estão de acordo com Borlini *et al.* (2005) que citam que a composição química da cinza de lenha é caracterizada basicamente por alta quantidade de CaO e SiO<sub>2</sub> e com quantidades significativas de K<sub>2</sub>O e MgO. A quantidade elevada de CaO está relacionada a carbonato e hidróxido de cálcio, enquanto o SiO<sub>2</sub> está associado com a fase cristalina do quartzo (BORLINI *et al.*, 2005).

Na análise de metais com ICP dos extratos solubilizados e lixiviados, os seguintes metais foram analisados: Ba, Cu, Ni, Cd, Cr, Pb, V, Zn, Sb, Ag, Co, e Mo. As concentrações correspondentes estão apresentadas na Tabela 15.

As concentrações encontradas no ensaio de lixiviação da cinza estão abaixo do limite máximo estabelecido pela norma de classificação dos resíduos sólidos ABNT NBR 10004, anexo F. Assim este resíduo não é caracterizado como tóxico.

No entanto, a concentração de cádmio encontrada pela análise de ICP no extrato solubilizado da cinza está acima da estabelecida no anexo G da norma já referida (0,007 contra 0,005 mg/L), o que classifica o resíduo como não-inerte classe II A.

Tabela 15 - Concentrações de metais nos extratos solubilizado e lixiviado da cinza de algaroba

Metais	Concentração (mg/L)	
	solubilizado	Lixiviado
Ba	0,643	1,364
Cu	0,009	0
Ni	0,025	0
Cd	0,007	0
Cr	0,108	0,047
Pb	0	0
V	0	0,027
Zn	0,147	0,031
Sb	0,053	0
Ag	0,205	0
Co	0,007	0,004
Mo	0,955	0,289

Fonte: tabela da autora, 2013

Quanto à atividade pozolânica, a cinza de algaroba utilizada neste trabalho não atende condições específicas da norma ABNT NBR 12653. A soma dos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  num material pozolânico deve ser no mínimo de 50%, mas nas cinzas não totalizam nem 10%. Assim sendo não pode ser considerado um material pozolânico.

Utilizando cinza de algaroba da mesma lavanderia deste trabalho, porém com granulometria distinta, Melo (2012) realizou o ensaio de materiais pozolânicos de acordo com a ABNT NBR 15895 para se certificar a respeito da existência ou não da atividade pozolânica. Seus resultados não indicaram atividade pozolânica neste resíduo.

#### 4.2.2.3 Análises microestruturais

No gráfico de difração de raios-X (DRX), ilustrado na Figura 26 verifica-se a presença de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), com  $2\theta$  de maior intensidade (pico de 100%) em  $29,46^\circ$ , hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) em  $34,10^\circ$ , óxido de cálcio em  $37,36^\circ$  e óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) em  $29,36^\circ$ .

Para ajudar a definir as fases no gráfico proveniente da análise de difração de raios-X fez-se uso da análise térmica do resíduo.

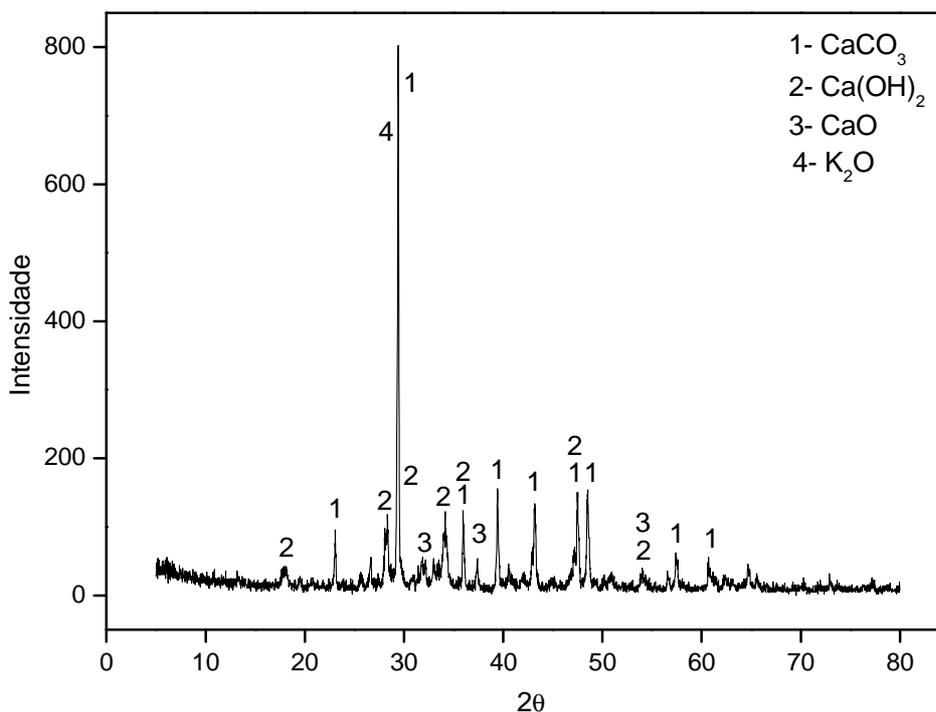


Figura 26 - Difração de raios-X (DRX) da cinza de algaroba

De acordo com a análise termogravimétrica houve três perdas de massa. A primeira perda (entre 30 e 325°C) corresponde a vaporização da água adsorvida, a segunda (entre 325 e 475°C) à decomposição do Ca(OH)<sub>2</sub> em CaO e a terceira (entre 475 e 780°C) à decomposição do CaCO<sub>3</sub> em CaO. Estas faixas de temperatura são similares às apresentadas por Mirghiasi *et al.* (2013).

Se a cinza de algaroba fosse utilizada em materiais que são submetidos a altas temperaturas, como blocos cerâmicos, por exemplo, cerca de 21% da massa desse resíduo seria transformado em CO<sub>2</sub> e transferido para a atmosfera. Além de implicar em poluição, esse fato colaboraria para o aumento de porosidade no material onde a cinza estivesse inserida, proporcionando uma provável diminuição na resistência mecânica deste. Um das vantagens de inserir a cinza em argamassa de cimento, fabricada em temperatura ambiente, consiste na não decomposição da fase calcita provocada por altas temperaturas, evitando a transferência de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

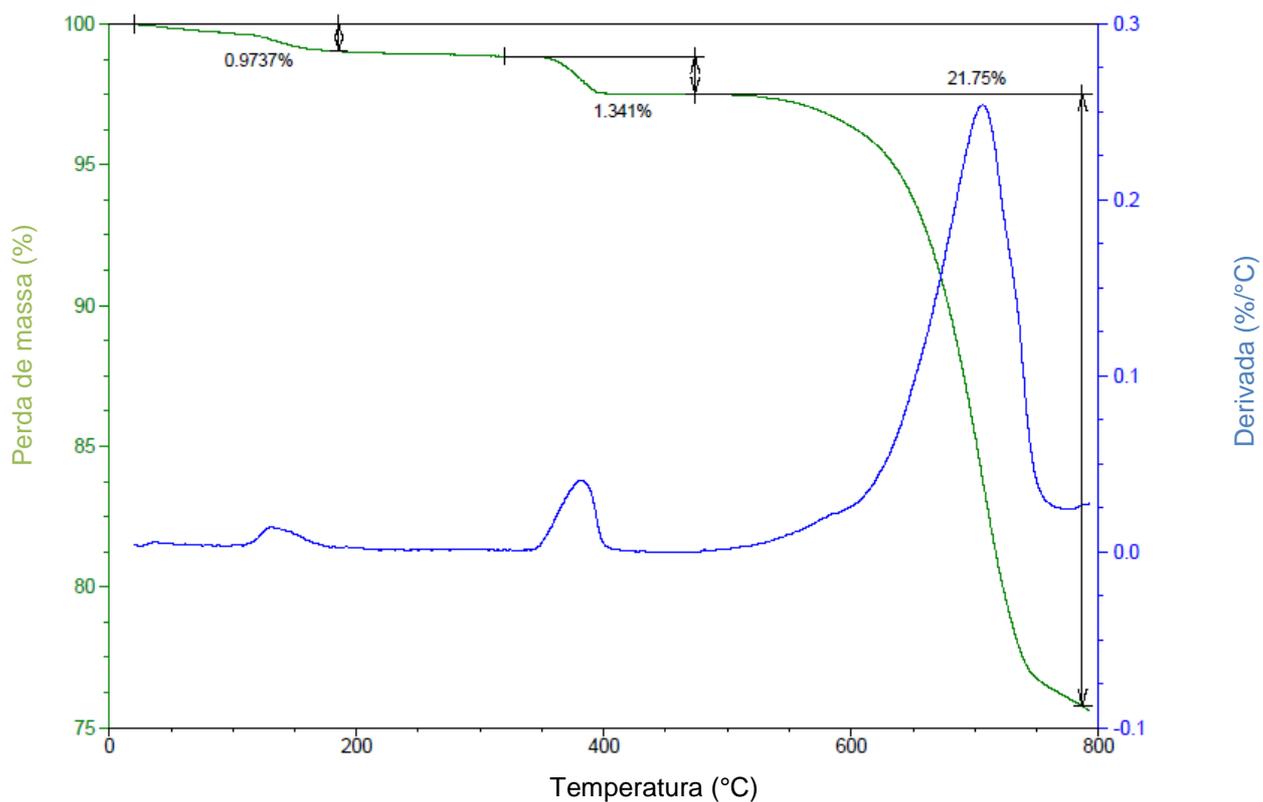
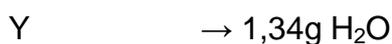
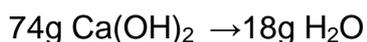
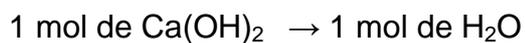


Figura 27 - Curvas de TG e DTG da cinza de algaroba

A perda total de massa foi de 24,06%, de 30 a 780°C, que difere dos sólidos voláteis da Tabela 12 por se tratar de faixas de temperaturas distintas. No cálculo dos sólidos voláteis desta tabela a temperatura foi até 550°C.

A quantidade de óxido de cálcio que desidratou pode ser calculada através da equação 19.



$$Y=5,5 \text{ g de CaO ou } 5,5 \% \text{ de CaO}$$

Para conhecer a quantidade de  $\text{CaCO}_3$  na amostra recorreremos à equação 20.



1 mol de  $\text{CaCO}_3 \rightarrow 1$  mol de  $\text{CO}_2$

100g de  $\text{CaCO}_3 \rightarrow 44$ g de  $\text{CO}_2$

X  $\rightarrow 21,75$  g

X= 49, 43g de  $\text{CaCO}_3$  ou 49,43 % de  $\text{CaCO}_3$

Na imagem feita em microscópio eletrônico de varredura (MEV), com aumento de 1200 vezes, exibida na Figura 28, nota-se que a cinza tem estrutura arredondada com alguns grãos da ordem de 10  $\mu\text{m}$  e outros menores aglomerados.

Nos pontos onde se fez uso de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para identificação da composição química, encontrou-se predominantemente Ca, K e Si, acordando com a análise de fluorescência de raios-X.

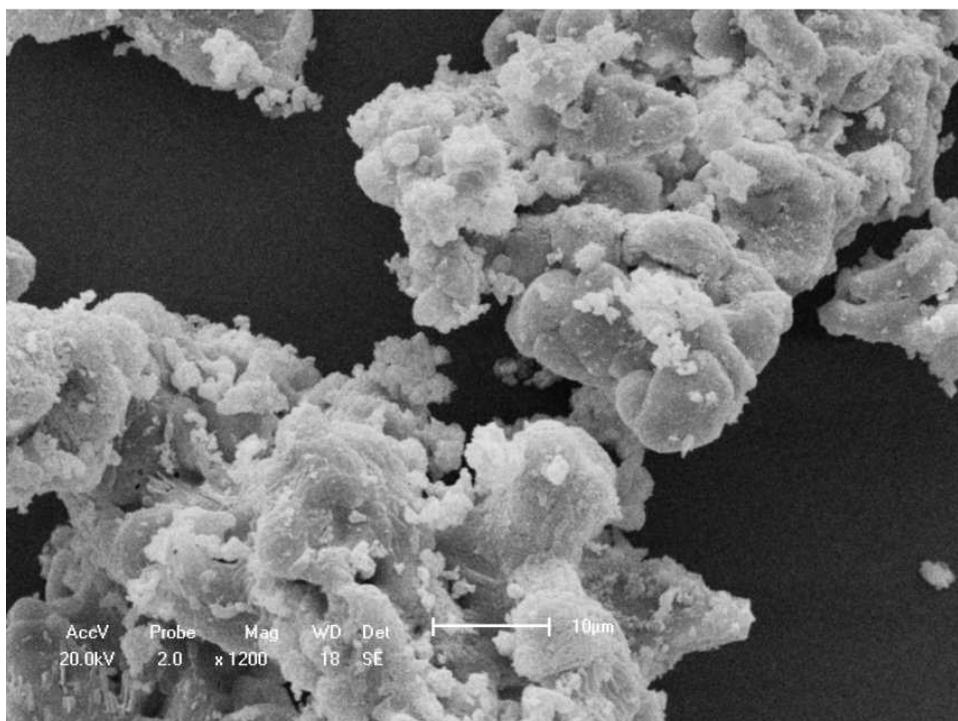


Figura 28 - Cinza de lenha no microscópio eletrônico de varredura, com aumento de 1200 vezes

### 4.3 Caracterização das argamassas

#### 4.3.1 Consistência (estado fresco)

O ensaio de consistência foi utilizado para encontrar a quantidade de água a ser inserida nas argamassas. Para o traço de referência, a quantidade de água

necessária para o índice de consistência de 259 mm foi 435 ml, o que resulta num fator água/cimento de 0,87. A mesma quantidade de água foi adotada para os outros traços com a finalidade de manter constante o fator água/cimento.

A Figura 29 contém os valores médios de consistência relativos a cada dosagem utilizada.

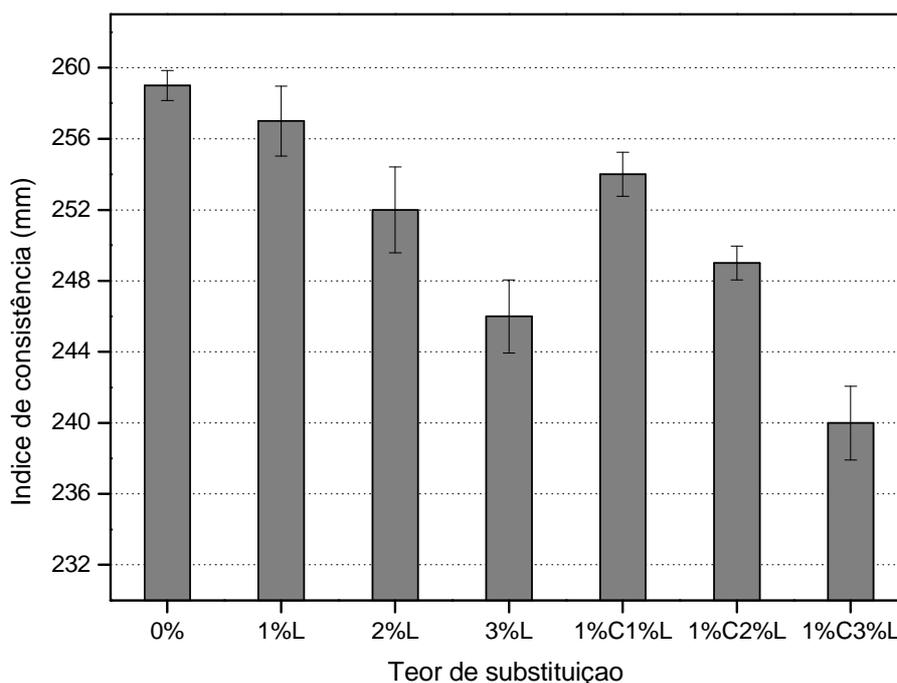


Figura 29 - Índice de consistência das argamassas com e sem adição de resíduos

A adição de lodo têxtil provoca uma diminuição no índice de consistência, o que de fato provoca um aumento da trabalhabilidade, devido ao aumento de superfície específica no sistema com a inserção deste resíduo. Com 3% de substituição da areia por lodo têxtil, a redução do índice de consistência em relação à argamassa de referência é de 5%. As argamassas com 1% de cinza também contribuem para o aumento da trabalhabilidade (ou diminuição do índice de consistência), também devido à superfície específica, que é menor que a do lodo, porém maior que a da areia. A substituição de areia por 3% de lodo junto com 1% de cinza provocou uma redução do índice de consistência de 7,3%.

A trabalhabilidade pode comprometer o emprego das argamassas e por isso recomenda-se fazer um teste antes de empregá-las. Um aditivo plastificante pode

ser empregado nas argamassas com menores índices de consistência para melhorar esta propriedade. Outros fatores água/cimento também podem ser testados nesses casos.

#### 4.3.2 Retenção de água (estado fresco)

Os resultados obtidos no ensaio de determinação da retenção de água estão expostos na Figura 30, onde se verifica um aumento da retenção com o aumento da adição de resíduos. Esta propriedade está relacionada com a capacidade da manutenção da trabalhabilidade da argamassa fresca quando exposta a situações que provocam perda de água (CARASEK, 2010). As adições revelam-se positivas no contexto das argamassas experimentais. Carasek (2010) expõe ainda sobre a importância da retenção de água para algumas propriedades da argamassa endurecida já que isso favorece as reações químicas de endurecimento do aglomerante.

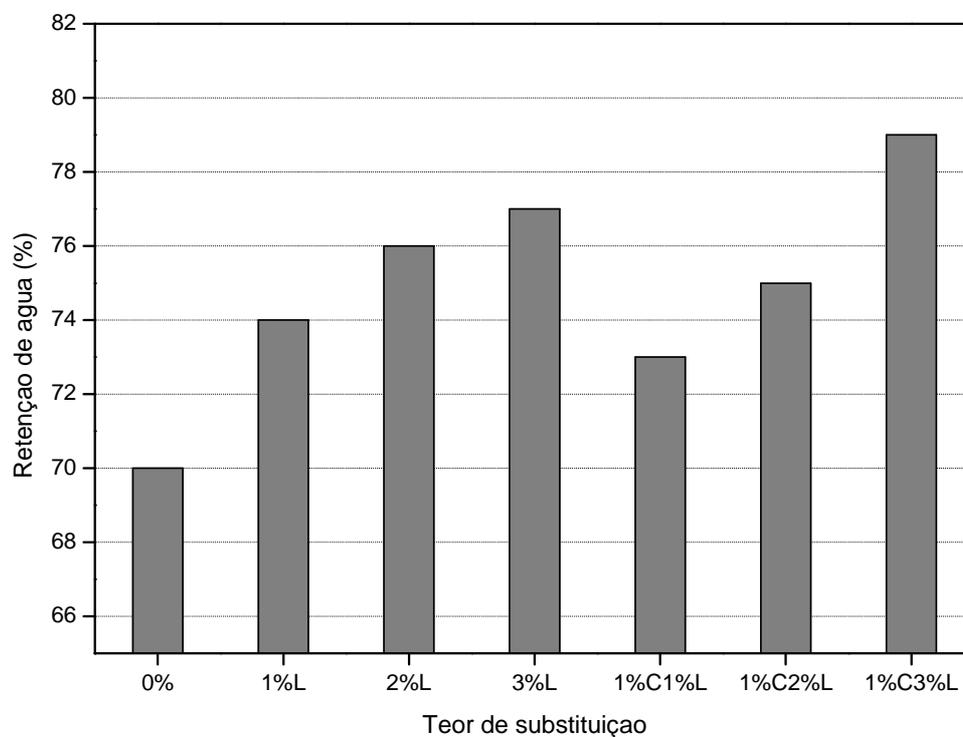


Figura 30 – Retenção de água das argamassas com e sem adição de resíduos

Comparando o traço 2%L (retenção de 76%) com 1%C1%L (retenção de 73%) e 3%L (retenção de 77%) com 1%C2%L (retenção de 73%), verificou-se que a retenção de água das argamassas adicionadas apenas com lodo têxtil é superior às adicionadas também de cinza de algaroba. Isso está coerente com o fato do lodo ter maior finura e conseqüente maior superfície específica.

Com a substituição de areia por 3% de lodo têxtil juntamente com 1% de cinza de algaroba a retenção de água, que é de 70% na argamassa padrão, aumentou para 79%. Isto se traduz numa mudança da classe U1 para U2, conforme estabelecido na ABNT NBR 13281, o que não inviabiliza sua utilização como argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos.

#### 4.3.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado (estado fresco)

A densidade de massa ou massa específica das argamassas varia com o teor de ar e com a massa específica dos materiais que as constituem. Quanto mais leve for a argamassa, maior será sua trabalhabilidade em longo prazo (CARASEK, 2010).

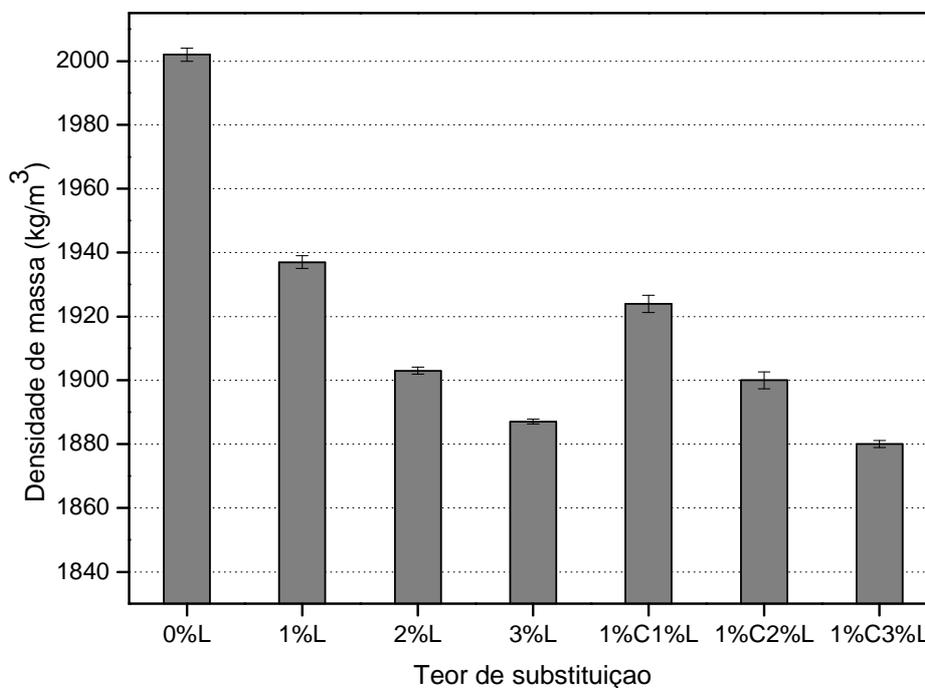


Figura 31 - Densidade de massa

Verifica-se que com o aumento gradual do percentual de resíduos houve decréscimo dos valores de densidade. O resultado está coerente com a expectativa, já que o lodo, presente em todos os traços com resíduo, é menos denso que a areia por ele substituída. Com a substituição de areia por 4% de resíduos (1%C3%L), há uma redução de cerca de 6%. Mesmo com esta diminuição, não há mudança de classe (D5) conforme requisitos da ABNT NBR 13281.

Esta tendência na diminuição da densidade com a inserção dos resíduos está diretamente associada também a uma tendência de aumento na incorporação de ar a medida que aumentam a quantidade de finos nas argamassas, como pode ser visto na Figura 32.

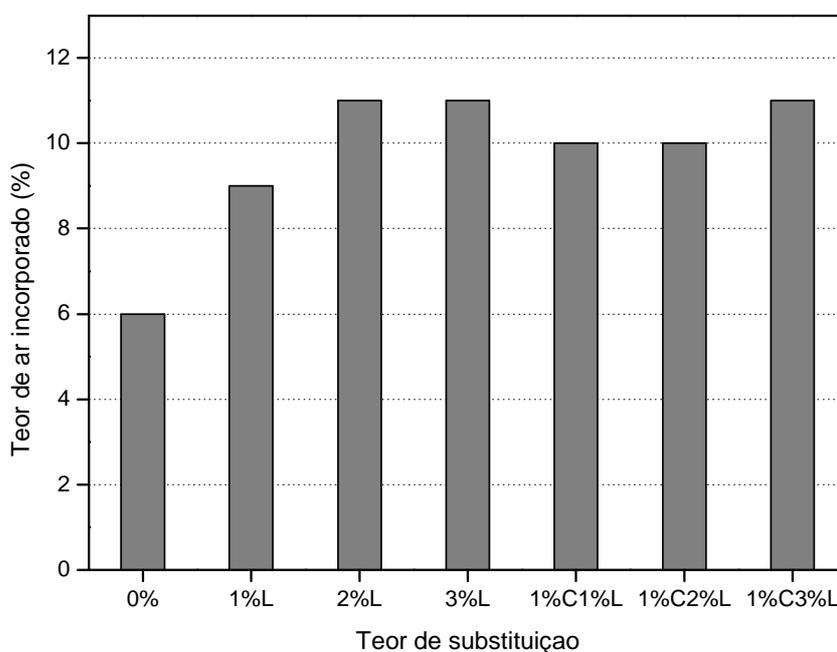


Figura 32 - Teor de ar incorporado

#### 4.3.4 Densidade de massa aparente

A densidade de massa das argamassas endurecidas são um pouco menor do que no estado fresco devido à saída de parte da água (CARASEK, 2010).

Os valores das densidades das argamassas estudadas estão apresentados na Figura 33.

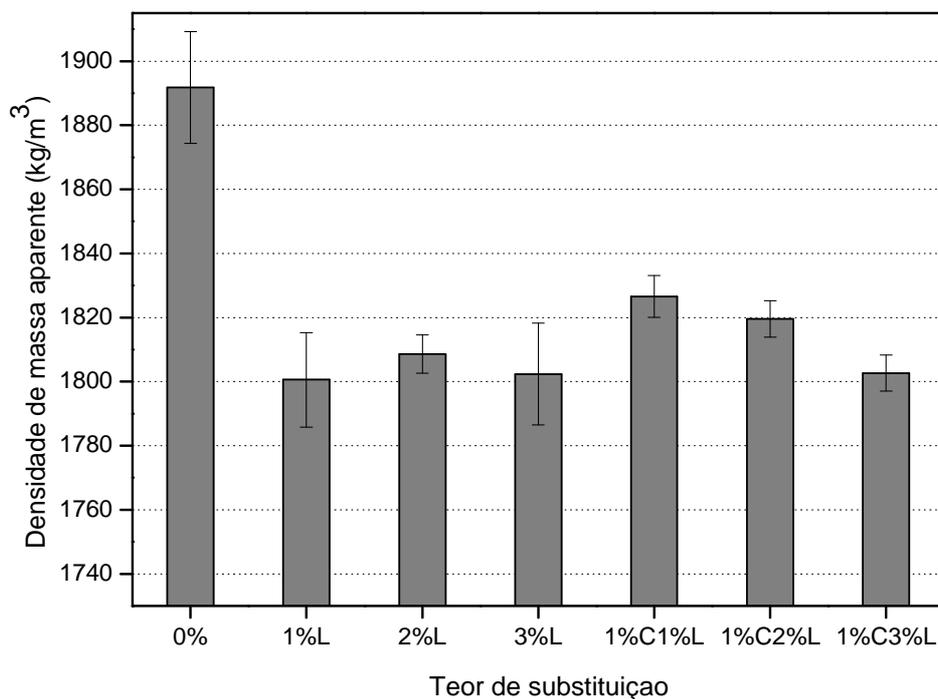


Figura 33 - Densidade de massa aparente

Com a substituição de 4% da areia pelos resíduos há uma redução de cerca de 5% no valor da densidade aparente em relação à amostra padrão, o que provoca a mudança de classe de M6 para M5, nos termos da ABNT NBR 13281, o que não inviabiliza a utilização da argamassa para fins de assentamento e revestimento.

#### 4.3.5 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Os resultados de absorção de água por capilaridade estão apresentados na Figura 34.

Nota-se que com o aumento do teor de resíduos nas argamassas há uma diminuição da absorção de água. Como esta propriedade está relacionada com a permeabilidade do material, se deduz que houve uma diminuição desta segunda propriedade, o que será constatado mais adiante nos resultados do ensaio de permeabilidade.

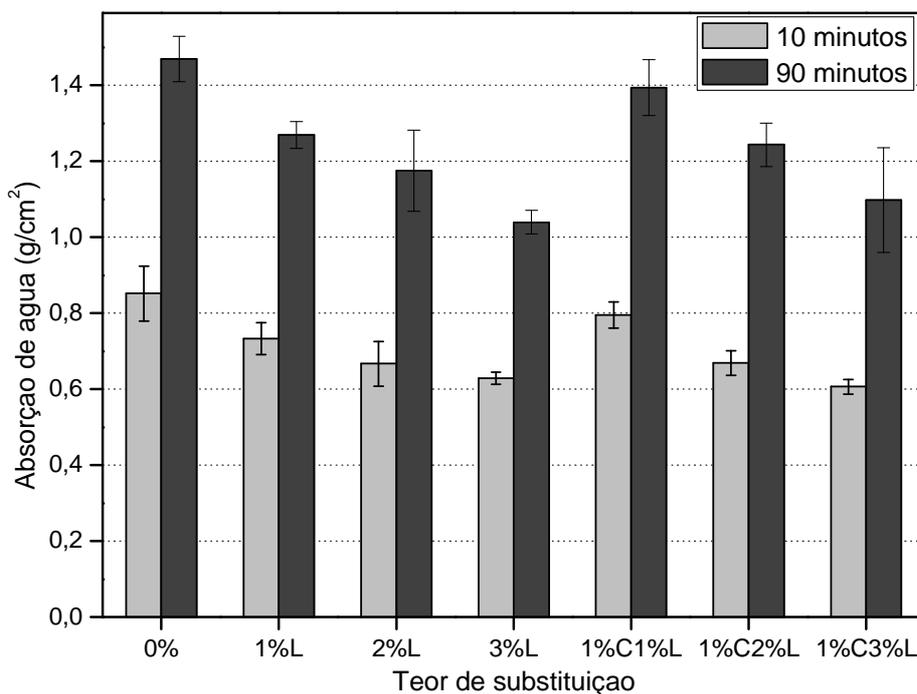


Figura 34 - Absorção de água por capilaridade

Observa-se também que as argamassas com teor de cinza e lodo tiveram absorção de água por capilaridade maior que as argamassas apenas com lodo. Aos 90 minutos, a absorção de água com 2%L e 3%L foi de 8,1 e 6,6 g/cm<sup>2</sup>, respectivamente, valores menores que 9,6 e 9,2 g/cm<sup>2</sup> relativos a 1%C1%L e 1%C2%L. Isso se deve ao fato de que o lodo tem mais finos que a cinza e por isso teve um melhor preenchimento dos poros das argamassas.

Com a substituição de 4% de areia (1%C3%L), houve uma redução na absorção de água, em relação à argamassa padrão de cerca de 20% aos 90 minutos, e de 28% aos 10 minutos.

A Figura 35 apresenta os valores do coeficiente de capilaridade para as argamassas em estudo.

Com a substituição da areia por 3% de lodo têxtil juntamente com 1% de cinza de algaroba, verifica-se uma diminuição de aproximadamente 20% do coeficiente de capilaridade, em relação à argamassa padrão. Todavia, de acordo com a ABNT NBR 13281, as argamassas continuam classificadas na mesma classe (C5).

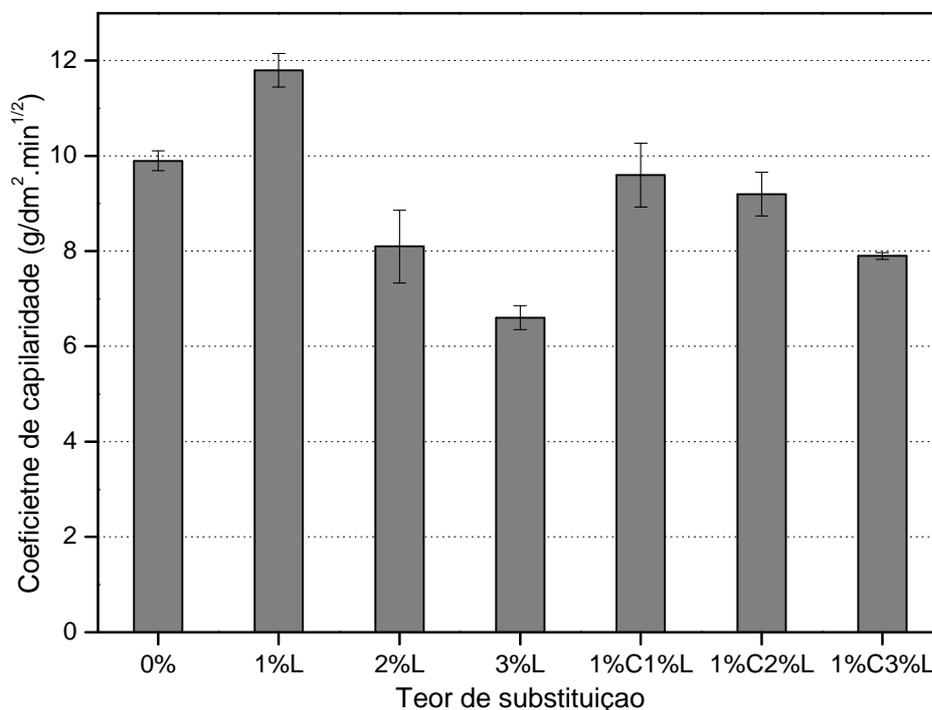


Figura 35 - Coeficiente de capilaridade

#### 4.3.6 Variação dimensional e variação de massa

Os corpos de prova submetidos a este ensaio sofreram retração, uma diminuição dos seus comprimentos ao longo dos 28 dias de cura.

Através da análise da Figura 36, pode-se perceber que os valores da variação dimensional tendem a ser maiores nas argamassas com adição que na argamassa padrão. Isso acontece porque a quantidade de finos nestas argamassas é maior que a na argamassa de referência. Carasek (2010) afirma que quanto maior a quantidade de finos numa argamassa maior será a sua retração devido ao aumento de superfície específica do sistema e conseqüente maior quantidade de água de amassamento, o que é comprovado pelos valores do ensaio de retenção de água.

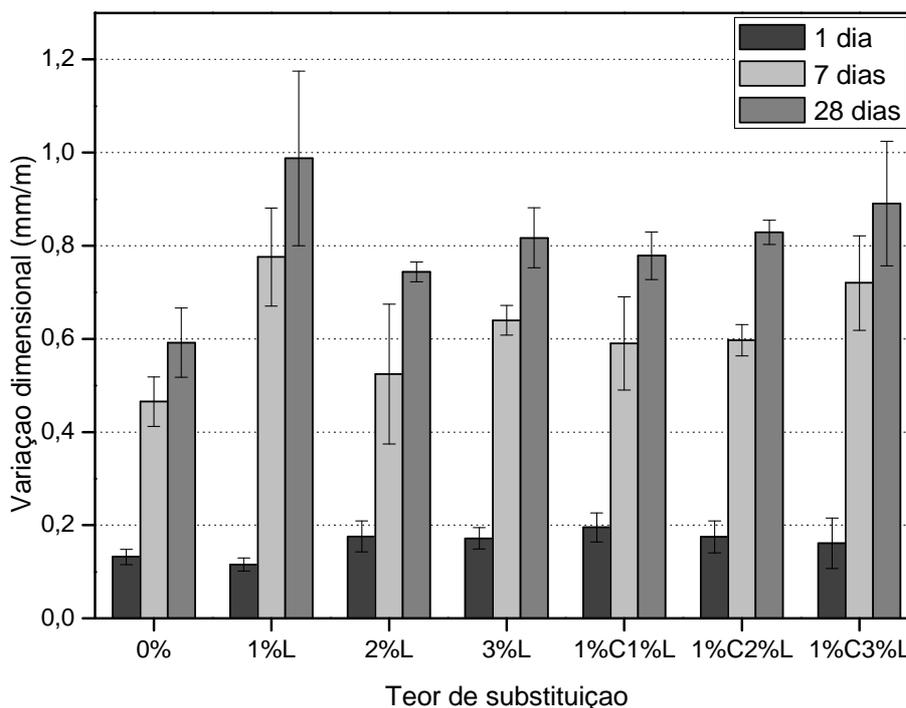


Figura 36 - Variação dimensional

Com a substituição de 4% da areia, o aumento da variação dimensional em relação à argamassa padrão é de aproximadamente 16, 55 e 51%, aos 1<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup> e 28<sup>o</sup> dias, respectivamente.

Os valores da variação de massa das argamassas estão representados na Figura 37. Esta variação se dá principalmente pela perda de água com o avanço da idade. A tendência de aumento observada com a adição de resíduo no sistema pode ser explicada pela maior retenção de água que os mesmos proporcionam, como evidenciado no item 3.4.2.

Com a substituição de 4% da areia, o aumento da variação de massa em relação à argamassa padrão é de, aproximadamente, 4, 7 e 6% aos 1<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup> e 28<sup>o</sup> dias, respectivamente.

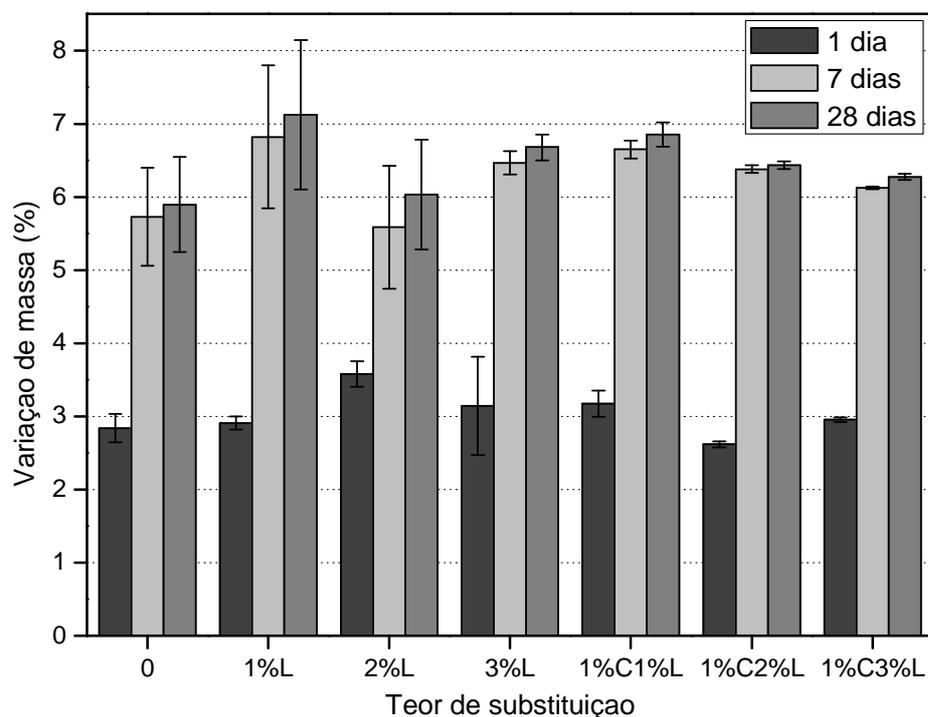


Figura 37 - Variação de massa

#### 4.3.7 Resistência à tração na flexão e à compressão

Os valores de resistência à tração estão ilustrados na Figura 38 e os valores de resistência à compressão estão ilustrados na Figura 39.

Os valores de tração e compressão nas diferentes idades e entre as diferentes argamassas com resíduos não variam de forma significativa.

Aos 28 dias, a resistência à tração na flexão para a argamassa com 1% de substituição da areia por lodo têxtil é de 2,629 MPa. Quando alteramos o teor de substituição para 3%, a resistência aumenta cerca de 3,6%, e se compararmos com o teor de 4% (1%C3%L) temos um aumento de 5,7%.

Para a resistência à compressão, aos 28 dias a argamassa com 1% de substituição da areia por lodo têxtil apresentou resistência de 7,021 MPa. Com o triplo de substituição há um aumento de 6,9% da resistência, valor bem próximo ao verificado com o teor de substituição de 4% que foi de 7,1%.

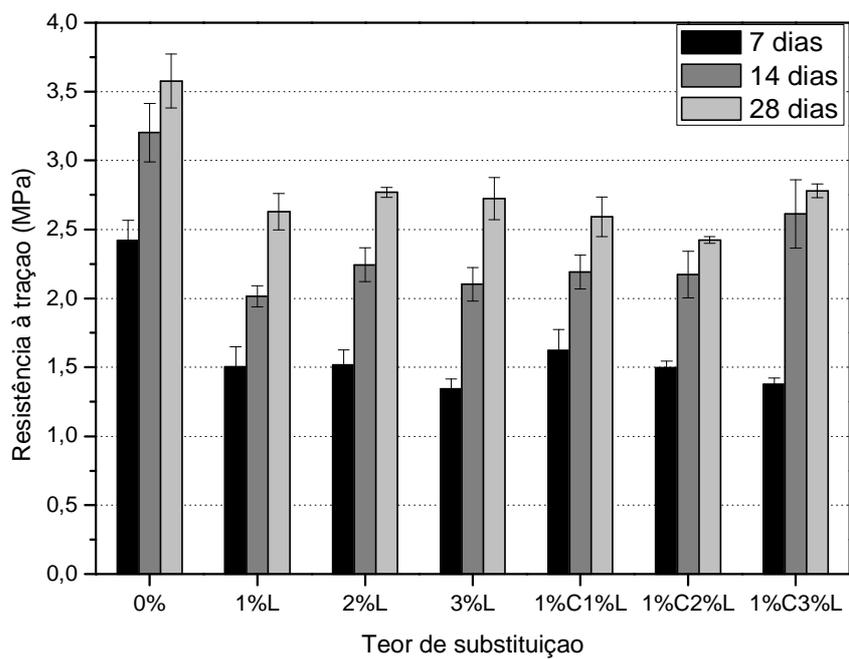


Figura 38 - Resistência à tração

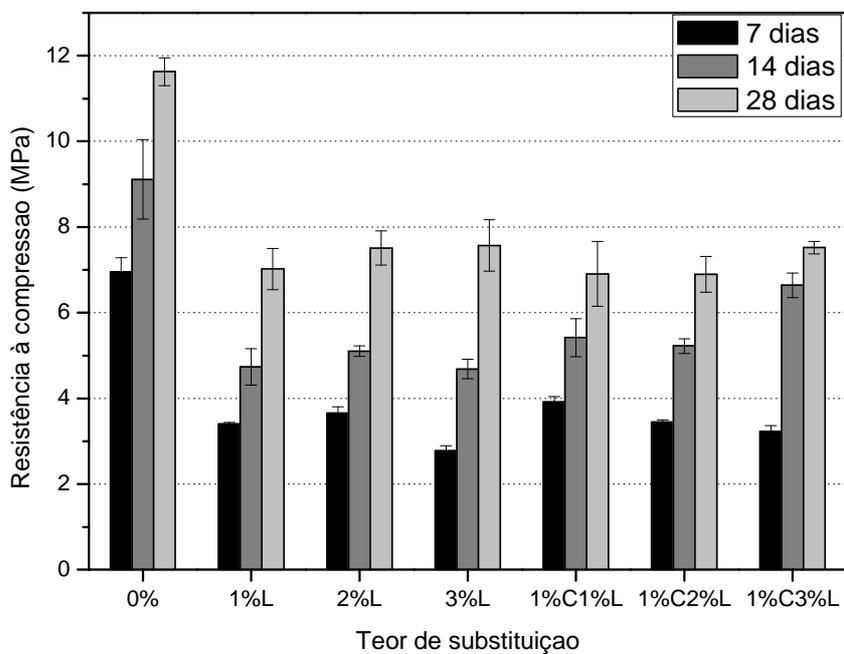


Figura 39 - Resistência à compressão com cura controlada

Com a substituição de 4% de areia, aos 28 dias, há, em relação à argamassa padrão, uma diminuição das resistências à tração e à compressão de 22 e 35%, respectivamente. Esta diminuição se traduz em uma alteração de classe, conforme os requisitos da ABNT NBR 13281, tanto no que se refere à resistência à compressão, de P6 para P5, quanto à tração na flexão, de R5 para R4.

Todos os valores encontrados satisfazem os requisitos para argamassas para assentamento e revestimento referenciados na norma ABNT NBR 13281.

#### 4.3.8 Módulo de elasticidade dinâmico

Os valores do módulo de elasticidade para as argamassas ensaiadas estão apresentadas na Figura 40.

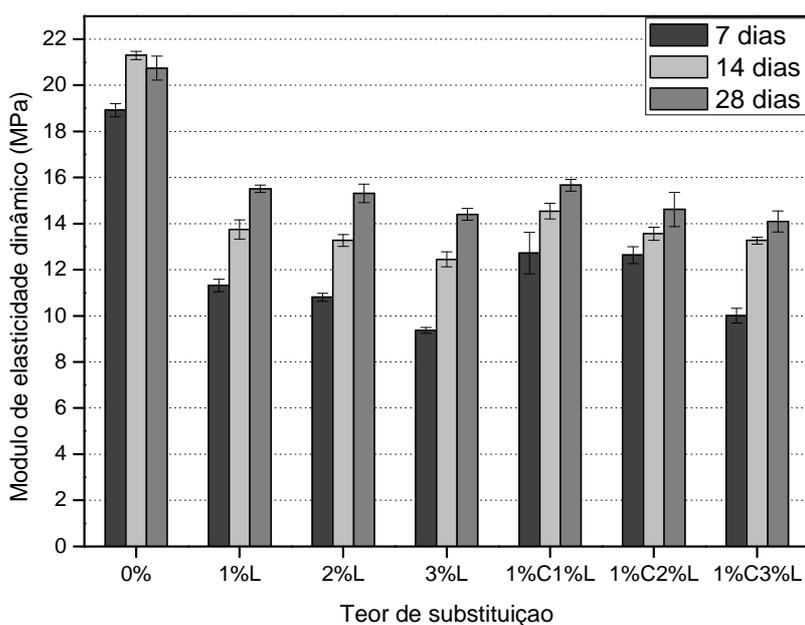


Figura 40 - Módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.

Com a introdução dos resíduos nas argamassas houve uma diminuição do módulo de elasticidade dinâmico nas mesmas. Isso significa que para uma mesma variação de tensão, há uma maior variação de deformação nas argamassas com resíduos.

Aos 28 dias vemos que não há uma grande variação entre os valores encontrados das argamassas com resíduos. O módulo de elasticidade dinâmico, aos 28 dias, para argamassa com 1% de substituição da areia por lodo têxtil foi de 15,51 MPa. Com o triplo de substituição há uma diminuição em torno de 7%, valor próximo ao verificado com o teor de substituição de 4% que foi de 9,1%.

Todavia, a introdução de apenas 1% de lodo têxtil no sistema acarreta uma diminuição de 25% em relação ao padrão.

A substituição de 4% da areia pelos resíduos acarretou uma diminuição do módulo de elasticidade dinâmico de aproximadamente 32%

#### 4.3.9 Permeabilidade

A Figura 41 apresenta os resultados do ensaio de permeabilidade obtidos para as argamassas analisadas neste trabalho. Verifica-se que a argamassa de referência apresentou maior permeabilidade ao gás nitrogênio quando comparada com as outras argamassas.

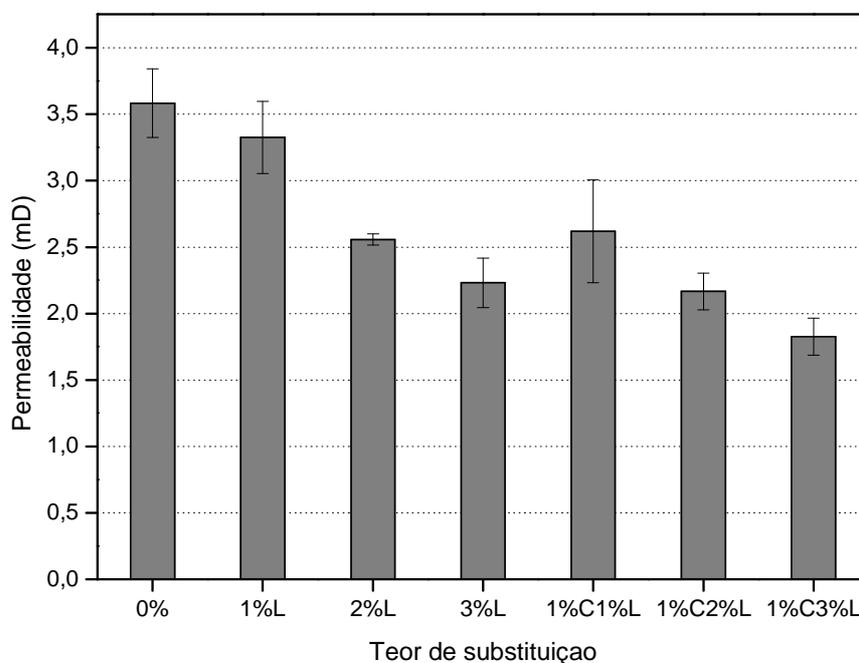


Figura 41 - Permeabilidade das argamassas

A incorporação de lodo e cinza promoveu uma redução contínua na permeabilidade à medida que se aumentou o teor de adição dos resíduos. Esta redução, que confere maior estanqueidade às argamassas, está associada ao fenômeno físico de refinamento da estrutura granular e preenchimento dos poros capilares, que são da ordem de 10  $\mu\text{m}$  segundo Mindess e Young (1981 apud HOPPE FILHO, 2008).

Com a substituição de areia por 4% de resíduos, a permeabilidade em relação à argamassa padrão diminuiu, aproximadamente, em 49%.

#### 4.3.10 Porosidade

A porosidade das argamassas estudadas está ilustrada na Figura 42. O aumento de porosidade das argamassas com resíduo em relação à argamassa padrão está em consonância com os resultados do teor de ar incorporado, exibido anteriormente. Isto pode ser decorrente da diminuição da trabalhabilidade nas argamassas com resíduos, e consequente diminuição da capacidade de adensamento delas.

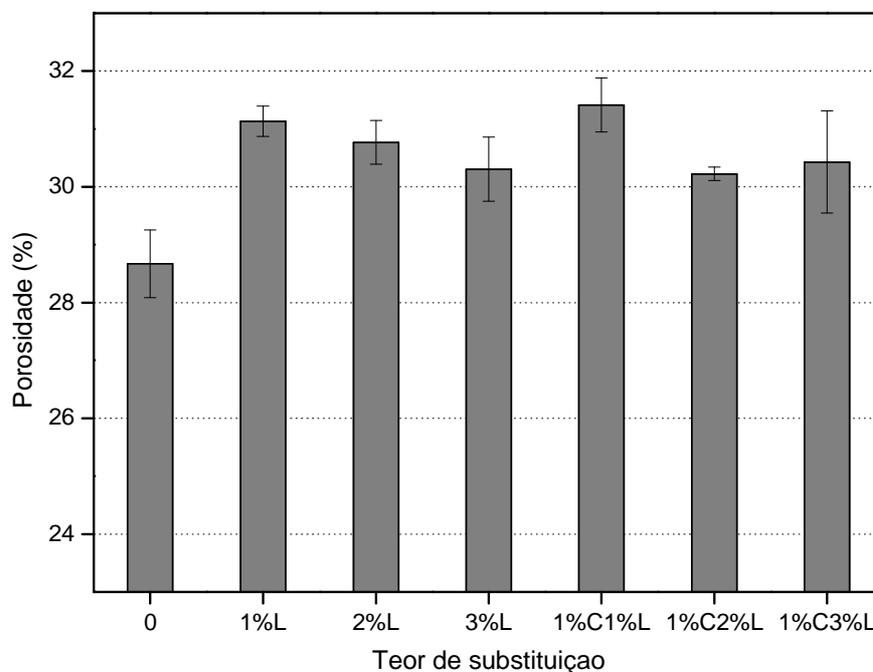


Figura 42 - Porosidade das argamassas

Há uma relação inversa entre a resistência e porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008) e isso foi verificado nos ensaios realizados no item 4.3.7.

O aumento de porosidade pode ser também atribuído ao aumento de finos no sistema e o fato do lodo ter morfologia fibrosa e lamelar também contribui para um aumento da incorporação de ar nas argamassas.

Com a substituição de areia por 4% de resíduos (1%C1%L), a porosidade em relação à argamassa padrão aumenta, aproximadamente, em 6%.

Apesar do aumento da porosidade houve diminuição da permeabilidade, verificada no item 4.3.5, o que indica uma obstrução dos poros capilares.

#### 4.3.11 Análise química

Nas argamassas, as médias dos percentuais de metais estão expostas na Tabela 16, tendo 2,9% como desvio padrão máximo, o que significa que os valores não variam muito entre os diferentes traços.

Tabela 16 - FRX das argamassas

Óxidos	Percentual médio (%)
CaO	62,05
SiO <sub>2</sub>	13,79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,04
K <sub>2</sub> O	6,08
SrO	3,01
SO <sub>3</sub>	1,87
Outros elementos	3,16

Fonte: tabela da autora, 2013

Na análise de metais com ICP dos extratos solubilizados e lixiviados, os seguintes metais foram analisados: Ba, Cu, Ni, Cd, Cr, Pb, V, Zn, Sb, Ag, Co, e Mo. Os resultados das concentrações de metais nos extratos lixiviados das argamassas estão apresentados na Tabela 17, e dos extratos solubilizados, na Tabela 18.

Tabela 17 – Concentrações de metais nos extratos lixiviados das argamassas

Teor de substituição	Concentrações (mg/L)											
	Ba	Cu	Ni	Cd	Cr	Pb	V	Zn	Sb	Ag	Co	Mo
0%	0,409	0	0,157	0	0,409	0	0,204	0,055	0	0	0,008	0,014
1%L	0,407	0,003	0,078	0	0,324	0	0,303	0,053	0	0	0,01	0,016
2%L	0,468	0,003	0,118	0,001	0,354	0	0,248	0,083	0	0	0,015	0,014
3%L	0,224	0,058	0,015	0	0,235	0	0,153	0,084	0	0	0,004	0,011
1%C1%L	0,118	0,006	0,001	0	0,289	0	0,159	0,021	0	0	0,003	0,012
1%C2%L	0,203	0,015	0,002	0	0,261	0	0,148	0,018	0	0	0,004	0,012
1%C3%L	0,192	0,021	0,025	0	0,244	0	0,173	0,05	0	0	0,004	0,013

Fonte: tabela da autora, 2013

As concentrações encontradas no ensaio de lixiviação das argamassas estão abaixo do limite máximo estabelecido pela norma de classificação dos resíduos sólidos ABNT NBR 10004, anexo F, como já era de se esperar já que os resíduos nelas inseridos não foram classificados como agentes tóxicos.

Tabela 18 – Concentrações de metais nos extratos solubilizados das argamassas

Teor de substituição	Concentrações (mg/L)											
	Ba	Cu	Ni	Cd	Cr	Pb	V	Zn	Sb	Ag	Co	Mo
0%	0,261	0	0,015	0	0,098	0	0	0,017	0,065	0,102	0,006	0
1%L	0,255	0,01	0,08	0,005	0,088	0	0	0,037	0,069	0,024	0,007	0
2%L	0,213	0,014	0,025	0,005	0,081	0	0	0,022	0,069	0,024	0,017	0
3%L	0,291	0,041	0,008	0	0,124	0	0,032	0,043	0	0	0,004	0,014
1%C1%L	0,31	0,011	0	0	0,152	0	0,034	0,029	0	0,121	0,004	0,011
1%C2%L	0,259	0,022	0,006	0	0,152	0	0,045	0,079	0	0,022	0,005	0,011
1%C3%L	0,24	0,035	0,012	0,001	0,138	0	0,038	0,056	0	0	0,005	0,016

Fonte: tabela da autora, 2013

A concentração de cádmio encontrada no extrato solubilizado das argamassas com 1% e 2% de lodo corresponde à concentração máxima estabelecida no anexo G da norma supracitada. Essa concentração está abaixo da concentração encontrada nos resíduos, o que indica um poder de estabilização do cádmio por parte da matriz cimentícia, possibilitando a aplicação desta para fins construtivos.

#### 4.3.12 Análise microestrutural

Na análise da difração de raios-X entre a argamassa de referência e as argamassas com percentuais de lodo, não é possível perceber influência

significativa do lodo no padrão de difração, como se pode visualizar na Figura 43. Isso acontece principalmente porque o percentual de lodo inserido nas argamassas é muito pequeno para torna-lo perceptível neste ensaio. Além disso, o lodo é um material essencialmente amorfo e os picos dos materiais cristalinos que ali se encontram são superpostos pelos picos característicos das argamassas.

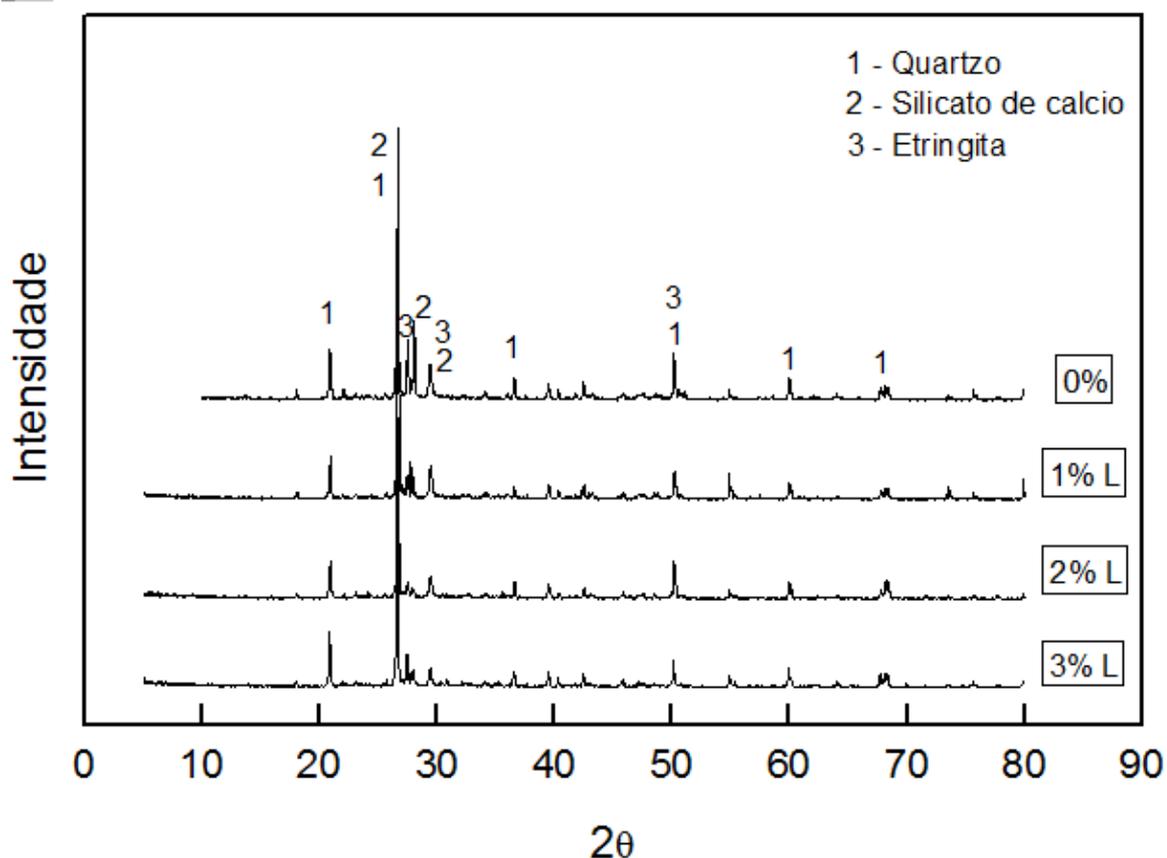


Figura 43 - Difração de raios-X das argamassas de referência e com 1, 2 e 3% de lodo.

Na análise da difração de raios-X entre a argamassa de referência e as argamassas com cinza e lodo, também não é possível perceber influência significativa destes resíduos nos picos do gráfico, como se pode visualizar na Figura 44, pelos mesmos motivos expostos anteriormente.

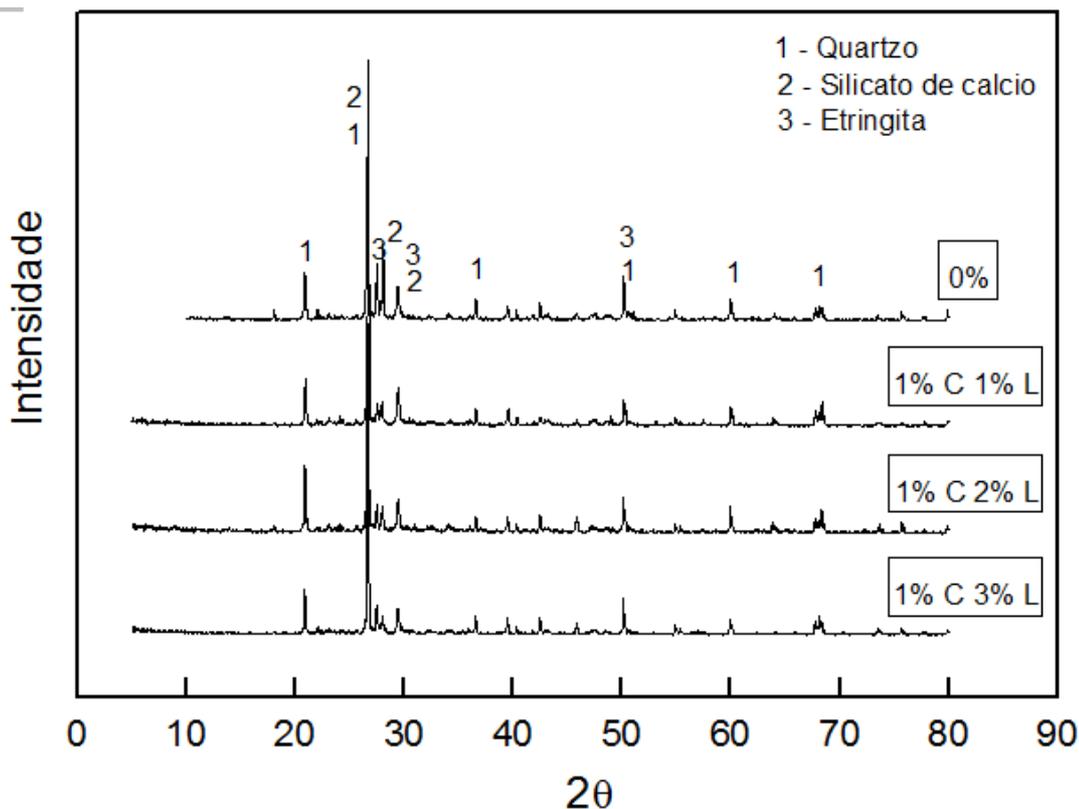


Figura 44 - Difração de raios-X (DRX) das argamassas de referência e com substituição concomitante de cinza e lodo

Nas análises de DRX mostradas nas Figura 43 e Figura 44, não foi possível visualizar os picos referentes à portlandita e CSH, devido à cristalinidade predominante do quartzo que tem o pico de 100%, de maior intensidade, ( $2\theta=26,64^\circ$ ) muito evidente no gráfico.

A imagem feita em microscópio eletrônico de varredura (MEV) de argamassa com 1% de cinza e 3% de lodo está exibida na Figura 45. Devido à cinza possuir morfologia similar a do silicato de cálcio hidratado, não é possível identifica-la na imagem. Já o lodo têxtil, de morfologia planar, pode ser visualizado na figura através dos pontos ali indicados A e B.

Verifica-se aqui que a substituição do agregado miúdo pelos resíduos não provocou uma modificação expressiva na microestrutura da argamassa.

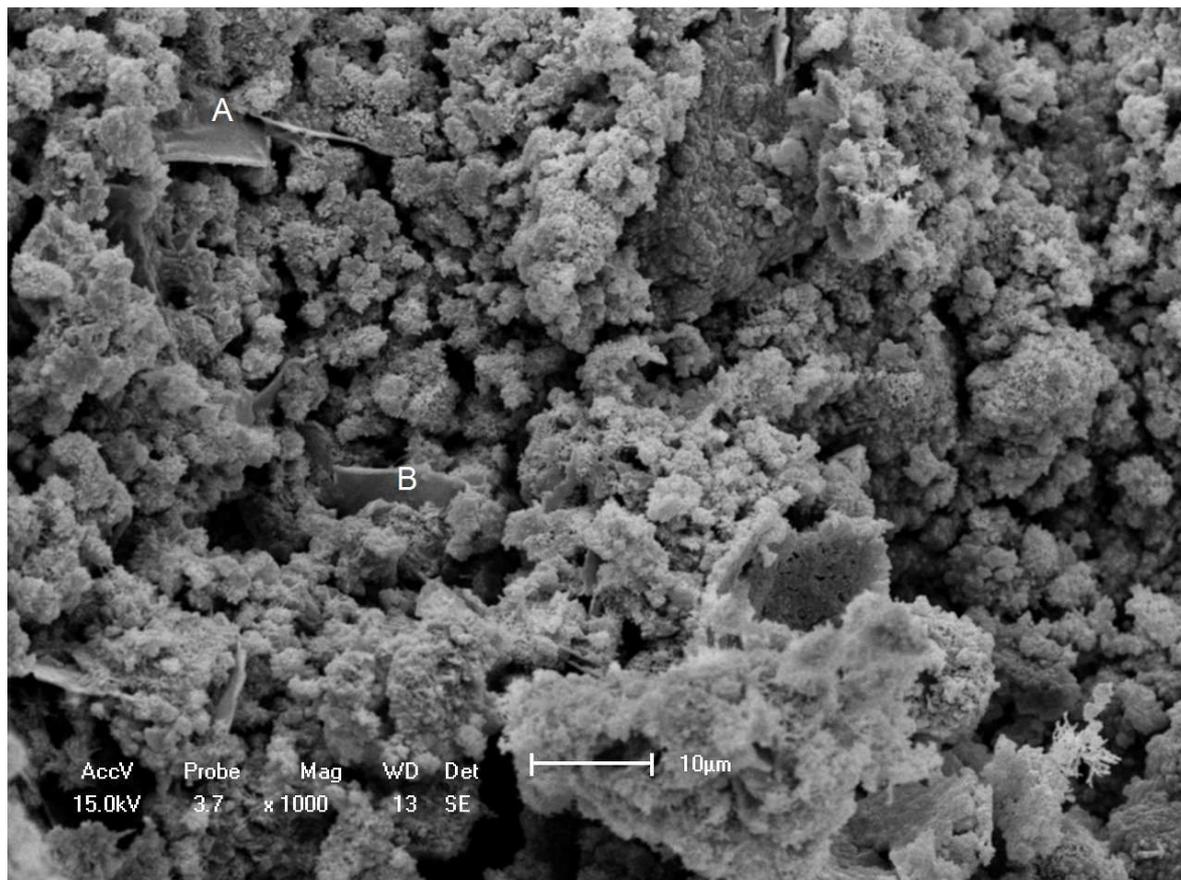


Figura 45 - Imagens de microscópio eletrônico de varredura em argamassas em modo SE com ampliação de 1000 vezes.

#### 4.4 Discussões

De acordo com os resultados encontrados houve alterações positivas e negativas das propriedades das argamassas com lodo têxtil e cinza de algaroba em relação às argamassas padrão, como mostra a Tabela 19, que relaciona os valores das propriedades da argamassa padrão com a argamassa com 4% de substituição de resíduos (1%C3%L).

Apesar da perda de trabalhabilidade com o aumento do teor de substituição de areia pelos resíduos, as argamassas podem ser utilizadas em aplicações não estruturais. A resistência à compressão aos 28 dias da argamassa com maior percentual de resíduos está acima do valor exigido em norma brasileira para sua utilização como assentamento ou revestimento.

Estima-se que o consumo de argamassa empregada no assentamento de blocos numa casa popular de 47 m<sup>2</sup>, provida de dois quartos e um banheiro, seja de aproximadamente 3.760 kg. Empregando-se o traço de 1:4 (cimento:areia) em

massa e fazendo-se uso da argamassa com 1% de cinza de lenha e 3% de lodo têxtil, seriam utilizados 120 kg de resíduos (30 kg de cinza e 90 kg de lodo), que equivale a 8 quilos de resíduos por saco de cimento. Considerando-se a construção de um conjunto habitacional com 500 casas, seriam 60 toneladas de resíduos dispostos de maneira segura.

Tabela 19 – Comparativo entre as propriedades da argamassa padrão e da argamassa com 4% de substituição de areia pelos resíduos

Propriedades	Teor de Substituição		Variação (%)
	0%	1%C3%L	
Consistência (mm)	259	240	-7%
Densidade no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	2002	1880	-6%
Teor de ar (%)	6	11	83%
Retenção de água (%)	70	79	13%
Densidade de massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	1892	1803	-5%
Absorção de água por capilaridade aos 10 minutos (g/cm <sup>2</sup> )	0,85	0,61	-28%
Absorção de água por capilaridade aos 90 minutos (g/cm <sup>2</sup> )	1,47	1,1	-25%
Coeficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	9,9	7,9	-20%
Variação dimensional no 1º dia (mm/m)	0,016	0,054	238%
Variação dimensional no 7º dia (mm/m)	0,465	0,72	55%
Variação dimensional no 28º dia (mm/m)	0,592	0,891	51%
Variação de massa no 1º dia (%)	2,832	2,983	5%
Variação de massa no 7º dia (%)	5,727	6,125	7%
Variação de massa no 28º dia (%)	5,896	6,274	6%
Resistência à tração na Flexão no 7º dia (MPa)	2,421	1,377	-43%
Resistência à tração na Flexão no 14º dia (MPa)	3,201	2,611	-18%
Resistência à tração na Flexão no 28º dia (MPa)	3,577	2,779	-22%
Resistência à compressão no 7º dia (MPa)	6,961	3,233	-54%
Resistência à compressão no 14º dia (MPa)	9,112	6,639	-27%
Resistência à compressão no 28º dia (MPa)	11,629	7,521	-35%
Módulo de elasticidade dinâmico no 7º dia (MPa)	18,92	10,01	-47%
Módulo de elasticidade dinâmico no 14º dia (MPa)	21,3	13,26	-38%
Módulo de elasticidade dinâmico no 28º dia (MPa)	20,74	14,09	-32%
Permeabilidade (mD)	3,582	1,824	-49%
Porosidade (%)	28,669	30,427	6%

Fonte: tabela da autora, 2013

Os ensaios de solubilização e lixiviação fornecem valores de concentrações de metais abaixo dos limites tolerados pela norma brasileira. As análises

microestruturais das argamassas também não sofreram alterações significativas com a introdução dos resíduos. Assim, a integridade das propriedades físicas e químicas das argamassas quando da substituição de até 4% do agregado miúdo pelos resíduos, possibilitam sua utilização como material de construção civil.

O emprego de cinza de algaroba nas argamassas juntamente com lodo têxtil não depreciou as propriedades químicas e mecânicas aqui pesquisadas. Desta forma, o uso concomitante ou individual dos dois resíduos na matriz cimentícia utilizada é uma alternativa viável de disposição para os mesmos.

## 5 CONCLUSÕES

- Os resíduos lodo têxtil e cinza de algaroba, provenientes de uma típica lavanderia de jeans do APL de confecções pernambucano, foram caracterizadas físico-quimicamente;
- Ambos os resíduos foram classificados conforme a ABNT NBR 10004 como pertencentes à classe II A (não perigosos e não inertes);
- Foi verificado que, após o processamento dispensado aos resíduos, ambos apresentaram superfície específica maior que o cimento, o que implica em algumas das alterações de propriedades estudadas, como aumento da retenção de água, do teor de ar incorporado, da trabalhabilidade;
- O lodo têxtil apresenta cerca de 40% de sólidos voláteis, e a cinza de algaroba durante a queima a temperaturas elevadas emite cerca de 21% gás carbônico para a atmosfera. Dessa forma a utilização destes resíduos em argamassas, cuja fabricação se desenvolve à temperatura ambiente se mostra adequado;
- Foi verificado que os resíduos não possuem atividade pozolânica e por isso não se recomenda a substituição do cimento por estes.
- A resistência à compressão aos 28 dias da argamassa com maior percentual de resíduos está acima do valor exigido em norma brasileira para sua utilização como assentamento ou revestimento
- As argamassas com substituição de até 4% da areia pelos resíduos podem ser utilizadas em aplicações não estruturais, o que corresponde à utilização de 8 kg de resíduo por saco de cimento;
- O lodo têxtil possui microestrutura lamelar e a cinza de algaroba possui estrutura arredondada com alguns grãos da ordem de 10  $\mu\text{m}$  e outros, menores, aglomerados;
- As argamassas com substituição de até 4% do agregado miúdo por resíduos não apresentaram modificação expressiva na microestrutura;
- Devido à presença de metais pesados encontrados nos resíduos, a estabilização/solidificação é um tratamento adequado para os mesmos. O cimento como agente ligante neste tratamento, mostrou-se eficiente já

que foi verificada a imobilização dos contaminantes encontrados nos resíduos através dos ensaios de solubilização e lixiviação. As argamassas com resíduos foram classificadas pela ABNT NBR 10004 como pertencente à classe II B, não perigosos e inertes.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para um maior refinamento do conhecimento das características dos resíduos e das argamassas com eles incorporados, recomenda-se a realização de mais alguns trabalhos. A saber:

- Análise microestrutural com análise química para identificação das fases da argamassa hidratada;
- Substituição de maiores percentuais de agregado miúdo pelo lodo têxtil e pela cinza de lenha em argamassas a fim de conhecer o limite possível de incorporação sem que a argamassa sofra perdas de propriedades a ponto de não ter sua utilização recomendável;
- Ensaio de aderência para conhecer o poder de fixação das argamassas a diferentes substratos;
- Análises para conhecimento das características da matéria volátil contida no lodo, como espectroscopia de infravermelho;
- Aprimoramento dos estudos da influência dos resíduos (sobretudo o lodo têxtil) na porosidade das argamassas;
- Experimentação de outros fatores água/cimento;
- Realização de outras análises químicas para saber acerca da variabilidade de composição do lodo têxtil.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7200**: execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **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 15261:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). 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 Chappelle 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.

BALASUBRAMANIAN, J. *et al.* Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials. **Waste Management**, v. 26, n. 1, p. 22-28. 2006.

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

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: ISAIA, G. C. (org./ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia dos materiais.** 2 ed.. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1591-1627. 2010.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações:** fundamentos. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 234 p.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (org./ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia dos materiais.** 2 ed.. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 863-904. 2010.

CASTRO, T. H. **Solidificação/estabilização de lodo gerado no tratamento de efluente de lavanderia industrial têxtil em blocos cerâmicos acústicos e seu desempenho em câmara reverberante.** 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

CHEA, 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. **Ressources, Conservation and Recycking**, v.55, p. 669-685. 2011

CHEN, Q. Y. *et al.* Immobilisation of heavy metal in cement-based solidifications/stabilisation: a review. **Waste Management**, v. 29, p. 390-403. 2009.

CONNER, J. R.; HOFFNER, S. L. The history of stabilization/solidification technology. critical reviews. **Environmental Science and Technology**, 28(4), 397-462, 1998.

EATON, A. D. *et al.* **Standard methods for the examination of water & wastewater**. 21st ed. Washington, DC: Centennial Edition, 2005

ESTADÃO. **Agreste tem 2º maior polo têxtil do país**. 2013. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/impreso,agreste-tem-2-maior-polo-textil-do-pais,981078,0.htm>>. Acesso em: 24 jun. 2013

FERRAZ JÚNIOR, A. D. N. **Tratamento de efluente têxtil em reator uasb seguido de biofiltro aerado submerso**. 2010. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

FIORITO, J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2005.

GOMES, A. B.; GOMES, R. A. A ecologia política da algaroba: uma análise das relações de poder e mudança ambiental no Cariri Ocidental – PB. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE ANTROPOLOGIA, 26., 2008, Porto Seguro. **Anais Eletrônicos...** Brasília: ABA, 2008. Disponível em : <[http://www.abant.org.br/conteudo/ANAIS/CD\\_Virtual\\_26\\_RBA/grupos\\_de\\_trabalho/trabalhos/GT%2036/Ramonildes%20Gomes.pdf](http://www.abant.org.br/conteudo/ANAIS/CD_Virtual_26_RBA/grupos_de_trabalho/trabalhos/GT%2036/Ramonildes%20Gomes.pdf)>. Acesso em: 23 de jun. 2013.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 298 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

LORA, E. L. **Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industrial e de transporte**. Brasília/DF: ANEEL, 2000.

MALVIYA, R.; CHAUDHARV, R. Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: a review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 137, p. 267-276. 2006.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MELO, C. S. M. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algarroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**.

2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. United States, Prentice-Hall, 1981.

MINOCHA, A. K.; JAIN, N.; VERMA, C. L. Effect of inorganic materials on the solidification of heavy metal sludge. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1695-1701. 2003.

MIRGUIASI, Z. *et al.* Preparation and characterization of CaO nanoparticles from Ca(OH)<sub>2</sub> by direct Thermal decomposition method. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 24 abr. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2013.04.018>>

PATEL, H.; PANDEY, S. Evaluation of physical stability and leachability of portland pozzolona cement (PPC) solidified chemical sludge generated from textile wastewater treatment plants. **Journal of Hazardous Materials**, v. 207, p. 56-64. 2012

PIETROBON, C. L. D. R. *et al.* Estudos preliminares sobre estabilização/solidificação - e/s - de lodo de tratamento de lavanderia têxtil para reutilização como argamassa de construção: exame de caso para maringá, estado do paraná. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 24, p. 1659-1664. 2002.

PIETROBON, C. L. D. R. *et al.* Lixiviação de contaminantes de compostos de lodo-cimento. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 26, n. 1, p. 45-52. 2004.

PRIM, E. C. C. **Reaproveitamento de lodo têxtil e da cinza pesada na construção civil: aspectos tecnológicos e ambientais**. 1998. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

SANTOS, E. O. **Caracterização, biodegradabilidade e tratabilidade do efluente de uma lavanderia industrial**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - SEBRAE. **Estudo de aracterização econômica do polo de confecções do agreste pernambucano**. Relatório final apresentado ao SEBRAE. Recife: UFPE, 2004.

\_\_\_\_\_. **Estudo econômico do arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano, 2012**. Coordenação Técnica: Ana Claudia Arruda. Recife: SEBRAE, 2013. Disponível em: <[http://www.sebrae.com.br/uf/pernambuco/downloads/estudos-e-pesquisas/copy2\\_of\\_aprenda/estudo-economico-do-apl-de-confeccoes-do-agreste.pdf](http://www.sebrae.com.br/uf/pernambuco/downloads/estudos-e-pesquisas/copy2_of_aprenda/estudo-economico-do-apl-de-confeccoes-do-agreste.pdf)>

SILVA FILHO, A. R. A. **Desenvolvimento de sistema simplificado de gestão ambiental aplicada a micro e pequenas empresas de beneficiamento de jeans**.

2013. 211 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SILVA, M. A. R. **Solidificação e estabilização de resíduos inorgânicos industriais**: estudo da eficiência do processo e evidência de mecanismos de imobilização. 2007. 106 f. Tese (Doutorado em Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997. 459 p.

YAN, S.; SAGOE-CRENTSIL, K.; SHAPIRO, G. Reuse of de-inking sludge from wastepaper recycling in cement mortar products. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 2085-2090. 2011.

## ANEXO

Tabela 20 – Resultado do ensaio de consistência

Traço	Medidas	C (mm)	Desvio
0%L	258,470	259	0,831
	259,250		
	260,130		
1%L	255,090	257	1,977
	255,910		
	258,850		
2%L	253,960	252	2,088
	249,940		
	250,970		
3%L	247,620	246	2,052
	244,070		
	247,630		
1%C1%L	254,860	254	1,246
	252,370		
	253,710		
1%C2%L	247,850	249	0,936
	248,840		
	249,720		
1%C3%L	240,590	240	2,076
	237,320		
	241,170		

Fonte: tabela da autora, 2013

Tabela 21 – Resultado dos ensaios de densidade no estado fresco, de teor de ar e de retenção de água

Traço	D (kg/m <sup>3</sup> )	A (%)	Ret (%)
0%L	2002	6	70
1%L	1937	9	74
2%L	1903	11	76
3%L	1887	11	77
1%C1%L	1924	10	73
1%C2%L	1900	10	73
1%C3%L	1880	11	79

Fonte: tabela da autora, 2013

Tabela 22 – Resultado do ensaio de densidade de massa aparente em argamassas

Traço	D (kg/m <sup>3</sup> )	Média	Desvio
0%	1890,701	1892	17,407
	1875,029		
	1909,788		
1%L	1791,611	1801	14,769
	1817,579		
	1792,404		
2%L	1810,328	1809	5,960
	1813,492		
	1801,958		
3%L	1810,040	1802	15,888
	1812,952		
	1784,093		
1%C1%L	1834,009	1827	6,551
	1821,565		
	1824,236		
1%C2%L	1814,538	1820	5,677
	1818,397		
	1825,714		
1%C3%L	1807,536	1803	5,655
	1803,882		
	1796,439		

Fonte: tabela da autora, 2013

Tabela 23 – Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade em argamassas

Traço	$A_{10}$ (g/cm <sup>2</sup> )	Média	Desvio	$A_{90}$ (g/cm <sup>2</sup> )	Média	Desvio	C (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	Média	Desvio
0%	0,89	0,85	0,07	1,51	1,47	0,06	9,8	9,9	0,2
	0,89			1,50			9,7		
	0,77			1,40			10,1		
1%L	0,74	0,73	0,04	1,88	1,27	0,04	18,2	11,8	5,5
	0,69			1,24			8,9		
	0,77			1,29			8,4		
2%L	0,71	0,67	0,06	1,26	1,18	0,11	8,8	8,1	0,8
	0,60			1,06			7,3		
	0,69			1,21			8,3		
3%L	0,61	0,63	0,02	1,01	1,04	0,03	6,3	6,6	0,3
	0,64			1,07			6,8		
	0,63			1,04			6,6		
1%C1%L	0,83	0,80	0,03	1,46	1,39	0,07	10,0	9,6	0,7
	0,79			1,41			9,9		
	0,76			1,31			8,8		
1%C2%L	0,71	0,67	0,03	1,31	1,24	0,06	9,6	9,2	0,5
	0,65			1,19			8,7		
	0,65			1,23			9,3		
1%C3%L	0,59	0,61	0,02	1,01	1,10	0,14	6,7	7,9	1,9
	0,61			1,03			6,8		
	0,63			1,26			10,1		

Fonte: tabela da autora, 2013

Tabela 24 – Resultados do ensaio de variação dimensional

Traço	$\epsilon_1$ (mm/m)	Média	Desvio	$\epsilon_7$ (mm/m)	Média	Desvio	$\epsilon_{28}$ (mm/m)	Média	Desvio
0%	-0,156			-0,492			-0,620		
	-0,136	-0,139	0,016	-0,404	-0,465	0,053	-0,508	-0,592	0,074
	-0,124			-0,500			-0,648		
1%L	-0,130			-0,664			-0,816		
	-0,103	-0,116	0,014	-0,872	-0,776	0,105	-1,188	-0,988	0,188
	-0,115			-0,792			-0,960		
2%L	-0,212			-0,666			-0,728		
	-0,166	-0,176	0,033	-0,539	-0,524	0,150	-0,736	-0,744	0,021
	-0,149			-0,367			-0,768		
3%L	-0,197			-0,664			-0,785		
	-0,169	-0,172	0,023	-0,604	-0,640	0,032	-0,820	-0,818	0,064
	-0,151			-0,652			-0,848		
1%C1%L	-0,229			-0,492			-0,816		
	-0,185	-0,195	0,031	-0,416	-0,591	0,240	-0,720	-0,779	0,051
	-0,170			-0,864			-0,800		
1%C2%L	-0,214			-0,560			-0,828		
	-0,158	-0,1747	0,034	-0,624	-0,597	0,033	-0,856	-0,829	0,026
	-0,152			-0,608			-0,804		
1%C3%L	-0,108			-0,648			-0,796		
	-0,160	-0,161	0,054	-0,792	-0,720	0,102	-1,044	-0,891	0,134
	-0,216			3,424			-0,832		

Fonte: tabela da autora, 2013

Tabela 25 – Resultados do ensaio de variação de massa

Traço	$\Delta m_1$ (%)	Média	Desvio	$\Delta m_7$ (%)	Média	Desvio	$\Delta m_{28}$ (%)	Média	Desvio
0%	3,053			-4,958			-5,164		
	2,762	2,832	0,195	-6,045	-5,727	0,670	-6,128	-5,896	0,647
	2,681			-6,179			-6,395		
1%L	3,010			-6,785			-7,235		
	2,873	2,908	0,090	-7,816	-6,821	0,978	-8,085	-7,124	1,021
	2,841			-5,861			-6,052		
2%L	3,745			-6,195			-6,492		
	3,584	3,578	0,171	-4,628	-5,585	0,839	-5,166	-6,034	0,752
	3,404			-5,933			-6,444		
3%L	3,837			-6,329			-6,787		
	3,104	3,145	0,673	-6,425	-6,465	0,160	-6,769	-6,677	0,175
	2,494			-6,642			-6,475		
1%C1%L	-2,966			-6,733			-6,730		
	-3,293	-3,171	0,179	-6,704	-6,648	0,123	-7,044	-6,852	0,168
	-3,255			-6,507			-6,782		
1%C2%L	2,662			-6,373			-6,427		
	2,615	2,619	0,042	-6,327	-6,377	0,053	-6,381	-6,432	0,053
	2,579			-6,432			-6,487		
1%C3%L	2,983			-6,169			-6,312		
	2,949	2,951	0,031	-6,086	-6,125	0,042	-6,280	-6,274	0,042
	2,921			-6,120			-6,229		

Fonte: tabela da autora, 2013

Tabela 26 – Resistência à tração na flexão

Traço	7 dias			14 dias			28 dias		
	Tensão (MPa)	Média	Desvio	Tensão (MPa)	Média	Desvio	Tensão (MPa)	Média	Desvio
0%	2,588			3,379			3,761		
	2,337	2,421	0,145	3,257	3,201	0,212	3,600	3,577	0,197
	2,336			2,968			3,369		
1%L	1,671			2,005			2,488		
	1,403	1,503	0,146	2,095	2,014	0,076	2,650	2,629	0,131
	1,437			1,943			2,748		
2%L	1,450			2,190			2,731		
	1,643	1,516	0,110	2,384	2,243	0,123	2,771	2,769	0,037
	1,456			2,156			2,804		
3%L	1,300			2,011			2,900		
	1,428	1,344	0,073	2,054	2,102	0,121	2,656	2,724	0,154
	1,305			2,240			2,616		
1%C1%L	1,523			2,127			2,510		
	1,550	1,623	0,150	2,331	2,191	0,122	2,756	2,591	0,143
	1,796			2,115			2,508		
1%C2%L	1,528			2,325			2,443		
	1,519	1,496	0,048	2,197	2,172	0,168	2,430	2,423	0,025
	1,441			1,993			2,395		
1%C3%L	1,348			2,787			2,821		
	1,430	1,377	0,046	2,328	2,611	0,248	2,724	2,779	0,050
	1,354			2,719			2,793		

Fonte: tabela da autora, 2013

Tabela 27 – Resistência à compressão

Traço	7 dias			14 dias			28 dias		
	Tensão (MPa)	Média	Desvio	Tensão (MPa)	Média	Desvio	Tensão (MPa)	Média	Desvio
0%	6,687	6,961	0,327	8,063	9,112	0,927	11,153	11,629	0,322
	6,720			8,666			11,714		
	7,052			10,145			11,843		
	7,384			9,574			11,808		
1%L	3,395	3,403	0,038	5,132	4,736	0,424	7,436	7,021	0,479
	3,377			4,687			7,065		
	3,459			4,163			6,340		
	3,379			4,961			7,244		
2%L	3,583	3,657	0,146	5,096	5,102	0,122	7,442	7,510	0,400
	3,578			5,030			8,093		
	3,593			5,004			7,288		
	3,876			5,276			7,216		
3%L	2,852	2,775	0,121	4,520	4,686	0,225	8,366	7,571	0,595
	2,890			4,465			7,642		
	2,734			4,864			6,979		
	2,622			4,896			7,299		
1%C1%L	3,989	3,914	0,121	4,816	5,421	0,442	6,563	6,909	0,759
	4,044			5,383			6,002		
	3,829			5,661			7,512		
	3,794			5,824			7,559		
1%C2%L	3,431	3,445	0,056	5,030	5,222	0,170	6,957	6,903	0,418
	3,394			5,212			6,521		
	3,431			5,445			6,665		
	3,525			5,203			7,467		
1%C3%L	3,071	3,233	0,129	6,227	6,639	0,289	7,571	7,521	0,148
	3,240			6,697			7,643		
	3,386			6,727			7,565		
	3,234			6,904			7,305		

Fonte: tabela da autora, 2013

Tabela 28 – Resultados do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica

Traço	E <sub>d</sub> 7 dias (MPa)	Média	Desvio	E <sub>d</sub> 14 dias (MPa)	Média	Desvio	E <sub>d</sub> 28 dias (MPa)	Média	Desvio
0%	18,66	18,92	0,29	21,46	21,30	0,18	21,34	20,74	0,52
	19,22			21,34			20,50		
	18,88			21,10			20,39		
1%L	11,52	11,32	0,27	13,26	13,74	0,42	15,38	15,51	0,15
	11,02			13,98			15,48		
	11,43			13,98			15,68		
2%L	10,75	10,81	0,17	13,17	13,26	0,26	14,95	15,31	0,40
	10,67			13,07			15,75		
	11,01			13,56			15,24		
3%L	9,34	9,37	0,12	12,53	12,45	0,32	14,11	14,40	0,26
	9,26			12,09			14,50		
	9,50			12,71			14,60		
1%C1%L	12,53	12,72	0,90	14,21	14,54	0,34	15,70	15,67	0,26
	13,70			14,90			15,40		
	11,92			14,50			15,90		
1%C2%L	12,57	12,63	0,37	13,40	13,56	0,29	13,78	14,62	0,74
	13,03			13,90			14,94		
	12,30			13,40			15,14		
1%C3%L	9,66	10,01	0,31	13,39	13,26	0,15	13,93	14,09	0,45
	10,26			13,30			14,60		
	10,10			13,10			13,74		

Fonte: tabela da autora, 2013

Tabela 29 – Resultados dos ensaios de permeabilidade e porosidade em argamassas

Traço	Per (mD)	Média	Desvio	Por (%)	Média	Desvio
0%	3,927	3,582	0,258	28,758	28,669	0,585
	3,457			27,829		
	3,330			29,173		
	3,613			28,915		
1%L	2,997	3,326	0,271	30,868	31,130	0,258
	3,423			31,383		
	3,637			29,829*		
	3,247			31,140		
2%L	2,520	2,557	0,043	30,792	30,768	0,380
	2,547			31,293		
	2,603			30,545		
	2,520			30,440		
3%L	1,650*	2,231	0,187	30,537	30,304	0,554
	2,043			29,672		
	2,233			31,557*		
	2,417			30,703		
1%C1%L	3,143	2,618	0,386	31,662	31,411	0,464
	2,233			31,037		
	2,633			31,939		
	2,463			31,007		
1%C2%L	2,183	2,165	0,137	30,234	30,222	0,114
	2,143			30,183		
	2,333			30,371		
	2,000			30,099		
1%C3%L	1,750	1,824	0,139	30,995	30,427	0,881
	1,917			30,874		
	1,963			31,874*		
	1,667			29,413		

\* Valores excluídos para cálculo da média e do desvio

Fonte: tabela da autora, 2013