



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CAMPUS DE CURITIBA**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL - DACOC**

**ESTUDO DA ADIÇÃO DE CINZA DE FOLHA DE BANANEIRA EM**  
**ARGAMASSAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2011**

**SUELEN PATRICIO MARIA**

**ESTUDO DA ADIÇÃO DE CINZA DE FOLHA DE BANANEIRA EM  
ARGAMASSAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Concreto, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Sede Ecoville.

**CURITIBA**

**2011**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba  
Gerência de Ensino e Pesquisa  
Coordenação do Curso de Tecnologia em Concreto

---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ESTUDO DA ADIÇÃO DE CINZA DE FOLHA DE BANANEIRA EM ARGAMASSAS

Por

Suelen Patrício Maria

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Concreto, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 22 de novembro de 2011, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – Rodrigo César Kanning  
UTFPR

---

Prof. Gilberto Walter Gogola  
UTFPR

---

Prof. Wellington Mazer  
UTFPR

---

UTFPR - Deputado Heitor de Alencar Furtado, 4900 - Curitiba - PR Brasil  
[www.utfpr.edu.br](http://www.utfpr.edu.br) [dacoc-ct@utfpr.edu.br](mailto:dacoc-ct@utfpr.edu.br) telefone DACOC: (041) 3373-0623

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

***Dedico este trabalho aos meus pais Cleusa e José Maria.***

## **AGRADECIMENTOS**

Acima de tudo, sou grata a Deus e Nossa Senhora pela vida e pela coragem que sempre me acompanha a cada novo desafio, pela família que recebi e pelo meu namorado Rodrigo colocado em meu caminho.

À minha família, pelos valores que me foram passados, pela confiança, carinho e apoio incondicionais ao longo de todos esses anos da minha vida e, de forma especial nesse período de realização deste trabalho de conclusão de curso.

As minhas irmãs Araceli Maria e Even Maria, meus pares.

Ao orientador, Professor Msc. Rodrigo César Kanning, pela dedicação, seriedade, competência e incentivo demonstrado antes e durante a realização deste trabalho.

Ao laboratorista Gustavo da UTFPR por ter me auxiliado na realização de alguns ensaios.

Ao Engenheiro Thiago Garcia pela concessão do cimento utilizado nesta pesquisa.

Aos queridos professores que tive em toda minha vida em especial aos professores que lecionavam na Escola Rural Municipal de Pedra Chata-Guaraqueçaba - PR, Ozenir Modesto, Elizete e Zelli Banques por quem tenho muito respeito e admiração

A UTFPR por ser o intermediador de todos os conhecimentos técnicos adquiridos.

Enfim, á todos que fazem parte da minha vida e que de alguma forma contribuíram para obtenção desta conquista.

*“É preciso saber esperar, principalmente quando as coisas estão mais difíceis e parecem não ter mais soluções, pois muitas vezes a dor pela espera é necessária para o nosso crescimento. A vida é como um bumerangue, tudo o que fazemos terá sempre retorno, por isso é sempre importante praticarmos o bem, fazermos boas coisas”*

(Autor desconhecido)

Maria, Suelen Patrício. Estudo da Adição de Cinza de Folha de Bananeira em Argamassas. Curitiba, 2011, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Concreto) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 87 p.

## RESUMO

O Brasil destaca-se entre os principais produtores mundiais de banana, sendo que em 2008 o país ocupou a quarta colocação, com produção de 7,1 milhões de toneladas em cerca de 514 mil alqueires, que corresponde a cerca de 94,63 milhões de toneladas de cinzas de folhas de bananeiras. Este trabalho verifica o comportamento de adição de cinza de folhas de bananeiras em argamassas de cimento Portland. Para análise dos ensaios tecnológicos, foram confeccionadas argamassas nos traços 1:3 (cimento : areia), posteriormente acrescidas de cinza de folha de bananeira em proporções de 5%; 10%; 15%; 20%; 25% e 30%. Os resultados se apresentaram satisfatórios quanto aos desempenhos físicos e mecânicos, onde todas as adições com cinza de folha de bananeira nas argamassas obtiveram valores superiores aos da argamassa de referência. Pode-se assim concluir que a utilização da cinza de folha de bananeira é viável tecnicamente, devido as suas reações pozolânicas com o cimento Portland.

palavras-chave: Cinza de folha de bananeira, folha de bananeira, pozolana, argamassa.

Maria, Suelen Patrício. Estudo da Adição de Cinza de Folha de Bananeira em Argamassas. Curitiba, 2011, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Concreto) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 87 p.

### **ABSTRACT**

Brazil stands out among the world's leading producers of bananas, in 2008 the country held the fourth place with a production of 7.1 million tons in about 514,000 bushels, which is about 94.63 million of tons of ash of banana leaves. This work verifies the behavior of the addition leaf ash of banana in Portland cement mortars. For analysis of the technological tests were made mortar in proportion of 1:3 (cement: sand) and then addition of banana leaf ash in proportions of 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30%. The results were satisfactory to the physical and mechanical performances, where all additions with leaf ash of banana had higher values than the reference mortar. One can thus conclude that the use leaf ash of banana is technically feasible due to its pozzolanic reaction with Portland cement.

keywords: leaf ash of banana, leaf of banana, pozzolanic activity, mortar.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1 – Etapas de ensaio do Programa Experimental .....                           | 47 |
| Figura 3.2 – Recipiente para determinação da densidade de massa das<br>argamassas..... | 50 |
| Figura 3.3 – Ensaio de resistência à compressão das argamassas.....                    | 51 |
| Figura 3.4 – Ensaio de tração das amostras .....                                       | 52 |
| Figura 3.5 – Equipamento de ensaio da absorção de água por capilaridade.....           | 53 |
| Figura 4.1 – Análise granulométrica da areia .....                                     | 56 |
| Figura 4.2 – Consistência das argamassas conforme porcentagem de adição .....          | 58 |
| Figura 4.3 – Massa específica das argamassas no estado fresco .....                    | 59 |
| Figura 4.4 – Teor de ar incorporado das argamassas.....                                | 60 |
| Figura 4.5 – Resistência à compressão das argamassas .....                             | 61 |
| Figura 4.6 – Resistência à tração das argamassas.....                                  | 63 |
| Figura 4.7 – Massa específica no estado endurecido .....                               | 64 |
| Figura 4.8 – Absorção de água por capilaridade.....                                    | 65 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 2.1 – Parâmetros químicos e físicos das argamassas conforme<br>NBR12653.....     | 24 |
| Quadro 2.2 – Espessura mínima e máxima do revestimento .....                            | 38 |
| Quadro 2.3 – Resistência à tração para emboço camada única .....                        | 39 |
| Quadro 3.1 – Características físicas, químicas e mecânicas do<br>Cimento CII – F32..... | 48 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 4.1 – Classificação do agregado natural .....                                    | 55 |
| Tabela 4.2 – Composição granulométrica do agregado natural .....                        | 56 |
| Tabela 4.3 – Consistência das argamassas.....   | 57 |
| Tabela 4.4 – Massa específica no estado fresco .....                                    | 58 |
| Tabela A1 – Caracterização da argamassa no estado fresco .....                          | 81 |
| Tabela B1 – Valores de resistência a compressão da argamassa com 0%<br>de adição .....  | 83 |
| Tabela B2 – Valores de resistência a compressão da argamassa com 5%<br>de adição .....  | 83 |
| Tabela B3 – Valores de resistência a compressão da argamassa com 10%<br>de adição ..... | 83 |
| Tabela B4 – Valores de resistência à compressão da argamassa com 15%<br>de adição.....  | 84 |
| Tabela B5 – Valores de resistência à compressão da argamassa com 20%<br>de adição.....  | 84 |
| Tabela B6 – Valores de resistência à compressão da argamassa com 25%<br>de adição ..... | 84 |
| Tabela B7 – Valores de resistência à compressão da argamassa com 30%<br>de adição ..... | 85 |
| Tabela B8 – Valores de massa específica no estado endurecido .....                      | 85 |
| Tabela B9a – Valores de absorção de água por capilaridade .....                         | 86 |
| Tabela B9b – Valores de absorção de água por capilaridade .....                         | 87 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|                     |   |
|---------------------|---|
| ABCP                | Associação Brasileira de Cimento Portland   |
| ASTM                | <i>American Society for Testing and Materials</i>   |
| CSH                 | Silicato Hidratado de Cálcio  |
| Ca(OH) <sub>2</sub> | Hidróxido de Cálcio   |
| CPII F 32           | Cimento Portland com adição de Filler Calcário e resistência mecânica de 32 MPa aos 28 dias |
| NBR                 | Normas Brasileiras Regulamentadoras   |
| IPT                 | Instituto de pesquisas tecnológicas   |
| UTFPR               | Universidade Tecnológica Federal do Paraná  |
| ABNT                | Associação Brasileira de Normas Técnicas  |
| CB                  | Cinza de Folha de Bananeira   |
| CaO                 | Óxido de Cálcio   |
| SiO                 | Óxido de Silício  |
| SiO <sub>2</sub>    | Dióxido de Silício  |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                             | <b>15</b> |
| 1.1 OBJETIVO GERAL.....                               | 18        |
| 1.1.1 Objetivos Específicos .....                     | 18        |
| 1.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....                      | 18        |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....                       | 18        |
| <b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                  | <b>20</b> |
| 2.1 AGLOMERANTES HIDRÁULICOS .....                    | 20        |
| 2.2 CIMENTO PORTLAND .....                            | 20        |
| 2.2.1 Hidratação do Cimento.....                      | 21        |
| 2.3 POZOLANA .....                                    | 22        |
| 2.3.1 Classificação das pozolanas .....               | 23        |
| 2.4 MATERIAIS POZOLÂNICOS .....                       | 24        |
| 2.4.1 Vidro Vulcânico.....                            | 25        |
| 2.4.2 Tufo Vulcânico.....                             | 25        |
| 2.4.3 Sílica Opalina e Terras Diatomáceas .....       | 26        |
| 2.4.4 Cinzas Volantes.....                            | 27        |
| 2.4.5 Sílica Ativa.....                               | 28        |
| 2.4.6 Argilas Calcinadas.....                         | 29        |
| 2.4.7 Metacaulim .....                                | 30        |
| 2.4.8 Escória granulada de alto forno.....            | 31        |
| 2.4.9 Cinza de casca de arroz.....                    | 32        |
| 2.4.10 Cinza de Casca de Castanha de Caju.....        | 33        |
| 2.4.11 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar .....        | 34        |
| 2.4.12 Cinza de folha de bananeira .....              | 34        |
| 2.5 ARGAMASSA.....                                    | 36        |
| 2.6 CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS QUANTO A FUNÇÃO..... | 36        |
| 2.6.1 Argamassa de assentamento .....                 | 36        |
| 2.6.2 Argamassa de revestimento.....                  | 37        |
| 2.7 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO..... | 39        |
| 2.7.1 Trabalhabilidade.....                           | 39        |
| 2.7.2 Consistência e plasticidade .....               | 40        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.7.3    | Retenção de água .....  | 41        |
| 2.7.4    | Massa específica aparente e teor de ar incorporado.....           | 41        |
| 2.7.5    | Exsudação da água.....  | 42        |
| 2.7.6    | Coesão e Tixotropia .....   | 42        |
| 2.8      | PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....             | 42        |
| 2.8.1    | Resistência mecânica.....   | 42        |
| 2.8.2    | Módulo de deformação.....   | 43        |
| 2.8.3    | Aderência .....   | 43        |
| 2.8.4    | Permeabilidade.....   | 44        |
| 2.8.5    | Elasticidade .....  | 44        |
| 2.9      | DOSAGEM DAS ARGAMASSAS.....                                       | 45        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                    | <b>46</b> |
| 3.1      | MATERIAIS UTILIZADOS .....  | 47        |
| 3.1.1    | Agregado miúdo .....  | 47        |
| 3.1.2    | Aglomerante .....   | 47        |
| 3.1.3    | Água .....  | 48        |
| 3.1.4    | Adição .....  | 48        |
| 3.1.5    | Aditivo.....  | 49        |
| 3.2      | ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....                                   | 49        |
| 3.2.1    | Ensaio de consistência – <i>Flow Table</i> .....                  | 49        |
| 3.2.2    | Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado ..... | 50        |
| 3.3      | ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO.....                               | 51        |
| 3.3.1    | Resistência à compressão .....                                    | 51        |
| 3.3.2    | Resistência à tração na flexão .....                              | 51        |
| 3.3.3    | Densidade de massa no estado endurecido .....                     | 52        |
| 3.3.4    | Absorção de água por capilaridade.....                            | 53        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS.....</b>  | <b>55</b> |
| 4.1      | CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....                                 | 55        |
| 4.2      | ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....                                   | 57        |
| 4.2.1    | Ensaio de consistência – <i>Flow Table</i> .....                  | 57        |
| 4.2.2    | Ensaio de Massa Específica no estado fresco .....                 | 58        |
| 4.2.3    | Determinação do teor de ar incorporado .....                      | 59        |
| 4.3      | ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO.....                               | 61        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.3.1 Resistência à compressão das argamassas ..... | 61        |
| 4.3.2 Resistência à tração na flexão.....           | 62        |
| 4.3.3 Massa específica no estado endurecido .....   | 63        |
| 4.3.4 Absorção de água por capilaridade .....       | 64        |
| <b>5 CONCLUSÕES .....</b>                           | <b>66</b> |
| 5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....           | 67        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                             | <b>68</b> |
| <b>ANEXO A.....</b>                                 | <b>80</b> |
| <b>ANEXO B.....</b>                                 | <b>82</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação da pozolana como substituta parcial ao cimento Portland recorda à antiguidade, pois registros históricos evidenciam que os romanos já utilizavam em suas construções uma cinza de origem vulcânica oriunda de Pozzuoli na Itália, o qual conferiu a denominação de pozolana (SOUZA, 2003 e LEA, 1971).

A NBR 12653 (ABNT,1992) indica que a pozolana consiste em um material silicoso ou sílico-aluminoso, o qual apresenta poder aglomerante na presença de água em temperatura ambiente, reagindo com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento.

As pozolanas são classificadas em naturais, artificiais e subprodutos industriais. As naturais possuem atividade pozolânica no seu estado natural ou são facilmente transformadas em pozolanas através de processos de calcinação e moagem como os tufos vulcânicos, as terras diatomáceas e as argilas calcinadas (KARSTENSEN, 2006).

As pozolanas artificiais consistem em argilas submetidas à tratamento térmico com temperaturas que variam entre 500 °C à 900 °C para desidratação. Dentre as pozolanas de subprodutos industriais destacam-se: a sílica ativa; as cinzas volantes; as cinzas de cascas de arroz (COUTINHO, 1997; METHA e MONTEIRO, 1994 e NEVILLE, 1997).

O emprego das pozolanas podem ocorrer durante o processo de fabricação do cimento Portland com a substituição parcial do clínquer, bem como, na produção de argamassas e concretos. Em ambos os casos a utilização da pozolana acarreta uma diminuição no consumo do cimento, tendo como consequência à redução da exploração das jazidas de argila e calcário.

A adição de pozolanas no concreto geram vários benefícios do tipo tecnológicos; econômicos e ecológicos. Tecnicamente aumentam a durabilidade do concreto, melhoram suas propriedades mecânicas e podem aumentar a trabalhabilidade quando corretamente dosados. Econômicos porque diminui o consumo do cimento Portland e o consumo de energia elétrica e/ou energia térmica



utilizado na sua produção. E ecológicos, pois a maioria das pozolanas são oriundas de processos industriais os quais possuem componentes poluentes podendo ocasionar danos ao meio ambiente e ao ser humano, quando depositados inadequadamente (JUAREZ *apud* ISAIA; GASTALDINI, 2004; JOZIC e ZELIC, 2006; MALHOTRA e METHA, 1996 e COIMBRA *et al.*, 2002).

Neville (1997) relata que a utilização de materiais alternativos na construção civil está sendo cada vez mais empregado, pois, podem melhorar a durabilidade e o desempenho dos concretos e argamassas. Com isso a grande necessidade pelo uso de resíduos e subprodutos faz com que o estudo de suas utilidades seja necessário, contribuindo como um benefício ecológico, social e econômico.

O aproveitamento de resíduos na indústria da construção civil tem sido intenso, em virtude da mesma ser uma grande consumidora de materiais naturais agregados em seus processos. Savastano (2000) salienta que os resíduos podem ser reciclados, reutilizados, transformados e incorporados resultando em novos materiais que atendam à crescente busca por novas tecnologias de construção com economia e sustentabilidade.

Dentre esses resíduos destacam-se: a cinza de casca de caju (CAMPOS *et al.*, 2007); o bagaço de cana-de-açúcar (MACEDO, 2009; ZARDO *et al.*, 2004; PAULA, 2006 e SANTOS *et al.* 2009) a cinza de casca de arroz (SILVEIRA, 1996; SANTOS, 2006 e TASHIMA, 2006).

Segundo Lea (1971), a utilização dessas cinzas, também conhecidas como adições minerais, foram difundidas por todo império romano na execução de diversas construções como material cimentante. As adições minerais como matéria-prima nos materiais de construção originaram-se na Grécia no período de 1500 a.C no qual adotava-se um material oriundo de erupções vulcânicas que ocorreram na Ilha de Santorini (MALHOTRA e METHA, 1996).

Vazquez (1997), afirma que a preservação do meio ambiente é uma das grandes preocupações da atualidade, principalmente no que se refere à redução de

consumo de energia e de matérias-primas naturais, bem como na geração de resíduos.

Neste contexto, é de grande importância a busca por novas tecnologias, o desenvolvimento de pesquisas contemplando o uso de novos materiais como pozolanas que possam ser utilizadas como matérias primas para o emprego na indústria da construção civil. Sendo assim é que se verifica a necessidade da utilização da cinza da folha de bananeira como adição na produção de argamassas, tendo como base a pesquisa desenvolvida por KANNING (2010).

A folha de bananeira é adquirida através da desfolha do bananal o qual consiste na eliminação das folhas que não são mais úteis a planta (EMBRAPA, 2004).

A banana (*Musa spp.*), pertencente à família Musaceae é considerada a fruta tropical de maior consumo e produção no mundo, com a colheita de 71 milhões de toneladas em 2004. O Brasil com 6,6 milhões de toneladas em 2004 ocupa o segundo lugar mundial, perdendo apenas para Índia com 16,8 milhões de toneladas (CEAGESP, 2005).

A desfolha da banana traz benefícios ao plantio da mesma, visto que a eliminação das folhas que não são mais úteis a planta, propicia ao bananal melhores condições de luminosidade e arejamento, maior controle de pragas que utilizam a planta como refugio, eliminação das folhas cuja fotossíntese não corresponde às necessidades fisiológicas da planta e melhorias do solo pela sua deposição (EMBRAPA, 2004).

Com isso a utilização da cinza de folha de banana como adição em argamassas pode ser viável, em virtude de não acarretar danos ao meio ambiente podendo colaborar como uma nova tecnologia resultando em sustentabilidade.

## 1.1 OBJETIVO

Estudar o uso da adição de pozolana oriunda da queima da folha de bananeira como adição em argamassas.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Avaliar a melhor porcentagem de adição de pozolana em argamassas de cimento, sendo adições de 5%; 10%; 15%; 20%; 25% e 30% tendo como referência os trabalhos desenvolvidos por Santos (2006) *apud* Al-Dulaijan *et al.* (2003) e Silveira (2001) o qual empregam valores máximos de 30% de cinza de casca de arroz.

Caracterização do agregado miúdo natural;

Determinação as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

## 1.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA±

No ano de 2010 a produção nacional de cimento foi de 59,117 milhões de toneladas. Em 2011, no período janeiro à julho foram produzidos 35,682 milhões de toneladas, com aumento de 8,69% sobre o mesmo período de 2010 (SNIC, 2011). Com base nesses dados, faz-se necessário e de suma importância o estudo da incorporação de subprodutos com características pozolânicas ao cimento, atendendo a quesitos de qualidade, durabilidade, economia e ecologia. Desta forma limitou-se a pesquisa na avaliação da maior porcentagem de adição de cinza de folha de bananeira em argamassas.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A referida pesquisa apresenta-se subdividida em cinco capítulos conforme segue:

O capítulo 1 trata da introdução, apresentando um resumo histórico sobre o cimento e argamassa enfocando a importância da pesquisa, justificativa e seus objetivos;

O capítulo 2 compreende a revisão bibliográfica sobre os temas como: cimento, argamassas, técnicas de produção, matéria prima; constituintes dos cimentos e argamassas; tipos de cimentos disponíveis no mercado; a microestrutura da partícula hidratada e pozolanas;

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada, onde são apresentadas as variáveis de estudo, os ensaios normalizados utilizados na avaliação das unidades de estudo;

O capítulo 4 detalha inicialmente os resultados obtidos e analisados individualmente, e, por conseguinte é apresentada uma discussão geral, correlacionando os diversos resultados;

O capítulo 5 relata as considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 AGLOMERANTES HIDRÁULICOS

Os aglomerantes hidráulicos são assim denominados em virtude da pasta apresentar propriedades de endurecimento em contato com a água, no qual seus produtos de hidratação manifestam resistência a ela (METHA e MONTEIRO, 1994).

A hidratação dos aglomerantes consiste numa reação exotérmica com liberação de calor em virtude da elevação da temperatura da massa. A cal e os materiais da família do cimento Portland são intitulados aglomerantes hidráulicos enquanto o gesso é um aglomerante aéreo devido que a ocorrência da pega (endurecimento) ocorre em presença exclusiva de ar atmosférico.

### 2.2 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland foi descoberto em 1824 pelo pedreiro e químico Joseph Aspdin, o qual queimou argila e calcário criando um produto duro como as pedras utilizadas nas construções, resultando numa mistura com cores e propriedades de durabilidade semelhantes às rochas da Ilha Britânica de Portland, sendo assim patenteada com o nome de Cimento Portland.

O Cimento Portland é um aglomerante hidráulico o qual consiste num pó fino composto de calcário, argila, óxido de ferro e gesso que endurece sob a ação da água e depois de endurecida conserva sua resistência e estabilidade.

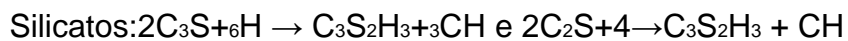
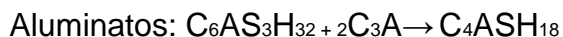
A fabricação do Cimento Portland ocorre com a moagem das matérias-primas, na mistura em quantidades adequadas, sendo sua queima executada num grande forno rotativo até a temperatura de cerca de 1450 °C, com essa temperatura o material sofre fusão produzindo o clínquer, o qual é rapidamente resfriado e moído transformando-se num pó bem fino e então o processo é finalizado com adição do gesso com a finalidade de controlar as reações de pega e endurecimento do cimento.

### 2.2.1 Hidratação do Cimento

O conhecimento dos componentes químicos do cimento e os processos que acontecem na sua hidratação, bem como os componentes resultantes é importante na medida em que pretende-se entender o processo de reação dos materiais pozolânicos quando empregados junto ao cimento.

Segundo Metha e Monteiro (1994), o cimento Portland é constituído por uma mistura heterogênea com inúmeros componentes, com isso na hidratação do cimento ocorrem reações simultâneas dos compostos anidros, sendo cada um com sua velocidade e característica no decorrer da hidratação. São dois os mecanismos de hidratação do cimento, sendo o primeiro a dissolução dos compostos anidros em seus constituintes iônicos e a formação de hidratos na solução devido à sua baixa solubilidade no qual ocorre a precipitação dos produtos hidratados. O segundo mecanismo consiste na hidratação do estado sólido do cimento, pois as reações ocorrem diretamente na superfície dos componentes do cimento anidro, sem entrar em solução.

Os aluminatos e silicatos são os principais componentes do cimento, sendo assim os aluminatos hidratam mais rapidamente que os silicatos resultando no enrijecimento e na pega do cimento Portland. Os silicatos são responsáveis pelo endurecimento (resistência) do cimento Portland. A reação de hidratação é uma reação exotérmica a qual os produtos estão indicados na equação abaixo:



De acordo com Carvalho (2002), a hidratação do cimento Portland consiste na soma das reações de vários compostos individuais do cimento que acontecem simultaneamente. Os compostos do cimento iniciam sua hidratação a partir da introdução da água, produzindo os silicatos de cálcio hidratado (CSH), o qual formam uma rede microestrutural coesiva se desenvolvendo com o número de hidratos.

Para (Kaefer, 1998) A hidratação do cimento resume-se no enrijecimento da pasta (mistura do cimento e água) iniciadas pelos aluminatos e posteriormente evolução da resistência pelos silicatos.

A hidratação do cimento consiste na transformação de compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis. Na hidratação há formação de uma camada de gel em torno dos grãos dos compostos anidros, de maneira que, na zona de transição (zona intermediária entre o cristal primário e o gel), a solução é supersaturada em relação aos compostos hidratados. As variações de concentração de soluto e água fazem com que se gere um gradiente de concentração, originando uma pressão osmótica que vai trazer a ruptura do gel, expondo novas áreas do composto anidro à ação da água.

### 2.3 POZOLANA

Material natural ou artificial que contém sílica na forma reativa, sendo proveniente de rochas vulcânicas, resíduos de termoelétricas e outros que apresentem atividade pozolânicas.

A NBR12653 (ABNT,1992) define pozolana como materiais silicosos ou silicoaluminosos que possuindo pouco ou nenhuma atividade aglomerante, na presença de água e finamente moídos, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades cimentantes.

Os primeiros sinais de utilização das pozolanas datam dos tempos do Império Romano, quando foram encontradas cinzas nas imediações da cidade de Pozzuoli na Itália, cinzas que tinham características de mistura de argilas, areias e siltes provenientes das alterações dos materiais vulcânicos. As cinzas eram constituídas de materiais não cristalinos com alto teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ).

A incorporação da pozolana especificamente a cinza volante, ocorreu na Europa nos anos 50, tendo em vista o aproveitamento destes resíduos e a diminuição no custo da produção do cimento e no Brasil teve início com a fabricação do cimento Portland Pozolânico no ano de 1969, sendo produzido 42.910 toneladas, correspondendo à apenas 0,55% de todo cimento produzido naquele ano (SNIC, 1997; 1998).

### 2.3.1 Classificação das pozolanas

Os materiais pozolânicos, segundo a NBR 12653 (ABNT,1992) são classificados em três classes (classe N, classe C e classe E). Os materiais pozolânicos da classe N, consistem em pozolanas naturais e artificiais, sendo os materiais vulcânicos de caráter petrográfico, terras diatomáceas e argilas calcinadas. Os da classe C são as cinzas volantes produzidas pela combustão de carvão mineral em usinas termoelétricas. E os materiais de classe E, são pozolanas não enquadradas nas classes anteriores.

Segundo a ASTM 618-95 citado por Kanning (2010), as pozolanas são classificadas nas classes N, F e C. As pozolanas da classe N, são pozolanas cruas ou calcinadas, originadas de terras diatomáceas, quartzo de opalina e xistos: tufo vulcânicos e argilas. Os materiais pozolânicos da classe F, consistem em cinzas volantes produzidas pela incineração de carvão betuminoso ou antracito, tendo atividade pozolânica. Por último o material da classe C é a cinza oriunda de carvão betuminoso ou lignina, apresentando propriedades pozolânicas e cimentantes.

A NBR 12653 (ABNT,1992) indica que os materiais pozolânicos devem estar dentro dos parâmetros químicos e físicos, conforme mostra o quadro 2.1.



QUADRO 2.1 – Parâmetros químicos e físicos das argamassas conforme NBR12653

| Exigências químicas e físicas dos materiais pozolânicos       |                                |     |     |
|---|--------------------------------|-----|-----|
| Exigências Físicas  |                                |     |     |
| Propriedades  | Classes de Material Pozolânico |     |     |
|   | N                              | C   | E   |
| Material retido na peneira $\mu\text{m}$ , % máx.             | 34                             | 34  | 34  |
| Índice de atividade pozolânica                                |                                |     |     |
| Com cimento aos 28 dias, em relação controle, % mín.          | 75                             | 75  | 75  |
| Com cal aos 7 dias, em Mpa.                                   | 6                              | 6   | 6   |
| Água requerida, % máx.  | 115                            | 110 | 110 |
| Exigências Químicas   |                                |     |     |
| Propriedades  | Classes de Material Pozolânico |     |     |
|   | N                              | C   | E   |
| $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , % mín. | 70                             | 70  | 50  |
| $\text{SO}_3$ , % máx.  | 4                              | 5   | 5   |
| Teor de umidade, % máx.                                       | 3                              | 3   | 3   |
| Perda ao fogo, % máx.   | 10                             | 6   | 6   |
| Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$ , % máx.         | 1,5                            | 1,5 | 1,5 |

Fonte: O autor

## 2.4 MATERIAIS POZOLÂNICOS

Souza (2003) *apud* Christófolli (2010) indica que as pozolanas podem ser naturais como as cinzas vulcânicas e as terras diatomáceas ou industriais originadas de algum processamento industrial como a cinza volante originada na combustão do carvão mineral em termoelétricas, a sílica ativa adquirida nos eletrofiltros na fabricação das ligas de silício, a cinza de casca de arroz e as argilas calcinadas.

De acordo com NBR 12653 (ABNT, 1992) os materiais pozolânicos são classificados em: naturais (materiais de origem vulcânica com teor de  $\text{SiO}_2$  superior à 65% ou de origem sedimentar com atividade pozolânica), para serem incorporados ao concreto ou argamassa esses materiais em geral devem passar pelo processo de britagem, moagem, classificação por tamanho e dependendo da utilização é necessário ativação para uma maior e mais ativa superfície específica. As pozolanas artificiais são materiais proveniente de tratamento térmico sendo as argilas calcinadas ou termicamente ativadas ou subprodutos industriais com atividade pozolânica (cinza volantes, cinzas de casca de arroz, sílica ativa, etc).

Metha (1987) afirma que não é fácil classificar uma pozolana natural, pois sendo um material natural, apresenta diversos componentes que reagem com o hidróxido de cálcio, e a sua composição e propriedades também variam muito. A designação de materiais naturais consiste em todos materiais pozolânicos oriundos de rochas ou minerais vulcânicos (com exceção das terras diatomáceas) o qual são britadas, moídas, classificadas e termicamente ativadas devido à presença de impurezas na sua composição (argilo minerais) que minimiza sua atividade pozolânica.

A reatividade de uma pozolana pode ser medida através do ensaio de pozolanicidade, processo químico no qual se mede o grau de agrupamento entre a pozolana e o hidróxido de cálcio.

Baseando-se nos principais constituintes que reagem com a cal componentes dos materiais, as pozolanas naturais podem ser classificadas em : vidro vulcânico, tufo vulcânico, sílica opalina e terras diatomáceas.

#### 2.4.1 Vidro Vulcânico

É assim denominado para assinalar as rochas vulcânicas extrusivas compostas por material vítreo que não cristaliza permanecendo em estado amorfo.

Os vidros vulcânicos correspondem em geral à estabilização de lavas ácidas, possuindo textura microporosa que propicia grande superfície específica, sendo responsável pela atividade química do material e também são ricos em compostos reativos, principalmente o silicato de alumínio.

Mcphie, Doyle e Allen (1993); *apud* Montanheiro (2011) descrevem que o vidro vulcânico é resultado do resfriamento rápido de silicatos fundidos.

#### 2.4.2 Tufo Vulcânico

Rochas vulcânicas de granulação média à fina, resultantes da ação hidrotérmica sobre depósitos de materiais magmáticos (cinzas vulcânicas) e pulverização de rochas pré-existentes (PERONI, 2007 e MINEROPAR, 2006). A composição dos fragmentos pode ser de três tipos: Tufo vulcânico cristalino, Tufo vulcânico lítico e tufo vulcânico vítreo. O tufo vulcânico cristalino é composto em

mais de 75% de cristais vulcânicos e fragmentos de rochas ejetados. No tufo vulcânico lítico predominam fragmentos de rochas cristalinas. E por último o tufo vulcânico vítreo o qual mais de 75% da sua composição é composta por cinza vulcânica endurecida.

#### 2.4.3 Sílica Opalina e Terras Diatomáceas

Formadas pela deposição da sílica gel hidratada resultado da deposição de óxidos solúveis lixiviados. As sílicas opalinas são altamente reativas à cal e sua elevada área de superfície requer um consumo excessivo de água, sendo prejudicial à durabilidade e resistência dos concretos e argamassas (METHA & MONTEIRO, 1994). Estes materiais comumente possuem grande quantidade de argilominerais, necessitando de calcinação para serem utilizados como materiais pozolânicos.

A terra diatomácea é um dos principais tipos de sílica opalina, é formada de compostos hidratados de sílica não-cristalina, consiste num sedimento amorfo de origem orgânica o qual foi originado da parede celular de organismos aquáticos, como as algas microscópicas marinhas (SANTOS, 1992).

Com baixa massa específica aparente a terra diatomácea é um material leve, sua coloração varia do branco ao cinza escuro. E além disso maior parte das terras diatomáceas apresentam dimensões variadas entre 4 e 5  $\mu\text{m}$ , existindo em mais de 12.000 espécies diferentes (SOUZA *et al.* 2003).

Segundo Montanheiro (2002b) As terras diatomáceas se sobressaem como uma das principais substâncias naturais pozolânicas.

As pozolanas de origem artificial junto com os subprodutos industriais resultantes de processos de queima à temperaturas específicas de materiais naturais são apresentadas conforme segue, sendo as cinzas volantes, sílica ativa, argila calcinada, metacaulim, escória granulada de alto forno, cinzas de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e a cinza da casca de castanha de caju.

#### 2.4.4 Cinzas Volantes

As cinzas volantes são resíduos coletados através da precipitação eletrostática ou captação mecânica das poeiras que acompanham os gases de combustão dos fumos de exaustão de centrais termoelétricas alimentadas por carvão. Conforme indicado por Neville (1982) essas cinzas constituem-se nas pozolanas artificiais mais comuns.

As partículas de carvão pulverizado continuam na chama oxidante (1200°C à 1600 °C) motivando a fusão total ou fusão parcial do material e a imensa quantidade de cinza gerada muda em função da qualidade do carvão. Formando assim dois tipos de cinzas : pesadas e volantes.

A granulometria das cinzas pesadas são mais grossas que a granulometria das cinzas volantes, com isso elas caem em tanque de resfriamento e são removidas.

As cinzas volantes possuem partículas muito finas, com isso elas são arrastadas pelos gases provenientes da queima do carvão e coletadas com precipitadores eletrostáticos ou métodos mecânicos que coletam as partículas antes de serem emitidas na atmosfera, representando assim 80 a 85% das cinzas produzidas.

As propriedades químicas das cinzas variam com a composição do carvão e impurezas contidas no processo. De acordo com Camões (2002) 85% da composição química das cinzas possui compostos químicos e cristais de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e cal ( $\text{CaO}$ ). Esta cinza é a mais reativa porque contém a maior parte de cálcio na forma de compostos cristalinos reativos.

Metha e Monteiro (1994) expõe que as cinzas volantes podem ser divididas em duas categorias em função das diferenças de composição mineralógica e suas propriedades quanto ao teor de cálcio. A cinza com menor teor de cálcio é comumente um material de combustão do antracito e carvões betuminosos que possuem quantidades de  $\text{CaO}$  total menores que 10%. A cinza com elevado teor de cálcio geralmente é um produto de combustão do lignito ou de carvões sub-betuminosos contendo normalmente de 15 a 30% de  $\text{CaO}$ .

As partículas das cinzas são esféricas o que é vantajoso com relação à quantidade da água de amassadura, são partículas muito finas com diâmetros entre 1 e 150  $\mu\text{m}$ , porém a maior parte está abaixo de 45  $\mu\text{m}$ .

As cinzas volantes podem ser utilizadas no concreto para corrigir a granulometria do agregado miúdo ou como substituição parcial do cimento. A distribuição granulométrica das partículas, as características de superfície e a morfologia da cinza volante usada como adição mineral ao concreto desempenha grande influência no consumo de água, na trabalhabilidade do concreto fresco e na velocidade de propagação da resistência do concreto endurecido.

A utilização das cinzas no concreto fresco como substituta parcial do cimento, reduz a exsudação, auxilia o bombeamento, retarda o início de pega e aumenta a trabalhabilidade. No concreto endurecido a cinza diminui a resistência nas idades iniciais e pode aumentar ou manter a resistência como se fosse um cimento sem adição, nas idades finais.

#### 2.4.5 Sílica Ativa

A sílica ativa ou microssílica como é conhecida comercialmente é um subproduto industrial oriundo da produção das ligas de ferro silício (usado na produção de aços comuns) ou silício metálico (usado na fabricação de componentes eletrônicos, silicone e alumínio).

A sílica ativa é produzida em forno elétrico de fusão, do tipo arco voltaico, em temperaturas maiores que 2000°C motivando a reação do quartzo de alta pureza com o carvão. No processo de redução do quartzo, o silício é liberado na forma de gás (monóxido de silício gasoso – SiO) e levado a zonas de temperaturas menores, no qual entra em contato com o ar e oxida na forma de óxido de silício (SiO<sub>2</sub>).

Existem vários tipos de sílica ativa referente à composição química, cor, distribuição granulométrica. Esta variação ocorre em função do tipo de liga formada, tipo de forno, composição química e dosagem das matérias-primas.

A sílica ativa é um material muito fino, constituída por altas quantidades de SiO<sub>2</sub> (entre 85% à 98%), com superfícies esféricas amorfas, com diâmetro entre 0,1 e 0,2  $\mu\text{m}$  e área superficial em torno de 20.000m<sup>2</sup>/kg Mehta (1987) citado por Pinheiro (2008).

Nos materiais cimentícios a sílica ativa pode ser utilizada para aumentar a resistência mecânica e compacidade, em virtude das reações pozolânicas e do efeito microfíler que acontece em função da diminuição da porosidade total devido ao preenchimento dos vazios de gel e de poros capilares. Com isso a sílica ativa é proposta como um produto alternativo para aperfeiçoar as propriedades de concretos e argamassas.

A sílica ativa gera benefícios quando utilizadas no concreto. No concreto fresco a sílica colabora com a diminuição da segregação e da exsudação, porém é necessário a utilização de plastificantes e superplastificantes para garantir a trabalhabilidade da mistura

A adição de sílica ativa em proporções adequadas no concreto endurecido, aumenta a resistência à compressão dos concretos, a porosidade e permeabilidade diminuem, e a resistência aos agentes agressivos aumentam, em virtude das partículas finas da sílica ocuparem os vazios entre o cimento e o agregado deixando o conjunto mais denso (COUTINHO, 1997).

#### 2.4.6 Argilas Calcinadas

A argila calcinada consiste em um agregado artificial de argila resultado da transformação de um solo ou folheto argiloso o qual foi anteriormente processado num material inerte e com resistência mecânica à uma determinada finalidade.

Metha (1987) Evidencia que as argilas só apresentam reatividade após passar por um processo térmico, sendo submetidas à temperaturas entre 600 °C e 1000 °C, sofrendo alterações nas suas propriedades físicas e químicas. A estrutura cristalina dos silicatos que compõe a argila é alterada, transformando-a em compostos amorfos que reagem com a cal em uma temperatura ambiente. Contudo não são todas as argilas calcinadas que possuem comportamento pozolânico, pois as argilas que apresentam grande quantidade de minerais muito cristalinos em sua composição, como o quartzo e o feldspato, não produzem um material reativo com a cal.

As caulinitas, montmorillonitas e as illitas são os minerais que compõem as argilas mais utilizadas para produção de pozolanas (SOUZA SANTOS, 1992).

As argilas ricas em caulinita e montmorillonitas precisam ser calcinadas em temperaturas de 540°C à 980°C para possuir resultados de atividades pozolânicas, porém se as montmorillonitas apresentar muitos cátions de sódio livres, sua utilização em concretos e argamassas, precisa ser restringida em virtude das possíveis reações alcali-agregado. E as argilas ricas em mica, vermiculita e clorita não apresentam atividade pozolânica aceitável quando calcinadas com temperaturas abaixo de 1100°C (MIELENZ 1983 *apud* METHA, 1987).

O progresso das atividades pozolânicas das argilas calcinadas depende da procedência e da abundância do argilo mineral, das condições de calcinação e da finura do material final (OLIVEIRA, 2006).

#### 2.4.7 Metacaulim

O metacaulim é um subproduto sílico-aluminoso produzido da calcinação do rejeito do caulim, sendo proveniente da calcinação das argilas caulínicas em temperaturas que variam entre 600°C e 900°C. Com esta temperatura ocorre a remoção dos íons hidroxila da sua estrutura cristalina, resultando na destruição do arranjo atômico e formando a partir dos argilominerais um componente amorfo, possuindo grande estabilidade termodinâmica denominado metacaulinita ( $Al_2Si_2O_7$ ) sendo responsável pela atividade pozolânica, com produção predominante de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e  $C_4AH_x$ . DAL MOLIN (2005) citado por PINHEIRO (2008).

Para evitar a fusão do material, a temperatura deve ser controlada, porém é necessário garantir que o material produzido seja de alta pureza e reaja com o hidróxido de cálcio –  $Ca(OH)_2$ . De acordo com BARATA (1998), temperaturas acima de 900°C produzem compostos cristalinos com área superficial específica inferior ao necessário e pouca atividade pozolânica.

Conforme Malhotra e Metha (1996) as características físicas do metacaulim, como tamanho das partículas e área específica são um dos fatores essenciais que

podem propiciar a alta atividade pozolânica, sendo chamado por alguns autores de metacaulim de alta reatividade (MCAR). Entretanto durante a calcinação das argilas ocorre a aglomeração das partículas resultando em uma maior granulometria. Com isso é necessário realização de moagem para que o metacaulim e o MCAR atinjam todo o potencial de suas atividades pozolânicas. O MCAR também pode ser obtido da indústria produtora de cobertura de papel o qual consiste em um caulim de extrema finura, brancura e pureza.

Segundo Rocha (2005) a alta reatividade do metacaulim pode ser explicada em virtude da sua reação química com o hidróxido de cálcio livre que compõe a pasta de cimento ligado a sua finura o qual gera a realização de micro-preenchimento de poros da mistura.

A utilização do metacaulim em pastas de cimento Portland colabora para uma maior resistência à compressão e durabilidade, pois forma uma estrutura de poros com dimensões menores.

#### 2.4.8 Escória granulada de alto forno

A NBR 5735 (ABNT,1991) define que a escória granulada de alto forno é um subproduto do tratamento do minério de ferro em alto forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, composto em sua maior parte de silicatos e aluminatos de cálcio.

O processo de obtenção da escória é realizado no alto forno (unidade industrial) no qual os óxidos presentes no minério de ferro se reduzem e as impurezas que os acompanham são separadas.

As escórias são formadas pela fusão das impurezas do minério de ferro, junto com a adição dos fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque. As escórias de alto forno podem ter resfriamento lento ou rápido, quando a escória de alto forno sofre um resfriamento lento adquire-se a escória expandida apresentando coloração entre cinza escuro e marrom. Essa escória não pode ser utilizada como material cimentício, podendo ser utilizada apenas como agregado para concretos e asfaltos. Para a escória que sofre resfriamento rápido obtém-se a escória granulada ou



peletizada o qual consiste num material amorfo e reativo, sendo usada como adição ou substituição parcial do cimento Portland e na fabricação de cimentos compostos, sendo o cimento Portland de alto forno (CPIII) e o cimento Portland composto com escória (CPIII - E).

De acordo com Litte (1999) os concretos compostos com escória granulada de alto forno apresentam boa durabilidade, alta resistência à meios sulfatados, baixo calor de hidratação e maior ganho de resistência a longo prazo.

#### 2.4.9 Cinza de casca de arroz

A cinza da casca de arroz é um resíduo proveniente do beneficiamento do arroz, é obtida da combustão da casca de arroz, usada pelas indústrias beneficiadoras para se gerar calor e vapor necessários aos processos de secagem e parboilização dos grãos.

Com isso uma elevada quantidade de cinza é produzida, gerando um grande volume de resíduos. Santos (2006) indica que a cinza da casca de arroz é o resíduo agroindustrial que representa um dos maiores volumes de material disposto na natureza.

Calcula-se que cada tonelada de arroz em casca, gera em torno de 200 kg de casca e através da combustão gera 40 kg de cinzas (METHA e MONTHEIRO, 1994).

O arroz possui grandes quantidades de sílica, principalmente na casca. Essa sílica geralmente possui uma forma amorfa hidratada de sílica com uma estrutura em estado parecido ao vítreo ou na forma de gel. Quando ocorre a combustão, parte da massa é convertida em cinza, adquirindo-se uma estrutura celular e porosa com alta superfície específica (50 à 100 m<sup>2</sup>/g) e grande quantidade de sílica em torno de 85 a 95%.

Para que a sílica seja adquirida a partir da casca de arroz, além do processo de combustão, a sílica pode ser obtida a partir de tratamentos físico-químicos da casca, seguidos de queima e através de processos microbiológicos (POUEY, 2006 *apud* NETTO, 2006).

A cinza da casca de arroz apresenta colorações que variam conforme o processo de combustão da celulose e das transformações estruturais que ocorrem

no material frente à variação de temperatura. A cinza mais escura possui maior teor de carbono, visto que possui uma grande quantidade de matéria orgânica que não foi queimada, a cor branca da cinza, indica uma completa oxidação do carbono da cinza e as cinzas de cor branco rosada mostram que existe sílica na forma de cristobalita e tridimita o qual foram queimadas em longos tempos e altas temperaturas.

Em virtude das características de possuir altas quantidade de sílica, forma angular, estrutura altamente celular, área superficial elevada e dependendo do grau de moagem, possuir diâmetro médio inferior à 45  $\mu\text{m}$ , a cinza da casca de arroz torna-se uma superpozolana, acarretando benefícios sobre as propriedades do concreto o qual pode-se citar a redução da permeabilidade.

#### 2.4.10 Cinza de Casca da Castanha de Caju

A produção da cinza ocorre após misturada da casca com cardo durante o processo de decorticação, que separa a casca da castanha. A cinza é obtida com a queima da casca para a geração de calor nas caldeiras de decorticação (LIMA et al., 2008).

A cinza possui aproximadamente 5% do peso da castanha inicial, e em virtude da produção da cajucultura, a formação dessas cinzas pode chegar anualmente à obter a produção de 15.000 toneladas.

Poucas são as pesquisas encontradas com a cinza da casca de castanha de caju, mesmo que com fins diversos ao da indústria da construção civil, porém pode ocorrer uma possível potencialidade em relação à utilização da cinza de casca de castanha de caju, em virtude dos resultados obtidos com outras cinzas provenientes da agroindústria, devido à grande quantidade de sílica em materiais orgânicos. Cincotto e Kaupatez (1988) citado por Lima (2008).

A cinza da casca de castanha de caju foi avaliada como adição mineral em matrizes de cimento Portland, sendo realizada através de estudos da pozolanicidade e da resistência das argamassas. Para a resistência à compressão das argamassas, os resultados mostraram que só os teores abaixo de 5% de cinza de casca de castanha de caju apresentaram valores que correspondem ao traço convencional

sem adição da cinza e os teores de cinza acima de 5% diminuirão em mais de 70% os valores da resistência à compressão das argamassas na idade de 91 dias. Os resultados para o índice de pozolanicidade (IP) com a cinza da casca de castanha de caju não compreenderão o valor mínimo requerido pelas normas, o índice de atividade pozolânica não pode ser o único método julgado para definir a reatividade de uma cinza (LIMA *et al.*, 2008).

#### 2.4.11 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

A cinza de bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo gerado após a extração do caldo da cana para produção de álcool. Como descreve Paula *et al.* (2008) 95% de todo o bagaço produzido no Brasil são empregados na queima em caldeira para geração de vapor em caldeiras. A cinza gerada constitui-se de sílica em sua maior quantidade de SiO<sub>2</sub> (CORDEIRO *et al.*, 2008).

Mesa Valenciano e Freire (2004) utilizaram a cinza do bagaço de cana de açúcar em misturas de solo-cimento. A incorporação dessas cinzas mostraram que à resistência à compressão simples dos solos aumenta aos 60 dias de idade, com a utilização de 3% do cimento ou substituição parcial de 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar também pelo cimento.

A utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cerâmicas vermelhas por Borlini *et al.* (2006) indicaram que 10% de incorporação de cinza na massa da cerâmica fecha a porosidade aberta e a incorporação de até 10% de cinza calcinada à 1200°C, não mudou a resistência mecânica comparando a massa cerâmica.

#### 2.4.12 Cinza de folha de bananeira

A bananeira é uma espécie típica de regiões tropicais e subtropicais, possuindo grande importância econômica e social, servindo como fonte de renda e alimento para milhões de pessoas (FAO, 2009 *apud* RIBEIRO *et al.*, 2010).

A banana constitui importante fonte de alimento, podendo ser utilizada, verde ou madura, crua ou processada. A banana é a segunda fruta mais cultivada no

Brasil, depois da laranja, visto que seu consumo per capita aumentou gradativamente, atingindo aproximadamente 31kg/hab/ano (FAO, 2011).

Segundo dados da Fao (2010) o Brasil destaca-se entre os principais produtores mundiais de banana, pois em 2008 o país ocupou a quarta colocação, com produção de 7,1 milhões de toneladas em cerca de 514 mil alqueires.

A produção de banana no Paraná encontra-se principalmente na região litorânea, o qual ocupa 80% da área que fica entre o litoral norte e sul (IAPAR, 2008). Em virtude da bananeira, ser uma fruta de clima tropical ela apresenta melhor desenvolvimento em climas com temperatura média anual na ordem de 22 °C com precipitações pluviométricas superiores a 1200 mm/ano.

A duração do ciclo de desenvolvimento da bananeira é influenciado pelas variações na altitude da região, pois em regiões tropicais com altitude máxima de 300 m acima do nível do mar, o ciclo da produção da bananeira é mais produtivo, ocorrendo entre 8 a 10 meses e para altitudes próximas à 900 m acima do mar, são necessários 18 meses para concluir todo processo de produção (CORDEIRO, 2002 *apud* KANNING, 2010).

De acordo com Kanning (2010), cada pé de banana produz em média cerca de 1343 g de folhas secas, representando anualmente, um potencial nacional de geração de aproximadamente 900 milhões de toneladas de folhas secas.

A Limpeza das folhas velhas e secas é de grande importância para o bom desenvolvimento das bananeiras e dos seus brotos, sendo necessário porque essas folhas dobram junto ao pseudocaule, prejudicando o desenvolvimento das brotações e, com sua eliminação, surgem novas gemas laterais de brotação.

Kanning (2010) pesquisou a avaliação da atividade pozolânica da cinza de folha de bananeira. Os resultados evidenciaram que a cinza de folha de bananeira apresenta atividade pozolânica superior aos valores mínimos indicados nas normas NBR 5751 (ABNT,1992) e 5752 (ABNT, 1992), quando são queimadas com temperaturas de 850 °C e posteriormente moídas em moinho de bolas. O tempo ideal de moagem da cinza de folha de bananeira conforme descrito por Kanning (2010) apresenta-se em 30 minutos, com uma massa específica de 2,53g/cm<sup>3</sup>. Contudo conclui-se que a cinza proveniente da queima da folha de bananeira apresenta atividade pozolânica, podendo ser adicionada em concretos e argamassas.

## 2.5 ARGAMASSA

A argamassa é uma mistura homogênea de aglomerante de origem mineral, agregado miúdo, água e quando necessário aditivos em proporções adequadas para determinados resultados esperados, com capacidade de aderência e endurecimento (YAZIGI, 2008 e PETRUCCI, 1975).

As argamassas são empregadas na execução de revestimentos internos ou externos, em assentamentos de pisos, alvenaria e revestimento cerâmicos, podendo ser preparadas na obra com seus componentes sendo misturados na hora da utilização ou industrializadas em fábricas, tratando-se de uma mistura seca à qual ocorre somente a adição de água no momento do uso da mesma.

Segundo a NBR 13529 (ABNT, 1995), a sua função principal é argamassa de assentamento e argamassa de revestimento.

## 2.6 CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS QUANTO A FUNÇÃO

### 2.6.1 Argamassa de assentamento

A argamassa de assentamento tem como característica possuir adequada resistência mecânica, grande poder de aderência e grande capacidade de deformação (THOMAZ, 1992).

Segundo Sabbatini (1986), dentro do conjunto da alvenaria à argamassa de assentamento possui funções de unir os componentes de alvenaria para que o conjunto suporte aos vários tipos de esforços; distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente do bloco, absorver as deformações a que a alvenaria estiver sujeita; e selar o conjunto quando a alvenaria for aparente (SABBATINI).

Para que a argamassa atenda aos quesitos de qualidade e durabilidade no estado fresco observam-se as características de trabalhabilidade e capacidade de retenção de água; enquanto no estado endurecido destacam-se: resistência mecânica, capacidade de absorver deformações, resistência de aderência, retração na secagem e durabilidade.

Em geral, a importância da trabalhabilidade está ligada ao correto preenchimento das juntas entre componentes e, em consequência, na precisão das características geométricas da parede. O incorreto controle de qualidade no estado fresco podem decorrer em quedas acentuadas da resistência do elemento e futuros problemas patológicos.

À capacidade de retenção de água associa-se à trabalhabilidade, pois a perda de pequenas quantidades de água da argamassa reflete nas características de fluência e plasticidade. Por outro lado, a pouca capacidade e retenção de água se traduz numa diminuição da capacidade de absorver deformações e no aumento do potencial de retração. Outra consequência da pouca retenção de água seria a diminuição da aderência na interface junta de argamassa-bloco, devido a redução da hidratação das partículas de cimento.

A aderência é normalmente reconhecida como a mais importante das propriedades da argamassa de assentamento. Uma diminuição neste parâmetro de resistência se traduz numa diminuição da resistência do elemento à flexão e ao cisalhamento.

## 2.6.2 Argamassa de revestimento

A argamassa de revestimento, conforme a norma NBR 13749 (ABNT, 1996) aplica-se a paredes, pisos e tetos, como revestimento de camada única, ou para chapisco, emboço e reboco. Permite que os acabamentos de superfície sejam: somente sarrafeado no caso de aplicação posterior de reboco; desempenado ou sarrafeado no caso de revestimento posterior de placas cerâmicas; desempenado ou chapiscado, no caso do reboco constituir uma única camada de revestimento.

As características ideais dos revestimentos argamassados descritas na norma NBR 13749 (ABNT, 1996) são:

### 1) *Condições do revestimento:*

- ser compatível com o acabamento decorativo do revestimento superficial;
- ter resistência mecânica uniforme;
- ser constituído por uma ou mais camadas de argamassas uniformes;

- ter propriedade hidrofugante. No caso de não se empregar argamassa hidrofugante, deve ser executada pintura específica;
- ter propriedade impermeabilizante, em caso de revestimento externo em contato com o solo;
- resistir à ação de variações normais de temperatura e de umidade.

2) *Aspecto*: deve apresentar textura uniforme, sem imperfeições, como: cavidades; fissuras; manchas e eflorescências.

3) *Espessura*: quando houver necessidade de empregar revestimento com espessura superior ao da quadro 2.2, devem-se tomar os cuidados necessários para prover e garantir a aderência do revestimento.

QUADRO 2.2 - Espessura mínima e máxima do revestimento (NBR 13749/96)

| Revestimento              | Espessura ( mm )    |
|---------------------------|---------------------|
| Parede interna            | $5 \leq e \leq 20$  |
| Parede externa            | $20 \leq e \leq 30$ |
| Tetos internos e externos | $e \leq 20$         |

4) *Prumo*: a diferença de prumo do revestimento para paredes internas de argamassas não deve ser maior que  $h/900$ , sendo  $h$  a altura da parede em metros. Para paredes externas a norma não especifica qualquer limite.

5) *Nivelamento*: o nivelamento de revestimentos para tetos de argamassas, não deve ser maior que  $L/900$ , sendo o  $L$  o comprimento do maior vão do teto, em metros.

6) *Planeza*: após remoção das areias soltas sob a superfície, as ondulações não devem superar 3 mm em relação a uma régua de 2 m de comprimento. Já as irregularidades abruptas não devem superar 2 mm em relação a uma régua de 20 cm de comprimento.

7) *Aderência*: os revestimentos de argamassa devem apresentar aderência com a base do revestimento e entre suas camadas constituintes. A Norma NBR13749 (ABNT, 1996) especifica que deve ser avaliado, através de ensaios de percussão, realizados através de impactos leves com ferramenta adequada, de modo a verificar se há a existência de trechos com som cavo. A avaliação deve ser feita em cerca de um metro quadrado, para cada 100 m<sup>2</sup> de paredes. Os trechos que apresentarem som cavo deverão ser integralmente percutidos para se estimar a área total com falha na aderência. Quando a fiscalização julgar necessário, devem ser realizados ou solicitados a laboratórios a execução de seis ensaios de resistência à tração em pontos escolhidos aleatoriamente, a cada 100 m<sup>2</sup> ou menos da área suspeita. Destes seis pontos de ensaio, pelo menos quatro deverão ser iguais ou superiores aos indicados no quadro 2.3.

QUADRO 2.3 - Resistência à tração para emboço camada única (NBR 13749/96)

| Local  |         | Acabamento                  | Ra (Mpa) |
|--------|---------|-----------------------------|----------|
| Parede | interna | Pintura ou base para reboco | ≥ 0,20   |
|        |         | Cerâmica ou laminado        | ≥ 0,30   |
|        | externa | Pintura ou base para reboco | ≥ 0,30   |
|        |         | Cerâmica                    | ≥ 0,30   |
| Teto   |         |                             | ≥ 0,20   |

## 2.7 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

### 2.7.1 Trabalhabilidade

A Rilem (1982) descreve que a trabalhabilidade é a facilidade do pedreiro trabalhar com a argamassa, sendo, o conjunto de fatores da argamassa que conferem boa qualidade e produtividade na sua aplicação. Para argamassas de revestimento, traduz-se em uma adequada aderência ao substrato e facilidade de acabamento superficial.

Selmo (1989), acrescentou uma definição do ponto de vista prática muito expressiva no qual relata que:



*“uma argamassa de revestimento tem boa trabalhabilidade quando se deixa penetrar com facilidade pela colher do pedreiro, sem ser fluida; ao ser transportada para a desempenadeira e lançada contra a base mantém-se coesa, porém sem aderir à colher; e permanece úmida o suficiente para ser espalhada, sarrafeada e ainda receber o tratamento superficial previsto”.*

### 2.7.2 Consistência e plasticidade

É a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a conservar-se deformada após a redução das tensões de deformação. De acordo com Cincotto et al. (1995), a plasticidade e a consistência são as propriedades que efetivamente caracterizam a trabalhabilidade, e são influenciadas pelo teor de ar aprisionado, natureza e teor de aglomerantes e pela intensidade de mistura das argamassas.

Segundo Cascudo et al. (2005), a plasticidade adequada para cada mistura, de acordo com a finalidade e forma de aplicação da argamassa, demanda uma quantidade ótima de água o qual significa uma consistência ótima, sendo esta função do proporcionamento e natureza dos materiais.

A Rilem (1982), no documento MR-3, admite que a consistência e a plasticidade são as propriedades reológicas básicas que caracterizam a trabalhabilidade das argamassas e define consistência como “a propriedade da argamassa pela qual esta tende a resistir à deformação”, isto é, a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob a ação das cargas. A plasticidade por sua vez, é a propriedade pela qual, a argamassa tende a reter a deformação, após a redução do esforço de deformação.

Os métodos de ensaio que empregam a penetração de um corpo no interior da argamassa, avaliam a sua consistência e os métodos que utilizam de vibração ou choque para introduzir uma deformação à argamassa, medem a consistência e a plasticidade ao mesmo tempo. Geralmente, classificam-se as argamassas segundo a consistência em argamassas secas, plásticas ou fluídas.

### 2.7.3 Retenção de água

Define-se retenção de água como a capacidade da argamassa em reter a água de amassamento quando em contato com uma superfície absorvente. Ou ainda, é a capacidade da argamassa no estado fresco em manter sua consistência quando submetida a solicitações que provocam perda de água de amassamento seja por evaporação, sucção ou absorção por uma superfície (CINCOTTO, 1995).

Segundo Guimarães (1995), a retenção de água nas argamassas de revestimento interfere no tempo disponível de aplicação, regularização e desempenho da argamassa. Esta propriedade também influi em algumas propriedades do estado endurecido pois afeta as condições de hidratação do cimento e a carbonatação da cal que são os responsáveis pela evolução do endurecimento da argamassa. Como a retenção interfere na velocidade de evaporação da água de amassamento, também influi na retenção por secagem das argamassas. Selmo (1989) resume que a retenção de água das argamassas interfere não só no trabalho de acabamento do revestimento, mas também em propriedades no estado endurecido, seja por questões de espalhamento, contato com a base e retenção de umidade.

Cincotto (1985) defende que a perda substancial de água das argamassas quando em contato com uma base absorvente, ocorre nos primeiros cinco minutos e a maior perda ocorre nos dois primeiros minutos.

### 2.7.4 Massa específica aparente e teor de ar incorporado

Segundo Cincotto (1985), a massa específica aparente constitui-se na relação entre a massa do material e o volume incluindo os vazios a uma temperatura estabelecida. Os vazios presentes na argamassa contêm ar aprisionado ou espaços deixados pela evaporação do excesso de água de amassamento.

Para argamassas produzidas com materiais de mesma massa específica, porém com diferentes volume e vazios, a que apresentar o menor volume de vazios apresentará a maior massa específica. Sabe-se ainda que o teor de ar tem influência sobre a trabalhabilidade e também na resistência de aderência dos revestimentos.

### 2.7.5 Exsudação da água

O fenômeno de separação de parte da água de amassamento de uma argamassa fresca mantida em repouso sem vibrações ou choques, é definido como exsudação de água. Em geral, nas argamassas de consistência plástica a fluida manifesta-se a exsudação da água. Esta propriedade interfere na trabalhabilidade pois, exige remisturas freqüentes para homogeneização da argamassa e pode interferir na capacidade de adesão da argamassa ao ser lançada contra a base.

### 2.7.6 Coesão e Tixotropia

A coesão, segundo Cincotto *et al.* (1995), refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa no estado fresco e às ligações químicas da pasta aglomerante. Ainda, segundo os autores, a influência da cal sobre a consistência e a trabalhabilidade das argamassas provém das condições de coesão interna que a mesma proporciona, em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão ao agregado.

A tixotropia é a propriedade pela qual um material sofre transformações isotérmicas e reversíveis do estado sólido para o estado gel (SELMO, 1989). O estado gel, no caso das argamassas, diz respeito à massa coesiva de aglomerante na pasta, mais densa após a hidratação (CINCOTTO *et al.*, 1995).

## 2.8 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

### 2.8.1 Resistência mecânica

Segundo Cincotto (1985), a resistência mecânica das argamassas pode variar dependendo das diferentes solicitações a que estará submetida. A argamassa deverá ter resistência para suportar a movimentação da base que poderá ocorrer por recalques ou por variação dimensional por umedecimento e secagem ou ainda pela dilatação e contração do revestimento devido às variações de temperatura.

Estas solicitações poderão provocar fissuras ou falha na aderência entre a argamassa e a base ou entre as camadas de argamassa. Apesar da resistência

mecânica não ser uma propriedade fundamental como o é para concreto, justifica-se a análise desta propriedade pois, está relacionada com várias outras propriedades como por exemplo com a elasticidade das argamassas que interferem na durabilidade dos revestimentos argamassados.

### 2.8.2 Módulo de deformação

Segundo Cincotto (1995), o módulo de deformação representa a capacidade das argamassas de dissiparem as tensões a que estão submetidas. Selmo (1989), comenta que “os revestimentos devem apresentar capacidade de deformação para poder deformar-se sem ruptura ou através de microfissuras que não comprometam a aderência, estanqueidade e sua durabilidade.

A elasticidade das argamassas pode ser expressa pelo seu módulo de elasticidade quando submetida a esforços de compressão. Observa-se que durante a retração das argamassas por perda de umidade aliada aos efeitos de retração térmica ou de esforço de natureza externa, a argamassa estará sob um estado de tensões internas de tração e cisalhamento.

### 2.8.3 Aderência

Conceitua-se aderência como a capacidade da argamassa de resistir à tensões normais ou tangenciais à superfície de interface entre camadas. Como descreve Sabbatini (1990), a aderência deve ser analisada quanto à sua resistência, isto é, capacidade mecânica de resistir a esforços normais de tração e tangenciais de cisalhamento, e também quanto à extensão de aderência que é definida pela relação entre a área de contato efetivo e a área total da base a ser revestida.

Cincotto (1995), esclarece que a aderência é significativamente influenciada pelas condições da base, como a porosidade e absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e pelas próprias condições de execução onde exige-se um assentamento homogêneo sem descontinuidades excessivas. Deve entretanto ser enfatizada também a influência da capacidade de retenção de água da argamassa na aderência do revestimento.

#### 2.8.4 Permeabilidade

Cincotto (1995) descreve que a permeabilidade caracteriza a passagem de água através da argamassa ocasionada por infiltração sob pressão, por capilaridade onde a água é absorvida pelos materiais quando em contato superficial com a água, mas com baixa pressão hidrostática, ou ainda por difusão de vapor d'água.

Da permeabilidade ao vapor d'água depende a velocidade de secagem do revestimento após um período de chuva ou da umidade de condensação interna. Josiel (1981) comenta que a absorção de água capilar de um revestimento deve ser inferior à da base a revestir e quanto menor esta permeabilidade, melhor a proteção da base contra as intempéries, desde que possua permeabilidade ao vapor d'água.

Nos revestimentos permeáveis, as camadas de revestimento devem ter uma capacidade mínima de permeabilidade ao vapor d'água para permitir a evaporação da água provenientes de condensação ou umidade de infiltração que penetra através de fissuras.

#### 2.8.5 Elasticidade

Segundo Sabbatini (1984), elasticidade é a capacidade que a argamassa no estado endurecido apresenta em se deformar sem apresentar ruptura quando sujeita a solicitações diversas, e de retornar à dimensão original inicial quando cessam estas solicitações.

De acordo com Cincotto *et al.* (1995), a elasticidade é, portanto, uma propriedade que determina a ocorrência de fissuras no revestimento e, dessa forma, influi decisivamente sobre o grau de aderência da argamassa à base e, conseqüentemente, sobre a estanqueidade da superfície e sua durabilidade.

A capacidade do revestimento de absorver deformações pode ser avaliada através do módulo de elasticidade, que pode ser obtido através do método estático ou dinâmico. Quanto menor o valor do módulo, maior será a capacidade do revestimento de absorver deformações.

## 2.9 DOSAGEM DAS ARGAMASSAS

O adequado desempenho das argamassas depende fundamentalmente da correta escolha dos materiais e de seu proporcionamento, cujas operações são denominadas de dosagem (LARA *et al.*, 1995). Segundo Carneiro (1999), usualmente a composição e a dosagem das argamassas adotadas no Brasil são feitas com base em traços (massa ou volume) descritos ou especificados em normas internacionais ou nacionais, como Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e cadernos de encargos.

De acordo com o mesmo autor, para argamassas de revestimentos tem-se adotado com mais freqüência os traços de dosagem 1 : 1 : 6 (cimento : cal : areia) e 1 : 2 : 9, em volume, numa proporção aglomerante : agregado de 1 : 3 ou 1 : 4. A escolha de um desses traços está de acordo com o desempenho esperado da argamassa ao longo do tempo, ou seja sua durabilidade.

No entanto, na prática identifica-se o emprego de traços mais pobres, como 1: 4 a 1 : 9 (aglomerante : agregado), como constataram Campitelli *et al.* (1995), não dando qualidade ao revestimento. Embora na presente década os textos normativos sobre revestimentos de argamassa tenham passado por uma grande evolução, constata-se que a NBR 7200 (ABNT, 1998) suprimiu toda e qualquer indicação de traços ou consumos empíricos para a produção de argamassas de revestimentos (MIRANDA, 2000).

As perspectivas são de mudança quanto aos procedimentos para a dosagem de argamassas e as publicações nacionais são ainda divergentes, como se constata pela análise dos trabalhos de Sabbatini *et al.* (1988), Martinelli (1989), Selmo (1989), Campitelli *et al.* (1995), Lara *et al.* (1995), entre outros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O planejamento experimental desta pesquisa foi desenvolvido de modo a verificar as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, tendo como parâmetro de avaliação a maior porcentagem de adição de cinza de folha de bananeira proposto por Kanning (2010), comparado com uma argamassa de referência.

O Programa Experimental teve como base as etapas descritas na seqüência, visando a elucidação dos objetivos propostos, sendo:

- aquisição, acondicionamento e transporte dos materiais ou insumos ao laboratório;
- caracterização física das matérias-primas;
- estudos de dosagem das argamassas sem e com adições minerais;
- realização de ensaios físicos e mecânicos para avaliação das propriedades das argamassas em estado fresco e endurecido.
- elaboração de um banco de dados com avaliação estatística dos resultados e de desempenho do produto obtido.

A execução dos referidos ensaios teve como função avaliar as propriedades das argamassas para adições de 5%; 10%; 15%; 20%; 25% e 30%, considerando os parâmetros como segue:

- fator água/cimento constante após determinação da consistência padrão para a argamassa sem adição atendendo aos quesitos da norma NBR 13276 (ABNT, 2002).
- rompimento de corpos-de-prova de argamassa, segundo recomendações de norma, em idades de 28, 56 e 91 dias para resistência à compressão simples, à tração na flexão, bem como de absorção de água por capilaridade.

As etapas experimentais estão descritas na Figura 3.1.

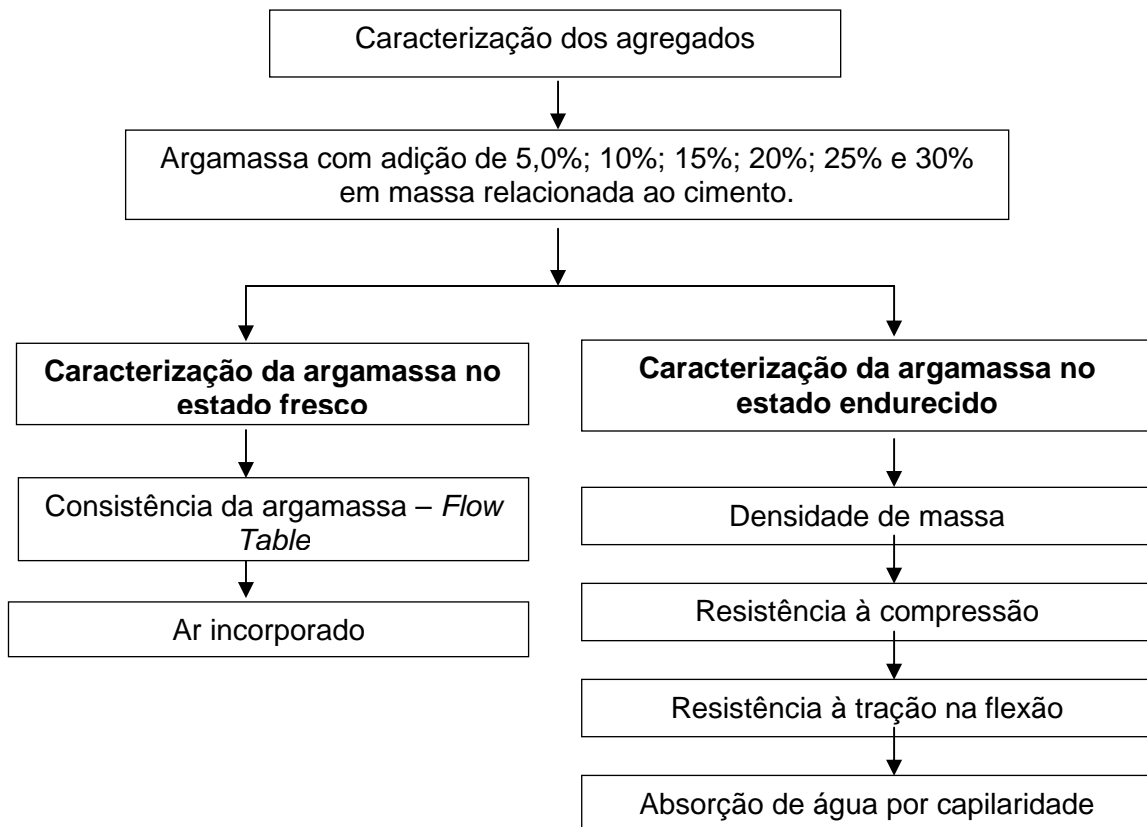


Figura 3.1 - Etapas de ensaio do Programa Experimental

Fonte: O autor

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

#### 3.1.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo natural utilizado na produção das argamassas foi do tipo quartzoso proveniente do Rio Iguaçu na região de Curitiba.

#### 3.1.2 Aglomerante

O cimento utilizado foi do tipo CP II-F 32 (cimento Portland composto com filler calcário e que apresenta resistência mecânica à compressão de 32 MPa, 28 dias após moldado), devido a não existência de materiais pozzolânicos em sua constituição, bem como características apresentadas no Quadro 3.1.



Quadro 3.1 – Características físicas, químicas e mecânicas do Cimento CII – F32

| <b>Análise Física</b>                                    | <b>Itambé</b>            | <b>Especificação ABNT</b> |
|--|--------------------------|---------------------------|
| Peneira #200 (%)   | 3,60                     | ≤ 10,0                    |
| Peneira #325 (%)   | 16,90                    | -----                     |
| Água da pasta de consistência normal (%)                 | 25,2                     | -----                     |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )                    | 3,11                     | -----                     |
| Superfície específica <i>Blaine</i> (m <sup>2</sup> /Kg) | 3370                     | ≥ 2800                    |
| Início de Pega (min)                                     | 215                      | ≥ 1,0                     |
| Fim de Pega (min)  | 255                      | ≤ 10,0                    |
| Expansão à quente (mm)                                   | 1,0                      | ≤ 5,0                     |
| <b>Análise Química (%)</b>                               | <b>Itambé</b>            | <b>Especificação ABNT</b> |
| Perda ao Fogo  | 5,19                     | ≤ 6,5                     |
| Resíduo Insolúvel  | 1,25                     | ≤ 2,5                     |
| <b>Análise Mecânica (MPa)</b>                            |                          |                           |
| <b>Idade (dias)</b>                                      | <b>Resistência (MPa)</b> | <b>Especificação ABNT</b> |
| 1  | 12,1                     | -----                     |
| 3  | 25,6                     | ≥ 10,0                    |
| 7  | 31,9                     | ≥ 20,0                    |
| 28   | 41,0                     | ≥ 32,0                    |

Fonte: Dados da companhia de Cimento Itambé

### 3.1.3 Água

A água utilizada para a produção das argamassas foi proveniente da rede de abastecimento público local, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

### 3.1.4 Adição

O material empregado como adição foi a cinza de folha de bananeira proveniente de Guaraqueçaba-PR Brasil, com massa específica de 2,44 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.1.5 Aditivo

O fator água/cimento foi mantido constante utilizando para tal o aditivo plastificante líquido do tipo Muraplast FK91, da empresa MC-Baucheme Brasil, com base de lignossulfonatos, de pega normal que atua como dispersor de partículas de aglomerante e redutor da tensão superficial da água empregada na mistura. Com densidade de  $1,18 \text{ g/cm}^3$  a dosagem do aditivo para cada argamassa variou conforme consistência de  $255 \pm 10\text{mm}$  não ultrapassando 1,0% da massa do cimento.

## 3.2 ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

### 3.2.1 Ensaio de consistência – *Flow Table*

A trabalhabilidade é uma propriedade fundamental da argamassa no estado fresco, sendo uma combinação de características reológicas como plasticidade, coesão, consistência, viscosidade e adesão, além da densidade.

Uma forma de se avaliar a trabalhabilidade da argamassa é através do ensaio da mesa de consistência estabelecido pela norma NBR 13276 (ABNT, 2002). Nesse ensaio a consistência da argamassa é avaliada por meio do índice de consistência padrão pela mesa *flow table* com abertura da média do diâmetro de  $255 \pm 10\text{mm}$ .

O índice de consistência é obtido a partir do preenchimento de um molde tronco cônico em três camadas com a aplicação de 15, 10 e 5 golpes simultaneamente com o auxílio de um soquete metálico.

Após efetua-se o movimento do prato da mesa de consistência em 30 quedas, uma a cada segundo. Logo após a última queda da mesa medir com o paquímetro o espalhamento do molde do tronco-cônico original da argamassa.

As medidas devem ser realizadas em três diâmetros ao longo do perímetro. O índice de consistência da argamassa corresponde a média das três medidas de diâmetro expressa em milímetros.

### 3.2.2 Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado

A densidade de massa foi determinada conforme a norma NBR 13278 (ABNT, 2005), sendo a argamassa depositada em três camadas no interior de um recipiente com 450 cm<sup>3</sup>, como mostra a Figura 3.2.

As camadas da argamassa são adensadas por meio de uma espátula com 20 golpes cada, seguidos de três quedas do recipiente a uma altura de 3 cm. O referido ensaio possibilita determinar o teor de ar incorporado a partir da massa específica da argamassa avaliada.



Figura 3.2 – Recipiente para determinação da densidade de massa da argamassa

O teor de ar incorporado foi realizado de acordo com a norma NBR 13278 (ABNT, 2005), pela equação 1:

$$At = 100 \times \left( 1 - \frac{d}{dt} \right) \quad (1)$$

onde: At é o teor de ar incorporado em %.

d é a massa específica da argamassa (g/cm<sup>3</sup>);

dt é a massa específica da argamassa sem vazios (g/cm<sup>3</sup>).

### 3.3 ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

#### 3.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão da argamassa foi determinada nas idades de 28, 56 e 91 dias, como visto na Figura 3.3, utilizando 6 corpos-de-prova de (40 x 40 x 160)mm, tomando-se como resistência final a média aritmética entre eles. Este ensaio seguiu as prescrições da norma NBR 13279 (ABNT,2005).

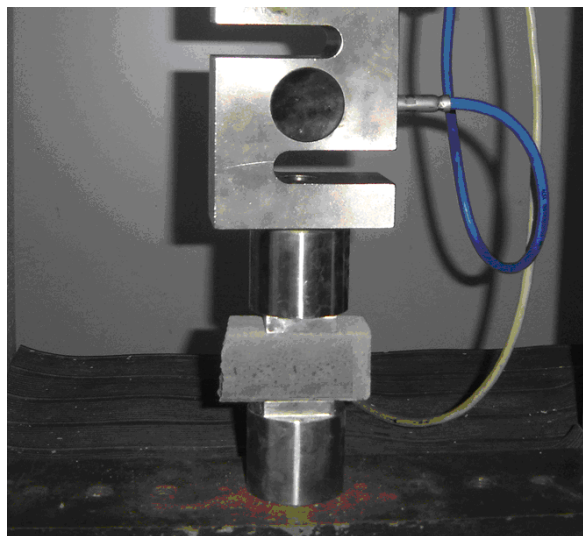


Figura 3.3 – Ensaio de resistência à compressão de argamassas

A resistência à compressão foi obtida pela equação 2:

$$R_c = (F_c / 1600) \quad (2)$$

onde:  $R_c$  é a resistência à compressão, em megapascals;

$F_c$  é a carga máxima aplicada, em newtons.

#### 3.3.2 Resistência à tração na flexão

Foram utilizadas 6 corpos de prova com dimensões (40 x 40 x 160)mm na idade de 28, 56 e 91 dias, conforme estabelece a norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

O ensaio previu um carregamento na parte central do corpo-de-prova bi-apoiado sobre suportes de aço em forma de roletes distantes entre si de  $(100 \pm 0,5)$ mm para impedir tensões de torção, como mostra a Figura 3.4.

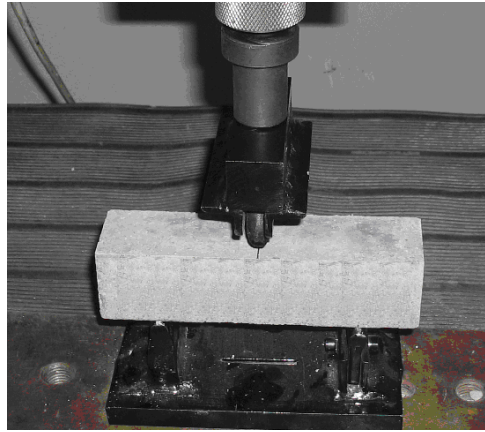


Figura 3.4 – Ensaio de tração das amostras

Os resultados de tração foram obtidos pela equação 3:

$$R_f = (1,5 F_f L)/40^3 \quad (3)$$

onde:  $R_f$  é a resistência à tração na flexão, em megapascals;

$F_f$  é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;

$L$  é a distância entre os suportes, em milímetros.

### 3.3.3 Densidade de massa no estado endurecido

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido foi efetuado concomitantemente com o ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias com amostras de  $(40 \times 40 \times 160)$ mm, conforme preconiza a norma NBR 13280 (ABNT, 2005).

Para a obtenção dos resultados os dados dos corpos-de-prova foram plotados na equação 4:

$$\rho_{\text{máx}} = (m / v) 1000 \quad (4)$$

onde:  $\rho$  máx é a densidade de massa no estado endurecido em  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $m$  é a massa do corpo de prova em gramas;  
 $v$  é o volume do corpo-de-prova em  $\text{cm}^3$ .

### 3.3.4 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada com corpos-de-prova possuindo dimensões (40 x 40 x 160)mm aos 28 dias de idade utilizando a norma NBR 15259/05. Os corpos-de-prova permaneceram inseridos em uma película de água de 5mm como mostra a Figura 3.5. O nível de água era mantido injetando água constantemente no interior do recipiente.

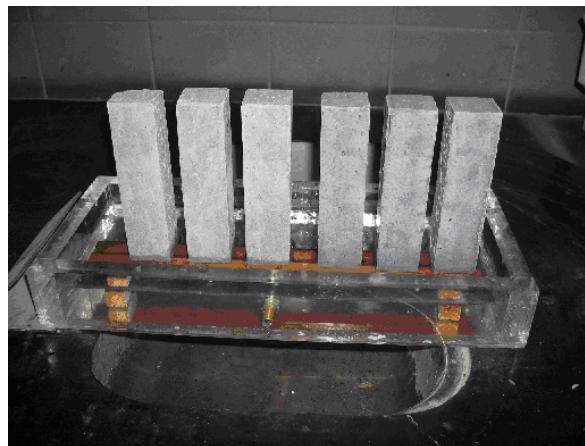


Figura 3.5 – Equipamento de ensaio da absorção de água por capilaridade

As amostras foram ensaiadas em número de 3, determinando a absorção aos 0, 10 e 90 minutos de contato com uma película de  $(5 \pm 1)$ mm de água e seus resultados obtido pela equação 5:

$$A_t = (m_t - m_o) / 16 \quad (5)$$

onde:  $A_t$  é a absorção de água por capilaridade em  $\text{g/cm}^2$ ;  
 $m_t$  é a massa do corpo-de-prova em cada tempo em gramas;  
 $m_o$  é a massa inicial do corpo-de-prova em gramas.

O coeficiente de capilaridade equivalente ao coeficiente angular da reta, foi expresso pela raiz quadrada do tempo em 10 e 90 minutos (abscissas) e absorção de água por capilaridade em centímetros quadrados (ordenada).

O resultado de cada amostra é obtido pela equação 6:

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (6)$$

onde: C é o coeficiente de capilaridade;

m<sub>90</sub> é a massa do corpo-de-prova em contato com a água por 90 min;

m<sub>10</sub> é a massa do corpo-de-prova em contato com a água por 10 min.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados do programa experimental, analisados em função dos materiais empregados e dos parâmetros de qualidade mediante o embasamento nas normas brasileiras vigentes.

### 4.1 Caracterização dos agregados

O agregado natural classifica-se como uma areia média conforme estabelece a norma NBR 7211 (ABNT, 2004) e seus resultados estão plotados na Tabela 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Classificação do agregado natural

| Ensaio                                  | Norma        | Resultados |
|---|--------------|------------|
| Massa Específica (kg / m <sup>3</sup> ) | NBR 9776/ 87 | 2640       |
| Massa Unitária (kg / m <sup>3</sup> )   | NBR 7810/ 83 | 1530       |
| Dimensão Máxima Característica (mm)     | NBR 7217/ 87 | 4,8        |
| Módulo de Finura                        | NBR 7217/ 87 | 2,60       |
| Teor de Material Pulverulento (%)       | NBR 7219/ 87 | 4,80       |
| Teor de Argila em Torrões (%)           | NBR 7218/ 82 | 0,00       |

Fonte: O autor

A composição granulométrica do agregado é descrita na Tabela 4.2 e seus valores plotados na Figura 4.1.



Tabela 4.2 – Composição granulométrica do agregado natural

| Análise granulométrica da areia NBR 7217 / 7211 |      |                   |                        |                           |                   |                        |                           |
|---|------|-------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| Abertura  |      | Amostra 1         |                        |                           | Amostra 2         |                        |                           |
| Polegadas                                       | (mm) | Massa retida (gr) | Porcentagem retida (%) | Porcentagem Acumulada (%) | Massa retida (gr) | Porcentagem retida (%) | Porcentagem Acumulada (%) |
| n° 4  | 4,8  | 3,9               | 0,8                    | 0,8                       | 4,3               | 0,9                    | 0,9                       |
| n° 8  | 2,4  | 42,7              | 8,5                    | 9,3                       | 39,1              | 7,8                    | 8,7                       |
| n° 16   | 1,2  | 103,6             | 20,7                   | 30,0                      | 105,1             | 21,1                   | 29,8                      |
| n° 30   | 0,6  | 109,2             | 21,8                   | 51,9                      | 108,5             | 21,8                   | 51,5                      |
| n° 50   | 0,3  | 91,4              | 18,3                   | 70,2                      | 89,6              | 18,0                   | 69,5                      |
| n° 100  | 0,15 | 149,1             | 29,8                   | 100,0                     | 152               | 30,5                   | 100,0                     |
| Fundo   | 0,10 | 24,0              | 4,8                    | 104,8                     | 23,7              | 4,8                    | 104,8                     |
| Total   |      | 499,9             |                        |                           | 498,6             |                        |                           |
| Módulo de finura                                |      | 2,62              |                        |                           | 2,59              |                        |                           |
| D.M.C.  |      | 4,8               |                        |                           | 4,8               |                        |                           |

Fonte: O autor

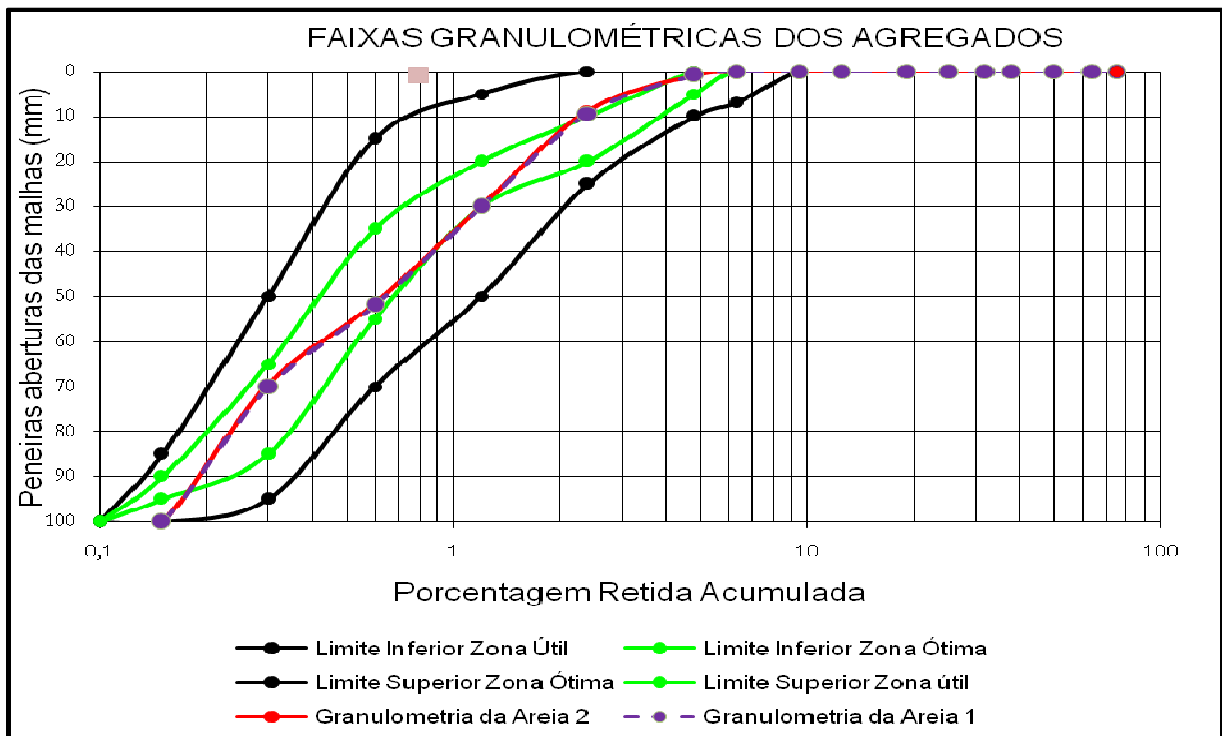


Figura 4.1 – Análise granulométrica da areia

Fonte: O autor

O ensaio de granulometria do agregado miúdo foi repetido duas vezes com uma quantidade de 500 g de agregado conforme prescreve a norma NBR 7217 (ABNT, 1987).

É observado que praticamente não há variação entre as análises, indicando um procedimento adequado para definição da composição granulométrica, bem como, verifica-se uma distribuição granulométrica contínua, não mostrando picos acumulativos de partículas de agregados entre as peneiras.

## 4.2 Argamassa no estado fresco

### 4.2.1 Ensaio de consistência – *Flow Table*

O preparo da argamassa atendeu aos quesitos da norma NBR 13276 (ABNT, 2002), sendo que as argamassas anidras foram pré-misturadas em sacos plásticos por um período de um minuto. A argamassa foi preparada utilizando uma argamassadeira mecânica no qual foram colocados seqüencialmente a água com aditivos plastificando quando necessário, seguido dos materiais anidros previamente misturados.

Os resultados obtidos na Tabela 4.3 estão plotados na Figura 4.2.

Tabela 4.3 – Consistência das argamassas

| Amostra           | Material    |           |          |             | Consistência (mm) |
|-------------------|-------------|-----------|----------|-------------|-------------------|
|                   | Cimento (g) | Areia (g) | Água (g) | Aditivo (g) |                   |
| <b>Referência</b> | 800         | 2400      | 445      | 0           | 249               |
| <b>5% CB</b>      | 800         | 2400      | 445      | 3           | 259               |
| <b>10% CB</b>     | 800         | 2400      | 445      | 3           | 261               |
| <b>15% CB</b>     | 800         | 2400      | 445      | 4           | 258               |
| <b>20% CB</b>     | 800         | 2400      | 445      | 5           | 248               |
| <b>25% CB</b>     | 800         | 2400      | 445      | 8           | 249               |
| <b>30% CB</b>     | 800         | 2400      | 445      | 8           | 251               |

Fonte: O autor

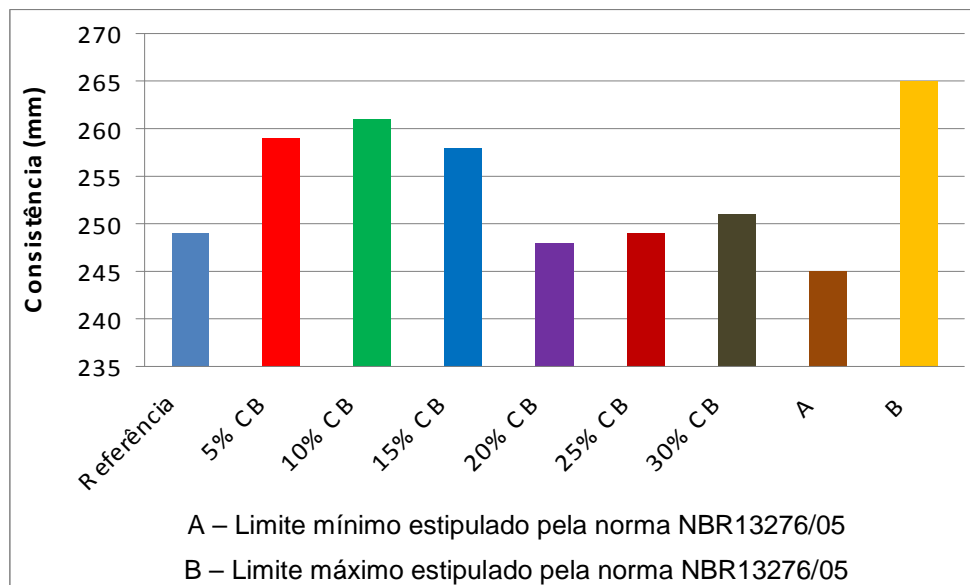


Figura 4.2 – Consistência das argamassas conforme porcentagem de adição

Fonte: O autor

A Figura 4.2 mostra a variação da consistência para cada porcentagem de adição de cinza de folha de bananeira estando as mesmas dentro dos parâmetros estipulados pela norma NBR 13276 (ABNT, 2002) em  $255 \pm 10$ mm. A medida que a quantidade de cinza era aumentada na mistura notava-se à redução de sua consistência, fator corrigido com o acréscimo de aditivo do tipo plastificante.

#### 4.2.2 Ensaio da Massa Específica no estado fresco

Os resultados obtidos no ensaio de massa específica da argamassa no estado fresco estão apresentados na Tabela 4.4 e plotados na Figura 4.3.

Tabela 4.4 – Massa específica no estado fresco (Fonte: O autor)

| Amostra    | Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------|---------------------------------------|
| Referência | 2074,8                                |
| 5% CB      | 2110,0                                |
| 10% CB     | 2140,3                                |
| 15% CB     | 2108,3                                |
| 20% CB     | 2107,0                                |
| 25% CB     | 2141,6                                |
| 30% CB     | 2162,7                                |

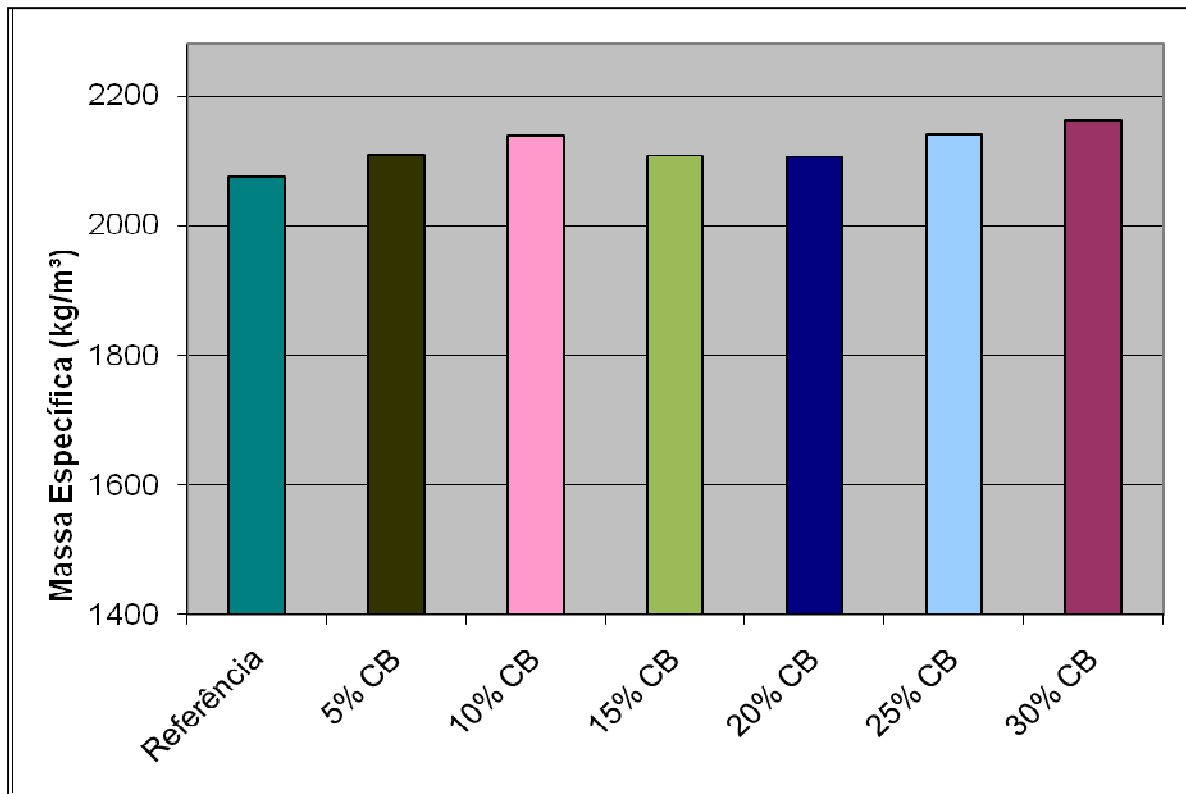


Figura 4.3 – Massa específica das argamassas no estado fresco

Fonte: O autor

A Figura 4.3 mostra que conforme a cinza de folha de bananeira é acrescida à argamassa nas proporções de 5%; 10%; 15%; 20%; 25% e 30% ocorre o aumento da massa específica das mesmas em 1,70%; 3,15%; 1,61%; 1,55%; 3,22% e 4,24% comparados com a argamassa de referência.

Para os ensaios com adição de 15% e 20% de cinza de folha de bananeira tem-se uma queda de massa específica em relação as argamassas contendo 5% e 10% de adição. Acredita-se que essa redução pode ser decorrente de possíveis falhas na execução deste ensaio.

#### 4.2.3 Determinação do teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado foi determinado conforme a norma NBR 13278 (ABNT, 2005), e seus resultados plotados na Figura 4.4.

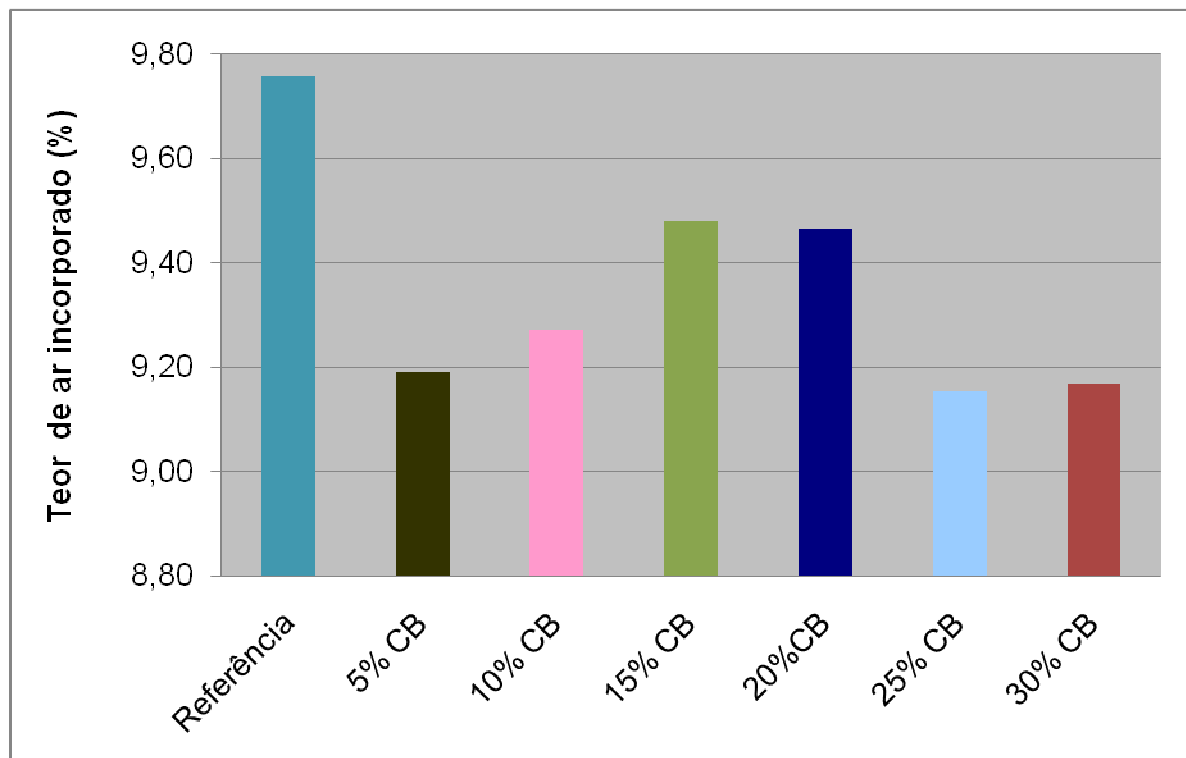


Figura 4.4 – Teor de ar incorporado das argamassas

Fonte: O autor

Avaliando a Figura 4.4 observa-se que as argamassas com adições de 15% e 20% tiveram aumento de 3,49% e 3,38% no teor de ar incorporado quando comparados com as argamassas com adições de 5% e 10% de cinza de folha de bananeira. Esse aumento pode ter ocorrido em função de possíveis falhas na execução do ensaio.

Entretanto para as adições de 5%, 10%, 25% e 30% a quantidade de ar incorporado é menor em relação à argamassa referência. Essa diminuição no teor de ar incorporado pode ter ocorrido em virtude dos finos da cinza de folha de bananeira preencher os vazios da mistura não permitindo a entrada de ar na argamassa.

### 4.3 Argamassa no estado endurecido

#### 4.3.1 Resistência à compressão da argamassa

A resistência a compressão foi determinada nas idades de 28, 56 e 91 dias, utilizando 6 corpos-de-prova de (40 x 40 x 160)mm, para cada idade e proporção de adição, totalizando 126 exemplares, em conformidade com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando a prensa universal de ensaios EMIC DL30000 com velocidade de carregamento de 500 N/s.

Os resultados de resistência à compressão estão plotados na Figura 4.5.

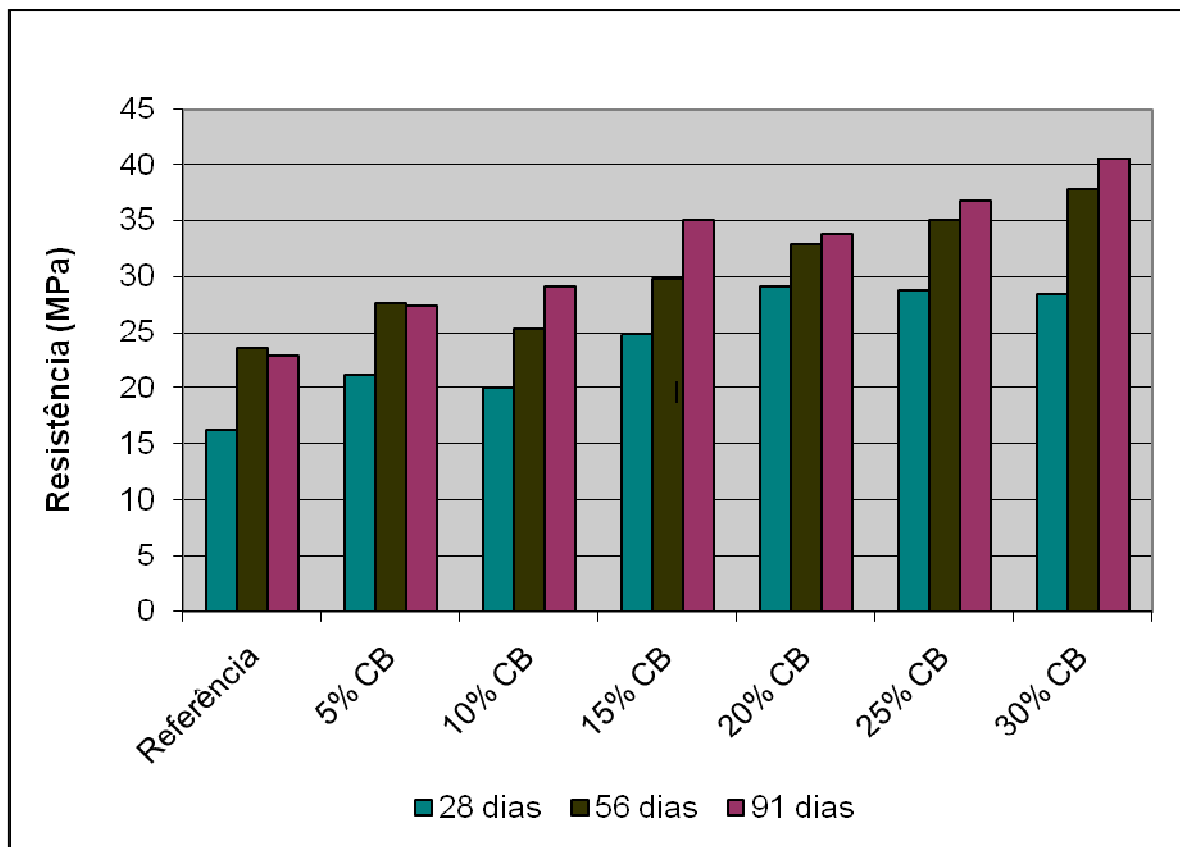


Figura 4.5 – Resistência à compressão das argamassas

Fonte: O autor

Analisando os resultados da resistência à compressão, nota-se que aos 28 dias as argamassas com adição de 5%; 10%; 15%; 20%; 25% e 30% de cinza de folha de bananeira apresentaram resistências maiores que a argamassa de referência em 30,75%; 23,54%; 52,87%; 80,04%; 77,70% e 74,92%. Entretanto aos 28 dias de idade essas argamassas não apresentam variações expressivas de resultados entre si, com isso acredita-se que tal fator pode ter sido decorrente das argamassas com adições de pozolanas ainda apresentarem reações pozolânicas insuficientes para alterar as resistências.

Aos 56 dias de idade observa-se que as resistências aumentam em 16,72%; 7,49%; 26,28%; 39,53%; 48,58% e 60,22% para as porcentagens de adição de 5%; 10%; 15%; 20%; 25% e 30% de cinza de folha de bananeira em relação a argamassa de referência. Embora a adição de 10% de cinza tenha apresentado um aumento de 7,49% de resistência em relação a argamassa de referência, nota-se que esta é 44,80% menor que a argamassa com adição de 5% de cinza de folha de bananeira. Tal fator pode ter sido decorrente das imperfeições existentes nas formas de argamassa, haja visto que estas não são normatizadas.

Para as resistências aos 91 dias todas as argamassas apresentaram valores superiores à argamassa de referência em 19,53%; 27,57%; 53,52%; 47,75%; 61,03% e 77,32% para as adições de 5%; 10%; 15%; 20%; 25% e 30%, respectivamente. Contudo acredita-se que a utilização de adição de cinza de folha de bananeira nas argamassas apresentou acréscimos de resistência de forma linear conforme a proporção de adição. Verifica-se um aumento máximo de resistência em 77,32% para a adição de 30% de cinza, o que demonstra que esta proporção ainda apresenta reação pozolânica com o cimento.

#### 4.3.2 Resistência à tração na flexão

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração estão descritos na Figura 4.6.

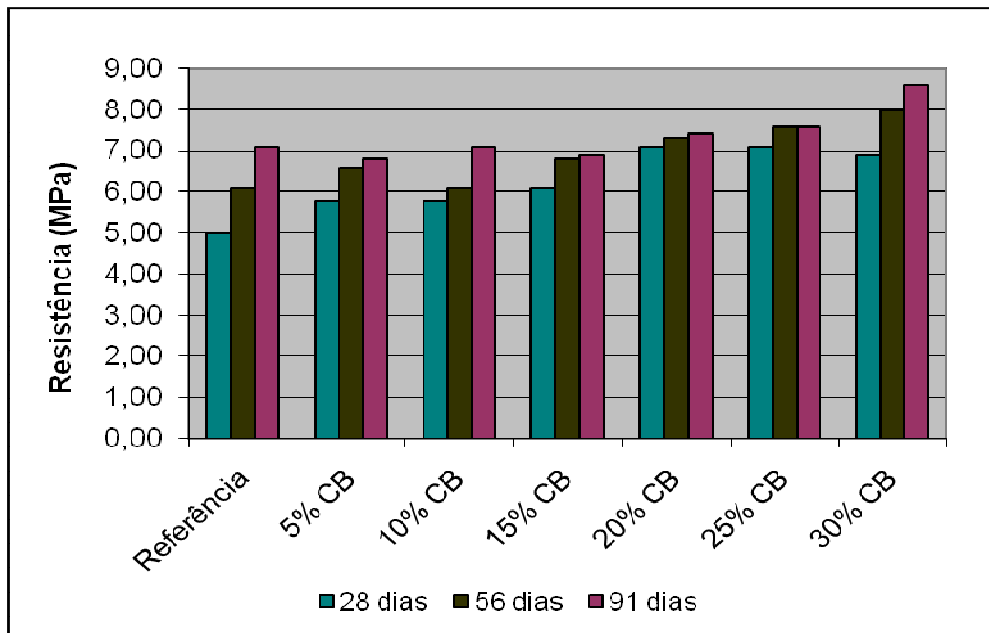


Figura 4.6 – Resistência à tração das argamassas

Fonte: O autor

Os valores apontados na Figura 4.6 indicam que a resistência à tração na flexão das argamassas com adições nas idades de 28 e 56 dias, são superiores à resistência da argamassa de referência.

A resistência das argamassas aos 91 dias, contendo 10%, 20%, 25% e 30% de cinza de folha de bananeira também apresentam maiores valores de resistência referente à argamassa sem adição em 0%, 4,22%, 7,04% e 21,12% respectivamente. No entanto as argamassas com 5% e 15% de cinza de folha de bananeira, obtiveram um decréscimo de resistência aos 91 dias em 4,22% e 2,81% quando comparados com a argamassa de referência. Esta redução pode ser decorrente de possíveis falhas na execução destes ensaios e também em virtude das formas do corpo de prova não serem normatizadas.

#### 4.3.3 Massa específica no estado endurecido

O ensaio de massa específica no estado endurecido foi efetuado aos 28 dias em corpos-de-prova de (40 x 40 x 160)mm, conforme preconiza a norma NBR 13280 (ABNT, 2005).

Os resultados dos ensaios estão plotados na Figura 4.7.



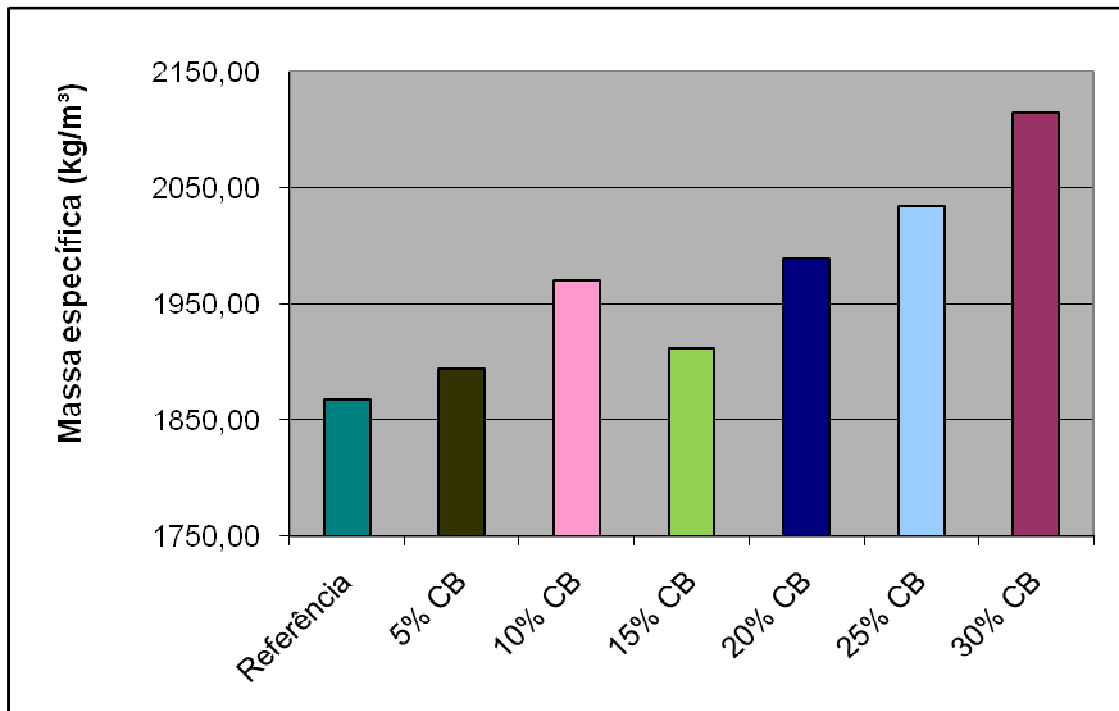


Figura 4.7 – Massa específica no estado endurecido

Fonte: O autor

As adições de cinza de folha de bananeira apresentaram acréscimo de massa específica em 1,46%; 5,52%; 2,36%; 6,52%; 8,95% e 13,25%, quando comparados com a argamassa de referência. Nota-se na Figura 4.7 que a adição de 15%, apresentou uma queda na sua massa específica, não acompanhando o crescimento de forma linear das demais adições, podendo ser decorrente de possíveis falhas na execução deste ensaio. Embora a adição de 15% de cinza tenha apresentado valores próximos aos de 5%, estas ainda são maiores que a referência, o que já era esperado devido ao acréscimo de material fino na mistura.

#### 4.3.4 Absorção de água por capilaridade

A argamassa de assentamento além as propriedades de resistências mecânicas, possui também características de impermeabilidade à água, estando esta relacionada com a movimentação da água por meio de vasos capilares no seu interior. A absorção de água por capilaridade foi determinada com corpos-de-prova com dimensões (40 x 40 x 160)mm aos 28 dias de idade utilizando a norma

NBR 15259 (ABNT, 2005). Foram ensaiados 6 amostras determinando a absorção aos 10 e 90 minutos de contato com uma película de  $(5 \pm 1)$ mm de água. Os resultados de absorção de água por capilaridade estão descritos na Figura 4.8

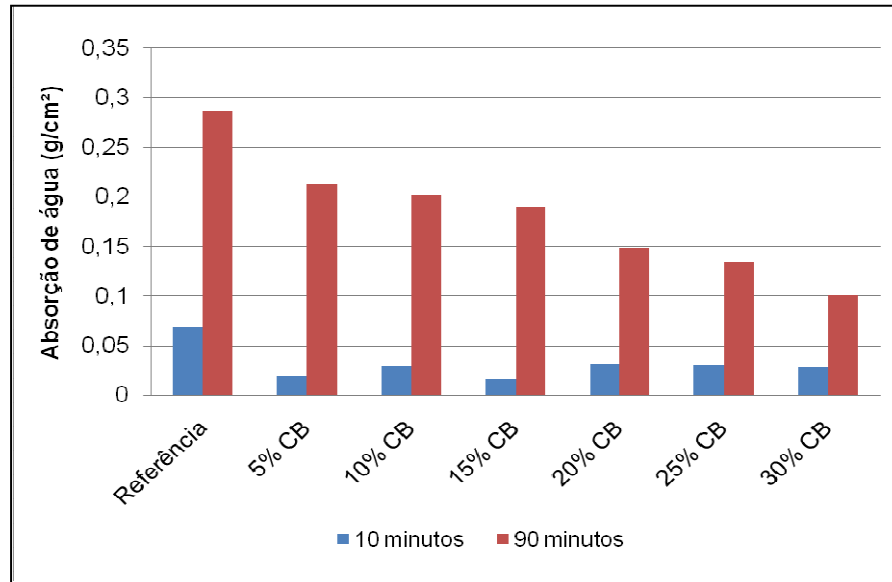


Figura 4.8 – Absorção de água por capilaridade

Fonte: O autor

Conforme a Figura 4.8, verifica-se que existe uma diminuição da absorção de água por capilaridade para as argamassas com adições quando comparados com a argamassa de referência.

No período de 10 minutos a absorção de água por efeito capilar das argamassas com adições teve uma redução de 72,46%, 57,97%, 78,26%, 55,07%, 56,52% e 59,42% para as adições de 5%; 10%; 15%; 20%; 25% e 30% respectivamente com relação à argamassa padrão.

Aos 90 minutos observa-se um decréscimo de absorção à medida que a quantidade de cinza aumenta em 26,13%; 29,62%; 33,80%; 48,09%; 53,31%; 64,81% nas adições de 5%; 10%; 15%; 20%; 25% e 30% respectivamente, quando comparados com a argamassa referência. Contudo supõe-se que à medida que ocorre a adição de cinza de folha de bananeira em argamassas, sendo este um material fino, as mesmas passam a apresentar menor quantidade de vazios e um menor fluxo de água no seu interior.

## 5 CONCLUSÃO

As argamassas produzidas com cinza de folha de bananeira apresentaram resultados significativos quando comparados com a argamassa referência, como segue:

- Para a consistência das argamassas, verificou-se que a medida que aumentava-se a porcentagem de adição de cinza, a consistência da argamassa diminuía podendo prejudicar a sua trabalhabilidade. Com isso a trabalhabilidade foi corrigida adicionando-se aditivo plastificante, ficando dentro dos parâmetros solicitados em norma.
- Os resultados de ar incorporado demonstraram que as argamassas com cinza de folha de bananeira, apresentaram menores teores de ar incorporado em relação à argamassa de referência. Sendo possível em virtude dos finos da cinza preencherem os vazios da argamassa.
- A massa específica no estado endurecido é maior para as argamassas com cinza de folha de bananeira, visto que quanto maior a quantidade de cinza utilizada, maior foi a massa específica encontrada.
- Os ensaios de absorção de água por capilaridade demonstram valores menores que os apresentados pela argamassa de referência, fator favorável à impermeabilidade, principalmente em locais em contato com a umidade, como solos.
- Os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão das argamassas apresentaram maiores resistências quando comparados à argamassa referência. Os mesmos indicaram viabilidade de utilização de até 30% de cinza de folha de bananeira, sem prejuízos de resistência.

Conclui-se desta forma que a cinza da folha de bananeira quando adicionada em argamassas de cimento apresenta bom desempenho do ponto de vista tecnológico, em relação à argamassa sem adição.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, faz-se necessário estudos mais detalhados sobre a influência da adição da cinza em cimentos, concretos e argamassas mistas de cimento e cal, tendo como base avaliar a resistência mecânica à compressão. É necessário também analisar a viabilidade econômica da produção da cinza de folha de bananeira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALYSSANDRO, A. S. A. **Adição de resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2009.

AL-DULAIJAN, S. U.; MASLEHUDDIN, M.; AL-ZAHRANI, M. M.; SHARIF, A. M.; SHAMEEN, M.; IBRAHIM, M. ***Sulfate resistente of pain and blended cementsexposed to varying concentrations of sodium sulfate.*** Cement and Composites, 25, 2003, p. 429-437.

ARAUJO, S. L. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentíceas : Estudo de caso da cinza da casca de castanha de caju.** Dissertação de mestrado. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751/92.** Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752/92.** Pozolanas – Determinação de atividade pozolânica com o cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467/87.** Determinação do inchamento de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23.** Cimento Portland – Determinação da específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7216/82**. Amostragem de Agregados. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217/82**. Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218/87**. Determinação do Teor de Argila em Torrões nos Agregados. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219/82**. Determinação do Teor de Materiais Pulverulentos nos Agregados. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7220/87**. Determinação de Impurezas Orgânicas Húmicas em Agregado Miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251/82**. Agregado em Estado Solto – Determinação da Massa Unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura por meio da peneira 0,077 mm (nº 325) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9941/87**. Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776/87**. Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9777/87**. Agregados – Determinação da absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653/92**. Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13259/05**. 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749/96**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – especificações. Rio de Janeiro, 1996.

CAMARGO, P. M. **Avaliação do desempenho das argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** Dissertação de Graduação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira. São Paulo, 2009.

CAMÕES, AIRES F. F. L., **Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes.** Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade do Minho – Minho: Portugal, 2002.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas.** São Paulo, 1999. 203 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARVALHO, A. dos G. de. **Energia de Ativação dos Concretos Experimentação e Modelagem.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2002. 134 p.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VI. Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

CEAGESP. Disponível em:

<[http://www.ceagesp.gov.br/produtor/estudos/artigos/artigo\\_070410](http://www.ceagesp.gov.br/produtor/estudos/artigos/artigo_070410)> Acesso em: 18 de março de 2011.

CHRISTOFOLLI, J. L. **Estudo das argilas calcinadas para produção de Cimento Portland Pozolânico na região de Curitiba, Paraná, Brasil.** Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Construção Civil. Área de concentração em Ambiente Construído. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.



CINCOTTO, M. A. Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações. In. **Tecnologia das Edificações**. São Paulo: Pini/IPT, 1988.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim Técnico n. 68.

COUTINHO, A.S., 1997, **Fabrico e Propriedades do betão** – Volume I, 3 ed. Lisboa:  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 401p.

COIMBRA, M. A., SANTOS, W. N. dos, MORELLI, M. R. UFSCar. **Recuperação de resíduos inorgânicos para a construção civil**. Cerâmica, 48 (306) abril /maio /junho 2002.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais ao concreto estrutural**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo, IBRACON, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – Desfolha do Bananal**, EMBRAPA. Nº 53. Bahia, 2004.

FIORITO; A. J. S. **Manual de argamassas e revestimentos**: estudos e procedimentos de execução. São Paulo, Ed. Pini, 1994.

FACHINI, D. **Aglomerante alternativo para construção civil**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Área de Concentração em Engenharia de Materiais. UTFPR. Curitiba. 2010. 110p.

FONSECA G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: Uma abordagem epistêmica.** Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Área de concentração: Materiais de construção civil. UFMG. Belo Horizonte. 2010.

FAO. Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. Disponível em: <http://www.fao.org.br> Acesso em 16 de março de 2011.

GAVA, G. P.; JUNIOR, L. R. P. **Comparação entre diferentes metodologias utilizadas no Brasil para avaliação da pozolanicidade da cinza volante e da cinza de casca de arroz.** V CBC – Congresso Brasileiro de Cimento. São Paulo, 8 à 12 de novembro 1999.

ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L. **Concreto “verde” com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade.** I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído 18-21. São Paulo. 2004.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. da. **Cinzas e aglomerantes alternativos.** In: Tecnologias e materiais alternativos de construção / Wesley Jorge Freire, Antônio Ludovico Beraldo. Ed. da UNICAMP. São Paulo, Campinas, 2003. p 140 – 190.

KAEFER, L.F. **A evolução do concreto armado.** PEF 5707 – Concepção, Projeto e realização das estruturas: aspectos históricos. São Paulo. 1998.

KANNING, R. C. **Avaliação do Potencial Pozolânico da Cinza de Folha de Bananeira**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UTFPR. Curitiba, 2010.

KARSTENSEN K. H. **Formação e emissão de POPs pela Indústria de Cimento. Fundação para pesquisa científica e industrial da Noruega. 2006**. Tradução: BUSATO L. C. ; BUSATO T. M. M. São Paulo, 2010. 188 pg.

LEA, F.M **The Chemistry of Cemet and Concrete**. 3 rd. ed., New York, Dover Publishing, v. 1, 375p. 1971.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A.; CAMPOS, M. F. **Pozolanicidade e resistência mecânica das argamassas confeccionadas com cinza de casca de caju**. Revista Minerva. pg. 249-256, 2008.

LITTLE, A. D. et al. **Estudo sobre aplicações das escórias siderúrgicas**. Preparado para: Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS e Empresas Siderúrgicas Associadas. 1999.

MACEDO, P. M. **Avaliação do desempenho das argamassas com adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas. São Paulo. 2009.

MALOTRA, V. M.; METHA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Advances in Concrete Technology, v. 1, Gordan and Breach Publishers, 1996.

MANTUANO, R. N. **Materiais pozolânicos**. Dissertação de Especialização. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2006.

METHA, P. K. Natural Pozzolan. In: Supplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987. 427p.

MEHTA P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MCPHIE,; DOYLE, M.; ALLEN, R. **Volcanic Textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks**. Hobart, Tas: Centre For Ore Deposit and Exploration Studies, University of Tasmania, 1993. 198p.

MELO, G. C. **Avaliação da Influência do NaCl em pastas de Cimento Portland para cimentação de poços de petróleo em zonas evaporíticas**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2009.

MONTANHEIRO, T. J.; **Resto dos Nomes**. Vidro vulcânico maciço: Pozzolana natural no oeste paulista. Departamento de Geologia. USP. São Paulo. Vol. 11. Abril de 2011. Disponível em: <[http://www.revistausp.sibi.usp.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1519-874X2011000100004&lng=pt&nrm=iso](http://www.revistausp.sibi.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-874X2011000100004&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em 11 de agosto de 2011.

NEVILLE, A. M. 1923. **Propriedades do concreto**, 1923 - tradução Salvador E. Giammusso. São Paulo: PINI, 1982.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, 2ª . edição, Editora PINI Ltda. São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. **Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, n.2, p.490–496, 2006.

PAULA O. M. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Dissertação de Graduação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola. UFV. Viçosa. Minas Gerais. 2006.

PBMH. **Normas de classificação da banana.** São Paulo: Centro de qualidade em Horticultura, CEAGESP, 2005.

PERONI, RODRIGO L. **Rochas Ígneas – Aula 4.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia de Minas – Geologia de Engenharia I. Porto Alegre, 2007.

PETRUCCI, E. G. **Concreto de cimento Portland.** – 2º ed. – Porto Alegre: GLOBO, 1973.

PETRUCCI, E. G. R. 1922-1975. **Concreto de cimento Portland.** - 5 ed. – Porto Alegre: GLOBO, 1978.

PETRUCCI, E. G. R. 1922-1975. **Materiais de construção.** -11 ed. - São Paulo: GLOBO, 1998.

PINHEIRO, I. S. **Beneficiamento e caracterização de resíduos gerados na produção de blocos cerâmicos visando à aplicação como adição pozolânica.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em construção civil. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Área de concentração: Materiais de construção civil. UFMG. Belo Horizonte. 2008.

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

ROCHA, G.G.N. **Caracterização Microestrutural do Metacaulim de Alta reatividade.** Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, 2005. Universidade Federal de Minas Gerais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

SCHMIDT, M. V. et. al. Metodologia para avaliação da ocorrência de fissuração em argamassas. **Anais V simpósio brasileiro de tecnologia em argamassas**, São Paulo: USP, 2003. p. 609-618.

SABBATINI, F. H. **Patologia das argamassas de revestimentos – aspectos físicos.** In: Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986. p. 69-76.

SABBATINI, F. H. Tecnologia de execução de revestimento de argamassas. In. **13.Simpósio de Aplicação da Tecnologia do Concreto.** São Paulo, 1990.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas.** Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 1992.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso da pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. UFSC. Florianópolis, 2006. 285 pg.

SANTOS, T. J.; Sales, A.; LIMA, S. A. **Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar visando seu uso como substituto de agregado miúdo.** Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de São Carlos. Congresso de Iniciação Científica, 17. Anais de Eventos da UFSCar, v. 5, p. 22, 2009.

SAVASTANO Jr, Holmer. **Materiais a base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para construção de baixo custo.** USP – Escola Politécnica, 2000 – Tese de Livre Docência.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios.** São Paulo, 1989. 227 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVEIRA, A. A. **A utilização da cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996. 139 p.

SILVEIRA, A. A. **O efeito da incorporação da cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado.** 2001. 102f. Proposta (tese) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

SOUZA, P.S.L. **Verificação da influência do uso do metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência.** *Porto Alegre. Tese de doutorado.* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 2003. 203p.

TASHIMA, M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa, método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** Dissertação de mestrado. Faculdade de engenharia. Universidade Estadual de São Paulo. Ilha Solteira. São Paulo, 2006.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo, Ed. PINI, 1992.

ZARDO, A. M. et al **Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como filer em composto de fibrocimento**. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUIDO, 1, 2004, São Paulo. Anais . CLACS/ENTAC, 2004. 13 p.



**ANEXO A**  
**CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO**

TABELA A1 – Caracterização da argamassa no estado fresco

| <b>Cinza de<br/>folha de<br/>bananeira<br/>(%)</b> | <b>Densidade de<br/>Massa<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Teor de Ar<br/>Incorporado<br/>(%)</b> | <b>Índice de consistência<br/>(mm)</b> |
|--|--|---|--|
| <b>0%</b>  | 2074,8   | 9,76                                      | 249                                    |
| <b>5%</b>  | 2110,0   | 9,27                                      | 259                                    |
| <b>10%</b>   | 2140,3   | 9,48                                      | 261                                    |
| <b>15%</b>   | 2108,3   | 9,47                                      | 258                                    |
| <b>20%</b>   | 2107,0   | 9,19                                      | 248                                    |
| <b>25%</b>   | 2141,6   | 9,16                                      | 249                                    |
| <b>30%</b>   | 2162,7   | 9,17                                      | 251                                    |

**ANEXO B**

**CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO**

Tabela B1. Valores de resistência a compressão da argamassa com 0% de adição

| Compressão    | 28 Dias      |                         | 56 Dias      |                         | 91 Dias      |                         |
|---------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
|               | 0% - (kgf)   | Tensão de ruptura (Mpa) | 0% - (kgf)   | Tensão de ruptura (Mpa) | 0% - (kgf)   | Tensão de ruptura (Mpa) |
| Resultados    | 2620,33      | 16,38                   | 3693,44      | 23,08                   | 3264,40      | 20,40                   |
|               | 2741,15      | 17,13                   | 3743,62      | 23,40                   | 3403,66      | 21,27                   |
|               | 2860,96      | 17,88                   | 3896,19      | 24,35                   | 4321,13      | 27,01                   |
|               | 2415,33      | 15,10                   | 3797,89      | 23,74                   | 4031,35      | 25,20                   |
|               | 2294,71      | 14,34                   | 3576,71      | 22,35                   | 3139,48      | 19,62                   |
|               | 2646,95      | 16,54                   | 3974,01      | 24,84                   | 3818,37      | 23,86                   |
| Desvio Padrão | <b>1,30</b>  |                         | <b>0,89</b>  |                         | <b>2,92</b>  |                         |
| Média         | <b>16,23</b> |                         | <b>23,63</b> |                         | <b>22,89</b> |                         |

Tabela B2 – Valores de resistência a compressão da argamassa com 5% de adição

| Compressão    | 28 Dias      |                         | 56 Dias      |                         | 91 Dias      |                         |
|---------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
|               | 5 % - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 5 % - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 5 % - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) |
| Resultados    | 3642,24      | 22,76                   | 4814,68      | 30,09                   | 2324,40      | 14,53                   |
|               | 3272,59      | 20,45                   | 4430,70      | 27,69                   | 4860,76      | 30,38                   |
|               | 3201,94      | 20,01                   | 3929,98      | 24,56                   | 4618,08      | 28,86                   |
|               | 3715,97      | 23,22                   | 4582,71      | 28,64                   | 4842,33      | 30,26                   |
|               | 3069,85      | 19,19                   | 4449,13      | 27,81                   | 4669,28      | 29,18                   |
|               | 3468,17      | 21,68                   | 4270,96      | 26,69                   | 4949,85      | 30,94                   |
| Desvio Padrão | <b>1,60</b>  |                         | <b>1,87</b>  |                         | <b>6,33</b>  |                         |
| Média         | <b>21,22</b> |                         | <b>27,58</b> |                         | <b>27,36</b> |                         |

Tabela B3 – Valores de resistência a compressão da argamassa com 10% de adição

| Compressão    | 28 Dias      |                         | 56 Dias      |                         | 91 Dias      |                         |
|---------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
|               | 10% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 10% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 10% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) |
| Resultados    | 3082,13      | 19,26                   | 2448,30      | 15,30                   | 4694,88      | 29,34                   |
|               | 2871,2       | 17,95                   | 2894,75      | 18,09                   | 3746,69      | 23,42                   |
|               | 3517,32      | 21,98                   | 3528,58      | 22,05                   | 4783,96      | 29,90                   |
|               | 2805,66      | 17,54                   | 3133,33      | 19,58                   | 4804,44      | 30,03                   |
|               | 3343,25      | 20,90                   | 3198,87      | 19,99                   | 4369,26      | 27,31                   |
|               | 3626,88      | 22,67                   | 3762,05      | 23,51                   | 5631,81      | 35,20                   |
| Desvio Padrão | <b>2,13</b>  |                         | <b>2,90</b>  |                         | <b>3,85</b>  |                         |
| Média         | <b>20,05</b> |                         | <b>19,76</b> |                         | <b>29,20</b> |                         |

Tabela B4 – Valores de resistência à compressão da argamassa com 15% de adição

| Compressão    | 28 Dias      |                         | 56 Dias      |                         | 91 Dias      |                         |
|---------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
|               | 15% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 15% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 15% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) |
| Resultados    | 3382,16      | 21,14                   | 4766,56      | 29,79                   | 5957,43      | 37,23                   |
|               | 3653,51      | 22,83                   | 5622,59      | 35,14                   | 5196,62      | 32,48                   |
|               | 4156,27      | 25,98                   | 4414,31      | 27,59                   | 5476,17      | 34,23                   |
|               | 3713,92      | 23,21                   | 4506,47      | 28,17                   | 5464,90      | 34,16                   |
|               | 4579,17      | 28,62                   | 4412,27      | 27,58                   | 5744,44      | 35,90                   |
|               | 4331,37      | 27,07                   | 4928,34      | 30,80                   | 5898,04      | 36,86                   |
| Desvio Padrão | <b>2,86</b>  |                         | <b>2,90</b>  |                         | <b>1,83</b>  |                         |
| Média         | <b>24,81</b> |                         | <b>29,84</b> |                         | <b>35,14</b> |                         |

Tabela B5 – Valores de resistência à compressão da argamassa com 20% de adição

| Compressão    | 28 Dias      |                         | 56 Dias      |                         | 91 Dias      |                         |
|---------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
|               | 20% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 20% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 20% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) |
| Resultados    | 4953,94      | 30,96                   | 4634,47      | 28,97                   | 5416,77      | 33,85                   |
|               | 3584,9       | 22,41                   | 5409,61      | 33,81                   | 5179,30      | 32,37                   |
|               | 4243,31      | 26,52                   | 4643,68      | 29,02                   | 6095,38      | 38,10                   |
|               | 5539,65      | 34,62                   | 5846,84      | 36,54                   | 5128,95      | 32,06                   |
|               | 4860,76      | 30,38                   | 6467,36      | 40,42                   | 5249,27      | 32,81                   |
|               | 4867,93      | 30,42                   | 4648,8       | 29,06                   | 5398,27      | 33,74                   |
| Desvio Padrão | <b>4,21</b>  |                         | <b>4,82</b>  |                         | <b>2,21</b>  |                         |
| Média         | <b>29,22</b> |                         | <b>32,97</b> |                         | <b>33,82</b> |                         |

Tabela B6 – Valores de resistência à compressão da argamassa com 25% de adição

| Compressão    | 28 Dias      |                         | 56 Dias      |                         | 91 Dias      |                         |
|---------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
|               | 25% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 25% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 25% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) |
| Resultados    | 4296,56      | 26,85                   | 5363,53      | 33,52                   | 6201,13      | 38,76                   |
|               | 3398,54      | 21,24                   | 7198,47      | 44,99                   | 4222,83      | 26,39                   |
|               | 5431,89      | 33,95                   | 6785,82      | 42,41                   | 6491,94      | 40,57                   |
|               | 5130,06      | 32,06                   | 4240,24      | 26,50                   | 6081,33      | 38,01                   |
|               | 4275,05      | 26,72                   | 5032,79      | 31,45                   | 6595,29      | 41,22                   |
|               | 5152,59      | 32,20                   | 5083,99      | 31,77                   | 5789,24      | 36,18                   |
| Desvio Padrão | <b>4,77</b>  |                         | <b>7,10</b>  |                         | <b>5,44</b>  |                         |
| Média         | <b>28,84</b> |                         | <b>35,11</b> |                         | <b>36,86</b> |                         |

Tabela B7 - Valores de resistência à compressão da argamassa com 30% de adição

| Compressão    | 28 Dias      |                         | 56 Dias      |                         | 91 Dias      |                         |
|---------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
|               | 30% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 30% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) | 30% - (kgf)  | Tensão de ruptura (Mpa) |
| Resultados    | 4059,00      | 25,37                   | 5400,39      | 33,75                   | 6510,37      | 40,69                   |
|               | 4433,77      | 27,71                   | 6575,90      | 41,10                   | 6223,66      | 38,90                   |
|               | 5187,19      | 32,42                   | 5239,63      | 32,75                   | 6716,19      | 41,98                   |
|               | 3537,80      | 22,11                   | 6298,41      | 39,37                   | 6818,58      | 42,62                   |
|               | 4889,43      | 30,56                   | 6381,35      | 39,88                   | 6501,15      | 40,63                   |
|               | 5145,42      | 32,16                   | 6452,00      | 40,33                   | 6201,13      | 38,76                   |
| Desvio Padrão | <b>4,10</b>  |                         | <b>3,63</b>  |                         | <b>1,57</b>  |                         |
| Média         | <b>28,39</b> |                         | <b>37,86</b> |                         | <b>40,59</b> |                         |

Tabela B8 – Valores de massa específica no estado endurecido

| Corpo-de-prova | Massa Inicial | Comprimento | Largura | Altura | g/cm <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | Média dos corpos de prova |
|----------------|---------------|-------------|---------|--------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| Referência     | 511,65        | 16,2        | 4,1     | 4,1    | 1,88              | 1878,84           | 1867,06                   |
|                | 505,66        | 16,3        | 4,1     | 4,2    | 1,80              | 1801,51           |                           |
|                | 500,95        | 16,3        | 4,0     | 4,0    | 1,92              | 1920,82           |                           |
| 5% CB          | 532,53        | 16,3        | 4,1     | 4,1    | 1,94              | 1943,52           | 1894,24                   |
|                | 529,07        | 16,3        | 4,1     | 4,2    | 1,88              | 1884,92           |                           |
|                | 508,08        | 16,3        | 4,1     | 4,1    | 1,85              | 1854,29           |                           |
| 10% CB         | 540,50        | 16,2        | 4,0     | 4,1    | 2,03              | 2034,40           | 1970,06                   |
|                | 489,63        | 16,2        | 4,1     | 4,0    | 1,84              | 1842,93           |                           |
|                | 540,09        | 16,2        | 4,0     | 4,1    | 2,03              | 2032,86           |                           |
| 15% CB         | 475,90        | 16,1        | 3,9     | 3,9    | 1,94              | 1943,39           | 1911,13                   |
|                | 479,12        | 16,1        | 3,9     | 4,0    | 1,91              | 1907,63           |                           |
|                | 469,84        | 16,0        | 3,9     | 4,0    | 1,88              | 1882,37           |                           |
| 20% CB         | 542,16        | 16,3        | 4,1     | 4,1    | 1,98              | 1978,66           | 1988,79                   |
|                | 495,83        | 16,2        | 3,9     | 4,1    | 1,91              | 1914,12           |                           |
|                | 524,04        | 16,2        | 3,9     | 4,0    | 2,07              | 2073,60           |                           |
| 25% CB         | 515,79        | 16,1        | 4,0     | 4,0    | 2,00              | 2002,29           | 2034,10                   |
|                | 518,96        | 16,3        | 4,0     | 3,9    | 2,04              | 2040,90           |                           |
|                | 533,72        | 16,2        | 4,0     | 4,0    | 2,06              | 2059,10           |                           |
| 30% CB         | 548,87        | 16,2        | 4,1     | 4,0    | 2,07              | 2065,91           | 2114,50                   |
|                | 570,88        | 16,2        | 4,1     | 4,1    | 2,10              | 2096,34           |                           |

Tabela B9a – Valores de absorção de água por capilaridade

| Corpo-de-prova | Comprimento | Largura | Altura | Massa Inicial | Massa 10 min. | Massa 90 min. |
|----------------|-------------|---------|--------|---------------|---------------|---------------|
| Referência     | 16,2        | 4,1     | 4,1    | 511,65        | 513,09        | 517,14        |
|                | 16,3        | 4,1     | 4,2    | 505,66        | 506,95        | 510,80        |
|                | 16,3        | 4,0     | 4,0    | 500,95        | 501,52        | 504,08        |
| 5% CB          | 16,3        | 4,1     | 4,1    | 532,53        | 532,95        | 534,73        |
|                | 16,3        | 4,1     | 4,2    | 529,07        | 529,35        | 530,74        |
|                | 16,3        | 4,1     | 4,1    | 508,08        | 508,31        | 509,08        |
| 10% CB         | 16,2        | 4,0     | 4,1    | 540,50        | 540,87        | 542,15        |
|                | 16,2        | 4,1     | 4,0    | 489,63        | 490,12        | 491,86        |
|                | 16,2        | 4,0     | 4,1    | 540,09        | 540,63        | 542,66        |
| 15% CB         | 16,1        | 3,9     | 3,9    | 475,90        | 476,09        | 478,27        |
|                | 16,1        | 3,9     | 4,0    | 479,12        | 479,41        | 481,62        |
|                | 16,0        | 3,9     | 4,0    | 469,84        | 470,09        | 472,14        |
| 20% CB         | 16,3        | 4,1     | 4,1    | 542,16        | 542,56        | 544,53        |
|                | 16,2        | 3,9     | 4,1    | 495,83        | 496,37        | 499,06        |
|                | 16,2        | 3,9     | 4,0    | 524,04        | 524,58        | 527,56        |
| 25% CB         | 16,1        | 4,0     | 4,0    | 515,79        | 516,31        | 518,83        |
|                | 16,3        | 4,0     | 3,9    | 518,96        | 519,43        | 521,86        |
|                | 16,2        | 4,0     | 4,0    | 533,72        | 534,19        | 537,47        |
| 30% CB         | 16,2        | 4,1     | 4,0    | 548,87        | 550,00        | 552,29        |
|                | 16,2        | 4,1     | 4,1    | 570,88        | 572,07        | 574,96        |
|                | 16,0        | 4,0     | 4,0    | 558,40        | 559,35        | 561,08        |

Tabela B9b – Valores de absorção de água por capilaridade

| Corpo-de-prova | Absorção de água (g/cm <sup>2</sup> ) - 10 min. | Absorção de água (g/cm <sup>2</sup> ) - 90 min. | Média 10 min | Média 90 min | m90 - m10 |
|----------------|---|---|--------------|--------------|-----------|
| Referência     | 0,09  | 0,343   | 0,069        | 0,287        | 4,05      |
|                | 0,081   | 0,321   |              |              | 3,85      |
|                | 0,036   | 0,196   |              |              | 2,56      |
| 5% CB          | 0,026   | 0,138   | 0,019        | 0,101        | 1,78      |
|                | 0,017   | 0,104   |              |              | 1,39      |
|                | 0,014   | 0,063   |              |              | 0,77      |
| 10% CB         | 0,023   | 0,103   | 0,029        | 0,134        | 1,28      |
|                | 0,031   | 0,139   |              |              | 1,74      |
|                | 0,034   | 0,161   |              |              | 2,03      |
| 15% CB         | 0,012   | 0,148   | 0,015        | 0,149        | 2,18      |
|                | 0,018   | 0,156   |              |              | 2,21      |
|                | 0,016   | 0,144   |              |              | 2,05      |
| 20% CB         | 0,025   | 0,148   | 0,031        | 0,190        | 1,97      |
|                | 0,034   | 0,202   |              |              | 2,69      |
|                | 0,034   | 0,220   |              |              | 2,98      |
| 25% CB         | 0,032   | 0,190   | 0,030        | 0,202        | 2,52      |
|                | 0,029   | 0,181   |              |              | 2,43      |
|                | 0,029   | 0,234   |              |              | 3,28      |
| 30% CB         | 0,071   | 0,214   | 0,068        | 0,212        | 2,29      |
|                | 0,074   | 0,255   |              |              | 2,89      |
|                | 0,059   | 0,168   |              |              | 1,73      |