UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

TESE DE DOUTORADO

Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil

MARIA LUIZA LOPES DE OLIVEIRA SANTOS

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcus Antonio de F. Melo

Natal, Agosto de 2008.

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM

MARIA LUIZA LOPES DE OLIVEIRA SANTOS

Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos pré-requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcus Antonio de F. Melo

Natal, Agosto de 2008.

Divisão de Serviços Técnicos

Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Santos, Maria Luiza Lopes de Oliveira.
Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil / Maria Luiza Lopes de Oliveira Santos. – Natal, RN, 2008.
163 f. : il.

Orientador: Antonio Eduardo Martinelli.
Co-orientador: Marcus Antonio de F. Melo.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

1. Argamassa – Tese. 2. Microestrutura – Tese. 3. Resíduos minerais – Tese. I. Martinelli, Antonio Eduardo. II Melo, Marcus Antonio de. III. Título.

RN/UF/BCZM CDU 666.97(043.2)

MARIA LUIZA LOPES DE OLIVEIRA SANTOS

Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título

DOUTOR EM ENGENHARIA

Especialidade CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, área de concentração COMPÓSITOS, aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

_____
Prof. Antonio Eduardo Martinelli, Dr.
Orientador

_____
Prof. Marcus Antonio de F. Melo, Dr.
Co-orientador

_____
Prof. Wilson Acchar, Dr.
Coordenador do PPGCEM

Banca Examinadora:

_____
Profª Dulce Maria de Araújo Melo, Drª.
UFRN

_____
Profª. Maria das Vitórias V. A. de Sá, Drª.
UFRN

_____
Prof. Alexandro Diógenes Barreto, Dr.
CEFET/RN

_____
Profª Érika Pinto Marinho, Drª.
UFPE

Aos meus queridos Alan Salvio, meu marido
e Maria Auxiliadora, minha mãe,
por tudo que representam na minha vida.

Esta é uma conquista nossa!!!

AGRADECIMENTOS

À Deus, essência das nossas vidas, que mais uma vez esteve ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu marido, Alan Salvio José dos Santos, pelo amor, compreensão, incentivo e incondicional apoio em todos os momentos.

À minha mãe, Maria Auxiliadora de Carvalho Lopes, que sempre esteve presente nas minhas conquistas, a minha profunda e eterna gratidão.

À toda a minha família, pelas orações, apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

Ao professor Antonio Eduardo Martinelli pela orientação, convivência, ensinamentos, aprendizado e amizade.

Aos professores Marcus Antonio F. de Melo e Dulce Maria de Araújo Melo pelas sugestões e apoio durante a realização desta pesquisa.

Aos Professores Edilberto Borja e José Eurico de Queiroz, docentes do CEFET/RN, pela incansável disponibilidade em trocar e discutir idéias, vocês foram fundamentais!.

À minha eterna mestra e querida amiga, Profª Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá, pelo apoio e constante incentivo ao longo desta árdua caminhada.

Ao Prof. Wilson Acchar, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, pela presteza e apoio durante a realização do programa experimental.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pelo financiamento desta pesquisa.

À Gerência do Departamento de Construção Civil do CEFET/RN, em especial ao prof. Evandro Souza e ao coordenador do laboratório o eng. Lenilson Oliveira, pelo apoio durante a realização do programa experimental.

Ao prof. Vicente Coney Campiteli, pelas suas valiosas e constantes contribuições.

À Anaaiara Varela pela incansável ajuda durante a realização dos ensaios.

Aos bolsistas Elisângela Barros e Bruno Leonardo Costa, pelo apoio durante a realização dos ensaios mecânicos.

Aos bolsistas Tiago Renovato e Danilo Brasil, pelo apoio nas análises por DRX.

Ao Sr. Francisco de Assis Braz técnico do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFRN, pela sua presteza.

À Lídia Gabriella da coordenação do Programa de Pós-Graduação, pela sua presteza, apoio e simpatia.

À indústria Carbomil S/A, na pessoa do Sr. Crisanto Prado, pelo fornecimento da cal.

À concreteira SOMIX pelo fornecimento do cimento.

À cerâmica Elizabeth pelo fornecimento do resíduo do polimento do porcelanato.

À indústria BQMIL pelo fornecimento do resíduo de pedreira de rocha calcária.

E por fim, a todos que não foram oportunamente citados, mas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

“Conhecimento sem transformação não é sabedoria.
O verdadeiro caminho da sabedoria pode ser
identificado por apenas três coisas:
precisa ter amor,
deve ser prático,
e pode ser trilhado por qualquer um”.

Paulo Coelho

RESUMO

A preocupação ambiental diz respeito, entre outras coisas, ao consumo excessivo ou ineficiente de recursos naturais não-renováveis (LEITE, 2001). A indústria da construção civil é considerada como a maior consumidora de matérias-primas naturais, contribuindo assim, de maneira relevante, para uma maior degradação do meio ambiente. A utilização do resíduo de pedreira de rocha calcária (RPPC) e resíduo do polimento do porcelanato (RPP), em substituição parcial do cimento, pode ser um caminho alternativo para minimização deste problema. Esta pesquisa teve como objetivo estudar as propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas mistas produzidas com resíduos (RPPC e RPP), comparando o desempenho das mesmas com as argamassas de referência. Na produção dessas argamassas se utilizou o cimento Portland CP II F – 32, cal hidratada CH I, areia de rio e água da concessionária local. Os resíduos utilizados foram caracterizados quanto a massa específica, massa unitária, granulometria a laser, microscopia eletrônica de varredura, difratometria de raios-X e fluorescência de raios-X. Os traços utilizados foram 1:1:6 e 1:0,5:4,5, ambos em volume, com a relação água/cimento fixada, respectivamente, em 1,87 e 1,45. Foram produzidas 18 composições de argamassas, 16 utilizando RPPC e RPP e 02 composições convencionais que serviram de referência. Com as argamassas no estado fresco, foram realizados os ensaios de índice de consistência, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado. Já no estado endurecido, os ensaios realizados foram: densidade de massa aparente, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade. As argamassas foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (EDS), difração de raios-X e fluorescência de raios-X. Além disso, foram classificadas quanto aos padrões estabelecidos pela NBR 13281 (ABNT, 2005). Os resultados encontrados mostram que as argamassas formuladas com resíduos não sofreram alterações significativas no que se refere ao índice de consistência, retenção de água, densidade de massa no estado fresco, teor de ar incorporado e densidade de massa aparente no estado endurecido. Já em relação ao módulo de elasticidade a presença dos resíduos na mistura ocasionou a diminuição do mesmo, melhorando assim o desempenho da argamassa. Porém, a resistência à tração na flexão e à resistência à compressão, além da absorção de água por capilaridade, tiveram o seu desempenho comprometidos.

Palavras-chaves: argamassa. resíduos. microestrutura.

ABSTRACT

Current environmental concerns include the excessive consumption and inefficient use of non-renewable natural resources. The construction industry is considered one of the largest consumers of natural raw materials, significantly contributing to the environmental degradation of the planet. The use of calcareous quarry (RPPC) and porcelain tile polishing residues (RPP) as partial replacements of the cement in mortars is an interesting alternative to minimize the exploration of considerably large amounts of natural resources. The present study aimed at investigating the properties of fresh and hardened mortars produced using residues to replace cement. The residues used were fully characterized to determine their specific mass, unitary mass, particle size distribution and morphology, and composition. The performance of the mortars was compared to that of reference compositions, prepared without residues. A total of 18 compositions were prepared, 16 using residues and 2 reference ones. The mortars were prepared using Portland CP II F – 32 cement, CH I hydrated lime, river sand and tap water. The compositions of the mortars were 1:1:6 and 1:0.5:4.5 (vol%), and water to cement ratios of 1.87 and 1.45 were used, respectively. The mortars in the fresh state were evaluated by consistency index, water retention, density of mass and incorporated air content tests. In their hardened state, the mortars were evaluated by apparent mass density, modulus of elasticity, flexural tensile strength, compressive strength and water absorption by capillarity. The mortars were also analyzed by scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, X-ray diffraction and fluorescence. Finally, they were classified according to NBR 13281 standards. The mortars prepared using residues partially replacing the cement exhibited lower modulus of elasticity compared to the reference compositions, thus improving the performance in their intended use. On the downside, the water absorption by capillarity was affected by the presence of residues and both the tensile and compressive strength were reduced. However, from the overall standpoint, the replacement of cement by calcareous quarry or porcelain tile polishing residues did not result in significant changes in the properties of the mortars. Therefore, compositions containing these residues can be used in the construction industry.

Keywords: mortar, residues, microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Micrografia do concreto modificado com 1% de pilha zinco-carvão, após 28 dias de cura a 23 °C e umidade de 95% 32

Figura 2 – Descarga da lama na barragem de rejeito 33

Figura 3 – Amostragem no tubo de descarga da lama na barragem de rejeito 34

Figura 4 – Difração de raios-X da amostra de escória moída 38

Figura 5 – Ancoragem da argamassa na base 57

Figura 6 – Adequada aderência inicial 57

Figura 7 – Argamassa forte e argamassa fraca 59

Figura 8 – Exemplo de estocagem do resíduo de pedreira no pátio das empresas 70

Figura 9 – Cabeças de polimento com tijolos abrasivos 74

Figura 10 – Estocagem do resíduo do polimento do porcelanato 74

Figura 11 – Difração de raios-X do resíduo do polimento do porcelanato 76

Figura 12 – Difração de raios-X do RPP 76

Figura 13 – Distribuição do tamanho de partícula do RPP 77

Figura 14 – Partícula de resíduo do polimento do porcelanato retro-espelhado 77

Figura 15 – Diagrama esquemático do procedimento experimental 81

Figura 16 – Misturador mecânico 87

Figura 17a – Flow table 88

Figura 17b – Tronco de cone utilizado no ensaio 88

Figura 17c – Medição do espalhamento da argamassa 88

Figura 18 – Aparelhagem para realização do ensaio 89

Figura 19 – Equipamento utilizado no ensaio 90

Figura 20a – Ensaio de resistência à tração na flexão 91

Figura 20b – Ensaio de resistência à compressão 91

Figura 21 – Corpos-de-prova em contato com a água 92

Figura 22 – Curva granulométrica 97

Figura 23 – Distribuição de tamanhos de partículas do RPPC 98

Figura 24 – Distribuição de tamanhos de partículas do RPP 99

Figura 25 – Micrografia do resíduo de pedreira de rocha calcária – elétrons retro-espalhados 100

Figura 26 – Micrografia do resíduo do polimento do porcelanato – elétrons secundários 101
Figura 27 – DRX do RPPC 101
Figura 28 – DRX do RPP 102
Figura 29 – Correlação dos teores de resíduos com o índice de consistência das argamassas 106
Figura 30 – Correlação do teor de resíduo com a retenção de água das argamassas 108
Figura 31 – Correlação do teor de resíduo com a densidade de massa no estado fresco das argamassas 111
Figura 32 – Correlação do teor de resíduo com o teor de ar incorporado das argamassas 114
Figura 33 – Correlação do teor de resíduos com a densidade de massa aparente das argamassas 116
Figura 34 - Correlação do teor de resíduos com o módulo de elasticidade das argamassas 120
Figura 35 - Correlação do teor de resíduos com a resistência à tração na flexão das argamassas 124
Figura 36 - Correlação do teor de resíduos com a resistência à compressão das argamassas 124
Figura 37 - Correlação do teor de resíduos com a absorção de água por capilaridade (t = 90 minutos) das argamassas 128
Figura 38 – Micrografia do traço A1 de referência 129
Figura 39 – Análise espectroscópica realizada no traço A1 de referência 130
Figura 40 - Micrografia do traço A1 produzido com 30% de RPPC 130
Figura 41 – Análise espectroscópica realizada no traço A1 produzido com 30% de RPPC 131
Figura 42 - Micrografia do traço A1 produzido com 30% de RPP 131
Figura 43 – Análise espectroscópica realizada no traço A1 produzido com 30% de RPP 132
Figura 44 – Micrografia do traço A2 de referência 132
Figura 45 – Análise espectroscópica realizada no traço A2 de referência 133
Figura 46 - Micrografia do traço A2 produzido com 30% de RPPC 133

Figura 47 – Análise espectroscópica realizada no traço A2 produzido com 30% de RPPC 134
Figura 48 - Micrografia do traço A2 produzido com 30% de RPP 134
Figura 49 – Análise espectroscópica realizada no traço A2 produzido com 30% de RPP 135
Figura 50 – DRX do traço A1 de referência 136
Figura 51 – DRX do traço A1 com 30% de RPPC 137
Figura 52 – DRX do traço A1 com 30% de RPP 138
Figura 53 – DRX do traço A2 de referência 139
Figura 54 – DRX do traço A2 com 30% de RPPC 140
Figura 55 – DRX do traço A2 com 30% de RPP 141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de cimento Portland 45

Tabela 2 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13530 68

Tabela 3 – Classificação granulométrica dos produtos de britagem de rochas 71

Tabela 4 – Formulação das argamassas 80

Tabela 5 – Conversão dos traços das argamassas 86

Tabela 6 – Relação água/cimento, água/aglomerante, água/materiais secos, cimento/materiais secos, cimento/cal e índice de consistência 87

Tabela 7 – Amostras selecionadas para análise microscópica e EDS 93

Tabela 8 – Massa específica dos materiais de partida 95

Tabela 9 – Granulometria do agregado miúdo 96

Tabela 10 – Granulometria a laser do RPPC 97

Tabela 11 – Granulometria a laser do RPP 99

Tabela 12 – Fluorescência de raios-X do RPPC 102

Tabela 13 – Fluorescência de raios-X do RPP 103

Tabela 14 – Resultados médios dos índices de consistência das argamassas 104

Tabela 15 – Variação do índice de consistência entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência 104

Tabela 16 – Resultados médios da retenção de água das argamassas 107

Tabela 17 - Variação da retenção de água entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência 107

Tabela 18 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13281 109

Tabela 19 – Resultados médios da densidade de massa das argamassas 110

Tabela 20 - Variação da densidade de massa entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência 110

Tabela 21 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13281 112

Tabela 22 – Resultados médios do teor de ar incorporado das argamassas 113

Tabela 23 – Variação do teor de ar incorporado entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência 113

Tabela 24 - Resultados médios da densidade de massa aparente das argamassas 115

Tabela 25 - Variação da densidade de massa aparente entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência 115

Tabela 26 - Classificação das argamassas segundo a NBR 13281 117
Tabela 27 - Resultados médios do módulo de elasticidade das argamassas 118
Tabela 28 - Variação do módulo de elasticidade entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência 118
Tabela 29 - Resultados médios da resistência à tração na flexão das argamassas 121
Tabela 30 - Variação da resistência à tração na flexão entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência 121
Tabela 31 - Resultados médios da resistência à compressão das argamassas 122
Tabela 32 - Variação da resistência à compressão entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência 122
Tabela 33 - Classificação das argamassas segundo a NBR 13281 125
Tabela 34 - Classificação das argamassas segundo a NBR 13281 126
Tabela 35 - Resultados médios da absorção de água por capilaridade (t = 90 minutos) das argamassas 127
Tabela 36 - Variação da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência 127
Tabela 37 – Fluorescência de raios-X do traço A1 de referência 136
Tabela 38 – Fluorescência de raios-X do traço A1 com 30% de RPPC 137
Tabela 39 – Fluorescência de raios-X do traço A1 com 30% de RPP 138
Tabela 40 – Fluorescência de raios-X do traço A2 de referência 139
Tabela 41 – Fluorescência de raios-X do traço A2 com 30% de RPPC 140
Tabela 42 – Fluorescência de raios-X do traço A2 com 30% de RPP 141
Tabela A1 – Caracterização química do cimento Portland 160
Tabela A2 – Caracterização física e mecânica do cimento Portland 160
Tabela A3 – Resistência à compressão do cimento Portland 160
Tabela B1 – Caracterização física da cal CH I 161
Tabela B2 – Caracterização química da cal CH I 161
Tabela C1 – Resistência à compressão 162
Tabela C2 – Densidade de massa aparente no estado endurecido 162
Tabela C3 – Resistência à tração na flexão 162
Tabela C4 – Densidade de massa no estado fresco 162
Tabela C5 – Retenção de água 163

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A1	Argamassa tipo 1
A2	Argamassa tipo 2
a/c	Água/cimento
agr	Agregado
C_3A	Aluminato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico (ferrita)
CH	Hidróxido de cálcio (portlandita)
C_5H_2	Gipsita
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio (cal livre)
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio (portlandita)
cim	Cimento
C_2S	Silicato dicálcico (belita)
C_3S	Silicato tricálcico (alita)
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CP II F	Cimento Portland composto com filler de resistência 32 MPa
CP V	Cimento Portland de alta resistência inicial
$f_{a/agl}$	Relação água/aglomerante
$f_{a/c}$	Relação água/cimento
$f_{a/mat.secos}$	Relação água/materiais secos
$f_{c/cal}$	Relação cimento/cal
$f_{c/mat.secos}$	Relação cimento/materiais secos
$f_{cal/cim}$	Relação cal/cimento
$f_{a/res}$	Relação água/resíduo
IC	Índice de consistência
MgO	Óxido de magnésio
MnO	Óxido de manganês
Pp	Proporção
res	Resíduo
SrO	Óxido de estrôncio
ZnO	Óxido de zinco

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BRS	Building Research Station
BS	British Standard
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
CTGÁS	Centro de Tecnologias do Gás
DRX	Difração de Raios-X
LIMEV	Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica de Varredura
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MR	Méthode RILEM
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RCMG	Resíduo de Corte de Mármore e Granito
REF	Referência
RILEM	Réunion Internationale dês Laboratories D' Essais Et Des Recherches Sur Les Matériaux Et Les Consctructions
RPP	Resíduo do Polimento do Porcelanato
RPPC	Resíduo de Pedreira de Rocha Calcária
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 21
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 21
1.2 JUSTIFICATIVAS 24
1.2.1 Ambiental 24
1.2.2 Econômica 25
1.2.3 Tecnológica 26
1.3 OBJETIVOS 27
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO 27
2. ESTADO DA ARTE 29
2.1 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS MINERAIS PELA CONSTRUÇÃO CIVIL 29
2.2 MATRIZES CIMENTÍCIAS COM RESÍDUOS MINERAIS 30
2.2.1 Areia de fundição 30
2.2.2 Rejeito de pilha 31
2.2.3 Resíduos de corte de mármore e granito 33
2.2.4 Resíduos de construção e demolição 35
2.2.5 Escória de alto-forno granulada 37
2.2.6 Cinza volante 39
3. REFERENCIAL TEÓRICO 41
3.1 ARGAMASSA 41
3.1.1 Definição 41
3.1.2 Tipos de argamassa 41
3.1.3 Materiais constituintes da argamassa mista 42
3.1.3.1 Cimento 42
3.1.3.1.1 Definição 43
3.1.3.1.2 Histórico 43
3.1.3.1.3 Fabricação do cimento Portland 43
3.1.3.1.4 Composição química do cimento 44
3.1.3.1.5 Tipos de cimento Portland 45
3.1.3.2 Cal 46
3.1.3.2.1 Histórico 46
3.1.3.2.2 Tipos de cal 46

3.1.3.2.2.1 Cal virgem 46
3.1.3.2.2.2 Cal hidratada 46
3.1.3.2.2.3 Cal hidráulica 47
3.1.3.3 Agregados miúdos 47
3.1.3.3.1 Definição 47
3.1.3.3.2 Função 47
3.1.3.3.3 Classificação 47
3.1.3.4 Água 48
3.1.4 Funções e características 48
3.1.4.1 Argamassa de assentamento 49
3.1.4.2 Argamassa de revestimento 49
3.1.5 Principais propriedades 50
3.1.5.1 Propriedades no estado fresco 51
3.1.5.1.1 Trabalhabilidade 51
3.1.5.1.2 Consistência e retenção de consistência 51
3.1.5.1.3 Coesão e tixotropia 53
3.1.5.1.4 Plasticidade 54
3.1.5.1.5 Retenção de água 54
3.1.5.1.6 Massa específica e teor de ar incorporado 55
3.1.5.1.7 Exsudação 56
3.1.5.1.8 Aderência inicial 56
3.1.5.1.9 Tempo de endurecimento 58
3.1.5.1.10 Retração plástica 58
3.1.5.2 Propriedades no estado endurecido 59
3.1.5.2.1 Resistência mecânica 59
3.1.5.2.2 Elasticidade 60
3.1.5.2.3 Retração 61
3.1.5.2.4 Aderência 64
3.1.5.2.5 Permeabilidade 65
3.1.6 Durabilidade 66
3.1.7 Análise microestrutural 66
3.1.8 Classificação das argamassas 67
3.1.8.1 Argamassa de cal 68

3.1.8.2 Argamassa de cimento 69
3.1.8.3 Argamassa mista 69
3.2 RESÍDUO DE PEDREIRA 69
3.2.1 Definição 69
3.2.2 Obtenção e características 70
3.2.3 Utilização em matriz cimentícia 71
3.3 RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO 73
3.3.1 Definição 73
3.3.2 Obtenção e características 73
3.3.3 Utilização em matriz cimentícia 77
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL 79
4.1 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DAS ARGAMASSAS 79
4.2 FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS 79
4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 80
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 81
4.4.1 Cimento 81
4.4.2 Cal 82
4.4.3 Agregado miúdo 82
4.4.4 Resíduos 83
4.4.4.1 Pedreira de rocha calcária 83
4.4.4.2 Polimento do porcelanato 84
4.4.5 Água 85
4.5 CONVERSÃO DE TRAÇO EM VOLUME PARA MASSA 85
4.6 PREPARO DAS ARGAMASSAS 86
4.7 MÉTODOS DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS .. 88
4.7.1 Argamassa no estado fresco 88
4.7.1.1 Índice de consistência – trabalhabilidade 88
4.7.1.2 Retenção de água 88
4.7.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado 89
4.7.2 Argamassa no estado endurecido 89
4.7.2.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido 90
4.7.2.2 Módulo de elasticidade 90
4.7.2.3 Resistência à tração na flexão e à compressão 91

4.7.2.4 Absorção de água por capilaridade 91
4.7.2.5 Análise microestrutural 92
4.7.2.6 Análise por DRX e FRX 93
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 95
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA 95
5.1.1 Massa específica e massa unitária 95
5.1.2 Granulometria 96
5.1.2.1 Agregado miúdo 96
5.1.2.2 Resíduo de pedreira de rocha calcária 97
5.1.2.3 Resíduo do polimento do porcelanato 98
5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura 99
5.1.3.1 Resíduo de pedreira de rocha calcária 99
5.1.3.2 Resíduo do polimento do porcelanato 100
5.1.4 Difratometria de raios-X e Fluorescência de raios-X 101
5.1.4.1 Resíduo de pedreira de rocha calcária 101
5.1.4.2 Resíduo do polimento do porcelanato 102
5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM AS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO 103
5.2.1 Índice de consistência – trabalhabilidade 103
5.2.2 Retenção de água 106
5.2.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado 109
5.2.3.1 Densidade de massa 109
5.2.3.2 Teor de ar incorporado 112
5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM AS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO 114
5.3.1 Densidade de massa aparente 114
5.3.2 Módulo de elasticidade 117
5.3.3 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão 120
5.3.4 Absorção de água por capilaridade 126
5.3.5 Análise microestrutural 129
5.3.6 Análise por Difratometria de Raios-X e Fluorescência de Raios-X 135
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 142
6.1 CONCLUSÕES 142

6.2 CONTRIBUIÇÃO ORIGINAL PARA O CONHECIMENTO 145
6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 145
REFERÊNCIAS 147
ANEXOS 160

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Antes, assunto que se limitava aos estudiosos e militantes, a questão do meio ambiente virou tema mundial e hoje encontra-se presente nos mais diversos segmentos da sociedade. A preocupação com a preservação do meio ambiente já é vista como prioridade pelos poderes públicos e a adesão da sociedade se faz cada vez mais necessária. (OLIVEIRA, 2008).

Diante disso, a engenharia moderna é obrigada a trabalhar com três variáveis consideradas como básicas e que foram historicamente ignoradas: responsabilidade ambiental, responsabilidade social e sustentabilidade. O fato é que, a engenharia deve se aproximar das reais necessidades humanas, principalmente porque a indústria da construção civil é protagonista no cenário atual de poluição ambiental (DEL CARLO, 2008).

O desenvolvimento sustentável deve atender todas as necessidades das gerações do presente, sem que haja o comprometimento ao atendimento das necessidades de gerações futuras. Hoje é bastante clara a interdependência entre os conceitos de meio ambiente, valorização dos resíduos, saneamento e saúde, porém as ações nestes setores devem ser integradas e voltadas para a melhoria da qualidade de vida da sociedade.

Schenini et al (2004) ressaltam que, o estado possui um papel de extrema relevância no contexto da sustentabilidade. Como exemplo da atuação do estado, podemos citar a criação e aprovação de leis que incentivem e induzam a sociedade em direção ao desenvolvimento sustentável, bem como o implemento de políticas públicas que objetivem desenvolver a cultura de preservação.

Tudo que nos cerca e fazemos uso na nossa rotina diária um dia será resíduo: casas, escovas de dente, automóveis, móveis, pontes, aviões, televisão, colchão, roupas, sapatos, dentre outros. A esse total, devemos somar todos os resíduos do processo de extração de matérias-primas e de produção dos bens. Assim, em qualquer sociedade, a quantidade de

resíduos gerados supera a quantidade de bens consumidos. A sociedade industrial, ao multiplicar a produção de bens, agravou esse processo (ROCHA e JOHN, 2003).

A reciclagem, que aqui é definida como sendo o reaproveitamento dos materiais como matéria-prima para um novo produto, começou a se difundir nas últimas décadas. O consumo de recursos naturais e de energia tem crescido proporcionalmente ao crescimento e desenvolvimento da população mundial. A preocupação ambiental diz respeito, entre outras coisas, ao consumo excessivo ou ineficiente de recursos naturais não-renováveis (LEITE, 2001).

O desenvolvimento da reciclagem vem buscando assiduamente uma melhoria na qualidade de vida do ponto de vista ambiental, reduzindo assim, os resíduos gerados pela atividade industrial. No meio empresarial inicia-se a conscientização de que a geração de resíduos gera custos, pois requer seu tratamento e disposição em locais devidamente regulares e apropriados. Sendo assim, as diversas indústrias vêm buscando opções para diminuir os custos visando à redução dos impactos ambientais e o aumento da credibilidade perante o mercado consumidor (SILVA, 2005).

Silva (2005) ainda ressalta que, é importante observar que a reciclagem vem alcançando resultados relevantes no aspecto econômico, social e ambiental. Como suas principais vantagens, pode-se citar:

- Redução da quantidade de resíduos enviados para aterros industriais, economizando o custo com transporte e a redução de áreas degradadas;
- Economia de diversos recursos naturais;
- Melhoria da imagem da empresa perante os seus clientes;
- Redução dos custos industriais mediante a incorporação de resíduos em vários de seus processos produtivos.

A reciclagem é, sem dúvida, uma das melhores alternativas para reduzir o impacto que o meio ambiente pode sofrer com o consumo de matérias-primas, renováveis ou não, e a geração desordenada de resíduos. Nos últimos anos a reciclagem de resíduos tem sido

incentivada mundialmente, seja por questões políticas, econômicas ou ecológicas (LEITE, 2001).

A indústria da construção civil é considerada como a maior consumidora de matérias-primas naturais, contribuindo assim, de maneira relevante, para uma maior degradação do meio ambiente. Além disso, existe a contribuição indireta, onde se pode citar como exemplo a indústria do cimento que, segundo Capello (2008), responde por 5% das emissões mundiais de gás carbônico. Isso ocorre porque o processo de produção de cada tonelada de clínquer (seu principal componente) libera na atmosfera a mesma quantidade de CO_2.

O cimento é o insumo básico da indústria da construção civil, utilizado em grandes quantidades na produção de habitações, infra-estrutura, estradas, pontes, saneamento, hidrelétricas. Custo do cimento em relação ao custo total de uma obra residencial gira em torno de 7% a 9% (TEIXEIRA, 2008). Segundo reportagem publicada no site Cimento.org (2008), as vendas para o mercado interno no período de abril/2007 a março/2008 atingiram 46,1 milhões de toneladas produto.

Na última década, em especial, a construção civil vem buscando fazer uso de materiais que sejam duráveis, essa característica deve ser avaliada com a mesma atenção que as propriedades mecânicas e custo inicial. Esse fato faz com que pesquisas sejam realizadas buscando materiais resistentes e capazes de atender satisfatoriamente o desempenho e características importantes e desejáveis a cada material. Diante disso, o uso de materiais compósitos vem sendo uma alternativa viável. Segundo Budinsky (1996), os materiais compósitos podem ser definidos como a mistura de dois ou mais materiais diferentes com características inferiores as do material resultante.

A utilização de resíduos minerais tem demonstrado ser muito importante no desempenho dos materiais que possuem matrizes cimentícias, tanto nas propriedades no estado fresco quanto no endurecido, como no aspecto da durabilidade. A incorporação de resíduos na produção desses materiais pode proporcionar economia de energia e contribuir para o desenvolvimento sustentável (SILVA, 2005). O volume de subprodutos industriais, com ou sem propriedades pozolânicas, produzidos mundialmente, é muito superior à demanda na reciclagem. Portanto, é de grande importância o estudo da substituição de parte do cimento

do concreto ou da argamassa por resíduos com propriedades pozolânicas ou de preenchimento.

Pode-se citar como sendo subproduto industrial o material fino de britagem das pedreiras oriundo da cominuição de rochas. No Brasil esse subproduto possui denominações variadas, como pó-de-pedra, areia industrial, areia artificial (LANG e ROCHA, 2006) ou finos de pedreira. Nesta pesquisa, esses finos serão chamados resíduo de pedreira de rocha calcária (RPPC). Esse material, ainda vem sendo utilizado no Brasil de forma discreta. Reforçando a idéia de sustentabilidade, e com o intuito de se reduzir ao máximo os impactos ambientais gerados pelos rejeitos das pedreiras, optou-se por utilizar os mesmos, nesta pesquisa, na forma em que eles se encontram armazenados no pátio da pedreira.

Além da utilização do resíduo de pedreira de rocha calcária (RPPC), e atendendo a busca de utilização de rejeitos, objetivando uma maior preservação ambiental, utilizou-se também o resíduo do polimento do porcelanato, nesta pesquisa denominado de RPP, considerando o grande impacto ambiental gerado pela indústria cerâmica de revestimento.

Segundo Silva (2005), a indústria cerâmica para revestimentos internos e externos, usados na construção civil, produz uma grande quantidade de resíduos. Uma parte é reaproveitada no próprio setor e a outra é descartada. O processo de fabricação do porcelanato dá origem a uma quantidade de resíduo ainda não aproveitado pelas indústrias. Um dos resíduos produzidos na indústria de porcelanato é proveniente do polimento, necessário para dar acabamento à peça produzida.

1.2 JUSTIFICATIVAS

1.2.1 Ambiental

Em todos os segmentos industriais é notório o investimento das empresas em equipamentos e formação de profissionais para eliminar a cultura do desperdício e consolidar a cultura da redução de perdas, reaproveitamento e reciclagem de resíduos. Segundo Moura apud Silva (2006), os resíduos não só provocam o impacto ambiental, como também a sua redução e a sua reutilização podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos, o que implica muitas vezes num menor dispêndio econômico.

De acordo com Sjostrom apud John (2000), a construção civil consome entre 14% a 50% dos recursos naturais que são extraídos da terra. Diante disso, é fundamental que a indústria da construção civil passe a consumir, cada vez mais, resíduos ao invés de matérias-primas não renováveis.

Como exemplo de consumo pela construção civil, podemos citar a exploração de pedreiras. Onde, a britagem de rochas (basaltos, calcários, granitos, gnaisses, entre outras) gera basicamente cinco tipos de produtos: finos de pedreira, brita 0, brita 1, brita 2, e brita 3. Destes produtos, os únicos que encontram aplicações nobres na construção civil são as britas 1, 2 e 3, sendo a brita 0 e os finos de pedreiras utilizados apenas em aplicações sem muito valor comercial (SAMPAIO e ALMEIDA, 2002). Quanto aos finos de pedreira, quando não possuem destinação definida, fica estocado em pilhas ao ar livre no pátio das pedreiras e acabam provocando sérios danos ambientais, como assoreamento de rios e leitos de água, poluição visual e poluição atmosférica (SÁ, 2006).

Quanto à indústria cerâmica, ressalta-se que a mesma produz em média 32 toneladas do resíduo do polimento do porcelanato por mês. Até o presente momento, não há registros de utilização desse resíduo pela indústria da construção civil (SOUZA, 2007). O resíduo é estocado ao ar livre no pátio da indústria, por período indeterminado, ficando exposto à ação das intempéries, podendo gerar danos ambientais como: poluição atmosférica, poluição visual, dentre outros.

1.2.2 Econômica

Segundo Santin apud Silva (2006), no Brasil, são freqüentes os processos construtivos de edifícios que empregam paredes de alvenaria revestidas com argamassas, tanto no sistema de vedação interna, como externa; além do crescente uso da alvenaria estrutural. Isso ocorre, principalmente, em habitações de média e baixa renda, onde os conglomerados à base de cimento e agregados minerais perfazem 20% do custo médio das obras. Também evidenciando o elevado consumo de argamassas, os dados de Capozzi apud SILVA (2006), indicam que 37% dos edifícios em obra, na cidade de São Paulo, usam revestimentos de argamassa com acabamento de pintura em fachadas.

O consumo de argamassas nas obras brasileiras chega a 0,145 m³ de argamassa por m² de construção, sendo 0,030 m³ para alvenaria, 0,040 m³ para contrapiso, 0,030 m³ para revestimento externo e 0,045 m³ para revestimento interno (SOUZA e FRANCO, 1997). O mesmo autor ainda ressalta que, o consumo de cimento por m² de construção é de aproximadamente 26,05 kg/m², onde 4,32 kg são consumidos em alvenaria, 10 kg são consumidos em contrapiso, 5,25 kg consumidos em revestimento externo e 6,48 kg são consumidos em revestimento interno.

A substituição parcial do cimento por percentuais de finos de pedreira e resíduo do polimento do porcelanato na indústria da construção civil possui várias vantagens, entre elas se destacam:

- Aproveitamento integral das pedreiras;
- Reciclagem total do resíduo do polimento do porcelanato gerado pela indústria cerâmica, visto que os mesmos em geral são descartados em aterros gerando custos aos fabricantes;
- Redução do consumo de cimento, cuja produção traz grandes impactos ambientais;
- Soluções inquestionáveis de problemas ambientais.

Além disso, parte-se do princípio que, por serem resíduos minerais, o resíduo de pedreira de rocha calcária e o resíduo do polimento do porcelanato, podem desenvolver atividade pozolânica.

1.2.3 Tecnológica

A reciclagem é de fundamental importância para a redução do impacto ambiental e vem mostrando ser uma alternativa interessante para a utilização dos resíduos pela indústria da construção civil, desenvolvendo materiais que atendam aos padrões técnicos, melhorando suas propriedades e não oferecendo riscos ao meio ambiente (SILVA, 2005).

De acordo com Silva e Campiteli (2006), pode-se reduzir os custos de produção das argamassas de cimento e areia, como também das argamassas de cimento, cal e areia, sem comprometer o desempenho das mesmas, substituindo-se cimento e/ou cal por material pulverulento da areia artificial, fazendo-se uso de proporções adequadas.

Em relação ao resíduo do polimento do porcelanato, Silva (2005), chegou à conclusão de que, a adição de um percentual de 10% do referido resíduo na confecção de concretos, gerou um aproveitamento satisfatório das propriedades mecânicas e dos aspectos de durabilidade dos mesmos, desenvolvendo, portanto, um material com melhor desempenho e contribuindo para a preservação do meio ambiente.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é mostrar a viabilidade de se substituir, em percentuais de 5%, 10%, 20% e 30%, o cimento por resíduo de pedreira de rocha calcária ou resíduo do polimento do porcelanato na mistura de argamassas mistas de assentamento e revestimento, sem causar danos ao desempenho das mesmas.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar as argamassas formuladas através do ensaio de índice de consistência, retenção de água, densidade de massa no estado fresco, teor de ar incorporado, densidade de massa aparente no estado endurecido, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade;
- Avaliar a influência do resíduo de pedreira de rocha calcária e do resíduo do polimento do porcelanato nas propriedades e microestrutura das argamassas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é composta por seis capítulos, sendo que no primeiro foi colocada a importância do tema, as justificativas e os objetivos da pesquisa.

No segundo capítulo está apresentado o estado da arte sobre os principais resíduos minerais utilizados na confecção de materiais que possuem matriz cimentícia.

O terceiro capítulo aborda o referencial teórico sobre o cimento, argamassas, resíduo de pedreira de rocha calcária e resíduo proveniente do polimento do porcelanato.

No quarto capítulo encontra-se o programa experimental e os ensaios realizados.

Em seguida, no quinto capítulo, são apresentados, analisados e discutidos os resultados dos ensaios.

O sexto capítulo apresenta as conclusões finais sobre a pesquisa, validação da hipótese e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Logo após o sexto capítulo encontram-se as referências e os anexos da pesquisa.

CAPÍTULO 2
ESTADO DA ARTE

2.1 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS MINERAIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

De acordo com Selmo (1989) apud Silva (2006), nos livros de BOLTSHAUER (1963) constam, que na Grécia, por volta de 2000 a.C., a argila crua foi empregada em diversas construções de taipa ou pau-a-pique, envolvendo as estruturas resistentes de madeira. Técnica idêntica foi utilizada pela arquitetura romana entre os séculos VII e VI a.C. nas construções egípcias modestas, de 1600 a 1100 a.C., a argila em pasta era utilizada envolvendo a armação estrutural das casas, feitas de caules de plantas ou de tronco de palmeiras. A argila cozida em placas molduradas e com baixos relevos foi também empregada na arquitetura grega, para revestir os paramentos de pedra das fachadas. Os gregos e os romanos preparavam misturas de cal, areia e água, ou adicionavam gesso para obter o estuque, que constitui uma especialidade para revestimentos internos. Em certos casos, adicionavam também na mistura o pó de mármore. Os romanos fizeram uso amplo das argamassas, tanto no assentamento das alvenarias, como nos revestimentos de seus edifícios. Portanto, há mais de 2.000 anos, a argamassa vem sendo utilizada para assentamento e revestimento dos blocos de pedra que constituem as paredes das edificações.

Segundo Westphal apud Silva (2006), no Brasil, a argamassa passou a ser utilizada no primeiro século para assentamento de alvenaria de pedra (largamente utilizada na época). A cal utilizada na argamassa era obtida através da queima de conchas e mariscos. O óleo de baleia também era bastante utilizado como aglomerante naquela época.

A reciclagem dos rejeitos gerados pelas indústrias para uso como matérias-primas alternativas não é nova, e tem sido efetuada com sucesso em vários países. A construção civil é o ramo da atividade tecnológica que pelo volume de recursos naturais consumidos, parece ser bastante indicado para absorver rejeitos sólidos (AHMED, 1996 apud COIMBRA et al, 2004).

Desde a antiguidade, o homem dependeu das rochas, inicialmente usadas como abrigo e, depois, como arma e ferramenta. Hoje, mesmo com toda a sofisticação e tecnologia de que dispomos, é indiscutível a nossa dependência aos recursos minerais (AMORIM et al, 1999).

A adição mineral incorporada ao cimento não é um processo recente, originalmente incorporando pozolanas naturais à mistura e algum tempo depois, cinzas industriais, com propriedades semelhantes às primeiras. As pesquisas pioneiras com cinzas residuais datam de 1930 nos Estados Unidos (GARCIA et al, 2006).

Os bens minerais têm uma importância significativa para a sociedade, na qual nenhuma civilização pode prescindir do seu uso, principalmente, quando se pensa em qualidade de vida, uma vez que as necessidades básicas do ser humano são atendidas essencialmente por estes recursos (KUMMER et al, 2007).

As pesquisas caminham para o uso de adições inertes ao cimento, visando além das propriedades químicas e mecânicas, também a redução de problemas ambientais causados pela geração de toneladas de resíduos minerais (GARCIA et al, 2006).

A seguir, encontra-se o estado da arte dos principais resíduos minerais utilizados na confecção de materiais com matrizes cimentícias. Ressalta-se que os resíduos provenientes da exploração de rochas, denominados finos de pedreira, e do polimento do porcelanato, ambos utilizados nesta pesquisa, serão abordados no terceiro capítulo deste trabalho.

2.2 MATRIZES CIMENTÍCIAS COM RESÍDUOS MINERAIS

2.2.1 Areia de fundição

A indústria metalúrgica é historicamente conhecida como um setor que produz volumes consideráveis de resíduos sólidos inertes aos seus processos produtivos, dentre eles se destaca a areia de fundição. Apesar da implantação de novas tecnologias e um maior rigor por parte dos órgãos ambientais, grandes volumes de resíduos sólidos continuam sendo gerados e ainda preocupam os empresários do setor, devido, principalmente, às leis de responsabilidade ambiental e ao custo relativamente elevado para a gestão e destinação destes resíduos (CRUZ, 2002).

Dentre os resíduos produzidos pela indústria metalúrgica a areia de fundição é a mais aplicada, por apresentar características similares ao agregado miúdo comumente utilizado no setor construtivo (PEREIRA, 2002 apud NASCIMENTO et al, 2007). Assim, diversos

trabalhos têm sido desenvolvidos com a utilização deste resíduo como agregado, visando reutilizá-lo e assim gerar uma destinação final ambientalmente correta para o mesmo (NASCIMENTO et al, 2007).

A areia de fundição é composta de areia base, onde a sílica na forma de quartzo é o principal componente e proveniente de reservas naturais (MARIOTTO, 2001 apud NASCIMENTO et al, 2007); considera-se como aditivos da areia de fundição a betonita e o pó de carvão. A areia base é considerada um material inerte dentro da pasta de cimento (WATANABE, 2004 apud NASCIMENTO et al, 2007).

Estudos comprovam que a incorporação de bentonita nas pastas promove a formação de etringita e aumenta a relação Si/Ca, fator responsável pela formação de C-S-H, isso demonstra o aumento no grau de cristalinidade do material. Já as pastas elaboradas com pó de carvão não influenciam significativamente na hidratação do cimento, o mesmo favorece apenas a formação de etringita. A análise através da microscopia eletrônica de varredura mostra que o aumento das adições provoca uma maior formação de cristais de etringita, principalmente das amostras com bentonita (NASCIMENTO et al, 2007).

2.2.2 Rejeito de pilha

A resolução 257/99 publicada pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) vem delineando o destino de baterias e pilhas no país. O artigo 6º da lei determina que, a partir de 1º de janeiro de 1999, a fabricação, importação e comercialização de pilhas deve obedecer aos seguintes limites de metais ativos nas pilhas: 0,010% em peso de mercúrio, 0,015% de cádmio e 0,200% de chumbo (COIMBRA et al, 2004).

Neste contexto, se encontram as pilhas de zinco-carvão, que devido ao uso fácil e pelo razoável desempenho ou pela razão (característica da pilha)/preço, são bastante utilizadas. O uso deste tipo de pilha vem aumentando significativamente nas últimas décadas, devido a este tipo de pilha não possuir metais pesados como o mercúrio e introduzir o conceito de “baterias livre de metais pesados”. Atualmente, a indústria de pilhas utiliza cerca de 4% do zinco produzido no Brasil, isto equivale a aproximadamente, 8 mil toneladas ao ano, que são usadas e depois descartadas no lixo doméstico (COIMBRA et al, 2004).

Segundo Coimbra et al (2004), o concreto com adição de 1% em peso de pilha zinco-carvão, aumenta a resistência mecânica à compressão e diminui a deformação, em relação ao concreto sem adição. Porém, com 10% de adição, o concreto não apresentou fase aglomerante suficiente para apresentar resistência. Inclusive, mostrou características de "esfarelamento" e perda de partículas de areia e brita, não mantendo a homogeneidade em sua utilização.

Na composição contendo 1% de adição, ocorreu a formação de agulhas (Figura 1) que possibilitou o entrelaçamento das fases da pilha com a pasta de cimento fazendo com que, muito provavelmente, ocorresse o aumento da resistência mecânica, já para a composição com 10% de adição, pode ter ocorrido a interferência dos constituintes da pilha nas reações de hidratação da pasta de cimento, visto experimentalmente pelo típico odor de amônia na mistura (COIMBRA et al, 2004).

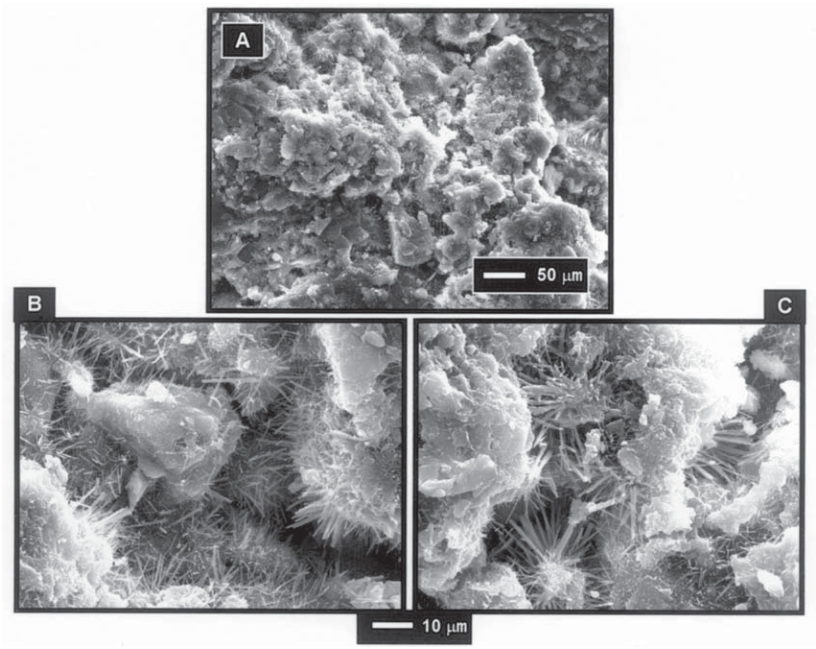


Figura 1 – Micrografias do concreto modificado com 1% em peso de pilha zinco-carvão, após 28 dias de cura a 23 °C e umidade acima de 95%. A) Aspecto geral da amostra (ampliação de 1.000 vezes); B) e C) Detalhes das agulhas (ampliação de 5.000 vezes) (COIMBRA et al, 2004).

Segundo COIMBRA et al (2004), os concretos com adições possuem tamanho de poros e porosidade total aberta maiores que os sem adições, o que poderia provocar a diminuição dos valores de resistência mecânica. No entanto, provavelmente devido à junção das fases das pilhas ao concreto, no caso da composição com 1% de adição, com a formação

das fases hidratadas do cimento, existindo assim, uma contribuição mútua para a melhora na resistência mecânica à compressão dos mesmos.

2.2.3 Resíduos de corte de mármore e granito

A preocupação com o meio ambiente cresce acentuadamente em todo o mundo. Evidentemente que o ramo de mármore e granito não poderia deixar de ser lembrado constantemente como causador de impactos ambientais (CALMON et al, 1997).

O Brasil detém grande reservas de pedras ornamentais (granito e mármore) com os mais variados aspectos estéticos. As pedras naturais ornamentais são os principais concorrentes dos revestimentos cerâmicos (MOREIRA et al, 2003).

O sistema de desdobramento de blocos de rochas ornamentais para produção de chapas, através de equipamentos denominados de teares, gera uma quantidade significativa de rejeito na forma de lama (Figuras 2 e 3). Esta lama é geralmente constituída de: água, granalha, cal e rocha moída, além de fragmentos metálicos provenientes do desgaste das lâminas. A cal pode ser substituída por outros materiais, tais como: calcário moído, escórias de alto forno, dentre outros (CALMON et al, 1997).

Figura 2 – Descarga da lama na barragem de rejeito (PONTES e VIDAL, 2005).

Figura 3 – Amostragem no tubo de descarga da lama na barragem de rejeito (PONTES e VIDAL, 2005).

De acordo com Mothe Filho et al (2001) apud Moreira et al, 2003, a lama quando seca torna-se um resíduo sólido não biodegradável classificado como resíduo classe III – inerte. Entretanto, quando este resíduo não é descartado de forma correta pode alcançar rios, lagoas, córregos e até mesmo os reservatórios naturais de água, provocando problemas de assoreamento.

Segundo Moura et al (2002), na serragem, cerca de 25% a 30% do bloco são transformados em pó, que é depositado nos pátios das empresas. No Brasil, a quantidade estimada de geração conjunta do resíduo de corte de mármore e granito é de 240.000 toneladas/ano.

Algumas características específicas do resíduo vislumbram propriedades favoráveis à sua utilização industrial Segundo Freire e Motta (1995) apud Calmon et al (1997), pode-se citar como exemplo: sua fina granulometria , sua composição química pré-definida e a inexistência de grãos mistos entre os componentes básicos; além disso, este resíduo é potencialmente aplicável como argamassas, matéria-prima para cerâmica e cargas minerais.

A utilização do resíduo de corte de mármore e granito na construção civil visa contribuir diretamente para a diminuição do impacto ambiental decorrente do elevado consumo de agregados naturais (MOURA et al, 2002).

Estudos realizados a respeito da utilização do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) como substituição de parte da areia na produção de argamassas para revestimento comprovam que, o referente resíduo encontra-se em forma cristalina e não apresenta riscos

ambientais. Quanto à resistência à compressão, observou-se um melhor desempenho das argamassas com RCMG, em relação às argamassas sem adições (MOURA et al, 2002).

Segundo Calmon et al (1997), quando ocorre à substituição da cal pelo RCMG pode-se concluir que:

- As argamassas possuem uma retenção de água e uma exudação de água maior, esses fenômenos ocorreram de forma discreta, apesar destes fatos prejudicarem a trabalhabilidade das argamassas, é necessário que se avalie o comportamento de adrência das mesmas;
- As argamassas obtiveram melhorias substanciais na resistência à compressão axial, resistência á tração por compressão diametral, absorção de água por capilaridade, absorção por imersão, índice de vazios e massa específica;
- O resíduo pode estar trabalhando como "filler".

2.2.4 Resíduos de construção e demolição

De forma mais simplificada, este material pode ser definido como o resíduo proveniente de construções, reparos, reformas, e demolições de estruturas e estradas (LEITE, 2001).

Em qualquer país do mundo, a indústria da construção civil é o setor responsável pelo consumo do maior volume de recursos naturais não-renováveis, estima-se que os recursos extraídos variam entre 15% e 50%; além disso, ressalta-se o fato dos seus produtos serem grandes consumidores de energia (JOHN, 1999 apud MIRANDA, 2000).

Os resíduos de construção e demolição (RCD) representam 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Uma estimativa aponta para um montante de 68,5 milhões de toneladas por ano, visto que 137 milhões de pessoas vivem no meio urbano. A maioria dos países no mundo investe num sistema formal de gerenciamento para reduzir a deposição ilegal e sistemática, que causam assoreamento de rios, entupimento de bueiros, degradação de áreas e esgotamento de áreas de aterros, além de altos custos sócio-econômicos, especialmente em cidades de médio e grande porte (ÂNGULO, 2005).

No Brasil, a geração de RCD *per capita* foi estimada em 500 kg/hab.ano, mediana para algumas cidades brasileiras (PINTO, 1999).

Países como a Holanda, Dinamarca, Alemanha possuem índices de reciclagem do RCD entre 50% e 90%, já países como Portugal e Espanha possuem índices inferiores a 50%. No cenário nacional, a pequena escala de produção das usinas de reciclagem da fração mineral do RCD, em sua maioria pertencentes ao setor público, faz com que os índices de reciclagem sejam modestos (ÂNGULO, 2005).

Tradicionalmente, a maioria dos RCD é enviada a aterros, frequentemente os mesmos usados para os resíduos sólidos urbanos (RSU), que nem sempre oferecem as condições que seriam desejáveis para lida com os diversos resíduos que recebem (PEREIRA et al, 2004).

No Brasil, como em outros países, a reciclagem da fração mineral do RCD gera agregados para pavimentação e material de enchimento para aterros. O emprego na fabricação de produtos à base de cimento (concretos, blocos, argamassas, etc.) é menor (ÂNGULO, 2005).

Segundo Amorim et al (1999), as argamassas com RCD possuem desempenho mecânico satisfatório, tornando a reciclagem de resíduos bastante promissora, capaz de produzir elementos construtivos de baixo custo.

Os RCD ao serem finamente moídos podem apresentar atividade pozolânica e serem utilizados com a cal ou como substitutos parciais do cimento Portland na produção de grout, argamassa e concreto (BARONIO e BINDA, 1997 apud FARIAS FILHO et al, 2006).

Pesquisa realizada por Levy (2001) confirma que o incremento de resíduos de concreto e alvenaria até o teor de 20%, não afeta o comportamento do concreto em relação ao de referência (sem resíduo), demonstrando que poderão ser utilizados sem qualquer restrição quanto à resistência e à durabilidade.

Segundo pesquisa realizada por Leite (2001), as taxas de absorção dos agregados reciclados são bastante elevadas e, deste modo, há a necessidade de compensá-las durante a produção dos concretos para que não haja diminuição excessiva da água livre das misturas de

concreto produzidas com agregados reciclados, fato este que comprometeria a trabalhabilidade. Outro fator relevante é o de que a resistência á tração dos concretos com agregados reciclados é inversamente proporcional à dimensão do agregado reciclados utilizado, em virtude da fragilidade inerente ao material.

2.2.5 Escória de alto-forno granulada

Segundo Pecchio e Battagin (1999) apud Brizola (2007), a escória de alto forno é um subproduto da manufatura do ferro-gusa em alto-forno, sendo que cada tonelada deste produz aproximadamente 300 kg de escória. A escória corresponde ao líquido sobrenadante na base do alto-forno e se separa do ferro-gusa, também líquido, por diferença de densidade. Na saída do alto forno, a escória passa por um resfriamento rápido ao cair em tanques com água, conhecidos por tanques de granulação. Este é o processo de obtenção da escória granulada e vítrea que é utilizada tradicionalmente pela indústria cimenteira como adição ao cimento Portland.

De acordo com Smolczyk (1980) apud Melo Neto (2002), o esfriamento brusco impede a organização de uma estrutura cristalina (Figura 4), retendo energia na estrutura atômica da fase vítrea, caracterizando assim, o material como amorfo. Quando a escória é esfriada lentamente é em grande parte cristalina e quase não apresenta propriedade aglomerante.

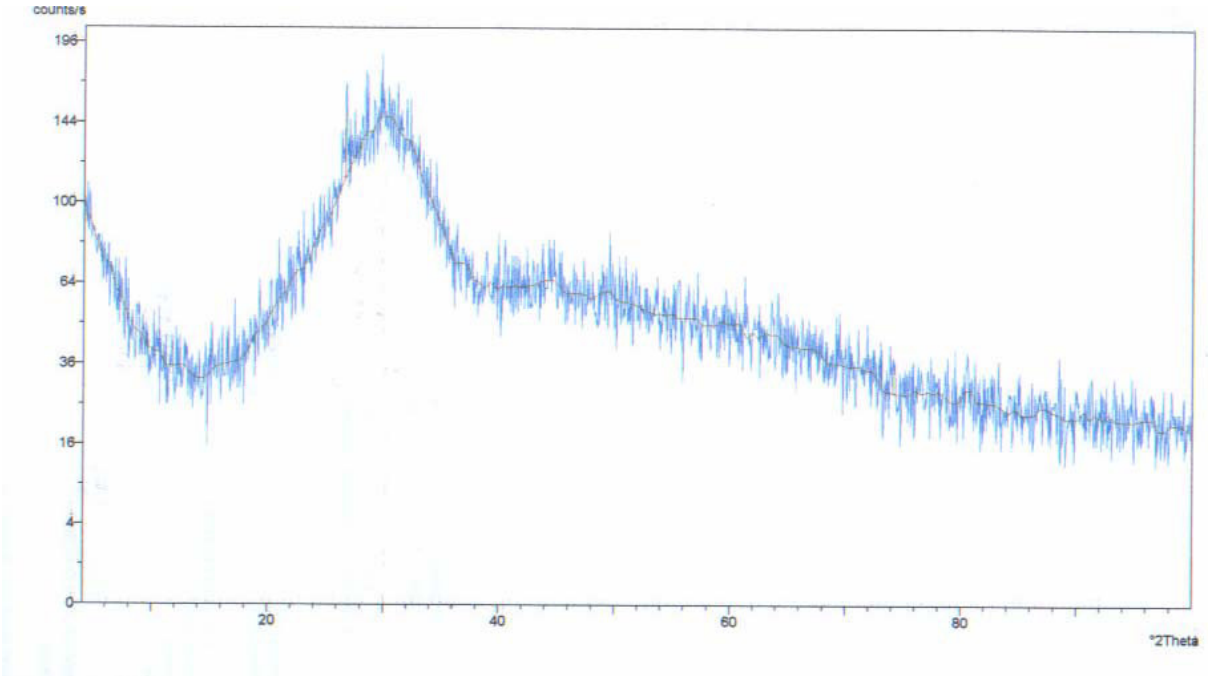


Figura 4 – Difração de raios-X da amostra de escória moída (VOGT et al, 2006).

Cincotto et al (1992) apud Brizola (2007), afirmam que as porcentagens dos principais componentes das escórias de alto forno brasileiras são: 30% a 35% de sílica, 40% a 45% de óxido de cálcio, 11% a 18% de óxido de alumínio, 2,5% a 9% de óxido de magnésio e 0% a 2% de Fe_2O_3.

Embora seu mecanismo fundamental de hidratação seja o mesmo do cimento, diferentemente deste a escória quando em contato com a água não se hidrata ou faz muito lentamente (ILLER, 1979 apud BRIZOLA, 2007).

Entretanto existem métodos de ativação que são utilizados para acelerar a hidratação. Breugel e Rooij (2004) apud Brizola (2007) relatam que, a escória é mais comumente ativada pelo uso de cimento Portland, sendo necessário entre 10% e 20% deste para que ocorra a ativação.

A escória de alto-forno é um rejeito comumente utilizado como adição ao concreto (GOLASZEWSKI, 2005), por possuir boas propriedades cimentícias, devido a sua característica reativa (RESCHKE et al, 2005), afetando a evolução da resistência do composto com o passar do tempo e sua durabilidade (VOGT et al, 2006).

A presença da escória de alto-forno torna a microestrutura da pasta de cimento hidratada mais densa, isso ocorre devido à maior formação de C-S-H, tal fato melhora a resistência mecânica e a durabilidade em longo prazo (NEVILLE, 1997). A maior densidade da matriz proporcionada pela escória de alto-forno aumenta a resistência do concreto à penetração de cloretos e ao ataque por sulfatos (MOURA, 2000).

Segundo pesquisa realizada por Golaszewski (2005), o uso de escória de alto-forno melhora significativamente o desempenho do concreto, particularmente com relação à durabilidade. A adição de escória de alto-forno influencia significativamente as propriedades reológicas, o tempo de pega e a resistência à compressão das argamassas. A forma e a magnitude dessa influência dependem das propriedades do cimento e do superplastificante que são utilizados nas dosagens, além das propriedades e teor de escória de alto-forno adicionada.

A confecção de concretos substituindo-se parcialmente, em massa, o cimento do concreto de referência por adições de escória de alto-forno, mostra que adição de 35% promove um crescimento mais lento da resistência, porém, não afeta significativamente o valor da resistência à compressão aos 28 dias. Além disso, contribui para um aumento de 10% no módulo de elasticidade dinâmico nessa idade. A tenacidade à fratura parece não ser afetada pelas adições (VOGT et al, 2006).

2.2.6 Cinza volante

A utilização de adições minerais iniciou-se pelo uso da cinza volante em obras de barragens de concreto massa, com o intuito de diminuir o calor de hidratação e o custo do concreto (LANA, 2005).

A cinza volante é o resíduo de carvão mineral utilizado em usinas termelétricas (LANA, 2005). Esse resíduo é considerado uma pozolana e enquadra-se entre as artificiais, ou seja, é produto secundário de um processo (sub-produto), potencialmente poluidor do meio ambiente, mas detentora de estrutura amorfa (vítrea) devido às altas temperaturas em que é gerada. (SILVEIRA, 2004). A análise por difratograma de raios-X mostra que os principais constituintes da cinza volante são quartzo e mulita (VAGHETTI, 1999).

Fortes argumentos induzem ao aproveitamento dessas cinzas no concreto, principalmente na Região Sul, onde se tem abundância desse material. O Rio Grande do Sul é detentor de aproximadamente 90% das reservas nacionais de carvão mineral (cerca de 28 bilhões de toneladas de carvão) - fonte:IRGA,safra 97/98 citado por Vaghetti (1999).

A Usina Termelétrica de Candiota/RS produz anualmente cerca de 1.000.000 toneladas de cinza, sendo 80% volantes e 20% pesadas (SILVA et al, 1999 apud LANA, 2005).

As 800.000 toneladas de cinzas volantes possuem características para serem utilizadas como adição mineral em concretos. Além de que a sua disposição no meio ambiente pode produzir sérios problemas de poluição (LANA, 2005).

Quando a cinza volante apresenta finura adequada, sua reatividade é boa, proporcionando influência considerável na trabalhabilidade e na velocidade de desenvolvimento da resistência do concreto endurecido (VAGHETTI, 1999).

Uchikawa (1986) apud Silveira (2004) ressalta que, a cinza volante retarda a hidratação do C_3S (silicato tricálcico) nas idades iniciais e acelera a hidratação deste composto nas idades mais avançadas. Diante disso, Lana (2005) afirma que os concretos confeccionados com cinza volante apresentam uma maior sensibilidade ao teor de umidade nas idades iniciais, necessitando assim de cura mais prolongada.

A incorporação de cinza volante no concreto tem como maior benefício ao concreto fresco maior trabalhabilidade facilitando a operação de lançamento e acabamento. Além disso, causa melhor coesão e menor tendência à exudação do que um concreto confeccionado apenas com cimento (FRIZZO, 2001 apud PETRY, 2004). Esse material ainda influencia beneficamente na diminuição da porosidade e aumento da resistência do concreto em longo prazo (SILVEIRA, 2004).

Segundo Neville (1997), a incorporação de materiais suplementares, em especial a cinza volante, no concreto de cimento Portland podem aumentar as propriedades do mesmo tanto no estado fresco como no endurecido, proporcionando assim maior durabilidade.

CAPÍTULO 3
REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ARGAMASSA

3.1.1 Definição

As argamassas são materiais de construção que têm seu uso cada vez maior e mais especializado nas edificações, cujos traços e características dependem do tipo de aplicação das mesmas (RODRIGUÉZ, 1994).

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define argamassa como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

3.1.2 Tipos de argamassa

A NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica e define os diversos tipos de argamassa de acordo com o uso e aplicação de cada uma delas:

a) Argamassa para assentamento

- Argamassa para assentamento em alvenaria de vedação: indicada para ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função de vedação;
- Argamassa para assentamento em alvenaria de estrutural: indicada para a ligação de componente de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função estrutural;
- Argamassa para complementação da alvenaria (encunhamento): indicada para fechamento de vedação, após a última fiada de componentes.

b) Argamassa para revestimento de paredes e tetos

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

c) Argamassa de uso geral

Indicada para assentamento de alvenaria sem função estrutural e revestimento de paredes e tetos internos e externos.

d) Argamassa para reboco

Indicada para cobrimento de emboço, propiciando uma superfície fina que permita receber o acabamento; também denominada massa fina.

e) Argamassa decorativa em camada fina

Argamassa de acabamento indicada para revestimentos com fins decorativos, em camada fina.

f) Argamassa decorativa em monocamada

Argamassa de acabamento indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos de edificação em contato com o meio externo, aplicada em camada única e com fins decorativos.

3.1.3 Materiais constituintes da argamassa mista

3.1.3.1 Cimento

3.1.3.1.1 Definição

Cimento, na significação geral da palavra, pode ser considerado todo material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. Esta definição abrange uma grande variedade de materiais. No campo da construção, o significado do termo se restringe aos materiais ligantes usados com pedras, areia, tijolos e blocos, dentre outros (NEVILLE, 1997).

3.1.3.1.2 Histórico

O emprego do cimento é bem antigo. Os antigos egípcios usavam gesso impuro calcinado. Os gregos e romanos usavam calcário calcinado e aprenderam, posteriormente, a misturar cal e água, areia e pedra fragmentada, tijolos ou telhas em cacos. Foi o primeiro concreto da história (NEVILLE, 1997).

Em 1756, o engenheiro John Smeaton, encarregado de construir o farol de Eddystone, ao largo da costa de Corn na Inglaterra, procurava um aglomerante que endurecesse mesmo em presença de água, de modo a facilitar o trabalho. Em suas tentativas, verificou que uma mistura calcinada de calcário e argila tornava-se, depois de seca, tão resistente como as pedras utilizadas nas construções. Entretanto foi o pedreiro Joseph Aspdin, em 1824, quem patenteou a descoberta, batizando-a de cimento Portland, numa referência à Portlandstone, tipo de pedra arenosa muito usada em construções na região de Portland, Inglaterra. No pedido de patente constava que o calcário era moído com argila, em meio úmido, até se transformar em pó. A água era evaporada pela exposição ao sol ou por irradiação de calor através de cano com vapor. Os blocos da mistura seca eram calcinados em fornos e depois moídos bem finos (TAYLOR, 1967 apud SILVA, 2006).

3.1.3.1.3 Fabricação do cimento Portland

O processo de fabricação de cimento Portland consiste essencialmente em moer a matéria-prima, misturá-la intimamente nas proporções adequadas e queimar essa mistura em um grande forno rotativo até uma temperatura de cerca de 1450 °C. Nessa temperatura, o material sofre uma fusão incipiente formando pelotas, conhecidas como clínquer. O clínquer é

resfriado e moído até um pó bem fino com a adição de um pouco de gesso, resultando o cimento Portland comercial largamente usado em todo o mundo (NEVILLE, 1997).

A mistura e a moagem das matérias-primas podem ser realizadas por dois tipos de processos: via úmida ou via seca. No processo por via úmida, a moagem e a homogeneização da mistura de matérias-primas são executadas em forma de lama contendo de 30% a 40% de água. As fábricas modernas de cimento priorizam o processo por via seca, o qual em termos de energia é mais eficiente do que o processo por via úmida porque a água usada para produzir a lama deverá ser posteriormente evaporada antes da operação de clinquerização. Para esta operação, os fornos usados no processo por via seca equipados com pré-aquecedores a suspensão, os quais permitem uma troca eficiente de calor entre os gases quentes e as misturas de matéria-prima necessitam um consumo de energia combustível fóssil da ordem de 800 kcal/kg de clínquer comparado com cerca de 1400 kcal/kg para os fornos do processo por via úmida (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

3.1.3.1.4 Composição química do cimento

As matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento portland consistem principalmente de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Estes compostos interagem entre si no forno formando uma série de produtos mais complexos e, com exceção de um pequeno resíduo de cal que não teve tempo suficiente para reagir, é atingido um estado de equilíbrio químico. No entanto, este equilíbrio não é mantido durante o resfriamento, e a velocidade de resfriamento influencia o grau de cristalização e a quantidade de material amorfo presente no clínquer frio. As propriedades deste material amorfo, conhecido como fase vítrea, diferem consideravelmente daquelas dos compostos cristalinos com uma composição química nominalmente similar. Surge outra complicação da interação entre a parte líquida do clínquer e os compostos cristalinos já presentes (NEVILLE, 1997).

Os principais compostos do cimento, cujas proporções são obtidas através da análise química são: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) e gipsita (C_5H_2). Além destes, que são constituintes principais do cimento, estão também presentes os constituintes menores, tais como os álcalis (Na_2O; K_2O), que apresentam na forma de sulfatos, o óxido de magnésio (MgO), a cal livre (CaO) e outros (SOUZA e RIPPER, 1998).

3.1.3.1.5 Tipos de cimento Portland

No Brasil, assim como na maioria dos países com produção significativa, são fabricados diversos tipos de cimento, que correspondem à maior ou menor exaltação das propriedades dos seus principais componentes e resultam no desenvolvimento de variadas características mecânicas, físicas e químicas. A escolha do tipo de cimento mais adequado a uma determinada obra ou serviço a executar requer o bom conhecimento das características dos diversos tipos disponíveis no mercado (SOUZA e RIPPER, 1998). Na Tabela 1 encontra-se o resumo dos diversos tipos de cimento brasileiros e as normas que os especificam.

Tabela 1 – Tipos de cimento Portland (SOUZA e RIPPER, 1998).

Designações	Classes	Norma ABNT
Cimento Portland comum	CP I – 25 CP I – 32 CP I – 40	NBR – 5732
Cimento Portland comum (com adições)	CP I – S - 25 CP I – S - 32 CP I – S - 40	NBR – 5732
Cimento Portland composto (com escória)	CP II – E - 25 CP II – E - 32 CP II – E - 40	NBR – 11578
Cimento Portland composto (com pozolana)	CP II – Z - 25 CP II – Z - 32 CP II – Z - 40	NBR – 11578
Cimento portland composto (com filler)	CP II – F - 25 CP II – F - 32 CP II – F - 40	NBR – 11578
Cimento Portland de alto-forno	CP III – 25 CP III – 32 CP III – 40	NBR – 5735
Cimento Portland pozolânico	CP IV – 25 CP IV – 32	NBR – 5736
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V - ARI	NBR – 5733

Segundo Roman et al (1999), os cimentos com maior superfície específica têm potencial para tornar as argamassas mais trabalháveis e com maior retenção de água. Os cimentos de endurecimento mais lento podem produzir argamassas mais resilientes (com maior capacidade de absorver pequenas deformações).

3.1.3.2 Cal

3.1.3.2.1 Histórico

O homem conheceu a cal provavelmente nos primórdios da Idade da Pedra. Apesar disso, a cal só ganhou mais destaque com documentação arqueológica durante e após a época das construções das monumentais pirâmides, feito extraordinário dos povos da Ásia Menor e, principalmente, do admirável império egípcio. Do Egito, a arte de manipular a cal passou para a Grécia, a seguir para Roma e depois para outras regiões mediterrâneas e circunvizinhas, até alcançar a modernidade (GUIMARÃES, 2002).

3.1.3.2.2 Tipos de cal

3.1.3.2.2.1 Cal virgem

Os calcários e dos dolomitos quando calcinados (transformação do carbonato de cálcio - $CaCO_3$, a temperatura elevada, em óxido de cálcio – CaO) à temperatura próxima de 1000 °C, produzem a cal virgem, pela perda de parte dos seus constituintes (anidrido carbônico – CO_2) (SILVA, 2006).

Quando provém de rochas puras, a cal virgem é um produto inorgânico branco. Quando apresenta colorações creme, amarelada e levemente cinza, é sinal que detém impurezas. Seu odor é equivalente ao "terroso". Nasce com estrutura cristalina, em cristais isolados ou conglomerados cristalinos, de dimensões e espaços intercristalinos variados, observávbeis somente pela microscopia. Algumas vezes, sua observação é mais difícil, pois suas configurações aparecem compactas ou microcristalinas (GUIMARÃES, 2002).

3.1.3.2.2.2 Cal hidratada

A cal hidratada resulta do prosseguimento do processo industrial que dá origem à cal virgem. A reação química que a produz com a presença da água, é uma clássica "reação de fases sólido-líquida". Dependendo do volume de água utilizada para areação, o produto final pode ser seco ou com aspectos de creme, lama, leite ou solução saturada (GUIMARÃES, 2002).

3.1.3.2.2.3 Cal hidráulica

De modo geral, a cal hidráulica pode ser classificada como um produto intermediário entre a cal virgem e o cimento Portland. Resulta da calcinação de calcários argilosos, procedimento que produz a combinação do hidróxido de cálcio com a sílica-quartzo e os minerais argilosos, formando relativa alta na porcentagem de compostos com propriedades hidráulicas (GUIMARÃES, 2002).

3.1.3.3 Agregados miúdos

3.1.3.3.1 Definição

A NBR 7211 (ABNT, 1983), define os agregados miúdos como sendo os agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 150 µm.

3.1.3.3.2 Função

Segundo Mineropar (2004) apud Silva (2006), as principais funções dos agregados são:

- Prover o aglomerante de um material de enchimento relativamente econômico;
- Prover a pasta de partículas adaptadas para resistir às cargas aplicadas, ao desgaste mecânico e à percolação da intempérie;
- Reduzir as variações de volume resultantes do processo de pega, endurecimento e variações de umidade na pasta de cimento, cal e água.

3.1.3.3.3 Classificação

De acordo com a Mineropar (2004) apud Silva (2006), quanto à origem os agregados são classificados em:

- Naturais: já encontrados na natureza sob a forma definitiva de utilização (areia de rio);
- Artificiais: são os que necessitam de modificação textual para chegar à condição adequada para sua utilização, como é o caso da areia de origem da britagem das rochas como basalto, calcário, dentre outras.

3.1.3.4 Água

A água além de permitir o endurecimento da argamassa pela hidratação do cimento, é o responsável pela trabalhabilidade da argamassa. A quantidade de água deve permitir uma boa aplicação, mas não pode causar a segregação dos constituintes (ROMAN et al, 1999).

3.1.4 Funções e características

Segundo Fiorito (2003), as argamassas de cimento e areia, cimento, cal e areia ou cimento, aditivo e areia são comumente utilizadas em obras, possuindo múltiplas aplicações nas construções. A destinação das argamassas determina o tipo de aglomerante ou a mistura de tipos diferentes de aglomerantes. Sua composição e espessura quando da sua aplicação são muito variáveis.

A eficiência de uma argamassa depende da qualidade dos materiais que a compõem, assim como da aplicação de traços apropriados para cada serviço específico (RIPPER, 1995). O mau uso das argamassas, em obra, ocasiona desempenhos ruins a curto, médio e longo prazo, gerando manutenções contínuas e onerosas (PINTO, 1996).

Entende-se por traço de uma argamassa a indicação das proporções dos seus componentes. Ao utilizarmos o traço em peso (massa) teríamos uma segurança absoluta quanto à qualidade da argamassa e as suas quantidades no consumo e apropriação de custos. Porém, é impraticável no canteiro de obra (FIORITO, 2003).

As argamassas mais utilizadas pela construção civil são as empregadas como argamassas de assentamento ou argamassas de revestimento, abaixo serão abordadas as principais funções e características de cada uma delas.

3.1.4.1 Argamassa de assentamento

Segundo a BS 5628 (1985), quando do uso para assentamento de paredes de alvenaria, a argamassa tem a função de:

- Unir solidariamente as unidades de alvenaria e ajudá-las a resistir aos esforços laterais;
- Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos;
- Absorver as deformações naturais a que a alvenaria estiver sujeita;
- Selar as juntas contra a penetração de água de chuva.

Para obter um bom desempenho a mesma deve apresentar as seguintes características (SABBATINI, 1986):

- Trabalhabilidade;
- Capacidade de retenção de água;
- Resistência inicial;
- Aderência adequada ao substrato;
- Durabilidade;
- Resistência suficiente para acomodar todas as deformações sem que ocorram fissuras.

A escolha do tipo de argamassa poderá, também, ser baseada no tipo de elemento a ser assentado, ou em normas construtivas ou, ainda, de acordo com os esforços a serem suportados pela alvenaria. Por exemplo, uma argamassa poderá ser correlacionada com o tipo ou característica dos elementos a serem assentados: blocos de concreto; blocos cerâmicos; tijolos maciços; tijolos furados; placas de concreto leve, etc. Assim, um elemento de alvenaria com alta velocidade inicial de absorção de água deverá ser compatível com argamassa de alta retenção de água (FIORITO, 2003).

3.1.4.2 Argamassa de revestimento

De acordo com Cincotto et al (1995), quando empregadas como revestimento às argamassas podem simplesmente exercer a função de cobrir as irregularidades da parede e ser parte constituinte do acabamento estético da edificação, como pode ainda, contribuir para as

exigências de segurança e habitabilidade. Diante disso, as argamassas devem apresentar as seguintes características:

- Estabilidade mecânica e dimensional (resistência à tração, compressão, impacto e abrasão) e resistência ao fogo;
- Contribuir para a estanqueidade da parede, constituindo-se em uma barreira à penetração de água;
- Contribuir para o conforto higrotérmico e acústico do ambiente;
- Deve ser aplicada verificando-se a contribuição da base para o desempenho do conjunto;
- Deve possuir compatibilidade entre seus materiais constituintes e os materiais da base na qual vai ser aplicada.

Não será demais lembrar que, estando às camadas de revestimentos ligadas entre si, à deformação de qualquer uma delas devida a causas endógenas ou esforços externos resultará em tensões atuando sobre cada camada. As tensões que atuam sobre os revestimentos são de especial interesse (FIORITO, 2003).

3.1.5 Principais propriedades

A avaliação do desempenho dos materiais de construção é considerada como um fator de grande importância (KRUS et al, 1997). Para que se possa prever o desempenho dos materiais de construção quando da sua exposição às intempéries, as propriedades dos mesmos precisam ser estudadas anteriormente as suas aplicações. A análise da relação entre a microestrutura e as propriedades contribui positivamente para o desempenho dos mesmos (QUENARD et al, 1998).

Pode-se dizer basicamente que, as argamassas necessitam das mesmas propriedades para obterem um bom desempenho quando do seu uso. Sendo assim, a seguir destacam-se as propriedades necessárias às argamassas de assentamento e revestimento, abrangendo a caracterização das mesmas.

3.1.5.1 Propriedades no estado fresco

3.1.5.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade pode ser considerada como uma propriedade subjetiva das argamassas. Não existe uma trabalhabilidade padrão a ser utilizada tanto no assentamento quanto no revestimento da alvenaria. A RILEM MR 3 (1982) prescreve que a trabalhabilidade é uma propriedade complexa, caracterizada basicamente pela consistência e plasticidade das argamassas.

Pode-se considerar que uma argamassa possui boa trabalhabilidade quando a mesma espalha-se facilmente sobre o substrato e adere à sua superfície, e ainda no caso das argamassas de revestimento quando proporciona facilidade no seu acabamento final.

Segundo Roman et al (1999), uma boa trabalhabilidade das argamassas depende da combinação de diversos fatores como a qualidade dos agregados e dos aglomerantes, quantidade de água utilizada na mistura, consistência, capacidade de retenção de água da argamassa, tempo decorrido da preparação da argamassa, adesão, fluidez e massa. Outro fator importante a ser considerado nesta propriedade são as características granulométricas das areias: coeficiente de uniformidade, módulo de finura e forma dos grãos (TRISTÃO, 1995).

Avaliar, mensurar e prescrever valores de trabalhabilidade das argamassas cientificamente, por meio de ensaios, é uma tarefa muito difícil, uma vez que esta propriedade não depende apenas das características intrínsecas da argamassa, mas também da habilidade do profissional que esta executando o serviço, das várias propriedades do substrato e da técnica de aplicação (CASCUDO et al, 2005).

3.1.5.1.2 Consistência e retenção de consistência

A consistência é a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a resistir à deformação. A quantidade de água adicionada à argamassa é o principal fator que influi nesta propriedade, tornando-a a principal propriedade usada no controle da quantidade de água das argamassas. Outros fatores como relação água/aglomerante, relação aglomerante/agregado, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante também exercem influência

sobre esta propriedade (CINCOTTO et al, 1995). Além disso, Pereira et al (1999), acreditam que a consistência também está diretamente ligada à resistência de aderência.

Em relação à consistência, as argamassas podem ser classificadas qualitativamente em (CINCOTTO et al, 1995):

- Argamassas secas: são aquelas às quais é necessária a aplicação de uma energia para conformá-las em sua forma final, onde a pasta preenche os vazios entre os grãos;
- Argamassas plásticas: argamassas que com a aplicação de um pequeno esforço atingem a sua forma final, onde a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados;
- Argamassas fluidas: são as argamassas que escorrem e se auto-nivelam, dispensando qualquer esforço, além da força de gravidade, para a sua aplicação, neste caso, os grãos ficam imersos na pasta.

Segundo Selmo (1989) apud Silva (2006), nas argamassas de consistência plástica a fluida a exudação de água pode se manifestar. Esta propriedade também interfere na trabalhabilidade, exigindo misturas freqüentes para homogeneização do material e pode interferir na capacidade de adesão da argamassa ao ser aplicada no substrato.

Para a avaliação da consistência faz-se uso da mesa de consistência (flow table) prescrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996) e do procedimento de ensaio para determinação do índice de consistência prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2005). Todavia, apesar da grande utilização, este ensaio é muito criticado por diversos autores que alegam o fato da mesa não possuir sensibilidade para medir a reologia da argamassa (GOMES et al, 1995; YOSHIDA e BARROS, 1995; CAVANI et al, 1997; JOHN, 2003; BAUER et al, 2005).

De acordo com Bauer et al (2005), apesar de existirem equipamentos sofisticados que permitem uma avaliação mais ampla do comportamento reológico de argamassas, fornecendo inclusive os parâmetros fundamentais (viscosidade e tensão de escoamento), os mesmos não são usuais em laboratórios de tecnologia das argamassas, devido, em primeiro lugar, ao seu elevado custo e, em segundo lugar, a algumas dificuldades operacionais.

Em relação à retenção de consistência se pode defini-la como sendo a propriedade da argamassa de manter sua consistência após entrar em contato com um substrato. Esta propriedade é de fundamental importância para as argamassas de assentamento de alvenarias e peças cerâmicas de revestimento, e depende basicamente da boa retenção de água das argamassas.

3.1.5.1.3 Coesão e tixotropia

A coesão de uma argamassa pode ser definida como sendo a propriedade da argamassa de manter seus constituintes homogêneos sem haver segregação, por intermédio das forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e às ligações químicas da pasta aglomerante. As argamassas necessitam de adições especiais e aglomerantes adequados para obterem uma boa coesão. Apesar da existência de diversos aditivos, o uso da cal hidratada ainda é a forma mais utilizada de se conseguir esta propriedade. (CINCOTTO et al, 1995).

Ainda, segundo os mesmos autores, a cal proporciona a coesão interna da argamassa, por meio da redução da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão ao agregado; além de influenciar na trabalhabilidade, consistência e estabilidade plástica das argamassas.

A tixotropia também é uma propriedade relaciona à coesão. Pode-se defini-la como sendo uma mudança da viscosidade quando se promove a agitação da massa, provocando a passagem do estado sólido, ou de pasta, para o gel (CALHAU, 2000). No caso da argamassa, o estado de gel diz respeito à massa coesiva de aglomerante na pasta que se torna mais densa após a hidratação (CINCOTTO et al, 1995).

A tixotropia é exigida, por exemplo, em argamassa de assentamento de peças cerâmicas e argamassas de recuperação. As argamassas tixotrópicas exigem uma baixa energia para alterarem sua forma, mas uma vez alterada conseguem mantê-la mesmo sob a ação da gravidade. Para consegui-las pode-se fazer uso de aditivos a base de polímeros e adições minerais tais como cinza volante, microssílica e cinza de casca de arroz.

3.1.5.1.4 Plasticidade

A plasticidade é a propriedade que permite a argamassa deformar-se e reter certas deformações após a redução das tensões a que a mesma foi submetida. De acordo com Cincotto et al (1995), a plasticidade juntamente com a consistência é a propriedade que caracteriza a trabalhabilidade e são influenciadas basicamente pelo teor de ar aprisionado, natureza e teor de aglomerantes e pela intensidade de mistura das argamassas.

A plasticidade de uma argamassa está diretamente ligada a sua consistência, coesão e retenção de água.

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

3.1.5.1.5 Retenção de água

"A retenção de água é a capacidade da argamassa no estado fresco de manter sua consistência quando submetida a solicitações que provocam perda de água de amassamento, seja por evaporação, sucção ou absorção por uma superfície" (TRISTÃO, 1995), ou, simplesmente, a capacidade que as argamassas possuem em reter a água de amassamento contra a sucção do substrato ou contra a evaporação (BAÍA e SABATTINI, 2000).

A retenção de água determina as condições de manuseio das argamassas e influencia nas propriedades das mesmas no estado endurecido, como retração por secagem, aderência e resistência mecânica final, na medida em que determina as condições de hidratação do cimento e carbonatação da cal, que são os responsáveis pelo endurecimento das argamassas mistas de cal e cimento.

A capacidade de retenção de água das argamassas varia em função do potencial de absorção do substrato, podendo ser ainda influenciada pela:

- Área específica dos materiais constituintes;

- Maturação prévia das argamassas de cal (período em que a pasta ou argamassa de cal é deixada em repouso antes da aplicação);
- Natureza da cal, onde as cales dolomíticas apresentam melhores características que as cales calcíticas (CINCOTTO et al, 1995);
- Relação cal/cimento no traço;
- Relação agregado/aglomerante do traço.

Devido a sua área específica os aglomerantes destacam-se como os principais responsáveis pela capacidade de retenção de água das argamassas. Segundo Roman et al (1999), a má retentividade de água pode ser resultante de uma má granulometria do agregado, agregados muito grandes, mistura insuficiente ou escolha de mistura podem aumentar a retentividade. O uso de material pozolânico ou a adição de mais água e maior tempo de mistura podem aumentar ainda mais esta retentividade.

As argamassas que possuem elevada retenção de água permitem a hidratação do cimento sem perder a sua plasticidade, enquanto que as argamassas com baixa retenção de água dificultam o manuseio e podem ocasionar a expansão do substrato (MÜLLER et al, 1999).

Da mesma forma que na trabalhabilidade, os fatores que influenciam a retenção de água são as características e proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa. A presença da cal e de aditivos pode melhorar essa propriedade (BAÍA e SABATTINI, 2000).

3.1.5.1.6 Massa específica e teor de ar incorporado

Segundo Roman et al (1999), a massa específica corresponde à relação entre a massa do material e o seu volume e pode ser absoluta ou relativa. Na determinação da massa específica absoluta, não são considerados os vazios existentes no volume do material. Já na relativa, também chamada massa unitária, os vazios presentes são levados em consideração.

Ainda, segundo o mesmo autor, tanto a massa unitária como o teor de ar vai interferir em outras propriedades da argamassa no estado fresco, como a trabalhabilidade. Uma argamassa com menor massa específica e maior teor de ar apresenta melhor trabalhabilidade.

O teor de ar é definido como sendo a quantidade de ar presente em certo volume de argamassa. À medida que cresce o teor de ar, a massa específica relativa diminui (ROMAN et al, 1999).

Os vazios presentes na argamassa são, na realidade, ares incorporado ou aprisionado, durante o processo de mistura e aplicação, ou ainda espaços deixados após a evaporação do excesso de água (vazios capilares). O teor de ar tem influência sobre a trabalhabilidade e a resistência de aderência dos revestimentos, limitando-se assim o uso de aditivos incorporadores de ar. O uso inadequado desses aditivos pode ocasionar um prejuízo a resistência mecânica e a aderência da argamassa (ROMAN et al, 1999).

3.1.5.1.7 Exsudação

A exsudação resume-se ao fenômeno de separação de parte da água de amassamento de uma argamassa fresca mantida em repouso sem qualquer tipo de vibrações ou choques.

Sabe-se que a água é o componente mais leve da mistura de argamassa, consequentemente, a exsudação é uma forma de segregação, porque os sólidos em suspensão tendem a se sedimentar sob a ação da força da gravidade. A exsudação resulta da inabilidade dos materiais componentes em reterem toda a água da mistura em estado disperso, enquanto os sólidos mais pesados estiverem assentando (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Geralmente a exsudação ocorre em argamassas de consistência plástica à fluida. Esta propriedade interfere na trabalhabilidade das argamassas, pois exige constantemente a remistura para a homogeneização das mesmas e segundo Selmo (1989) apud Tristão (1995) pode interferir na adesão quando lançadas contra o substrato.

3.1.5.1.8 Aderência inicial

Pode ser definida como a propriedade relacionada ao fenômeno mecânico que ocorre em superfícies porosas, pela ancoragem da argamassa na base, através da entrada da pasta nos poros, reentrâncias e saliências, seguido do endurecimento progressivo da pasta, conforme ilustrado na Figura 5 (BAÍA e SABATTINI, 2000).

Figura 5 – Ancoragem da argamassa na base (BAÍA e SABATTINI, 2000).

A aderência inicial é a propriedade que caracterizará o comportamento futuro do conjunto substrato/argamassa quanto ao desempenho decorrente da aderência (CINCOTTO et al, 1995), ou seja, esta propriedade tem ligação direta com a aderência que a argamassa terá ao substrato no estado endurecido.

A aderência inicial depende basicamente das propriedades da argamassa no estado fresco; das características da base de aplicação, como a porosidade, rugosidade, condições de limpeza e da superfície de contato efetivo entre a argamassa e o substrato. Para se obter uma adequada aderência inicial, conforme a Figura 6, a argamassa deve apresentar trabalhabilidade e retenção de água adequadas à sucção do substrato no qual será aplicada (BAÍA e SABATTINI, 2000).

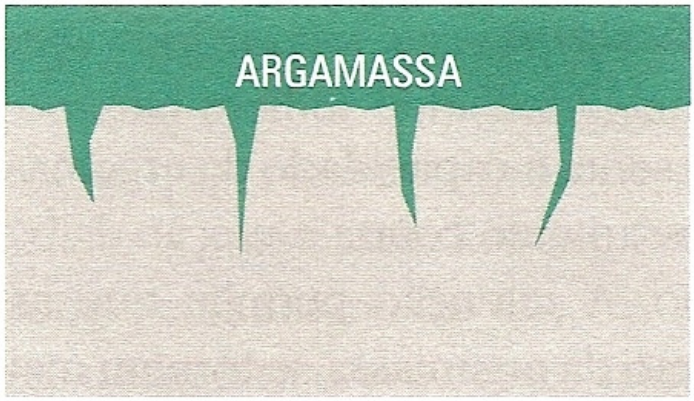


Figura 6 – Adequada aderência inicial (BAÍA e SABATTINI, 2000).

São considerados fatores essenciais para que ocorra uma boa aderência inicial da argamassa a rugosidade e condições de limpeza do substrato que deve estar isento de poeiras, partículas soltas e oleosidade (SILVA, 2006).

3.1.5.1.9 Tempo de endurecimento

O tempo de endurecimento das argamassas depende da hidratação do cimento, ou seja, da reação química entre o cimento e a água. Se o endurecimento ocorrer de forma acelerada, provocará problemas no assentamento ou acabamento do revestimento das alvenarias, se for muito lento, causará atraso na construção. Temperaturas muito altas tendem a acelerar o endurecimento das argamassas e as temperaturas baixas provocam o seu retardamento (ROMAN et al, 1999).

Ainda, segundo o mesmo autor, quanto mais homogênea a mistura melhor será o espalhamento do cimento, e o seu contato com a água, consequentemente, ocorrerá à aceleração do processo de endurecimento.

3.1.5.1.10 Retração plástica

Segundo Baía e Sabattini (2000), a retração plástica ocorre devido à evaporação da água de amassamento da argamassa e, também, pelas reações de hidratação e carbonatação dos aglomerantes. A retração pode acabar causando a formação de fissuras no revestimento.

A retração plástica ocorre nas primeiras idades de produção da argamassa e está ligada às reações internas da pasta de cimento, ela ocorre antes da pega do cimento (AÏTCIN, 2000). Essa retração é irreversível e não ocorre em idades avançadas. A perda de água da pasta de cimento é a principal causa da retração (BARBOSA, 2005).

As fissuras podem ser prejudiciais ou não (microfissuras). As fissuras prejudiciais permitem a percolação da água pelo revestimento já no estado endurecido, comprometendo a sua estanqueidade à água (BAÍA e SABATTINI, 2000).

Os mesmos autores ainda ressaltam que, os fatores que influenciam essa propriedade são: as características e o proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa; a espessura e o intervalo de aplicação das camadas; o respeito ao tempo de sarrafeamento e desempeno. Diferentemente das argamassas com alto teor de cimento (argamassa forte), as argamassas que possuem um baixo teor de cimento (argamassa fraca) estão menos sujeitas às

tensões causadoras do aparecimento de fissuras prejudiciais durante a secagem, além de trincas e possíveis descolamentos da argamassa já no estado endurecido (Figura 7).

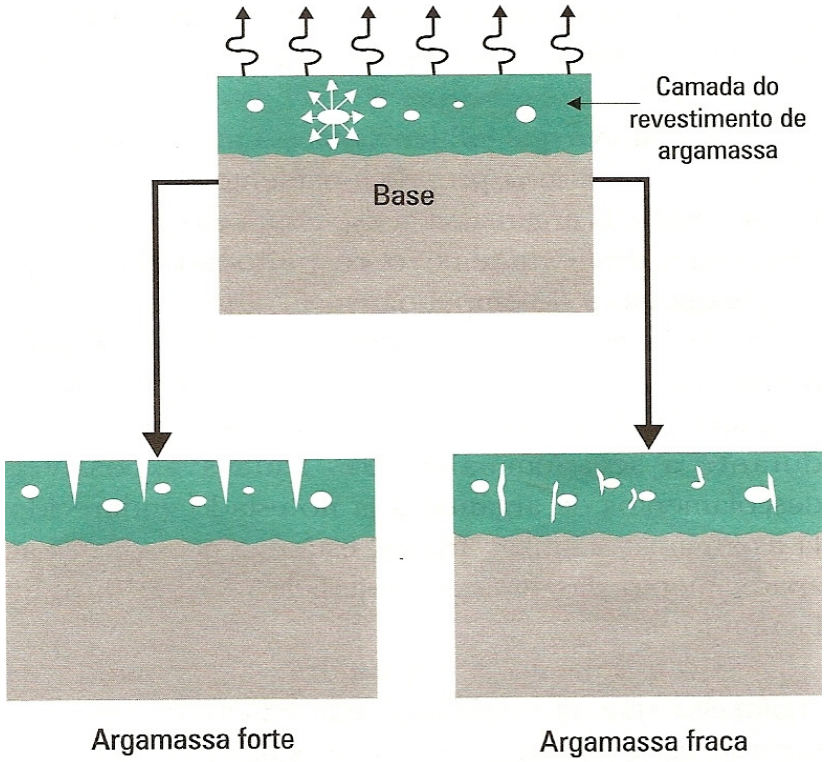


Figura 7 – Argamassa forte e argamassa fraca (BAÍA e SABATTINI, 2000).

3.1.5.2 Propriedades no estado endurecido

3.1.5.2.1 Resistência mecânica

A resistência mecânica pode ser definida como a propriedade das argamassas de suportarem as ações mecânicas de diferentes naturezas, devidas à abrasão superficial, ao impacto e à contração higroscópica (BAÍA e SABATTINI, 2000).

Após o seu endurecimento, independente do tipo de aplicação, as argamassas sempre serão submetidas a algum tipo de esforço mecânico. As argamassas de assentamento são solicitadas à compressão e as de revestimento à abrasão superficial, impacto, tensões de cisalhamento decorrentes de movimentações do substrato e variações térmicas/higrométricas.

A resistência mecânica depende basicamente do consumo e da natureza dos agregados e aglomerantes da argamassa empregada e da técnica de execução, que busca a compactação da argamassa durante a sua aplicação e acabamento. A resistência mecânica aumenta com a redução da proporção de agregado na argamassa e varia inversamente com a relação água/cimento da argamassa (BAÍA e SABATTINI, 2000). Porém, outros fatores como a temperatura e umidade podem interferir de maneira relevante no desempenho da resistência mecânica da argamassa (KOLIAS, 1994).

As propriedades mecânicas da argamassa são muito importantes para a resistência à compressão da alvenaria, uma vez que o mecanismo de ruptura da parede está diretamente ligado à interação junta/unidade (ROMAN, 1991).

A argamassa deve ser resistente o suficiente para suportar os esforços a que a parede será submetida. É importante ressaltar que, uma grande resistência à compressão da argamassa não implica necessariamente em uma parede mais resistente, ou seja, em uma melhor solução estrutural (ROMAN et al, 1999).

3.1.5.2.2 Elasticidade

A elasticidade ou resiliência é a propriedade da argamassa de suportar tensões sem romper, sem apresentar fissuras prejudiciais e sem perder a aderência (BAÍA e SABBATINI, 2000), retornando às suas dimensões iniciais quando cessam as solicitações que lhe foram impostas.

No entanto, este sentido é estendido, no caso de argamassas, para o estado tal de deformação plástica em que a ruptura ocorre sob a forma de fissuras microscópicas ou capilares não prejudiciais (SABATTINI, 1986).

As fissuras são decorrentes do alívio de tensões originadas pelas deformações da base. Elas são consideradas prejudiciais quando permitem que ocorra a percolação de água no revestimento. O aparecimento de fissuras prejudiciais compromete a aderência ao substrato, estanqueidade da superfície e durabilidade da edificação (BAÍA e SABBATINI, 2000).

A capacidade da argamassa 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 material de absorver deformações (SILVA, 2006).

As argamassas devem apresentar esta propriedade na maioria das suas aplicações, sendo esta de fundamental importância para as argamassas de assentamento e revestimento de alvenarias (OLIVEIRA, 2001).

3.1.5.2.3 Retração

A retração é um processo sofrido pelas argamassas, principalmente, nas primeiras idades. No estado endurecido, a retração ocorre logo após o endurecimento da argamassa, resultante da reação química dos aglomerantes (cal hidratada e cimento Portland) e da remoção da água adsorvida nos produtos de hidratação, durante o processo de secagem (KOPSCHITZ et al, 1997).

Segundo Sanchéz et al (1997), a retração pode ser definida simplesmente como o processo de redução de volume sofrido pelas matrizes cimentícias durante e após o seu endurecimento, quando expostas ao ar. Além disso, os autores ainda ressaltam que, este fenômeno gera tensões internas nas argamassas que podem causar desde a redução de volume até a fissuração do material. A propagação de fissuras de um material heterogêneo como a argamassa e o concreto é influenciada pelos seus componentes (DETRICHE e RAMODA, 1989).

Estudos realizados por Fiorito (2003) mostram que, aos sete dias já ocorreu 35% a 45% da retração total, aos vinte e oito dias ocorreu de 50% a 60% e aos cento e vinte dias a ocorrência da retração passa a ser de 80% a 95%.

Segundo Barbosa (2005), o fenômeno de retração pode ser classificado quanto:

- Ao estado físico da mistura (retração plástica e retração no estado endurecido);
- À natureza (retração por perda de água, retração por hidratação ou retração química, retração autógena ou endógena, retração por carbonatação, retração térmica);

- Ao grau de restrição (retração livre e retração restringida ou impedida);
- À permanência (retração à permanência do fenômeno e retração irreversível ou permanente).

Diante deste contexto, a seguir abordaremos apenas as retrações que podem ocorrer durante o estado endurecido das argamassas.

A retirada da água do concreto ou da argamassa, ambos conservados em ar não saturado causa a retração por perda de água (NEVILLE, 1997).

Sobre a retração por hidratação ou retração química Bastos (2001) apud Barbosa (2005) relata que na hidratação do cimento, o volume total dos hidratos é inferior ao volume absoluto inicial (volumes absolutos da água + cimento anidro). Esse fenômeno de contração foi descoberto por Lê Chatelier e recebe o seu nome. Após a hidratação completa, a concentração de Lê Chatelier é da ordem de 10% do volume inicial da pasta. Este fenômeno ocorre desde os instantes antes da pega e se prolonga durante toda a hidratação, sendo bem mais intensa nos primeiros dias.

A retração autógena ou endógena é uma combinação da retração química da argamassa endurecida com um fenômeno dela decorrente: a diminuição da água livre nos poros capilares. A mesma ocorre em um sistema fechado, com remoção da água capilar da pasta pela hidratação do cimento ainda não hidratado. Ocorre sem troca de umidade com o meio externo (BARBOSA, 2005).

Segundo Neville (1997), a retração por carbonatação ocorre provavelmente pela dissolução de cristais de $Ca(OH)_2$, sob tensão devida à retração hidráulica, e deposição do $CaCO_3$ em espaços não sujeitos a tensão. Se a carbonatação ocorre após o estágio de desidratação do C-S-H, também resulta uma retração por carbonatação. Sucintamente, Barbosa (2005) define a retração por carbonatação como sendo a conseqüência da reação do CO_2 do ar com compostos hidratados do cimento na pasta endurecida com aumento de massa.

As primeiras horas de hidratação do cimento são acompanhadas por uma significativa liberação de calor. A diminuição de temperatura causa retração, podendo ocorrer no componente à base de cimento de duas maneiras diferentes: após o pico de evolução da

temperatura por acúmulo de calor de hidratação e por variação térmica do ambiente (BARBOSA, 2005).

Ainda, segundo o mesmo autor, quanto ao grau de restrição as argamassas podem sofrer retração livre ou retração restringida (impedida). A retração livre ocorre em corpo-de-prova ou elemento estrutural isolado, ou seja, livre para retrair-se; no caso da retração restringida (impedida), se pode afirmar que várias formas de restrição podem surgir contra a livre ocorrência da retração, como a restrição pela presença do agregado em argamassas e concretos, a restrição por causa da aderência da pasta, argamassa ou concreto a uma base, a restrição devida à aderência do concreto á armadura, no caso do concreto armado. Todavia, quanto à permanência da retração, as argamassas no estado endurecido podem sofrer retração reversível, ou seja, parte da retração pode ser recuperada com a molhagem da pasta de cimento após a secagem.

A retração influencia de forma significativa quanto à estanqueidade e durabilidade dos revestimentos. Os fatores que afetam a retração das argamassas são os teores de aglomerante, o volume de água, a granulometria dos agregados e as condições ambientais (OLIVEIRA, 2001).

Outro fator relevante à retração está relacionado às condições de cura. Se a evaporação da água iniciar-se antes do término da pega do aglomerante, a retração poderá ser acentuadamente elevada. O concreto ou a argamassa quando mantidos a uma umidade relativa do ar constante, apresentam uma retração bem mais acelerada nas primeiras idades, atingindo-se cerca de 50% da retração total com apenas sete dias de condicionamento (THOMAZ, 2003).

Segundo Bortoluzzo et al (1999), os traços mais ricos em cimento apresentam valores maiores de retração.

"A relação água/cimento é o fator mais influente na retração, mais que a própria influência do consumo de cimento. Além dos todos os fatores internos à massa, citados anteriormente, de acordo com o BRS (1970) a forma geométrica da peça influi sensivelmente na grandeza da retração. Quanto maior a relação área exposta da peça/volume da peça, maior a retração a ser desenvolvida." (THOMAZ, 2003).

Nas argamassas de revestimento além dos fatores intrínsecos, fatores como aderência com a base, número de camadas aplicadas, espessura das camadas, tempo decorrido entre a aplicação de uma e outra camada, rápida perda de água durante o processo de endurecimento por ação intensiva de ventilação e/ou insolação, entre outros, podem ocasionar a retração (THOMAZ, 2003).

3.1.5.2.4 Aderência

A aderência é a capacidade que a argamassa possui de se manter fixa ao substrato, através da resistência às tensões normais e tangenciais que surgem na interface substrato-argamassa. É resultante da resistência de aderência à tração, da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de adrência da argamassa (BAÍA e SABBATINI, 2000).

Segundo Taha e Shrive apud Carvalho Jr. et al (2005), é largamente aceito que a aderência às alvenarias se desenvolve segundo dois mecanismos:

- Aderência química: a resistência de aderência advém de forças covalentes ou forças de Van der Waals, desenvolvidas entre a unidade de alvenaria e os produtos da hidratação do cimento;
- Aderência mecânica: é formada pelo intertravamento mecânico dos produtos da hidratação do cimento, transferidos para a superfície dos poros da unidade de alvenaria.

Autores como Cincotto et al (1995) e Roman et al (1999), relatam que a aderência é significativamente influenciada pelas características e condições do substrato - rugosidade, porosidade, absorção de água, resistência mecânica e textura superficial; tipo de aglomerante empregado; granulometria dos agregados; adesão inicial; retenção de água; consistência; conteúdo de ar das argamassas; mão de obra; temperatura e umidade relativa. Além disso, Baía e Sabbatini (2000) ressaltam que, a limpeza superficial do substrato também contribui para o bom desempenho desta propriedade.

As argamassas mistas (cimento e cal), em geral, devido à sua plasticidade e retenção de água, permitem o preenchimento das irregularidades da base repercutindo de forma favorável sobre a aderência.

Autores como Carasek (1997); Rocha e Oliveira (1999) e Pereira et al (1999), concluem que o teor de cimento influencia na resistência de aderência das argamassas, ou seja, na medida em que se aumenta o consumo de cimento obtêm-se maiores valores na resistência de aderência.

Em estudos realizados Carasek (1997) e Pereira et al (1999) concluíram que o umedecimento do substrato cerâmico não contribui para o ganho na resistência de aderência das argamassas. Contudo, Pereira et al (1999) acredita que a cura do revestimento influi largamente.

3.1.5.2.5 Permeabilidade

O comportamento dos materiais de construção em relação à umidade é largamente dependente da absorção de água dos mesmos (KRUS et al, 1997).

A permeabilidade está relacionada à passagem de água pela camada de argamassa, que é um material poroso e permite a percolação da água tanto no estado líquido como no de vapor (BAÍA e SABBATINI, 2000). Onde, a argamassa já no estado endurecido permite-se a penetração de água por meio de infiltração sob pressão, capilaridade ou difusão de vapor de água.

A permeabilidade de uma argamassa depende basicamente da quantidade e do tipo de aglomerante utilizado, da granulometria do agregado e das características do substrato. Onde o cimento Portland, quando usado em proporções adequadas, pode reduzir bastante à permeabilidade de um revestimento argamassado, porém se usado em teores muito altos pode provocar a fissuração por retração hidráulica comprometendo assim a permeabilidade da argamassa.

O revestimento deve ser estanque à água, impedindo a sua percolação. Mas deve ser permeável ao vapor para favorecer a secagem de umidade de infiltração (como a água da chuva, por exemplo) ou decorrente da ação direta do vapor de água, principalmente nos banheiros (BAÍA e SABBATINI, 2000).

A permeabilidade não é uma função simples da porosidade, mas depende também das dimensões, distribuição e continuidade dos poros (NEVILLE, 1997). Segundo Kolias (1994), a porosidade é um fator importante no que diz respeito à durabilidade das argamassas.

3.1.6 Durabilidade

Nenhum material é inerentemente durável; como resultado de interações ambientais, a microestrutura e, consequentemente, as propriedades dos materiais mudam com o passar do tempo. Admite-se que um material atingiu o fim da sua vida útil quando suas propriedades sob dadas condições de uso deterioram a tal ponto que a continuação do uso deste material é considerada, como insegura, ou antieconômica (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Sendo assim, a durabilidade de um revestimento pode ser definida como a propriedade do período de uso desse revestimento, resultante de suas propriedades no estado endurecido, e que reflete o desempenho das argamassas diante das ações do meio externo ao longo do tempo (BAÍA e SABBATINI, 2000).

A durabilidade inadequada se manifesta por uma deterioração que pode ser originada por fatores externos ou por causas internas no interior do próprio material. As diferentes formas de ação podem ser físicas, químicas ou mecânicas (NEVILLE, 1997).

Segundo Sabbatini (1986), as argamassas podem ter a sua integridade comprometida por uma série de fatores dentre os quais se pode citar a retração por secagem, absorção de água de chuva, temperaturas de congelamento, choque térmico, agentes corrosivos atmosféricos e agentes agressivos biológicos. Somado a esses fatores, a espessura excessiva e a falta de manutenção também podem comprometer a durabilidade do material (BAÍA e SABBATINI, 2000).

3.1.7 Análise microestrutural

Os métodos eficazes para determinação das fases dos materiais são baseados na microscopia, difração de raios-X e análises químicas (TAYLOR, 1990).

Todos os materiais sólidos contêm grandes números de imperfeições ou desvios da perfeição cristalina. O exame microscópico é uma ferramenta extremamente útil no estudo e na caracterização desses materiais. A microscopia pode ser relacionada com as várias características e propriedades dos materiais (CALLISTER, 2002)

A microestrutura é a estrutura fina de um material, observável com o auxílio de um microscópio. No estudo dos materiais de construção, sabe-se que há uma relação de dependência entre o processo de fabricação, a microestrutura e as propriedades. Diante disso, a análise de imagens vem colaborar para melhorar o nível de conhecimento destes materiais, sendo utilizada como uma ferramenta adequada para avaliar as mudanças morfológicas que ocorrem durante o seu processo e seu uso (GONDIM, 2005).

3.1.8 Classificação das argamassas

Segundo a NBR 13530 (ABNT, 1995), as argamassas possuem a seguinte classificação (Tabela 2):

Tabela 2 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13530 (ABNT, 1995).

Tipo	Critério de classificação
Argamassa aérea Argamassa hidráulica	Natureza do aglomerante
Argamassa de cal Argamassa de cimento Argamassa de cimento e cal	Tipo de aglomerante
Argamassa simples Argamassa mista	Número de aglomerante
Argamassa aditivada Argamassa de aderência melhorada Argamassa colante Argamassa redutora de permeabilidade Argamassa de proteção radiológica Argamassa hidrófuga Argamassa termoisolante	Propriedades especiais
Argamassa de chapisco Argamassa de emboço Argamassa de reboco	Função no revestimento
Argamassa dosada em central Argamassa preparada em obra Argamassa industrializada Mistura semipronta para argamassa	Forma de preparo ou fornecimento

Usualmente as argamassas utilizadas pela construção civil são argamassas à base de cal, argamassas de cimento e areia e as argamassas de cimento, cal e areia, mais conhecidas como argamassas mistas (SILVA, 2006).

3.1.8.1 Argamassa de cal

A argamassa de cal é composta por cal, agregado miúdo e água. A pasta de cal preenche os vazios entre os grãos do agregado miúdo, melhorando a plasticidade e a retenção de água. A argamassa de cal recebe usualmente o nome de argamassa intermediária, pois

quando se utiliza cal virgem este tipo de argamassa é utilizado para a maturação da cal, para posteriormente ser misturado o cimento (SILVA, 2006).

3.1.8.2 Argamassa de cimento

Este tipo de argamassa é composto, basicamente, por cimento, agregado miúdo e água. Adquire elevada resistência mecânica em pouco tempo, porém, tem pouca trabalhabilidade e baixa retenção de água, além de estar mais propícia à retração. Este tipo de argamassa é raramente utilizado como revestimentos, sua utilização principal é na confecção de chapisco para ser aplicada nas paredes de alvenaria e estruturas de concreto para aumentar a resistência de aderência do revestimento de argamassa mista (SILVA, 2006).

3.1.8.3 Argamassa mista

A argamassa mista é composta basicamente por cimento, cal, agregado miúdo e água. Segundo Sabbatini (1986), os ingleses utilizavam a proporção 1:3 (cimento+cal:areia seca) em volume como traço básico, pois partem do princípio de que com esta proporção os vazios da areia são preenchidos pela pasta aglomerante. E assim, ao alterar-se as proporções relativas de cal e cimento, a trabalhabilidade fica mais ou menos assegurada, independentemente das modificações. Esta proporção é muito utilizada no Brasil, como os tradicionais traços em volume 1:2:8 (cimento:cal:agregado miúdo) para revestimentos internos, 1:1:6 para revestimentos externos e 1:0,5:4,5 para assentamento de unidades de alvenaria estrutural.

3.2 RESÍDUO DE PEDREIRA

3.2.1 Definição

É o material resultante da britagem de qualquer tipo rocha, ou seja, da produção de agregado graúdo, geralmente com diâmetro inferior a 2,4 mm, comercializado a seco. Normalmente apresentam baixo valor agregado, e justamente por isso, é considerado como rejeito.

3.2.2 Obtenção e características

O aproveitamento do resíduo gerado pelo processo de britagem não é um assunto inovador. De acordo com Nuget (1979) apud Menossi (2004), esse material já vem sendo utilizado desde séculos passados em diversos países, tendo-se, como exemplo, os Estados Unidos e o Canadá.

O setor de pedra natural (extração e transformação de pedra) não dá origem a resíduos perigosos, porém o tipo de processamento traz como conseqüência a produção de quantidades bastante elevadas de resíduo, em particular sólidos na extração, que vão promover a ocorrência de impactos consideráveis e constituem um incômodo e encargo para as empresas.

Segundo Fujimura et al apud D'Agostini e Soares (2003) as pedreiras geram quantidades significativas de resíduos no processo de cominuição das rochas, principalmente quando do processo de britagem. Estima-se entre 10% e 15% do volume produzido de brita, o total de resíduo gerado no processo de britagem, o que resulta em alguns milhões de toneladas acumuladas anualmente. A Figura 8 ilustra a estocagem do resíduo de pedreira.

Figura8 - Exemplo de estocagem do resíduo de pedreira no pátio das empresas (MENOSSI, 2004).

Na Tabela 3 apresenta-se a classificação mais usual adotada pelas minerações brasileiras para os produtos de britagem de rochas (PISSATO e SOARES, 2001).

Tabela 3 – Classificação granulométrica dos produtos de britagem de rochas.

Brita numerada		Tamanho	
		Mínimo (mm)	Máximo (mm)
Resíduo	Pó-de-pedra		< 0,075
	Pedrisco	0,075	4,8
Brita 1		4,8	12,5
Brita 2		12,5	25
Brita 3		25	50
Brita 4		50	76
Brita 5		76	100
Rachão		> 100	

Fonte: Manual FAÇO, modificado por MENDES (1999) apud PISSATO e SOARES (2001).

Se considerados adequados para o preparo de argamassas, o resíduo de pedreira passaria de rejeito para subproduto da mineração, promovendo assim, uma utilização para o grande volume de finos que pode gerar diversos impactos ambientais se não for bem administrado (D'AGOSTINO e SOARES, 2001).

Normalmente, o resíduo de pedreira apresenta forma cúbica, superfícies rugosas e angulares proeminentes e, possuem uma composição mineralógica composta basicamente por quartzo, feldspato potássico (microclínico), plagioclásio e micas (PISSATO e SOARES, 2001).

3.2.3 Utilização em matriz cimentícia

Pesquisa realizada por D'Agostino e Soares (2001) mostra que, o resíduo de pedreira é adequado para o preparo de argamassas. Segundo os autores, o material possue uma boa distribuição granulométrica, o que permite melhor preenchimento de vazios deixados por grãos maiores e, portanto, as argamassas podem ser produzidas com menores quantidades de cimento.

Segundo Neves et al (2002), apesar do concreto dosado com resíduo de pedreira necessitar de um pouco mais de água, o que chega a ser insignificante em uma mistura de grandes volumes, pois para uma mistura de 1 m^3, o mesmo requer apenas 2 a 4 litros a mais em relação à sua mistura padrão (sem adição de resíduo de pedreira), o concreto dosado com resíduo de pedreira consome menos cimento e possue maior resistência mecânica em relação ao concreto padrão.

A pesquisa realizada por Silva et al (2007) evidencia que:

- As argamassas confeccionadas com resíduo de pedreira possuem baixos teores de ar incorporado com relação às argamassas de areia natural, possivelmente, devido ao maior teor de material pulverulento presente no resíduo de pedreira;
- Com relação à densidade aparente no estado endurecido, as argamassas produzidas com resíduo de pedreira apresentam valor superior quando comparadas às argamassas confeccionadas com areia natural. Esta propriedade pode ser utilizada para caracterização das argamassas relacionadas à presença de vazios e às resistências mecânicas.

De acordo com D'Agostino e Soares (2003), a argamassa quando produzida com resíduo de pedreira, após cura de 90 dias, apresenta resistência à compressão superior, representando mais que o dobro do resultado obtido com a argamassa produzida com areia aluvionar. Paes et al (1999) afirmam que, quanto maior o teor de resíduo de pedreira maior será a incidência de fissuras, apesar da redução da água unitária. Esta fissuração, provavelmente, decorre da retração, que pode ser explicada em função da granulometria da areia e do resíduo de pedreira. A areia atua como "estrutura" para evitar a retração da argamassa; e quando substituída, em diferentes teores, por materiais mais finos facilita à ocorrência de fissuras, visto que quanto menor o diâmetro dos agregados maior a retração (PAES et al, 1999).

Segundo Silva et al (2005), a substituição da areia natural pelo resíduo de pedreira é viável na confecção de argamassa de assentamento e revestimento.

Pesquisa realizada por Angelim et al (2003) conclui que, a adição de resíduo de pedreira às argamassas mistas proporciona aos revestimentos ganho da resistência mecânica, da dureza superficial e da resistência ao desgaste por abrasão. A justificativa para tal seria a baixa relação água/cimento, alta compacidade das argamassas endurecidas e pela possível integração do resíduo de pedreira à pasta de cimento hidratada.

As areias naturais quando substituídas por resíduo de pedreira na confecção de argamassas tornam as mesmas mais pesadas, refletindo assim na densidade de massa no

estado fresco, tornando-as impróprias para uso em como revestimento de tetos e paredes (TRISTÃO et al, 2005).

3.3 RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO

3.3.1 Definição

O resíduo do polimento do porcelanato pode ser definido como sendo a mistura de material cerâmico oriundo do polimento do porcelanato e material abrasivo desprendido durante o processo de polimento.

3.3.2 Obtenção e características

O porcelanato polido é o mais produzido comercialmente, requerendo uma etapa de polimento durante sua produção a fim de nivelar, retirar riscos e defeitos e dar brilho a superfície do produto final. Diante disso, a indústria cerâmica de porcelanatos gera uma elevada quantidade de resíduo durante o processo de polimento dos produtos. O que origina um novo custo aos produtores do setor, que necessitam gerenciar e descartar adequadamente esse resíduo (MARQUES et al, 2007).

O processo de polimento do porcelanato ocorre em um equipamento que possui várias cabeças polidoras compostas basicamente de materiais abrasivos, que em contato direto com as peças em alta rotação e velocidade controlada em presença de água, executam o polimento, utilizando gradativamente uma granulometria mais fina, até conseguir-se o resultado desejado (SILVA, 2005).

Conforme definição já descrita no item 3.3.1, o resíduo do polimento do porcelanato é constituído por uma mistura de material cerâmico oriundo do polimento do porcelanato e material abrasivo desprendido durante o processo, resultando em um pó de coloração branco. O material abrasivo (Figura 9) utilizado durante o polimento é geralmente composto por partículas de diamante ou carbeto de silício aglomerados por cimentos à base de cloretos magnesianos (MARQUES et al, 2007).

Figura 9 – Cabeças de polimento com tijolos abrasivos (SOUZA, 2007).

A composição química do resíduo do polimento do porcelanato é, basicamente, constituída pela massa do próprio porcelanato e pelos resíduos gerados pelos utensílios de polimento. Esse material descartado, geralmente, costuma ser estocado pela indústria (Figura 10) para posterior uso em re-aterro de jazidas exploradas para extração de matéria-prima utilizada na fabricação do próprio porcelanato (SOUZA, 2007).

Figura 10 – Estocagem do resíduo do polimento do porcelanato (SOUZA, 2007).

Nesse sentido, a reutilização e a reciclagem são as condições mais indicadas para o manejo da grande maioria dos resíduos industriais, tais como o resíduo do polimento do porcelanato, reduzindo custos, preservando recursos naturais não renováveis, diminuindo a carga de poluentes lançados ao meio ambiente (BERNARDIN et al, 2006) e reduzindo os impactos ambientais e efeitos danosos à saúde humana causados pelo descarte indiscriminado de resíduos na natureza.

Por ser o porcelanato polido o mais comercializado no mercado, ocorre assim uma produção permanente de resíduo decorrente da produção do mesmo. Segundo informações do

Sr. Mauro Palma, gerente da Indústria Elizabeth Porcelanatos, localizada no estado da Paraíba, a produção do resíduo do polimento do porcelanato está entre 30 e 35 toneladas por dia (SOUZA, 2007). Já na indústria Cecrisa, localizada no estado de Minas Gerais, diariamente são produzidos aproximadamente 20 toneladas do resíduo (SILVA, 2005).

O resíduo do polimento do porcelanato possui granulometria fina e apresenta composição química variada (SOUZA, 2007), e uma elevada concentração de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_2) e óxido de magnésio (MgO) na sua composição (SILVA, 2005).

Ainda, segundo Silva (2005), o teor de álcalis encontrado na análise química é inferior ao permitido em cimentos. Através da NBR 12653 (ABNT, 1992), norma esta que classifica as pozolanas em classes conforme sua origem e existências mínimas quanto à sua composição, observa-se que o resíduo do polimento do porcelanato aparece na classe N como uma argila calcinada e apresenta uma quantidade de SiO_2 + Al_2O_3 + FeO_3 superior a 70%. O óxido SO_3 está abaixo de 4%, o álcali Na_2O aparece um pouco acima de 1,5% e a perda ao fogo abaixo da porcentagem máxima de 10%. Diante disso, de acordo com a análise química realizada o resíduo do polimento do porcelanato pode ser classificado como uma pozolana, entretanto se faz necessário que a sílica esteja no estado amorfo.

A análise estrutural permite a identificação das fases presentes, da estrutura e da microestrutura de um material. Logo abaixo, as Figuras 11, 12, 13 e 14, ilustram claramente a caracterização estrutural do resíduo do polimento do porcelanato.

A difração de raios-X é muito útil para obter o espectro com informações importantes para a caracterização do resíduo. A intensidade de picos característicos de cada mineral é proporcional a sua quantidade. A identificação das fases é feita pela comparação dos espaçamentos (ou ângulos de difração) da amostra com dados conhecidos para materiais cristalinos, disponíveis em um banco de dados (SILVA, 2005).

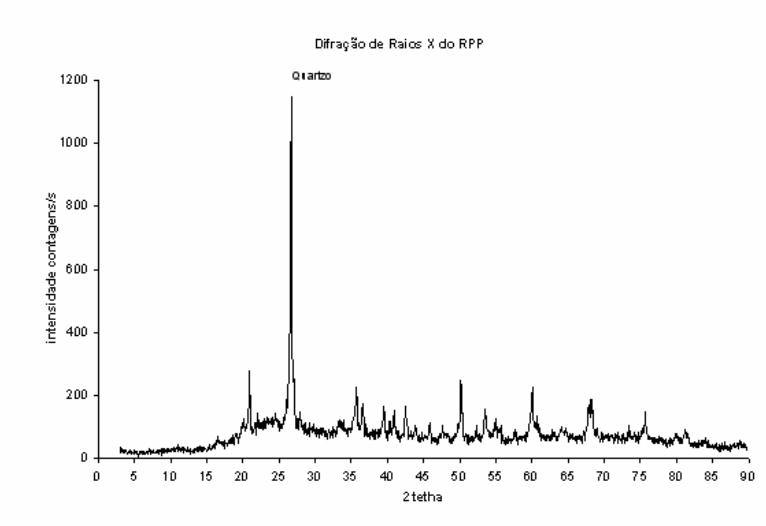


Figura 11 – Difração de raios-X do resíduo do polimento do porcelanato (SILVA, 2005).

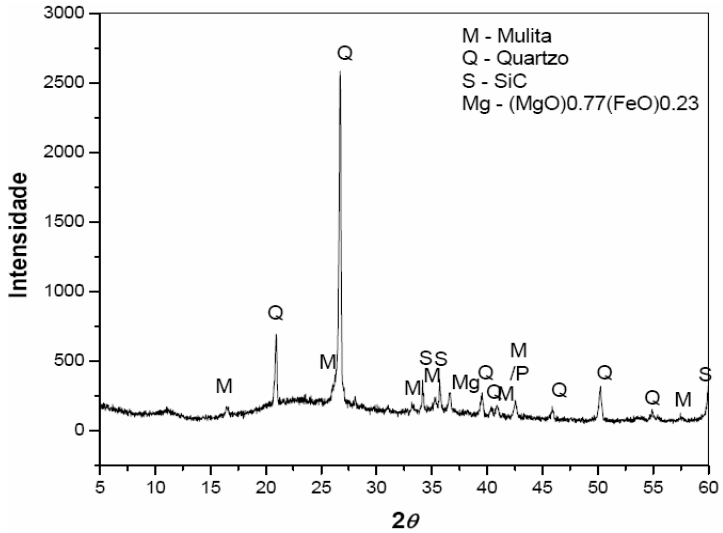


Figura 12 - Difração de raios-X do RPP (MARQUES et al, 2007).

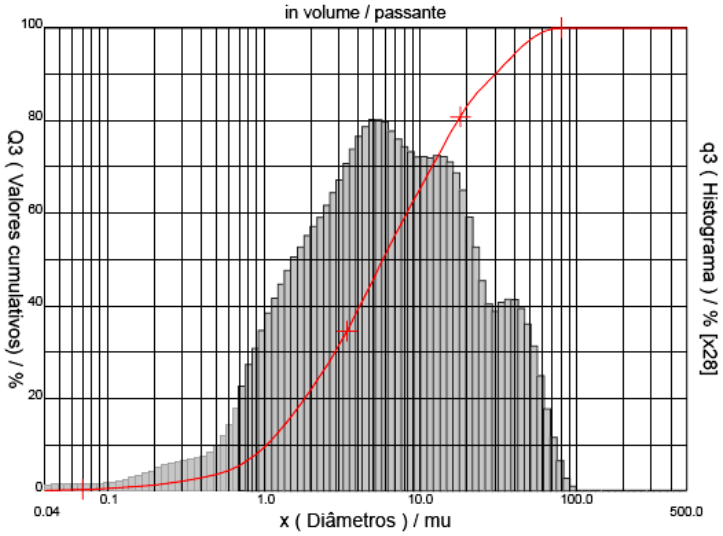


Figura 13 - Distribuição do tamanho de partícula do RPP (MARQUES et al, 2007).

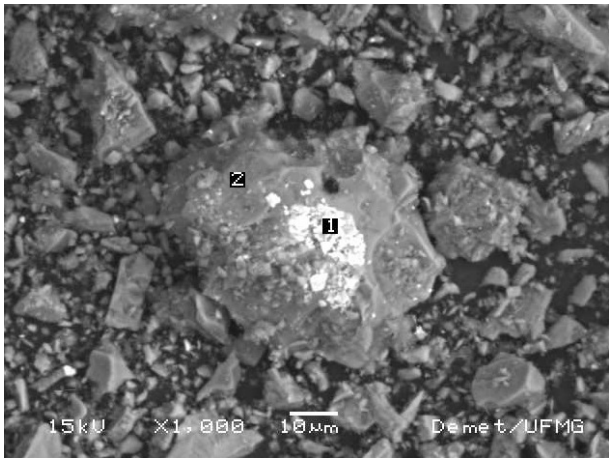


Figura 14 – Partícula de resíduo do polimento do porcelanato retro-espelhado (SILVA, 2005).

De acordo com Silva (2005), a massa específica do resíduo do polimento do porcelanato é de aproximadamente 2,49 g/cm^3.

3.3.3 Utilização em matriz cimentícia

Na literatura não são encontradas muitas publicações que abordem esse tema diretamente, a maioria das pesquisas realizadas com o aproveitamento do resíduo do polimento do porcelanato envolve a utilização do mesmo na fabricação de novos produtos cerâmicos. Autores como Silva (2005) e Souza (2007) utilizaram em suas pesquisas o resíduo do polimento do porcelanato como adição ao concreto.

Segundo Souza (2007), a utilização do resíduo do polimento do porcelanato no concreto proporciona um grande benefício ambiental e ainda agrega melhorias no que se refere à resistência mecânica e durabilidade.

O resíduo do polimento do porcelanato quando misturado com o cimento CP V, apresenta atividade pozolânica (SILVA, 2005).

Ainda, segundo o mesmo autor, as misturas de concreto com adição de resíduo do polimento do porcelanato apresentam melhor consistência e uma menor exsudação. Quanto à resistência à compressão axial, o concreto com adição de resíduo do polimento do porcelanato possue um melhor desempenho em relação ao concreto sem adição do resíduo.

Com relação aos aspectos de durabilidade, foi constatado que a presença do resíduo do polimento do porcelanato resulta em uma menor porosidade e absorção no concreto. A presença do resíduo do polimento do porcelanato no concreto não altera a condutividade térmica do mesmo (SOUZA, 2007).

CAPÍTULO 4
PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo é de fundamental importância para a análise experimental, pois nele encontra-se toda a descrição do trabalho realizado. O programa experimental da pesquisa foi desenvolvido seguindo instruções da Associação Brasileira de Normas Técnicas, através dos seus textos normativos, denominados de NBR, bem como orientações fornecidas pelos professores orientadores desta pesquisa.

4.1 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DAS ARGAMASSAS

As argamassas utilizadas neste estudo experimental foram argamassas mistas de assentamento com traço 1:1:6 (cimento:cal:areia), em volume, comumente utilizada na execução de alvenarias de vedação e estrutural, esse traço também pode ser utilizado como revestimento argamassado nas fachadas de edifícios acima de 20 pavimentos; argamassas mistas de assentamento com função estrutural específica, com traço 1:0,5:4,5 (cimento:cal:areia), em volume, comumente utilizadas em prédios de alvenaria estrutural acima de 4 (quatro) pavimentos. Procurou-se utilizar argamassas com traços comumente empregados em obras, retratando-se assim a realidade das edificações brasileiras.

4.2 FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Todas as argamassas utilizadas neste estudo experimental foram confeccionadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil do CEFET/RN.

Essas argamassas foram formuladas a partir da substituição de diferentes teores de cimento pelo resíduo de pedreira de rocha calcária (RPPC) e o resíduo do polimento do porcelanato (RPP). Como mostra a Tabela 4, foram formuladas um total de 16 (dezesseis) argamassas com substituições, consideradas argamassas com resíduos, e 2 (duas) argamassas sem adições, consideradas argamassas de referência (REF), que serviram como parâmetro comparativo.

Tabela 4 - Formulação das argamassas.

Traço da argamassa	Argamassa	Teor de resíduo (%)	Resíduo	Nomenclatura
1:1:6	A1	0	REF*	A1/0/REF
1:1:6	A1	5	RPPC	A1/5/RPPC
1:1:6	A1	10	RPPC	A1/10/RPPC
1:1:6	A1	20	RPPC	A1/20/RPPC
1:1:6	A1	30	RPPC	A1/30/RPPC
1:1:6	A1	5	RPP	A1/5/RPP
1:1:6	A1	10	RPP	A1/10/RPP
1:1:6	A1	20	RPP	A1/20/RPP
1:1:6	A1	30	RPP	A1/30/RPP
1:0,5:4,5	A2	0	REF*	A2/0/REF
1:0,5:4,5	A2	5	RPPC	A2/5/RPPC
1:0,5:4,5	A2	10	RPPC	A2/10/RPPC
1:0,5:4,5	A2	20	RPPC	A2/20/RPPC
1:0,5:4,5	A2	30	RPPC	A2/30/RPPC
1:0,5:4,5	A2	5	RPP	A2/5/RPP
1:0,5:4,5	A2	10	RPP	A2/10/RPP
1:0,5:4,5	A2	20	RPP	A2/20/RPP
1:0,5:4,5	A2	30	RPP	A2/30/RPP

* argamassa de referência (sem resíduo).

4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Após a definição dos traços e formulação das argamassas foi realizada a caracterização dos materiais a serem empregados nas dosagens das argamassas, em seguida a conversão dos traços em volume para massa. Logo após, foi abordada a descrição do preparo das argamassas para então, realizar-se a caracterização das mesmas. A Figura 15 mostra o diagrama esquemático das etapas realizadas no desenvolvimento do programa experimental.

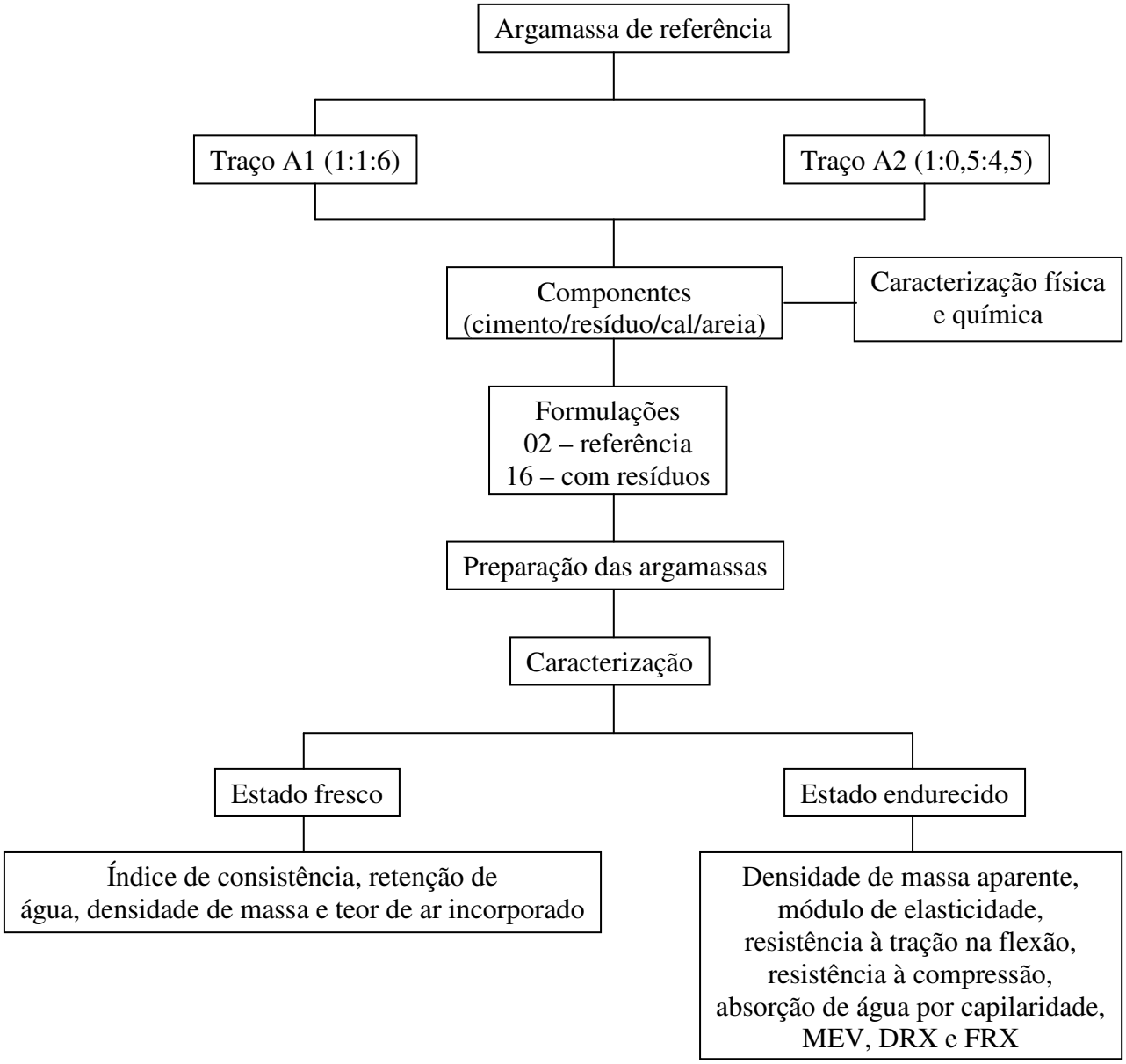


Figura 15 – Diagrama esquemático do procedimento experimental.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA

As argamassas mistas foram confeccionadas utilizando-se cimento, cal, areia natural, resíduo de pedreira de rocha calcária e resíduo do polimento do porcelanato.

4.4.1 Cimento

O cimento a ser utilizado na pesquisa foi o cimento Portland CP II F 32, da marca Poty, de um mesmo lote, fornecido por uma concreteira local. A escolha do tipo de cimento

deu-se por ser um cimento que não possui pozolana em sua composição, além de ser largamente utilizado em obras da região.

O cimento foi coletado de um dos silos da concreteira. O mesmo foi coletado através do recipiente onde fora armazenado. Trata-se de um recipiente plástico, vedado e revestido internamente com sacos plásticos, ficando assim, totalmente protegido das intempéries.

A caracterização química, física, mecânica e a resistência à compressão foram fornecidas pelo fabricante (Anexo A). A massa específica e massa unitária foram obtidas através de ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do CEFET/RN, conforme a NBR 9776 (ABNT, 1987) e NBR 7251 (ABNT, 1982), respectivamente.

4.4.2 Cal

Para realização da pesquisa fez-se uso da cal hidratada CH I, de um mesmo lote, fornecida pela indústria Carbomil, produtora de cal, localizada no estado do Ceará. A cal foi armazenada em um recipiente plástico, vedado, revestido internamente com saco plástico, ficando assim protegida das intempéries.

A caracterização física e química da cal foi fornecida pelo fabricante (Anexo B). A massa específica e massa unitária foram obtidas em conformidade com a NBR 9776 (ABNT, 1987) e NBR 7251 (ABNT, 1982), respectivamente. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do CEFET/RN.

4.4.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo, aqui denominado areia quartzosa de origem natural, foi adquirido em uma jazida, no distrito de Igreja Nova, localizado no município de Macaíba/RN. Através de uma inspeção visual pode-se constatar que a mesma não apresentava impurezas e que possuía granulometria uniforme.

Foi coletado aproximadamente 2 m³ de areia média, em sacos de aniagem, para serem utilizados na confecção das argamassas. Todo material foi seco em estufa e em seguida,

acondicionado em recipientes plásticos com tampa, revestidos internamente com saco plástico, estando assim protegido das intempéries.

O agregado miúdo foi caracterizado quanto à granulometria, conforme o prescrito pela NBR 7217 (ABNT, 1987) e NBR 7211 (ABNT, 1983); massa específica, segundo a NBR 9776 (ABNT, 1987) e massa unitária, conforme o estabelecido pela NBR 7251 (ABNT, 1982).

4.4.4 Resíduos

Os resíduos utilizados neste trabalho primeiramente foram peneirados na peneira de malha com abertura 2,4 mm, a fim de se excluir eventuais partículas com diâmetros superiores e que não fizessem parte da sua composição original. Nenhum beneficiamento preliminar foi feito aos resíduos, nem ocorreu descarte da porção abaixo de 0,075 mm, com o intuito de verificar a possibilidade de uso desses materiais, exatamente como encontram-se estocados nos pátios dos seus produtores. Além disso, qualquer beneficiamento implicaria em custos adicionais ao processo.

4.4.4.1 Pedreira de rocha calcária

O resíduo de pedreira de rocha utilizado na pesquisa é proveniente de britador de rocha calcária localizado no município de Mossoró/RN.

Após secagem em estufa o resíduo de pedreira de rocha calcária foi armazenado em recipientes plásticos, vedados e revestidos internamente com saco plástico, protegidos assim de intempéries.

O resíduo de pedreira de rocha calcária foi caracterizado quanto à massa específica, massa unitária, granulometria a laser, microscopia eletrônica de varredura, difratometria de raios-X e fluorescência de raios-X.

A massa específica e massa unitária foram obtidas através de ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do CEFET/RN, conforme o estabelecido pela NBR 9776 (ABNT, 1987) e NBR 7251 (ABNT, 1982), respectivamente.

A granulometria a laser foi determinada através do aparelho modelo 1064 da marca CILAS, localizado no Laboratório de Pesquisa em Petróleo, pertencente ao departamento de química da UFRN.

As micrografias foram realizadas no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica de Varredura - LIMEV – UFRN, utilizando-se o aparelho da marca Phillips, modelo XL 30 – ESEM.

A análise por difração de raios-X foi realizada pelo equipamento da marca Shimadzu modelo XRD-7000, pertencente ao Laboratório de Cimento da UFRN. Os experimentos de difração de raios-X foram realizados utilizando-se radiação Cu-Kα, com tensão acelerada 30 kV e corrente de 30 mA, com varredura de 5° a 80°,com velocidade de varredura de 2°/min.

A fluorescência de raios-X foi realizada através do equipamento EDX 720 da marca Shimadzu, o mesmo encontra-se no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFRN.

4.4.4.2 Polimento do porcelanato

O resíduo do polimento do porcelanato foi fornecido pela Elizabeth Porcelanatos S/A, localizada no estado da Paraíba. Esta empresa é especializada na produção de pisos cerâmicos do tipo porcelanato.

Todo material foi seco em estufa e posteriormente armazenado em recipientes plásticos, vedado, revestidos internamente com saco plástico, onde o mesmo permaneceu protegido de intempéries.

O resíduo do polimento do porcelanato foi caracterizado através da massa específica, massa unitária, granulometria a laser, micrografia eletrônica de varredura, difratometria de raios-X e fluorescência de raios-X.

A massa específica e massa unitária foram obtidas através de ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do CEFET/RN, de acordo com o prescrito pela NBR 9776 (ABNT, 1987) e NBR 7251 (ABNT, 1982), respectivamente.

Para realização da caracterização quanto à granulometria a laser, análise microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X e fluorescência de raios-X do resíduo do polimento do porcelanato, se fez uso dos mesmos equipamentos utilizados na caracterização do resíduo de pedreira de rocha calcária.

4.4.5 Água

A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento local.

4.5 CONVERSÃO DE TRAÇO EM VOLUME PARA MASSA

Pode-se afirmar que a proporção dos materiais constituintes das argamassas tem influência significativa nas propriedades das mesmas. Desta forma, torna-se relevante a metodologia utilizada para medição dos materiais, inicialmente medidos em volume, e posteriormente convertidos em massa, após a determinação das massas unitárias do cimento, do resíduo, da cal e do agregado miúdo (CALHAU, 2000).

Para conversão dos traços se utilizou a expressão abaixo:

$$1 : \frac{Pp_{res} . \delta_{res}}{\delta_{cim}} : \frac{Pp_{cal} . \delta_{cal}}{\delta_{cim}} : \frac{Pp_{agr} . \delta_{agr}}{\delta_{cim}}$$

Onde, podemos dizer que:

Pp_{res} = proporção de resíduo no traço da argamassa, em volume aparente, em dm^3;
Pp_{cal} = proporção de cal hidratada no traço da argamassa, em volume aparente, em dm^3;
Pp_{agr} = proporção do agregado miúdo no traço da argamassa, em volume aparente, em dm^3;
δ_{res} = massa unitária do resíduo, no estado solto, em kg/dm^3;
δ_{cal} = massa unitária da cal hidratada, no estado solto, em kg/dm^3;
δ_{cim} = massa unitária do cimento, no estado solto, em kg/dm^3;
δ_{agr} = massa unitária do agregado miúdo, no estado solto e seco, em kg/dm^3.

Quando da conversão dos traços a serem utilizados de volume para massa, foram obtidas as seguintes proporções entre os materiais (Tabela 5):

Tabela 5 – Conversão dos traços das argamassas.

Traço em volume	Traço em massa sem substituição*	Composição do traço	Traço em massa com substituição*	Composição do traço	Nomenclatura
1:1:6	333,30:210,30: 2.889,30 g	cimento:cal:areia	316,60:18,00:210,40: 2.889,30 g	cimento:resíduo:cal:areia	A1/5/RPPC
			300,00:36,10:210,40: 2.889,30 g		A1/10/RPPC
			266,70:72,10:210,40: 2.889,30 g		A1/20/RPPC
			233,30:108,20:210,40: 2.889,30 g		A1/30/RPPC
1:1:6	333,30:210,30: 2.889,30 g	cimento:cal:areia	316,70:15,90:210,40: 2.889,30 g	cimento:resíduo:cal:areia	A1/5/RPP
			300,00:31,90:210,40: 2.889,30 g		A1/10/RPP
			266,70:63,80:210,40: 2.889,30		A1/20/RPP
			233,30:95,70:210,40: 2.889,30 g		A1/30/RPP
1:0,5:4,5	434,80:137,20: 2.826,48 g	cimento:cal:areia	413,00:23,50:137,20: 2.826,48 g	cimento:resíduo:cal:areia	A2/5/RPPC
			391,30:47,00:137,20: 2.826,48 g		A2/10/RPPC
			347,80:94,00:137,20: 2.826,48 g		A2/20/RPPC
			304,50:141,09:137,20: 2.826,48 g		A2/30/RPPC
1:0,5:4,5	434,80:137,20: 2.826,48 g	cimento:cal:areia	413,00:20,78:137,20: 2.826,48 g	cimento:resíduo:cal:areia	A2/5/RPP
			391,30:41,61:137,20: 2.826,48 g		A2/10/RPP
			347,80:83,22:137,20: 2.826,48 g		A2/20/RPP
			304,50:124,83:137,20: 2.826,48 g		A2/30/RPP

* substituição de diferentes teores de cimento pelo resíduo de pedreira de rocha calcária ou pelo resíduo do polimento do porcelanato.

4.6 PREPARO DAS ARGAMASSAS

Os materiais utilizados na pesquisa foram pesados em balanças eletrônicas, devidamente calibradas. Na pesagem do cimento, resíduos, cal e água fizeram-se uso de uma balança com capacidade carga de 1000 g e resolução de 0,01g, marca HELMAC, modelo HM1000. O agregado miúdo foi pesado em balança eletrônica com capacidade de carga de 10.000 g e resolução 0,1 g, marca MARTE, modelo AC 10K.

Neste experimento, as argamassas foram produzidas utilizando-se um misturador mecânico (argamassadeira) de eixo vertical com capacidade de 5 litros, da marca PAVITEST C 3010-146-380 ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Misturador mecânico (foto da autora).

Primeiramente, foi determinado o teor de água para a obtenção do índice de consistência padrão prescrito na NBR 13276 (ABNT, 2005), utilizando-se as argamassas de referência (sem resíduo). Chegando-se a uma consistência no intervalo 260 ± 5 mm recomendado pela NBR 13276 (ABNT, 2005), fixou-se a relação água/cimento para cada um dos traços de referência, conforme mostra a Tabela 6, onde os valores encontrados foram igualmente utilizados nos traços que continham resíduos.

Objetivando um maior controle de produção, optou-se por separar previamente todo o material a ser utilizado na confecção do traço.

Tabela 6 – Relação água/cimento, água/aglomerante, água/materiais secos, cimento/materiais secos, cimento/cal e índice de consistência.

Argamassa	$f_{a/c}$	$f_{a/agl}$	$f_{a/mat.secos}$	$f_{c/mat.secos}$	$f_{c/cal}$	IC (mm)
A1	1,87	1,15	0,18	0,10	1,58	258,00
A2	1,45	1,10	0,19	0,13	3,17	261,00

4.7 MÉTODOS DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

4.7.1 Argamassa no estado fresco

4.7.1.1 Índice de consistência – trabalhabilidade

A Norma NBR 13276 (ABNT, 2005) foi utilizada neste ensaio visto que, prescreve o método de determinação do teor de água na preparação de argamassas, para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos. O princípio do ensaio consiste em medir o espalhamento da argamassa após ser submetida a 30 golpes na mesa de consistência.

Para realização do ensaio, fez-se uso da mesa para índice de consistência – "flow table", descrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996). O princípio do ensaio consiste em medir o espalhamento da argamassa após ser submetida a 30 golpes na mesa de consistência. As Figuras 17a, b e c, ilustram as etapas do ensaio.

(a) (b) (c)

Figura 17a - "Flow table" (foto da autora).
b - Tronco de cone utilizado no ensaio (foto da autora).
c - Medição do espalhamento da argamassa (foto da autora).

4.7.1.2 Retenção de água

Na ocasião da realização do ensaio o laboratório não dispunha do funil de Buchner, para que o ensaio fosse realizado conforme prescrito pela NBR 13277 (ABNT, 2005). Devido a isso, utilizaram-se as instruções contidas na NBR 13277 (ABNT, 1995).

Apesar de autores como Nakakura (2004) e Tristão e Machado (2003), entre outros, terem constatado que o método da NBR 13277 (ABNT, 1995) não ser eficaz, partiu-se do

princípio de que os resultados encontrados decorrentes do ensaio seriam comparativos entre os traços das argamassas, independentemente do método utilizado.

Esse ensaio tem como princípio básico medir a capacidade de retenção de água das argamassas. A Figura 18 ilustra a aparelhagem necessária para realização do ensaio.

Figura 18 – Aparelhagem para realização do ensaio (foto da autora).

4.7.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa e o teor de ar incorporado foram determinados utilizando os procedimentos da NBR 13278 (ABNT, 2005). Esta norma estabelece o método para determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado em argamassas no estado fresco, destinadas ao assentamento e revestimento de paredes e tetos. O resultado do ensaio mostra o estado de agregação das moléculas da mistura.

4.7.2 Argamassa no estado endurecido

Para realização dos ensaios com as argamassas no estado endurecido, quando do término da moldagem dos corpos-de-prova, a face superior do molde era protegida por uma placa de vidro plano com dimensão de 7 x 7 cm e espessura de 4 mm, para que não ocorresse a evaporação da água durante o processo de endurecimento da argamassa. Após 48 ± 24 hs os corpos-de-prova eram desmoldados, identificados, por lotes, com a data de moldagem, o traço utilizado e o número seqüencial. Todos os corpos-de-prova foram submetidos à cura ao ar, em local coberto, nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção Civil do CEFET/RN, durante o período mínimo de 28 dias, para então serem ensaiados.

4.7.2.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido

O ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido foi realizado na idade de 28 dias, conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005). A mesma prescreve o método de ensaio para determinação da densidade de massa aparente de argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos, no estado endurecido. Os corpos-de-prova foram moldados de acordo o estabelecido pela NBR 13279 (ABNT, 2005).

4.7.2.2 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado conforme o prescrito pelo projeto de norma nº 18:400.04-008 (ABNT, 2008), intitulado "Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Os corpos-de-prova foram moldados de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005) e ensaiados aos 28 dias de idade. Os resultados encontrados nos ensaios mostram a capacidade de deformação das argamassas quando submetidas à solicitações.

O ensaio foi realizado através do medidor de velocidade de pulso ultra-sônico, marca CONTROLS, modelo 58 – E0048. A Figura 19 ilustra o equipamento utilizado e a realização do ensaio.

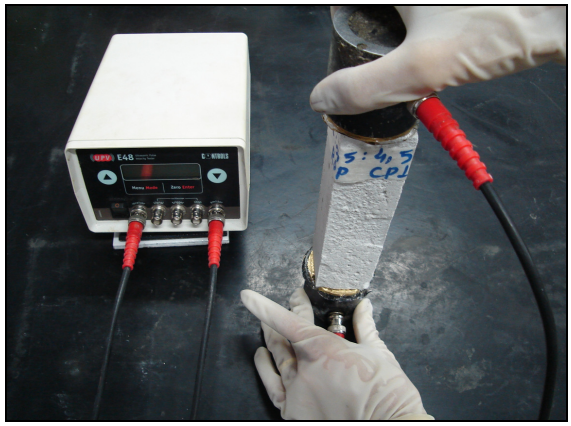


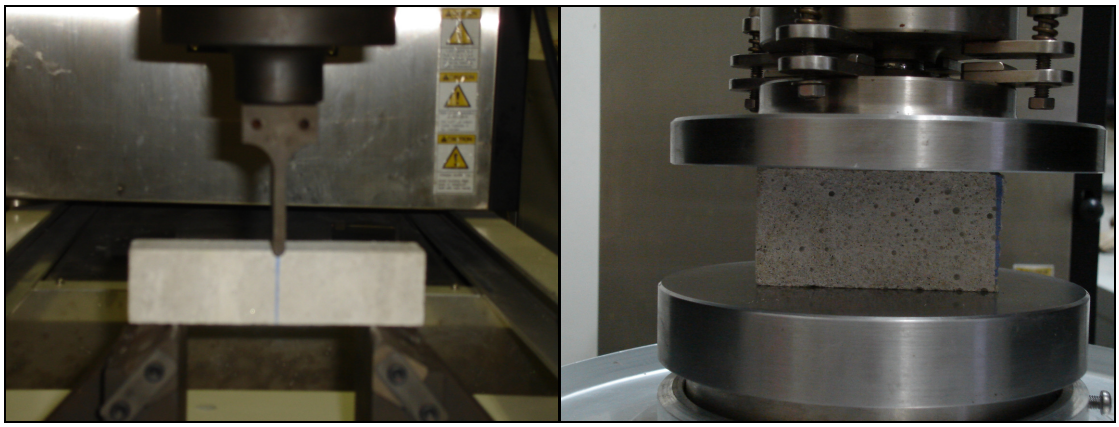
Figura 19 – Equipamento utilizado no ensaio (foto da autora).

4.7.2.3 Resistência à tração na flexão e à compressão

A resistência à tração na flexão e a resistência à compressão foram determinadas na idade de 28 dias, conforme procedimento descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005). A norma permite que, primeiramente se ensaie o corpo-de-prova à tração na flexão e, em seguida, que este mesmo corpo-de-prova seja ensaiado à compressão.

Quando da moldagem dos corpos-de-prova, as quedas foram aplicadas através da mesa para determinação do índice de consistência, pois o laboratório não dispunha da mesa de adensamento prescrita pela norma. Ressalta-se que, todos os corpos-de-prova foram moldados igualitariamente.

Antes da realização do ensaio de resistência à tração na flexão, o eixo do corpo-de-prova era demarcado para garantir a aplicação da carga no centro do mesmo. Os ensaios foram realizados na sala de ensaios mecânicos do Laboratório de Cimento da UFRN em uma prensa universal da Shimadzu modelo Autograph AG-I – TRAPEZIUM 2. As Figuras 20a e b ilustram a execução dos ensaios.



(a) (b)

Figura 20a – Ensaio de resistência à tração na flexão (foto da autora).
b - Ensaio de resistência à compressão (foto da autora).

4.7.2.4 Absorção de água por capilaridade

Para realização deste ensaio seguiu-se o método de ensaio descrito na NBR 15259 (ABNT, 2005). Os corpos-de-prova foram moldados conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005) e ensaiados aos 28 dias de idade. Esse ensaio tem como princípio básico medir a absorção de

água das argamassas pelos poros capilares. A Figura 21 ilustra o momento em que os corpos-de-prova foram ensaiados.

Figura 21 – Corpos-de-prova em contato com a água (foto da autora).

4.7.2.5 Análise microestrutural

O progresso no campo dos materiais resultou principalmente do reconhecimento do princípio de que as propriedades de um material têm origem na sua estrutura interna; em outras palavras, as propriedades podem ser modificadas por mudanças adequadas na estrutura do material (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Diante disso, as argamassas formuladas foram analisadas microestruturalmente, visando um auxílio na busca por respostas quando da sua caracterização.

As amostras para realização da análise microestrutural foram extraídas de corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 5 x 10 cm, moldados exclusivamente para a realização do ensaio. Os corpos-de-prova foram moldados em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 10 golpes aplicados através da mesa para determinação do índice de consistência.

Para a visualização na microscopia é necessário que a superfície observada não tenha recebido nenhum tipo de atrito ou qualquer incidência física que possa alterar as tensões superficiais do material, para não modificar, assim, as características intrínsecas da argamassa observada (SOUZA, 2007).

Com idades superiores a 28 dias, os corpos-de-prova foram fraturados manualmente, por impacto, com ajuda de uma barra metálica, onde foram reduzidos em amostras menores, com aproximadamente 0,70 x 0,50 x 0,50 cm e armazenadas em recipientes plásticos com tampa. Em seguida, as amostras foram metalizadas com ouro, visando o aumento do contraste de visualização.

As micrografias foram realizadas no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica de Varredura – LIMEV – UFRN, utilizando-se o aparelho da marca Phillips, modelo XL 30 – ESEM.

Para todas as amostras utilizou-se o mesmo critério de análise, onde primeiramente foi selecionado o ponto mais bem metalizado, visando uma melhor visualização, e em seguida o mesmo foi ampliado, sempre a partir da região central, em 3000 e 5000 vezes.

Para analisar a composição química elementar pontual das amostras, algumas delas foram selecionadas por serem representativas e apresentarem concentrações bem distintas de resíduos. As análises foram realizadas através da espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (EDS) – acoplado ao MEV. A Tabela 7 apresenta as argamassas analisadas.

Tabela 7 – Amostras selecionadas para análise microscópica e EDS.

Identificação do corpo de prova	Identificação da amostra analisada
1:1:60%	1
1:1:630%RPPC	3
1:1:630%RPP	8
1:0,5:4,50%	4
1:0,5:4,530%RPPC	6
1:0,5:4,530%RPP	10

4.7.2.6 Análise por DRX e FRX

Para identificação das fases formadas em todas as argamassas produzidas, foi utilizada a técnica de difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX). As amostras para realização destes ensaios foram extraídas dos mesmos corpos-de-prova utilizados para obtenção das amostras para a análise microestrutural. Uma pequena amostra do corpo-de-prova foi triturada e moída em um almofariz e utilizada à fração passante em peneira de # 50.

Os traços das argamassas analisadas por difração de raios-X e por fluorescência de raios-X foram os mesmos previamente selecionados para análise microscópica (Tabela 7).

As análises de fases por difração de raios-X foram realizadas através do equipamento da marca Shimadzu modelo XRD-7000, localizado no Laboratório de Cimento da UFRN. Os experimentos de difração de raios-X foram realizados utilizando-se radiação Cu-Kα, com tensão acelerada 30 kV e corrente de 30 mA, com varredura de 5° a 80°,com velocidade de varredura de 2°/min. No caso das análises por fluorescência de raios-X, se fez uso do equipamento EDX 720 da marca Shimadzu que se encontra no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFRN.

CAPÍTULO 5
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo abrangerá todos os resultados encontrados durante o desenvolvimento do programa experimental. Os resultados serão ilustrados em figuras e tabelas para uma melhor compreensão.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA

5.1.1 Massa específica e massa unitária

A Tabela 8 apresenta os resultados das massas específicas e massas unitárias dos materiais utilizados no estudo experimental.

Tabela 8 – Massa específica dos materiais de partida.

Ensaio	Método	Resultado
Cimento		
Massa específica (g/cm³)	NBR 9776 (1987)	2,98
Massa unitária (g/cm³)	NBR 7251 (1982)	1,06
Cal		
Massa específica (g/cm³)	NBR 9776 (1987)	2,70
Massa unitária (g/cm³)	NBR 7251 (1982)	0,65
Agregado miúdo (areia)		
Massa específica (g/cm³)	NBR 9776 (1987)	2,62
Massa unitária (g/cm³)	NBR 7251 (1982)	1,54
Resíduo de Pedreira de Rocha Calcária		
Massa específica (g/cm³)	NBR 9776 (1987)	2,50
Massa unitária (g/cm³)	NBR 7251 (1982)	1,47
Resíduo do Polimento do Porcelanato		
Massa específica (g/cm³)	NBR 9776 (1987)	2,25
Massa unitária (g/cm³)	NBR 7251 (1982)	1,01

Os resultados encontrados mostram que as massas específicas dos resíduos são inferiores a massa específica do agregado miúdo e dos aglomerantes utilizados no experimento. Logo, os resíduos possuem uma superfície específica inferior a dos demais materiais. A superfície específica do material é diretamente proporcional a ligação entre o agregado e os aglomerantes, e conseguintemente a agregação das moléculas. Além disso, Nakakura (2000) apud SILVA et al (2005) ressalta que a massa específica é diretamente

proporcional ao teor de finos do material. Diante disso, como o RPPC apresentou uma massa específica maior que a do RPP, apresenta um maior teor de finos na sua composição.

Em relação à massa unitária, os resultados mostram que os resíduos possuem massa unitária maior que a dos aglomerantes e menores que a do agregado miúdo. Segundo Pandolfo et al (2005), a massa unitária é inversamente proporcional à compacidade das argamassas. Diante disso, os resíduos podem contribuir para o preenchimento dos vazios presentes na ligação agregado/aglomerante.

5.1.2 Granulometria

5.1.2.1 Agregado miúdo

O teor de finos e a granulometria são elementos decisivos para o desempenho das argamassas. Na Tabela 9 estão apresentadas as características granulométricas do agregado miúdo utilizados nas argamassas estudadas. A figura 22 ilustra a curva granulométrica da areia utilizada nas misturas.

Tabela 9 – Granulometria do agregado miúdo.

Abertura da malha da peneira (mm)	% retido em massa	% retido em massa acumulada	Método
4,8	0,00	0,00	NBR 7217 (ABNT, 1987)
2,4	12,768	63,84	
1,2	18,612	93,06	
0,6	17,486	87,43	
0,3	16,850	84,25	
0,15	13,426	67,13	
< 0,15	20,858	104,29	
Total	100,000	-	
Módulo de finura	2,38		NBR 7217 (ABNT, 1987)
Dimensão máxima característica (mm)	4,8		NBR 7217 (ABNT, 1987)
Graduação (zona)	Zona 3 (areia média)		NBR 7211 (ABNT, 1983)

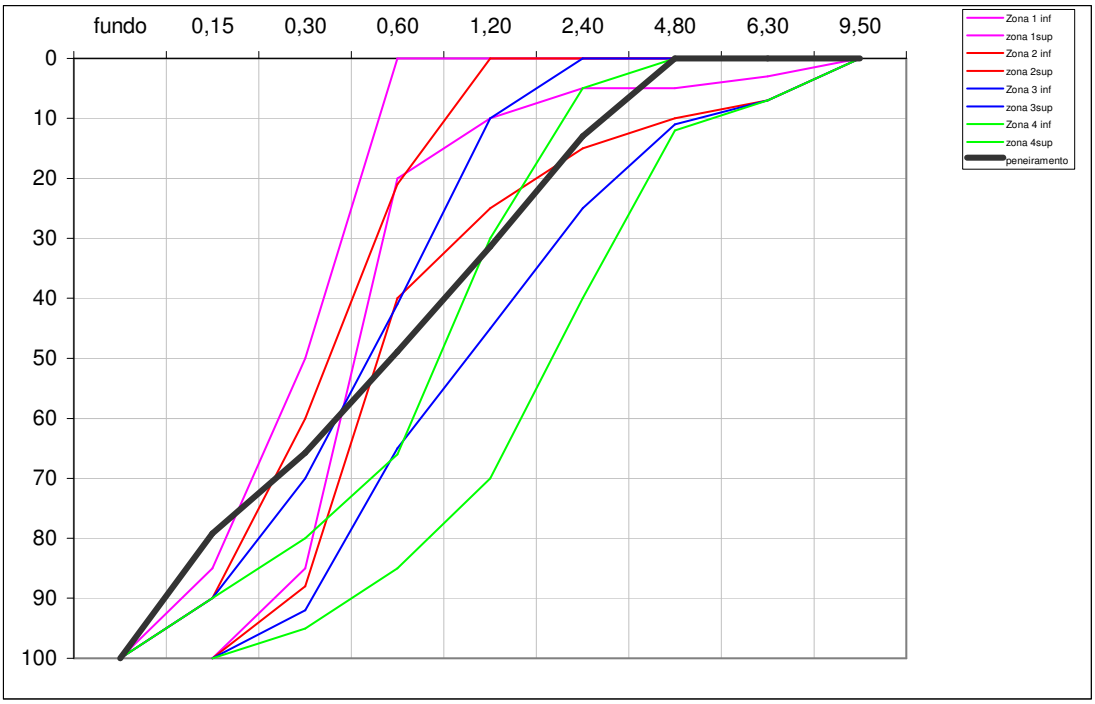


Figura 22 – Curva granulométrica da areia.

A Tabela 9 mostra que a areia utilizada encontra-se nos padrões adequados de uso para os traços estudados, pois apresenta graduação granulométrica conforme estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 1983) e dimensão máxima característica (mm) conforme prescrito pela NBR 7217 (ABNT, 1987). Na Figura 22 encontra-se a curva granulométrica da areia no intervalo entre a faixa inferior e superior da zona 3, classificando-a como areia média.

5.1.2.2 Resíduo de pedreira de rocha calcária

Para os resíduos utilizados nesta pesquisa foi realizada a granulometria a laser. A Tabela 10 apresenta o resultado do ensaio.

Tabela 10 – Granulometria a laser do RPPC (diâmetro em µm).

Resíduo de pedreira de rocha calcária	D10%	D50%	D90%
	0,82	20,56	194,36
Diâmetro médio das partículas	65,60		

O resultado do ensaio mostra que o diâmetro médio das partículas do resíduo de pedreira de rocha calcária é de 65,60 µm. O cimento Portland anidro consiste de partículas angulares de tamanho comumente entre 1 e 50 µm (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Diante disso, pode-se concluir, através da granulometria a laser, que, provavelmente, o resíduo de

pedreira de rocha calcária não apresenta granulometria adequada ao preenchimento dos vazios deixados pelos grãos de cimento.

Segundo Silva (2005), quanto ao tamanho da partícula, o sistema pode ser classificado como:

- Sistema granular: partículas acima de 44 µm, forças gravitacionais predominam, o material flui livremente.
- Sistema coloidal: partículas menores que 1 µm, as forças de superfície predominam controlando o comportamento do sistema.
- Pó: partículas de 1 a 44 µm, forças gravitacionais e de superfície da mesma ordem.

De acordo com a classificação acima, pode-se observar que o resíduo de pedreira de rocha calcária comporta-se como um sistema granular.

A Figura 23 ilustra o diâmetro das partículas em função da porcentagem acumulada do resíduo de rocha de pedra calcária (RPPC).

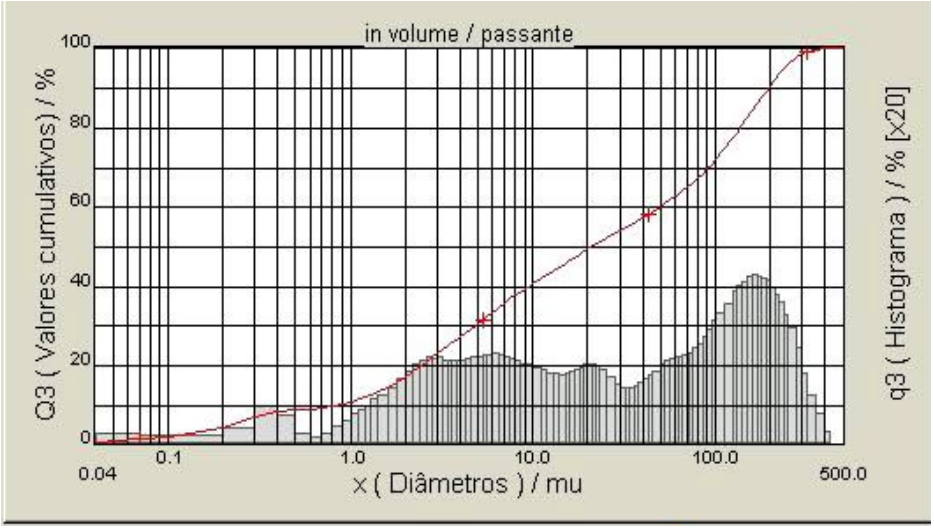


Figura 23 – Distribuição de tamanhos de partículas do RPPC.

5.1.2.3 Resíduo do polimento do porcelanato

A Tabela 11 apresenta o resultado da granulometria a laser do resíduo do polimento do porcelanato. A Figura 24 ilustra a curva granulométrica encontrada para o referido resíduo.

Tabela 11 – Granulometria a laser do RPP (diâmetro em µm).

Resíduo polimento porcelanato	D10%	D50%	D90%
	1,60	13,34	52,08
Diâmetro médio das partículas	20,85		

Com base na granulometria, pode-se dizer que, possivelmente, o resíduo do polimento do porcelanato é um material apropriado para realizar o preenchimento dos vazios deixados pelos grãos de cimento, visto que 80% das partículas possuem diâmetro de 20,85 µm. Quanto à classificação, o mesmo comporta-se como um pó, pois possui o diâmetro das suas partículas entre 1 e 44 µm.

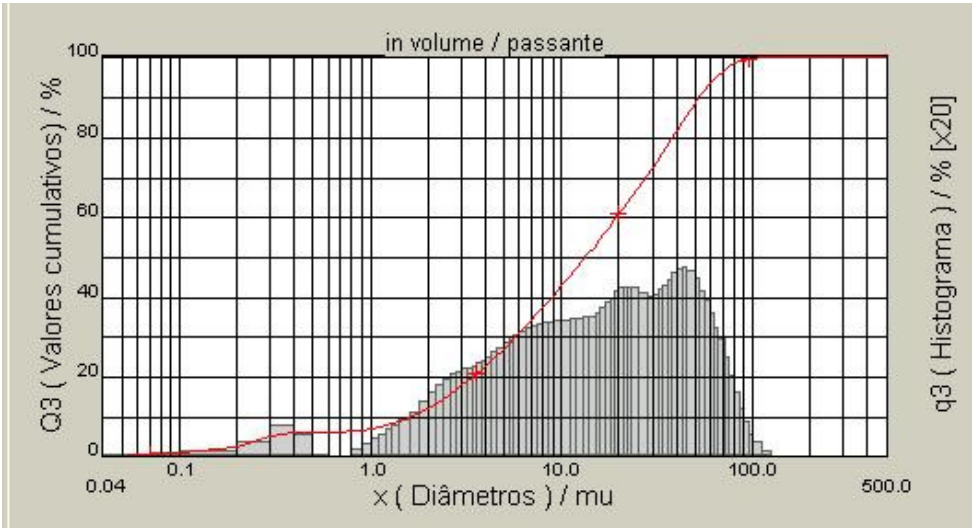


Figura 24 – Diâmetro das partículas x Porcentagem acumulada do RPP.

5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura

5.1.3.1 Resíduo de pedreira de rocha calcária

A microscopia eletrônica de varredura permitiu evidenciar a morfologia das partículas do resíduo, conforme a ilustração da Figura 25.

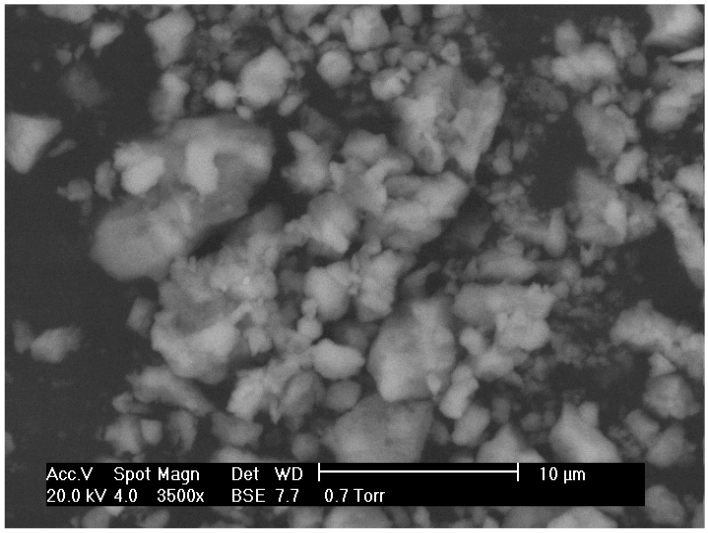


Figura 25 - Micrografia do resíduo de pedreira de rocha calcária – elétrons retro-espalhados.

A micrografia mostra que as partículas do resíduo de pedreira de rocha calcária possuem uma forma irregular e angular. A demanda de água está geralmente relacionada com a forma das partículas, sendo assim caracterizado o efeito rolamento para as partículas esféricas que favorece a trabalhabilidade da argamassa, diferentemente das partículas irregulares e angulares do resíduo de pedreira de rocha calcária.

5.1.3.2 Resíduo do polimento do porcelanato

A Figura 26 ilustra uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do resíduo do polimento do porcelanato. A análise realizada evidencia a morfologia das partículas do resíduo. As micrografias revelam que, as partículas do resíduo do polimento do porcelanato são ainda mais irregulares e angulares que as do resíduo de pedreira de rocha calcária. Sendo assim, a trabalhabilidade das argamassas dosadas com este material tende a ser menor.

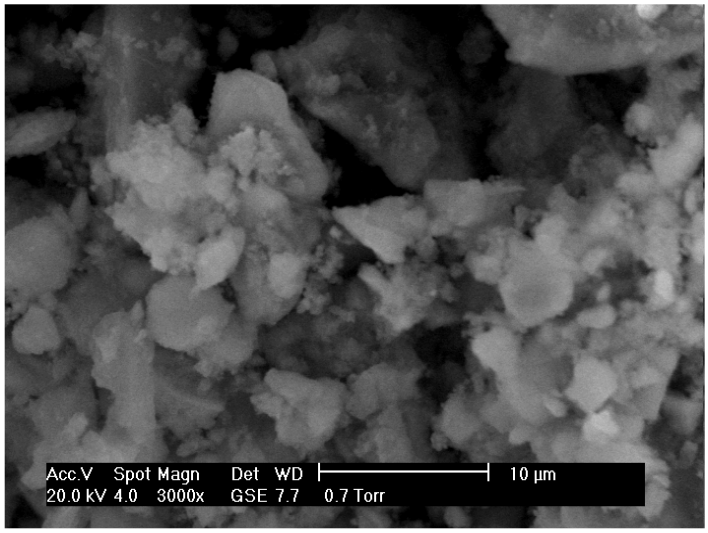


Figura 26 - Micrografia do resíduo do polimento do porcelanato – elétrons secundários.

5.1.4 Difratometria de raios-X e Fluorescência de raios-X

5.1.4.1 Resíduo de pedreira de rocha calcária

A Figura 27 ilustra o difratograma de raios-X do resíduo de pedreira de rocha calcária. O resultado da análise mostra que há uma predominância das fases $CaCO_3$, CaO e SiO_2. Tais fases possivelmente foram formadas em decorrência da origem calcária do resíduo, além da presença de quartzo.

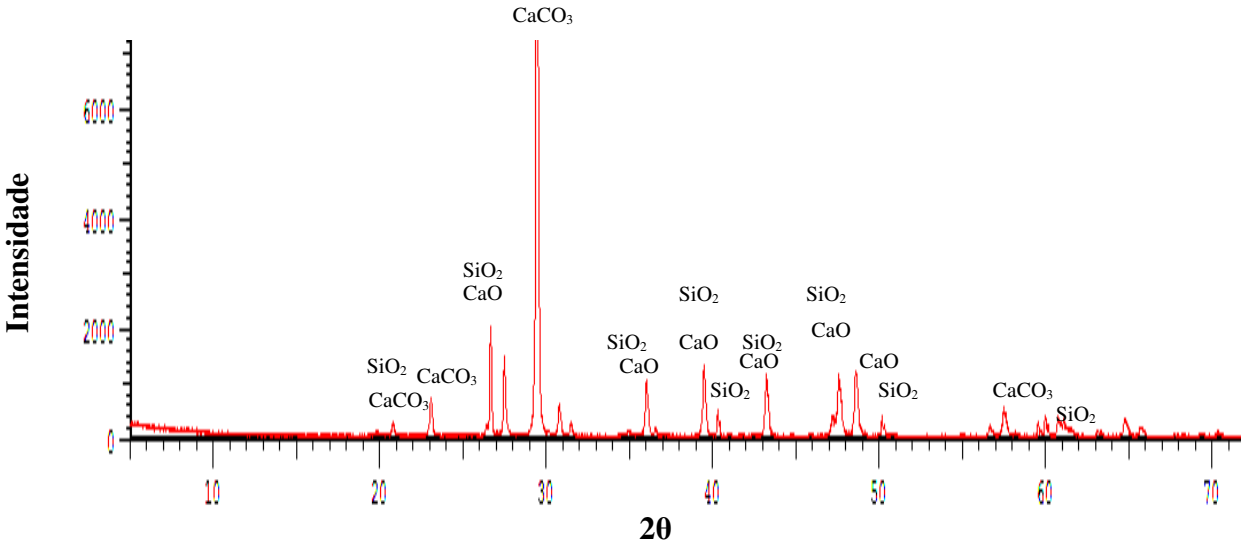


Figura 27 – DRX do RPPC.

A Tabela 12 apresenta o resultado da análise por fluorescência de raios-X. O resultado mostra a predominância do Ca e Si, confirmando o resultado da análise por difração de raios-X. Além disso, foram encontrados Al e Fe, provavelmente associados a fases presentes em menores teores.

Tabela 12 – Fluorescência de raios-X do RPPC.

Fase	Percentual
CaO	77,568%
SiO_2	11,866%
Al_2O_3	5,261%
Fe_2O_3	2,231%
SO_3	1,401%
K_2O	1,251%
Outros	0,422%

5.1.4.2 Resíduo do polimento do porcelanato

A difratometria de raios-X do resíduo do polimento do porcelanato, conforme ilustrado na Figura 28 mostra que as fases predominantes são quartzo, mulita e carbeto de silício. A presença do quartzo e da mulita possivelmente é oriunda do porcelanato, enquanto que a presença do carbeto de silício pode estar relacionada ao abrasivo utilizado no processo do polimento do porcelanato.

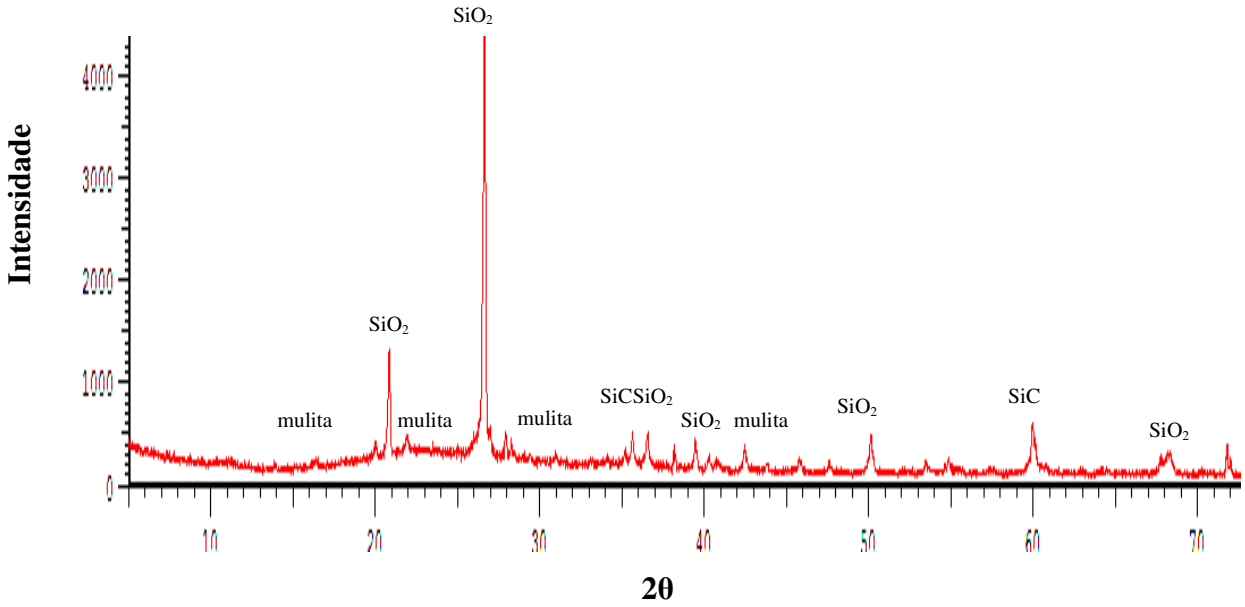


Figura 28 – DRX do RPP.

Na Tabela 13 encontra-se a análise por fluorescência de raios-X do RPP. A anáçise mostra o Si como elemento predominante, confirmando assim a formação do quartzo encontrado na difração de raios-X.

Tabela 13 – Fluorescência de raios-X do RPP.

Fase	Percentual
SiO_2	59,433%
Al_2O_3	18,989%
MgO	10,953%
K_2O	3,050%
ZrO_2	2,260%
CaO	1,911%
SO_3	1,553%
P_2O_5	1,010%
Outros	0,841%

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM AS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

5.2.1 Índice de consistência – trabalhabilidade

A Tabela 14 apresenta os resultados médios dos índices de consistência obtidos em todos os ensaios realizados com as argamassas A1 e A2. A Tabela 15 permite analisar a variação percentual desses índices para todos os traços formulados.

Tabela 14 – Resultados médios dos índices de consistência das argamassas.

Argamassa	Relação a/c	Índice de consistência (mm)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
A1/0/REF	1,87	258	4,89	1,89
A1/5/RPPC		235	4,05	1,72
A1/10/RPPC		247	4,55	1,84
A1/20/RPPC		240	5,88	2,45
A1/30/RPPC		236	0,95	0,40
A1/5/RPP		208	5,97	2,87
A1/10/RPP		221	4,39	1,98
A1/20/RPP		211	4,41	2,09
A1/30/RPP		211	2,78	1,32
A2/0/REF	1,45	261	5,57	2,13
A2/5/RPPC		259	4,05	1,56
A2/10/RPPC		248	6,05	2,44
A2/20/RPPC		257	8,74	3,40
A2/30/RPPC		244	7,95	3,26
A2/5/RPP		252	5,82	2,31
A2/10/RPP		241	4,55	1,89
A2/20/RPP		245	6,11	2,49
A2/30/RPP		243	1,65	0,68

Tabela 15 – Variação do índice de consistência entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência.

Argamassa	$f_{a/agl}$	$f_{a/res}$	$f_{cal/cim}$	Variação entre a consistência das argamassas com resíduos e argamassas de referência (%)
A1/5/RPPC	1,18	34,67	0,66	-8,91
A1/10/RPPC	1,22	17,29	0,70	-4,26
A1/20/RPPC	1,31	8,65	0,79	-6,98
A1/30/RPPC	1,41	5,77	0,90	-8,53
A2/5/RPPC	1,15	26,81	0,33	-0,77
A2/10/RPPC	1,19	13,40	0,35	-4,98
A2/20/RPPC	1,30	6,7	0,39	-1,53
A2/30/RPPC	1,43	4,47	0,45	-6,51
A1/5/RPP	1,18	39,25	0,66	-19,38
A1/10/RPP	1,22	19,56	0,70	-14,34
A1/20/RPP	1,31	9,78	0,79	-18,22
A1/30/RPP	1,41	6,52	0,90	-18,22
A2/5/RPP	1,15	30,32	0,33	-3,45
A2/10/RPP	1,19	15,14	0,35	-7,66
A2/20/RPP	1,30	7,57	0,39	-6,13
A2/30/RPP	1,43	5,05	0,45	-6,90

Neste ensaio constatou-se que ocorreu uma diminuição do índice de consistência das argamassas produzidas com resíduos, como conseqüência, um provável aumento na coesão, independentemente do traço.

Observou-se, ainda, que à medida que aumenta a relação cal/cimento, aumenta a necessidade de água para obtenção do índice de consistência padrão. Tal fato provavelmente está relacionado ao aumento da superfície específica da fração aglomerante das argamassas, pois a cal é mais fina que o cimento.

No caso das argamassas A1 e A2 dosadas com RPPC e A2 confeccionadas com RPP, a diminuição do índice de consistência foi abaixo de 9%. Já para as argamassas A1, formuladas com RPP, a diminuição do índice de consistência variou entre 14% e 20%. Neste caso, se pode dizer que o RPP provavelmente está contribuindo para uma melhor ligação entre o agregado e a pasta de aglomerante, atuando assim como um agente capaz de aumentar a coesão das argamassas. Tal aumento na coesão pode proporcionar ganhos relativos à qualidade e produtividade quando da elevação e revestimento de alvenarias, podendo ainda influenciar na redução de perdas das argamassas, reduzindo assim o desperdício e, conseqüentemente, a geração de resíduos.

Quando se compara os índices de consistência das argamassas com o mesmo traço em relação ao tipo de resíduo utilizado nas suas formulações, constata-se que as argamassas produzidas com RPPC (massa específica de 2,50 g/cm³) apresentaram diminuição do índice de consistência inferior àquelas produzidas com RPP (massa específica 2,25 g/cm³). Diante disso, provavelmente, quanto maior a massa específica do material menor será a necessidade de água para que o mesmo possa atingir o índice de consistência desejado. Além disso, foi visto na análise microscópica dos resíduos que o RPP apresenta a morfologia da partícula mais angular que a do RPPC, provocando assim uma diminuição mais acentuada da trabalhabilidade das argamassas. Ressalta-se ainda que, quando há substituição do cimento pelos resíduos ocorre uma diminuição na quantidade de aglomerante da mistura, visto que o cimento é mais fino que os resíduos.

Na Figura 29 pode-se constatar que existe uma correlação entre os índices de consistência e os percentuais e tipos de resíduos utilizados nas argamassas. Porém, a correlação ou dependência apresentada é no sentido probabilístico. As linhas de tendência

indicam que a presença dos resíduos na mistura pode ocasionar redução no índice de consistência das argamassas na medida em que haja o aumento do teor de resíduo.

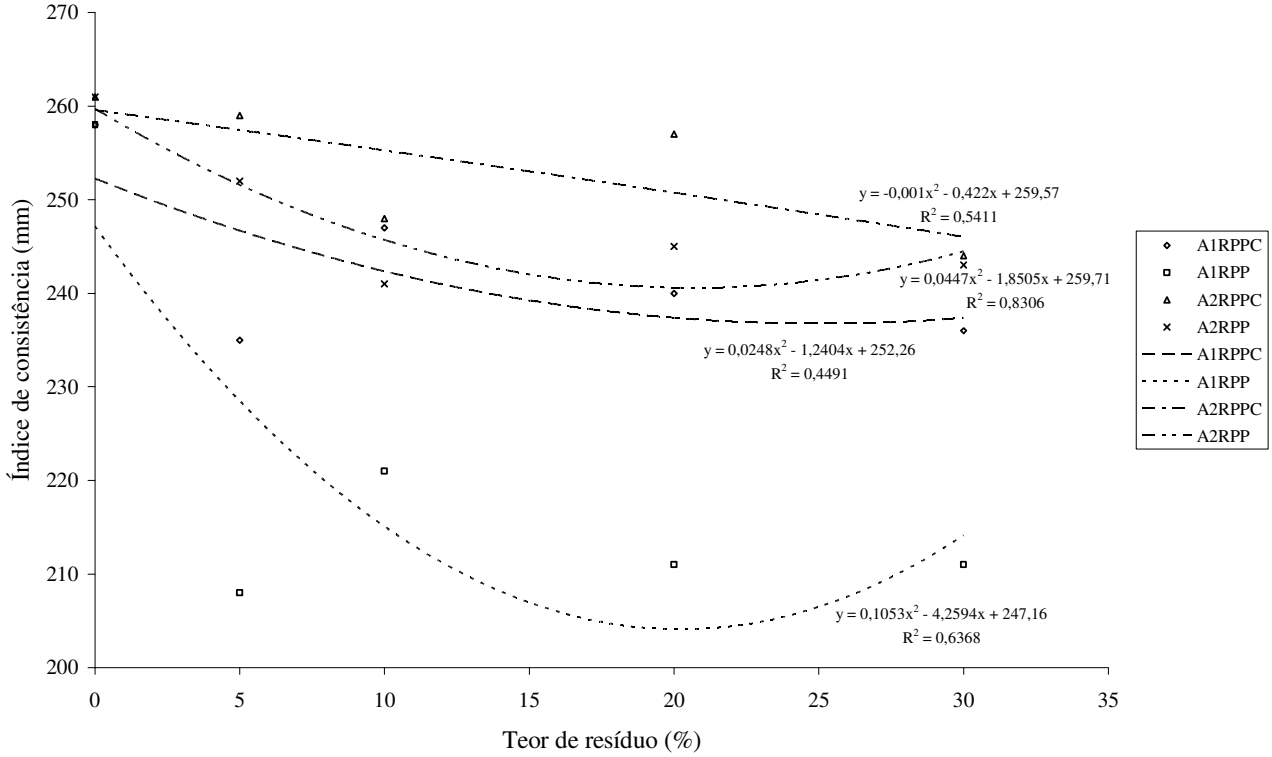


Figura 29 – Correlação dos teores de resíduos com o índice de consistência das argamassas.

5.1.2 Retenção de água

Na Tabela 16 encontram-se os resultados médios quando da realização do ensaio de retenção de água das argamassas produzidas. A Tabela 17 apresenta a variação percentual da retenção de água entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência.

Tabela16 – Resultados médios da retenção de água das argamassas.

Argamassa	Retenção (%)
A1/0/REF	94,33
A1/5/RPPC	98,25
A1/10/RPPC	95,49
A1/20/RPPC	97,41
A1/30/RPPC	99,02
A1/5/RPP	96,28
A1/10/RPP	93,95
A1/20/RPP	96,05
A1/30/RPP	96,60
A2/0/REF	90,85
A2/5/RPPC	92,29
A2/10/RPPC	92,61
A2/20/RPPC	93,30
A2/30/RPPC	92,66
A2/5/RPP	90,47
A2/10/RPP	92,59
A2/20/RPP	91,80
A2/30/RPP	96,27

Tabela 17 – Variação da retenção de água entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência.

Argamassa	Variação entre a retenção de água das argamassas com resíduos e argamassas de referência (%)
A1/5/RPPC	+4,16
A1/10/RPPC	+1,23
A1/20/RPPC	+3,27
A1/30/RPPC	+4,97
A1/5/RPP	+2,07
A1/10/RPP	-0,40
A1/20/RPP	+1,82
A1/30/RPP	+2,41
A2/5/RPPC	+1,59
A2/10/RPPC	+1,94
A2/20/RPPC	+2,70
A2/30/RPPC	+1,99
A2/5/RPP	-0,42
A2/10/RPP	+1,92
A2/20/RPP	+1,05
A2/30/RPP	+5,97

Os resultados obtidos mostram que não ocorreu alteração relevante, ou seja, aumento ou diminuição, da retenção de água das argamassas formuladas, independentemente do percentual ou tipo do resíduo utilizado na mistura. Diante disso, provavelmente, a utilização

dos resíduos na mistura das argamassas em substituição ao cimento não influencia essa propriedade.

Porém, ao se correlacionar os percentuais de resíduos presentes na mistura com a porcentagem de água retida (Figura 30) pode-se verificar que todas as argamassas produzidas com resíduos, tendem a aumentar a retenção de água à medida em há um aumento no teor de resíduo presente na composição das mesmas. Possivelmente, pode-se explicar o ocorrido pelo fato dos resíduos estarem substituindo o cimento. Logo a relação cal/cimento será maior na medida em que ocorre o aumento do percentual de resíduo presente na mistura visto que, a cal é mais fina que o cimento, conseqüentemente, tende a possuir uma maior retenção de água.

Ressalta-se que o traço A2 RPP a partir do teor 20% tende a diminuir a retenção de água. Conseqüentemente, teores maiores farão com que haja uma diminuição das resistências das argamassas, pois a hidratação do cimento e a carbonatação da cal serão prejudicadas em função da perda inadequada da água. Tal fato não pode ser explicado apenas devido ao traço A2 possuir uma relação cal/cimento inferior ao traço A1, mas também pelo RPP possuir uma massa específica menor que a do RPPC.

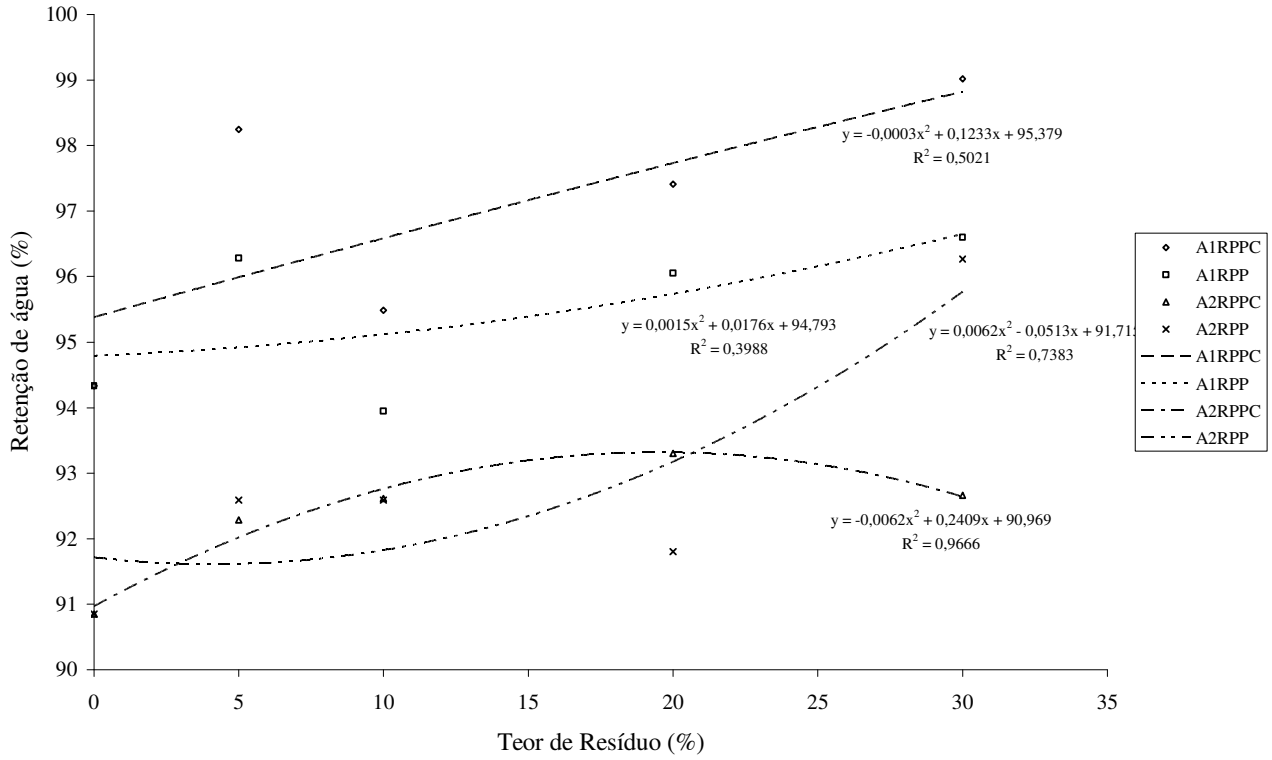


Figura 30 - Correlação do teor de resíduo com a retenção de água das argamassas.

No tocante à classificação das argamassas, a NBR 13281 (ABNT, 2005), cuja classificação encontra-se no Anexo C, prescreve que para as argamassas possuírem um bom desempenho e durabilidade as mesmas devem apresentar retenção de água adequada, conseqüentemente, devem estar classificadas nas faixas mais altas da tabela de classificação.

Na Tabela 18, os resultados mostram que as argamassas estudadas estão em conformidade com o estabelecido pela NBR 13281 (ABNT, 2005), visto que as mesmas foram classificadas nas faixas mais altas da tabela, conforme determinado pela norma, e que não há diferença relevante entre as argamassas formuladas com resíduo e as de referência.

Tabela 18 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13281.

Argamassa	Retenção (%)	Classificação
A1/0/REF	94,33	U5
A1/5/RPPC	98,25	U6
A1/10/RPPC	95,49	U5
A1/20/RPPC	97,41	U6
A1/30/RPPC	99,02	U6
A1/5/RPP	96,28	U6
A1/10/RPP	93,95	U5
A1/20/RPP	96,05	U6
A1/30/RPP	96,60	U6
A2/0/REF	90,85	U4
A2/5/RPPC	92,29	U5
A2/10/RPPC	92,61	U5
A2/20/RPPC	93,30	U5
A2/30/RPPC	92,66	U5
A2/5/RPP	90,47	U4
A2/10/RPP	92,59	U5
A2/20/RPP	91,80	U5
A2/30/RPP	96,27	U5

5.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados deste ensaio estão apresentados nas Tabelas 19 e 20 e Figuras 31 e 32. Primeiramente serão abordados e tratados os resultados referentes à densidade de massa, em seguida os de teor de ar incorporado.

5.1.3.1 Densidade de massa

As Tabelas 19 e 20 apresentam os resultados do ensaio de densidade de massa.

Tabela 19 – Resultados médios da densidade de massa das argamassas.

Argamassa	Densidade de massa (Kg/m³)
A1/0/REF	1545
A1/5/RPPC	1522
A1/10/RPPC	1510
A1/20/RPPC	1554
A1/30/RPPC	1538
A1/5/RPP	1546
A1/10/RPP	1546
A1/20/RPP	1565
A1/30/RPP	1531
A2/0/REF	1589
A2/5/RPPC	1575
A2/10/RPPC	1576
A2/20/RPPC	1575
A2/30/RPPC	1573
A2/5/RPP	1582
A2/10/RPP	1585
A2/20/RPP	1594
A2/30/RPP	1580

Tabela 20 – Variação da densidade de massa entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência.

Argamassa	Variação entre a densidade de massa das argamassas com resíduos e argamassas de referência (%)
A1/5/RPPC	-1,49
A1/10/RPPC	-2,27
A1/20/RPPC	0,58
A1/30/RPPC	-0,45
A2/5/RPPC	-0,88
A2/10/RPPC	-0,82
A2/20/RPPC	-0,88
A2/30/RPPC	-1,01
A1/5/RPP	+0,06
A1/10/RPP	0,00
A1/20/RPP	+1,29
A1/30/RPP	-0,91
A2/5/RPP	-0,44
A2/10/RPP	-0,25
A2/20/RPP	+0,31
A2/30/RPP	-0,57

A densidade corresponde ao estado de agregação das moléculas. Através dos resultados mostrados nas Tabelas 19 e 20, pode-se constatar que a presença dos resíduos na

produção das argamassas, independentemente do percentual ou tipo, provavelmente não altera a densidade de massa das argamassas no estado fresco.

Todavia, para as argamassas produzidas com RPPC, ao se correlacionar (Figura 31) o percentual de resíduo presente nas misturas com a densidade de massa, pode-se observar a tendência ao aumento da densidade. Tal fato, provavelmente se deve devido ao RPPC possuir uma massa específica maior, conseqüentemente, maior agregação das moléculas e empacotamento das partículas. Ressalta-se também o fato do RPPC apresentar a morfologia das suas partículas menos angulares que as do RPP. Conseguintemente, as argamassas produzidas com RPP apresentaram tendência à redução da sua densidade de massa quando da presença do resíduo nas misturas, independente do traço.

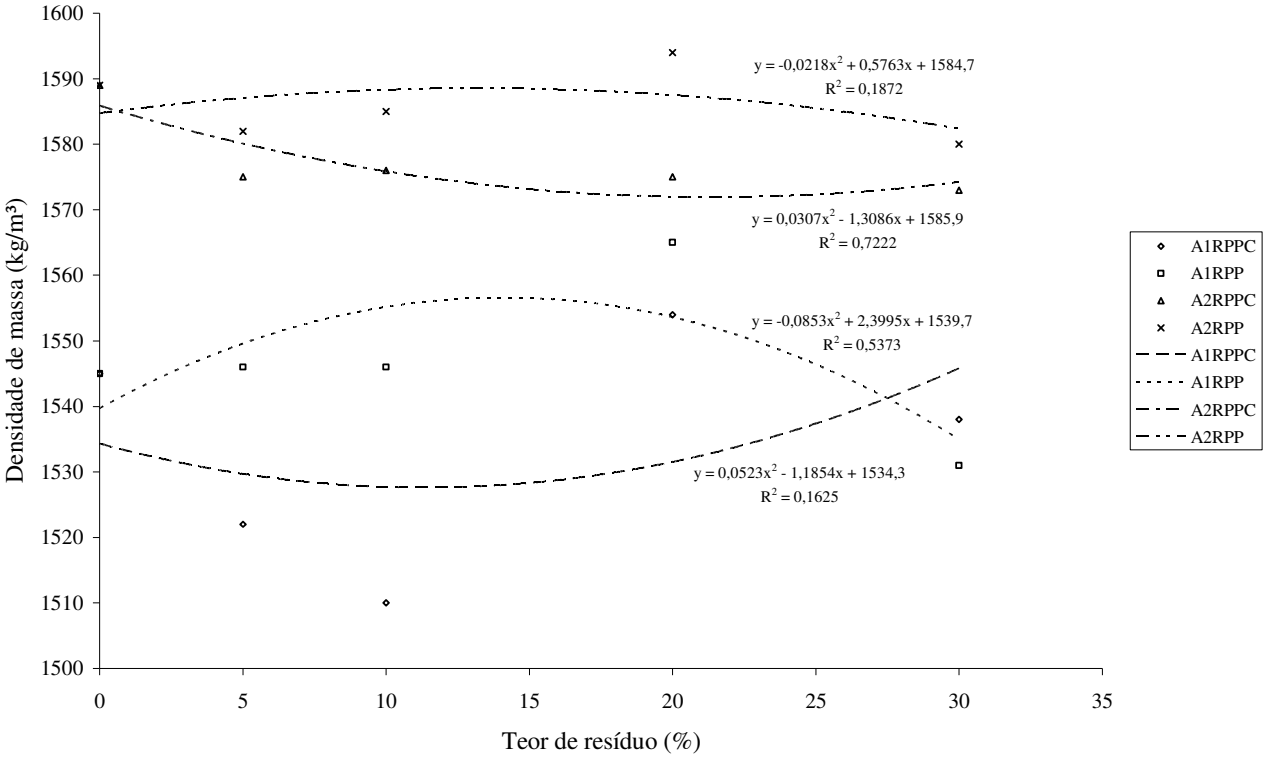


Figura 31 – Correlação do teor de resíduos com a densidade de massa no estado fresco das argamassas.

A classificação das argamassas estudadas segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), cuja classificação encontra-se no Anexo C, apresenta-se na Tabela 21. A referida norma recomenda que as argamassas apresentem sua densidade de massa nas faixas mais baixas da classificação para que não haja o comprometimento do seu desempenho e durabilidade. Para as argamassas formuladas, os resultados mostram que não há variação entre as argamassas

formuladas com resíduo e a de referência e que as argamassas estão na faixa central da tabela de classificação estabelecida pela norma.

Tabela 21 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13281.

Argamassa	Densidade de massa (Kg/m³)	Classificação
A1/0/REF	1545	D3
A1/5/RPPC	1522	D3
A1/10/RPPC	1510	D3
A1/20/RPPC	1554	D3
A1/30/RPPC	1538	D3
A1/5/RPP	1546	D3
A1/10/RPP	1546	D3
A1/20/RPP	1565	D3
A1/30/RPP	1531	D3
A2/0/REF	1589	D3
A2/5/RPPC	1575	D3
A2/10/RPPC	1576	D3
A2/20/RPPC	1575	D3
A2/30/RPPC	1573	D3
A2/5/RPP	1582	D3
A2/10/RPP	1585	D3
A2/20/RPP	1594	D3
A2/30/RPP	1580	D3

5.1.3.2 Teor de ar incorporado

A Tabela 22 apresenta os resultados do ensaio de teor de ar incorporado nas argamassas formuladas. Já na Tabela 23 encontra-se a variação percentual das entre as argamassas com resíduo e as argamassas de referência.

Tabela 22 – Resultados médios do teor de ar incorporado das argamassas.

Argamassa	Teor de ar incorporado (%)
A1/0/REF	41
A1/5/RPPC	42
A1/10/RPPC	42
A1/20/RPPC	40
A1/30/RPPC	41
A1/5/RPP	41
A1/10/RPP	41
A1/20/RPP	40
A1/30/RPP	41
A2/0/REF	40
A2/5/RPPC	40
A2/10/RPPC	40
A2/20/RPPC	40
A2/30/RPPC	40
A2/5/RPP	40
A2/10/RPP	40
A2/20/RPP	39
A2/30/RPP	40

Tabela 23 – Variação do teor de ar incorporado entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência.

Argamassa	Variação entre o teor de ar incorporado das argamassas com resíduos e argamassas de referência (%)
A1/5/RPPC	2,44
A1/10/RPPC	2,44
A1/20/RPPC	-2,44
A1/30/RPPC	0,00
A2/5/RPPC	0,00
A2/10/RPPC	0,00
A2/20/RPPC	0,00
A2/30/RPPC	0,00
A1/5/RPP	0,00
A1/10/RPP	0,00
A1/20/RPP	-2,44
A1/30/RPP	0,00
A2/5/RPP	0,00
A2/10/RPP	0,00
A2/20/RPP	-2,50
A2/30/RPP	0,00

Geralmente, o aumento do teor de ar incorporado acontece durante as operações de mistura dos materiais no preparo das argamassas e na moldagem dos corpos-de-prova para a realização de ensaios. Como ocorreu padronização nos procedimentos de preparo e

moldagem, muito provavelmente, a presença dos resíduos na mistura não altera esta propriedade.

Porém, quando da correlação (Figura 32) entre os traços estudados, foi possível verificar que há uma tendência ao aumento do teor de ar incorporado nas argamassas produzidas com RPP quando comparadas as produzidas com RPPC. Tal fato ocorre, possivelmente, devido ao RPP possuir uma massa específica menor que a do RPPC, causando assim, um maior aprisionamento de ar nas misturas.

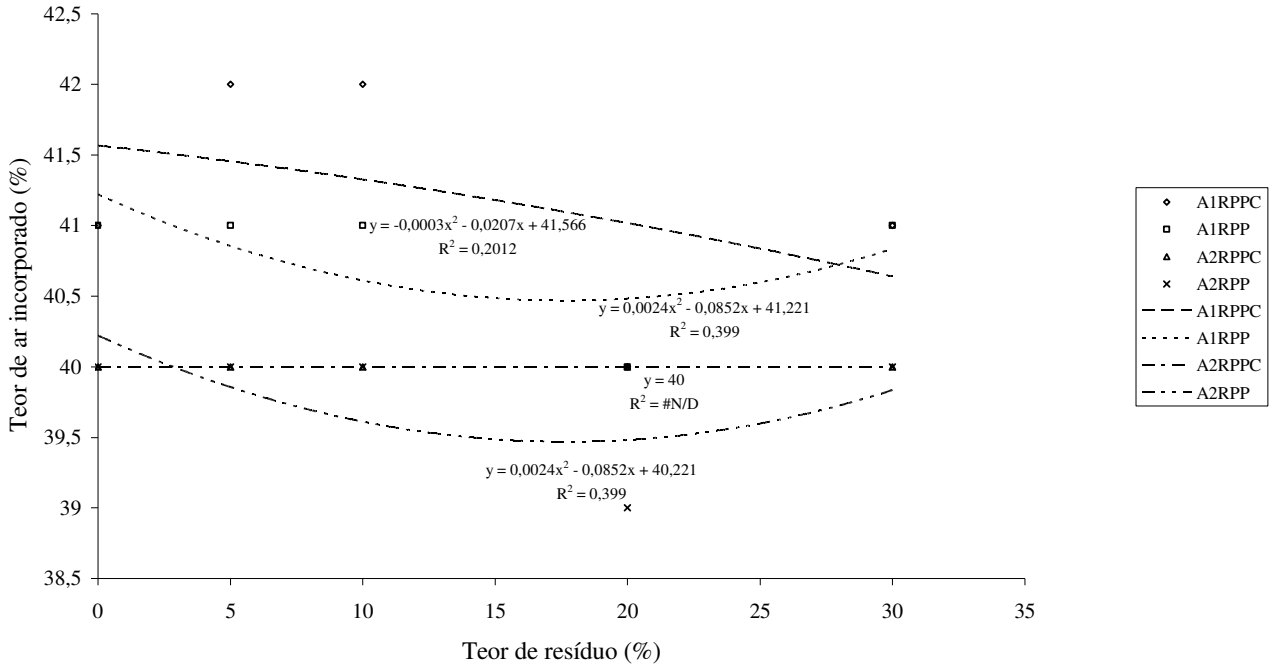


Figura 32 – Correlação do teor de resíduo com o teor de ar incorporado das argamassas.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM AS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

5.2.1 Densidade de massa aparente

Na Tabela 24 encontram-se os resultados médios dos ensaios de densidade de massa aparente realizados. Já na Tabela 25 apresentam-se a variação da densidade de massa aparente entre as argamassas com resíduos e as argamassas de referência.

Tabela 24 – Resultados médios da densidade de massa aparente das argamassas.

Argamassa	Densidade de massa aparente (kg/m³)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
A1/0/REF	1750	9,88	0,56
A1/5/RPPC	1771	6,01	0,34
A1/10/RPPC	1743	15,33	0,88
A1/20/RPPC	1694	1,37	0,08
A1/30/RPPC	1729	4,79	0,28
A1/5/RPP	1751	7,12	0,41
A1/10/RPP	1767	12,17	0,69
A1/20/RPP	1758	15,91	0,91
A1/30/RPP	1746	3,49	0,20
A2/0/REF	1806	10,92	0,60
A2/5/RPPC	1789	13,81	0,77
A2/10/RPPC	1766	8,54	0,48
A2/20/RPPC	1254	11,44	0,64
A2/30/RPPC	1730	4,08	0,24
A2/5/RPP	1741	3,67	0,21
A2/10/RPP	1749	2,58	0,15
A2/20/RPP	1733	10,51	0,61
A2/30/RPP	1720	20,21	1,17

Tabela 25 – Variação da densidade de massa aparente entre as argamassas com resíduo e argamassas de referência.

Argamassa	Variação entre a densidade de massa aparente das argamassas com resíduos e argamassas de referência (%)
A1/5/RPPC	+1,20
A1/10/RPPC	-0,40
A1/20/RPPC	-3,20
A1/30/RPPC	-1,20
A2/5/RPPC	-0,94
A2/10/RPPC	-2,21
A2/20/RPPC	-30,56*
A2/30/RPPC	-4,21
A1/5/RPP	+0,06
A1/10/RPP	+0,97
A1/20/RPP	+0,46
A1/30/RPP	-0,23
A2/5/RPP	-3,60
A2/10/RPP	-3,16
A2/20/RPP	-4,04
A2/30/RPP	-4,76

* O valor deverá ser desconsiderado. Neste caso, deve ter ocorrido alguma falha quando da execução do ensaio.

Constatou-se que a presença de resíduos na mistura causa uma variação abaixo de 5%, nessa propriedade.

Segundo Nakakura (2004), o valor da densidade de massa é um indicativo da compacidade resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto. Ela determina indiretamente o volume de vazios incorporados pelos aditivos e a quantidade de água perdida por evaporação. Sendo assim, a presença dos resíduos na mistura em substituição ao cimento provavelmente não compromete o bom desempenho das argamassas modificadas.

Porém, as correlações encontradas entre os traços estudados mostram que as argamassas produzidas com resíduos tendem a reduzir a sua densidade de massa na medida em que há um aumento do teor de resíduo na mistura (Figura 33). Possivelmente, a ocorrência de tal fato tenha se dado através da redução da massa específica da mistura quando da substituição do cimento pelos resíduos.

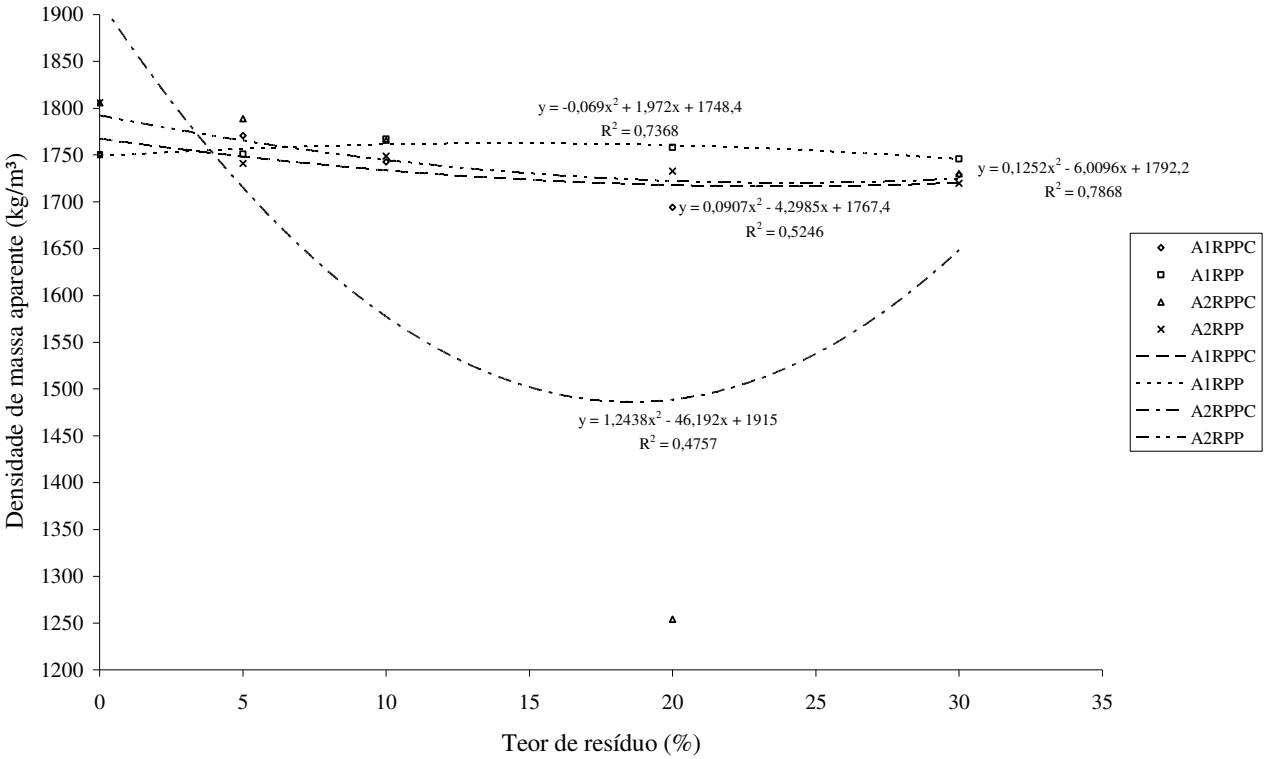


Figura 33 – Correlação do teor de resíduos com a densidade de massa aparente das argamassas.

Quanto à classificação, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), Anexo C, as argamassas devem possuir a sua densidade nas faixas mais baixas da tabela. Na Tabela 26 encontram-se os resultados das argamassas estudadas. Verifica-se que não há diferença de classificação entre as argamassas formuladas com resíduo e a de referência. Constata-se,

ainda, que as argamassas encontram-se na faixa alta da tabela de classificação. Diante disso, possivelmente, as mesmas podem ter seu desempenho e durabilidade comprometidos quando da sua aplicação.

Tabela 26 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Argamassa	Densidade de massa aparente (kg/m³)	Classificação
A1/0/REF	1750	M5
A1/5/RPPC	1771	M5
A1/10/RPPC	1743	M5
A1/20/RPPC	1694	M5
A1/30/RPPC	1729	M5
A1/5/RPP	1751	M5
A1/10/RPP	1767	M5
A1/20/RPP	1758	M5
A1/30/RPP	1746	M5
A2/0/REF	1806	M5
A2/5/RPPC	1789	M5
A2/10/RPPC	1766	M5
A2/20/RPPC	1254	M3
A2/30/RPPC	1730	M5
A2/5/RPP	1741	M5
A2/10/RPP	1749	M5
A2/20/RPP	1733	M5
A2/30/RPP	1720	M5

5.2.2 Módulo de elasticidade

Na Tabela 27 encontram-se os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade. A Tabela 28 mostra a variação do módulo de elasticidade entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência.

Tabela 27 – Resultados médios do módulo de elasticidade das argamassas.

Argamassa	Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
A1/0/REF	7000	0,23	0,00
A1/5/RPPC	6500	0,20	0,00
A1/10/RPPC	6500	0,35	0,01
A1/20/RPPC	3900	0,00	0,00
A1/30/RPPC	5800	0,20	0,00
A1/5/RPP	6900	0,30	0,00
A1/10/RPP	6100	0,31	0,01
A1/20/RPP	6000	0,76	0,01
A1/30/RPP	5200	0,35	0,01
A2/0/REF	10600	0,26	0,00
A2/5/RPPC	9700	0,21	0,00
A2/10/RPPC	8400	0,23	0,00
A2/20/RPPC	8100	0,15	0,00
A2/30/RPPC	5900	0,25	0,00
A2/5/RPP	8700	0,25	0,00
A2/10/RPP	9000	0,15	0,00
A2/20/RPP	8000	0,25	0,00
A2/30/RPP	6500	0,61	0,01

Tabela 28 - Variação do módulo de elasticidade entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência.

Argamassa	$f_{cal/cim}$	$f_{agr/agl}$	$f_{res/cim}$	t (µs)	Variação entre o módulo de elasticidade das argamassas com resíduos e argamassas de referência (%)
A1/5/RPPC	0,66	5,48	0,06	79,5	-7,14
A1/10/RPPC	0,70	5,66	0,12	79,0	-7,14
A1/20/RPPC	0,79	6,06	0,27	67,1	-44,29*
A1/30/RPPC	0,90	6,51	0,46	83,0	-17,14
A2/5/RPPC	0,33	5,14	0,06	65,3	-8,49
A2/10/RPPC	0,35	5,35	0,12	69,6	-20,75
A2/20/RPPC	0,39	5,83	0,27	71,3	-23,58
A2/30/RPPC	0,45	6,40	0,46	82,9	-44,34
A1/5/RPP	0,66	5,48	0,05	76,9	-1,43
A1/10/RPP	0,70	5,66	0,11	81,9	-12,86
A1/20/RPP	0,79	6,06	0,24	82,4	-14,29
A1/30/RPP	0,90	6,51	0,41	88,7	-25,71
A2/5/RPP	0,33	5,14	0,05	68,10	-17,92
A2/10/RPP	0,35	5,35	0,11	67,3	-15,09
A2/20/RPP	0,39	5,83	0,24	70,6	-24,53
A2/30/RPP	0,45	6,40	0,41	78,9	-38,68

* O valor deverá ser desconsiderado. Neste caso, deve ter ocorrido alguma falha quando da execução do ensaio.

Conforme já discutido no capítulo 3, o módulo de elasticidade é de fundamental importância para as argamassas de assentamento e revestimento de alvenarias. A relevância desta propriedade nas argamassas está diretamente relacionada à sua capacidade de deformação e a sua ligação com os fenômenos patológicos, como por exemplo, destacamento do revestimento.

Através dos resultados mostrados na Tabela 28, pode-se constatar que à medida que aumentam as relações cal/cimento, resíduo/cimento e agregado/aglomerante, diminui o módulo de elasticidade para as argamassas produzidas com RPPC e RPP quando comparadas às argamassas convencionais (produzidas sem resíduos).

Com a diminuição do teor de cimento ocasionado pelo aumento das relações cal/cimento, resíduo/cimento e agregado/aglomerante, provavelmente, diminuem a resistência à compressão, resistência à tração na flexão e a resistência de aderência à tração e, conseqüentemente, diminui o módulo de elasticidade.

O tempo de propagação da onda ultra-sônica é diretamente proporcional às relações cal/cimento, resíduo/cimento e agregado/aglomerante, conforme os resultados apresentados na Tabela 28. Com o aumento da compacidade do conjunto aglomerante e agregado, muito provavelmente ocasionado pelo aumento do teor de finos (cal e material pulverulento), aumenta a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e, conseqüentemente, diminui o tempo de propagação da onda, caracterizando assim o aumento do módulo de elasticidade.

As argamassas produzidas com o traço A1 apresentam maior módulo de elasticidade que as confeccionadas com o traço A2, ambas produzidas com RPPC. Tal situação pode ser explicada pelo fato da massa específica da mistura ser maior para traço A1. Possivelmente a mesma possui módulo de elasticidade maior. O mesmo ocorreu para os traços A1 e A2, produzidos com RPP.

Quando da correlação (Figura 34) entre os traços constatou-se que a diminuição do módulo de elasticidade é diretamente proporcional ao aumento do percentual de resíduo presente na mistura, independentemente do traço ou resíduo utilizado.

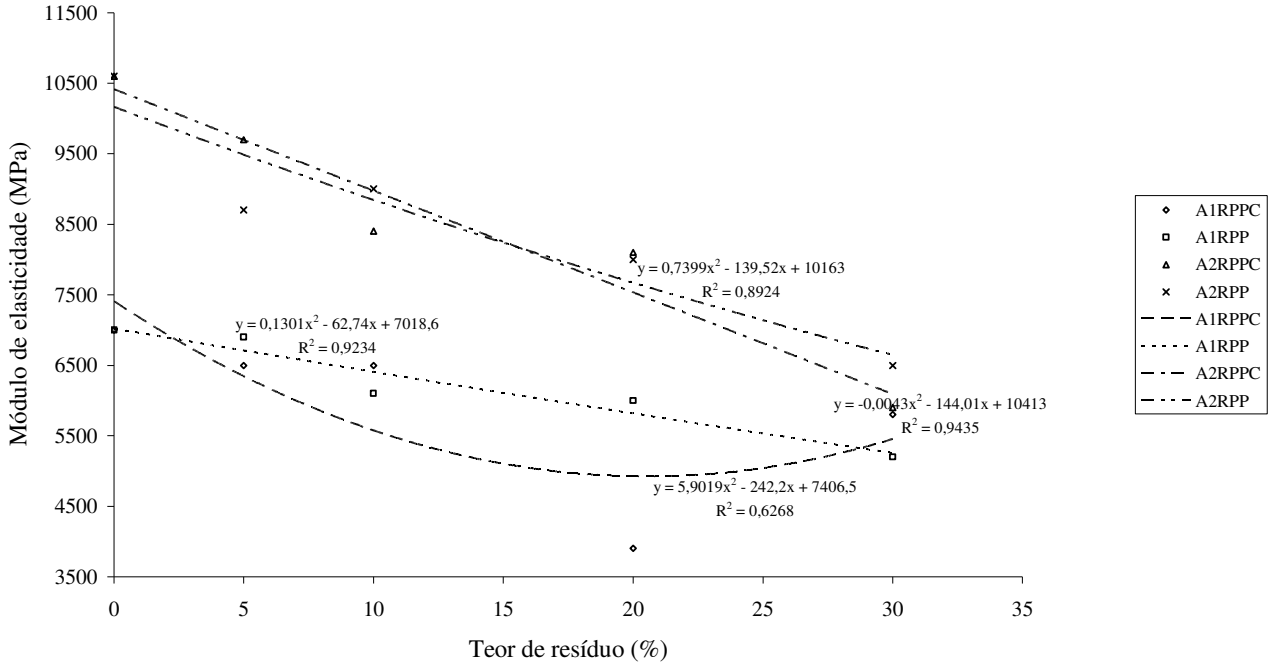


Figura 34 - Correlação do teor de resíduos com o módulo de elasticidade das argamassas.

5.2.3 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão

As médias dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão estão apresentados, respectivamente, na Tabela 29 e Tabela 30. Já os resultados da variação da resistência à tração na flexão e a resistência à compressão entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência são mostrados, respectivamente, na Tabela 31 e Tabela 32.

Tabela 29 – Resultados médios da resistência à tração na flexão das argamassas.

Argamassa	Resistência à tração na flexão (MPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
A1/0/REF	1,08	0,06	5,46
A1/5/RPPC	1,03	0,04	3,78
A1/10/RPPC	1,10	0,05	4,45
A1/20/RPPC	0,39	0,05	13,25
A1/30/RPPC	0,61	0,27	44,79
A1/5/RPP	1,02	0,12	11,30
A1/10/RPP	0,86	0,06	6,65
A1/20/RPP	0,71	0,03	4,65
A1/30/RPP	0,72	0,18	25,36
A2/0/REF	1,85	0,12	6,37
A2/5/RPPC	1,69	0,04	2,56
A2/10/RPPC	1,42	0,06	4,19
A2/20/RPPC	1,46	0,08	5,27
A2/30/RPPC	0,76	0,20	25,96
A2/5/RPP	1,75	0,15	8,77
A2/10/RPP	1,39	0,02	1,67
A2/20/RPP	1,38	0,13	9,16
A2/30/RPP	0,75	0,32	42,14

Tabela 30 – Variação da resistência à tração na flexão entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência.

Argamassa	$f_{cal/cim}$	$f_{agr/agl}$	$f_{res/cim}$	Variação entre a resistência à tração na flexão das argamassas com resíduos e argamassas de referência (%)
A1/5/RPPC	0,66	5,48	0,06	-4,63
A1/10/RPPC	0,70	5,66	0,12	+1,85
A1/20/RPPC	0,79	6,06	0,27	-63,89*
A1/30/RPPC	0,90	6,51	0,46	-43,52
A1/5/RPP	0,66	5,48	0,05	-5,56
A1/10/RPP	0,70	5,66	0,11	-20,37
A1/20/RPP	0,79	6,06	0,24	-34,26
A1/30/RPP	0,90	6,51	0,41	-33,33
A2/5/RPPC	0,33	5,14	0,06	-8,65
A2/10/RPPC	0,35	5,35	0,12	-23,24
A2/20/RPPC	0,39	5,83	0,27	-21,08
A2/30/RPPC	0,45	6,40	0,46	-58,92
A2/5/RPP	0,33	5,14	0,05	-5,41
A2/10/RPP	0,35	5,35	0,11	-24,56
A2/20/RPP	0,39	5,83	0,24	-25,41
A2/30/RPP	0,45	6,40	0,41	-59,46

* O valor deverá ser desconsiderado. Neste caso, deve ter ocorrido alguma falha quando da execução do ensaio.

Tabela 31 – Resultados médios da resistência à compressão das argamassas.

Argamassa	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
A1/0/REF	7,68	1,27	16,59
A1/5/RPPC	5,75	1,14	19,77
A1/10/RPPC	6,02	0,96	15,94
A1/20/RPPC	2,93	0,87	29,64
A1/30/RPPC	5,00	0,82	16,41
A1/5/RPP	6,26	1,61	25,76
A1/10/RPP	6,31	0,64	10,10
A1/20/RPP	5,66	1,04	18,34
A1/30/RPP	3,87	0,29	7,43
A2/0/REF	12,91	1,09	8,48
A2/5/RPPC	10,62	0,68	6,42
A2/10/RPPC	9,53	0,42	4,44
A2/20/RPPC	8,05	0,87	10,84
A2/30/RPPC	5,83	0,49	8,45
A2/5/RPP	10,19	0,42	4,16
A2/10/RPP	10,52	1,09	10,38
A2/20/RPP	9,62	1,41	14,70
A2/30/RPP	7,33	1,42	19,40

Tabela 32 – Variação da resistência à compressão entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência.

Argamassa	$f_{cal/cim}$	$f_{agr/agl}$	$f_{res/cim}$	Variação entre a resistência à compressão das argamassas com resíduos e argamassas de referência (%)
A1/5/RPPC	0,66	5,48	0,06	-25,13
A1/10/RPPC	0,70	5,66	0,12	-21,61
A1/20/RPPC	0,79	6,06	0,27	-61,85*
A1/30/RPPC	0,90	6,51	0,46	-34,90
A1/5/RPP	0,66	5,48	0,05	-18,49
A1/10/RPP	0,70	5,66	0,11	-17,84
A1/20/RPP	0,79	6,06	0,24	-26,30
A1/30/RPP	0,90	6,51	0,41	-49,61
A2/5/RPPC	0,33	5,14	0,06	-17,74
A2/10/RPPC	0,35	5,35	0,12	-26,18
A2/20/RPPC	0,39	5,83	0,27	-37,65
A2/30/RPPC	0,45	6,40	0,46	-54,84
A2/5/RPP	0,33	5,14	0,05	-21,07
A2/10/RPP	0,35	5,35	0,11	-18,51
A2/20/RPP	0,39	5,83	0,24	-25,48
A2/30/RPP	0,45	6,40	0,41	-43,22

* O valor deverá ser desconsiderado. Neste caso, deve ter ocorrido alguma falha quando da execução do ensaio.

Quando da análise dos resultados apresentados na Tabela 32, constata-se que à medida que aumentam as relações cal/cimento, resíduo/cimento e agregado/aglomerante, ocorre uma

relevante diminuição na resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas. Além disso, as argamassas estudadas apresentaram sua densidade de massa aparente no estado endurecido nas faixas mais altas da NBR 13281 (ABNT, 2005), contrariando a recomendação da mesma. Sendo assim, podem estar contribuindo negativamente no desempenho mecânico das argamassas formuladas, pois, segundo Silva et al (2007), a densidade de massa aparente no estado endurecido é uma importante propriedade que pode explicar o desempenho do revestimento quanto às propriedades mecânicas, influenciada, principalmente, pelo empacotamento das partículas dos agregados miúdos e, também, pelo empacotamento do conjunto agregado/aglomerante.

Nessa pesquisa ocorreu à substituição parcial do cimento por percentuais de resíduos, possivelmente, devido a isso, o desempenho da resistência à tração na flexão e à compressão foi reduzido em todas as argamassas produzidas com resíduo. Tanto na resistência à tração na flexão quanto na resistência à compressão, as argamassas produzidas com o traço A1 apresentaram um desempenho ainda mais desfavorável em relação às produzidas com o traço A2. Tal fato pode ter ocorrido devido ao traço A1 possuir uma relação cal/cimento 50% maior que a do traço A2. Diante disso, a substituição parcial do cimento pelos resíduos pode ter comprometido o desempenho das argamassas formuladas com esse traço.

Ressalta-se que as argamassas utilizadas para revestimento estão mais associadas à resistência à tração na flexão do que a resistência à compressão. Diante disso, a baixa resistência à tração na flexão não permite a argamassa suportar os esforços de tensões, podendo assim ocorrer a incidência de patologias, como o destacamento do revestimento.

Quando da análise das correlações (Figura 35 e Figura 36), pode-se verificar que o aumento no teor de resíduo quando da produção das argamassas tende a uma diminuição na resistência mecânica das mesmas.

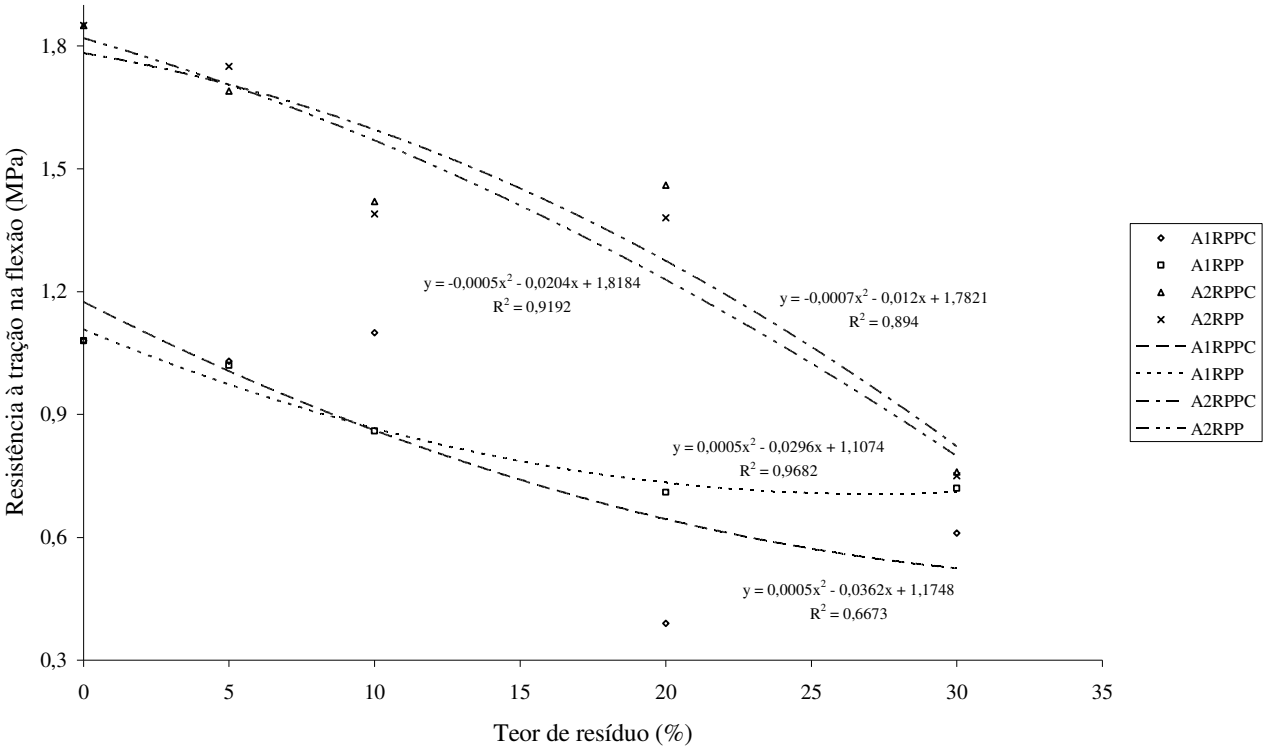


Figura 35 - Correlação do teor de resíduos com a resistência à tração na flexão das argamassas.

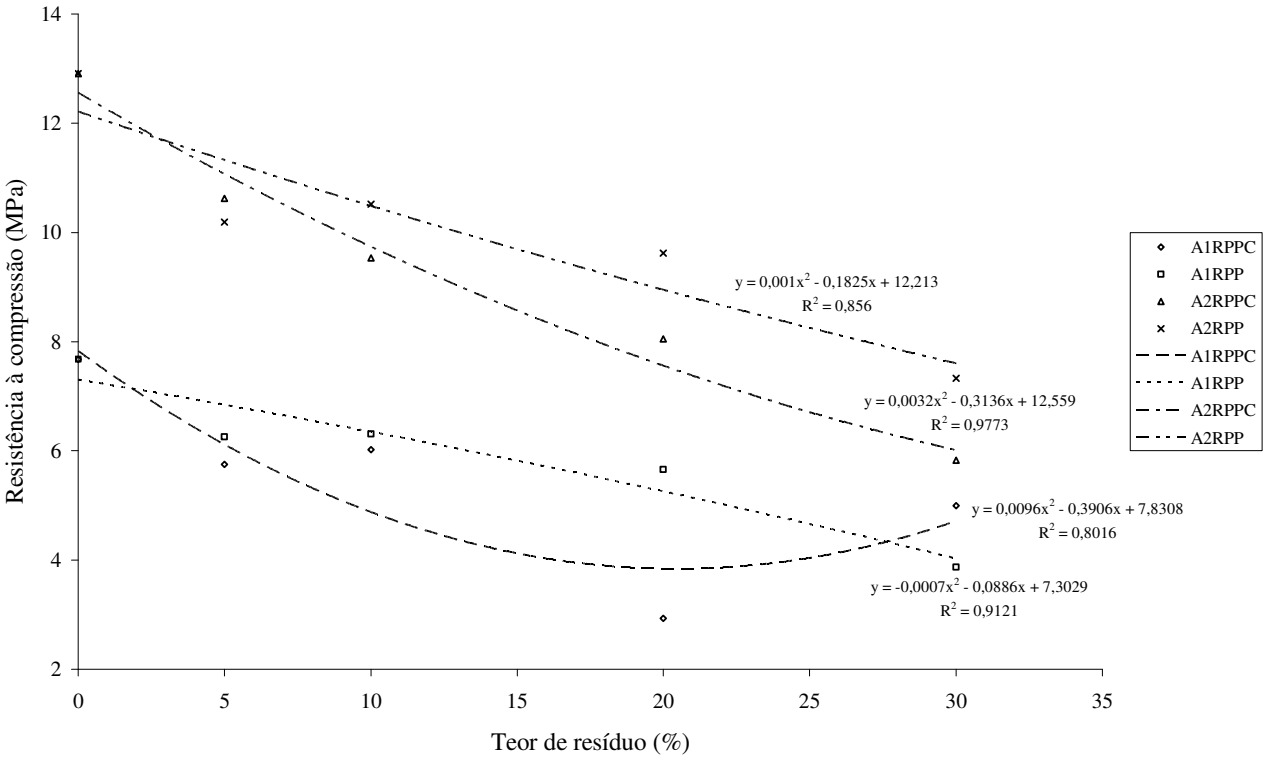


Figura 36 - Correlação do teor de resíduo com a resistência à compressão das argamassas.

A classificação das argamassas estudadas, conforme critérios estabelecidos pela NBR 13281 (ABNT, 2005), Anexo C, está apresentada na Tabela 33 e 34. A norma ressalta que argamassas com bom desempenho e durabilidade estão classificadas nas faixas mais altas da tabela, tanto em relação à resistência à tração na flexão como na resistência à compressão. Os resultados mostram claramente que em relação à resistência à tração na flexão as argamassas A1 estão classificadas na faixa mais baixa da tabela e as argamassas A2 nas faixas intermediárias.

Em relação à resistência à compressão, as argamassas A1 estão classificadas na faixa intermediária e a A2 na faixa mais alta. Tanto em relação à resistência à tração na flexão como na resistência à compressão ressalta-se que, entre as argamassas produzidas com o mesmo traço e tipo de resíduo não ocorreu diferença na classificação quando do aumento do percentual de resíduo presente na mistura.

Tabela 33 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Argamassa	Resistência à tração na flexão (MPa)	Classificação
A1/0/REF	1,08	R1
A1/5/RPPC	1,03	R1
A1/10/RPPC	1,10	R1
A1/20/RPPC	0,39	R1
A1/30/RPPC	0,61	R1
A1/5/RPP	1,02	R1
A1/10/RPP	0,86	R1
A1/20/RPP	0,71	R1
A1/30/RPP	0,72	R1
A2/0/REF	1,85	R3
A2/5/RPPC	1,69	R3
A2/10/RPPC	1,42	R2
A2/20/RPPC	1,46	R2
A2/30/RPPC	0,76	R1
A2/5/RPP	1,75	R3
A2/10/RPP	1,39	R2
A2/20/RPP	1,38	R2
A2/30/RPP	0,75	R1

Tabela 34 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Argamassa	Resistência à compressão (MPa)	Classificação
A1/0/REF	7,68	P5
A1/5/RPPC	5,75	P5
A1/10/RPPC	6,02	P5
A1/20/RPPC	2,93	P3
A1/30/RPPC	5,00	P4
A1/5/RPP	6,26	P5
A1/10/RPP	6,31	P4
A1/20/RPP	5,66	P4
A1/30/RPP	3,87	P3
A2/0/REF	12,91	P6
A2/5/RPPC	10,62	P6
A2/10/RPPC	9,53	P6
A2/20/RPPC	8,05	P6
A2/30/RPPC	5,83	P5
A2/5/RPP	10,19	P6
A2/10/RPP	10,52	P6
A2/20/RPP	9,62	P6
A2/30/RPP	7,33	P5

5.2.4 Absorção de água por capilaridade

As Tabelas 35 e 36 apresentam os resultados das argamassas estudadas em relação à absorção de água por capilaridade.

Tabela 35 – Resultados médios da absorção de água por capilaridade (t = 90 minutos) das argamassas.

Argamassa	Absorção de água por capilaridade – t = 90 minutos (g/cm²)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
A1/0/REF	1,46	0,06	4,28
A1/5/RPPC	1,70	0,01	0,59
A1/10/RPPC	1,62	0,05	3,05
A1/20/RPPC	1,85	0,05	2,78
A1/30/RPPC	2,08	0,04	2,10
A1/5/RPP	1,61	0,03	2,15
A1/10/RPP	1,52	0,03	2,28
A1/20/RPP	1,63	0,05	3,25
A1/30/RPP	1,20	0,04	3,33
A2/0/REF	0,66	0,23	34,85
A2/5/RPPC	1,17	0,02	1,77
A2/10/RPPC	0,99	0,19	19,16
A2/20/RPPC	1,38	0,18	13,30
A2/30/RPPC	1,58	0,13	8,52
A2/5/RPP	0,89	0,14	15,28
A2/10/RPP	0,93	0,04	3,79
A2/20/RPP	1,13	0,13	11,71
A2/30/RPP	1,29	0,02	1,18

Tabela 36 – Variação da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos entre as argamassas com resíduos e argamassas de referência.

Argamassa	Variação entre a absorção de água por capilaridade aos 90 minutos das argamassas com resíduos e argamassas de referência (%)
A1/5/RPPC	+16,44
A1/10/RPPC	+10,96
A1/20/RPPC	+26,71
A1/30/RPPC	+42,47
A1/5/RPP	+10,27
A1/10/RPP	+4,11
A1/20/RPP	+11,64
A1/30/RPP	+17,81*
A2/5/RPPC	+77,27
A2/10/RPPC	+50,00
A2/20/RPPC	+109,09
A2/30/RPPC	+139,39
A2/5/RPP	+34,85
A2/10/RPP	+40,91
A2/20/RPP	+71,21
A2/30/RPP	+95,45

* O valor deverá ser desconsiderado. Neste caso, deve ter ocorrido alguma falha quando da execução do ensaio.

Através da Tabela 36 pode-se constatar que ocorreu um aumento na absorção de água em todas as argamassas formuladas com resíduos. As argamassas que possuem RPPC presente em sua mistura apresentaram absorção ainda maior quando comparadas com as produzidas com RPP, independentemente do tipo do traço utilizado. Possivelmente, este fato está relacionado ao maior teor de finos presentes no RPPC, permitindo assim a formação de poros com diâmetros menores e, possivelmente, a ocorrência de uma maior conectividade entre eles. Ressalta-se que a altura da penetração da água é inversamente proporcional ao diâmetro dos capilares, ou seja, quanto menor o diâmetro dos capilares maior será a altura que a água atingirá no corpo-de-prova.

As correlações mostram (Figura 37) que há uma tendência das argamassas aumentarem a absorção de água por capilaridade quando do aumento do teor de resíduo presente nas misturas das mesmas.

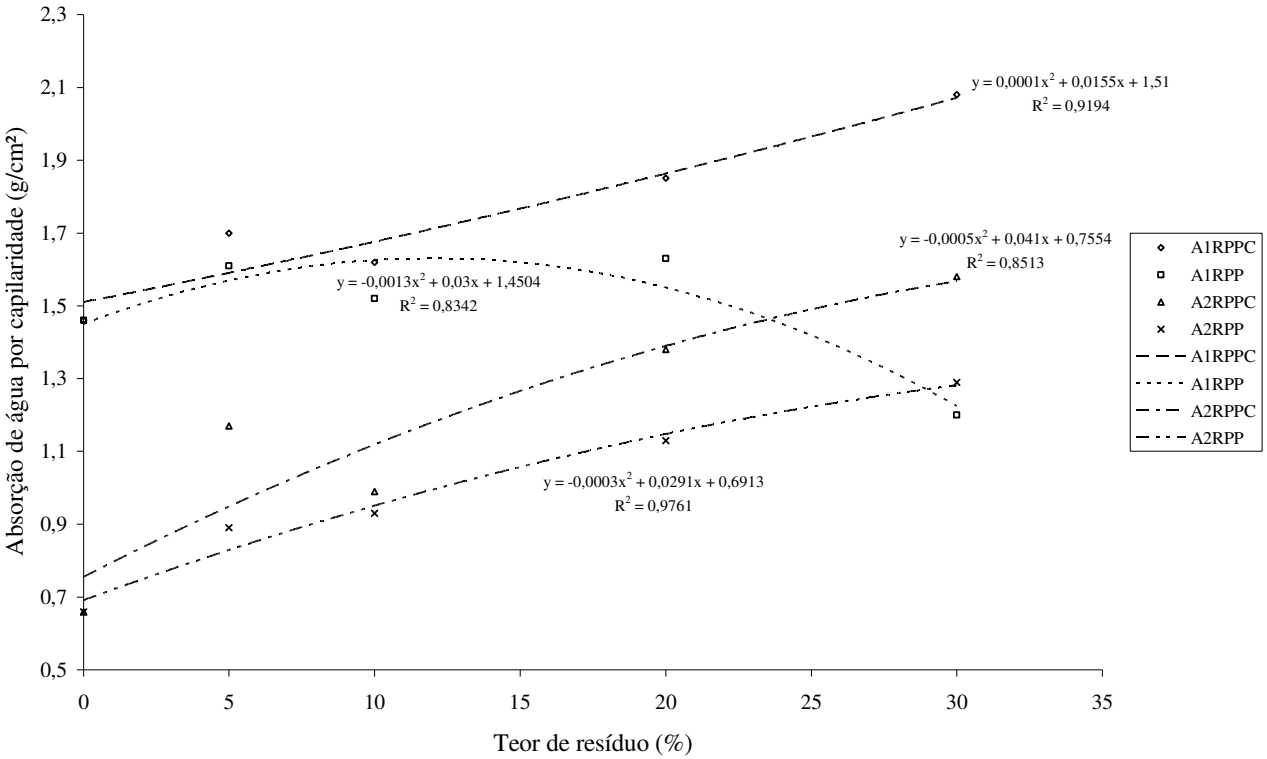


Figura 37 - Correlação do teor de resíduos com a absorção de água por capilaridade (t = 90 minutos) das argamassas.

5.2.6 Análise microestrutural

A Figura 38 ilustra o traço A1 de referência onde, pode-se observar a formação de cristais de etringita (1), vazios capilares (2) e silicatos de cálcio hidratado (3). Já a Figura 39 ilustra a análise espectroscópica realizada na área central da Figura 38.

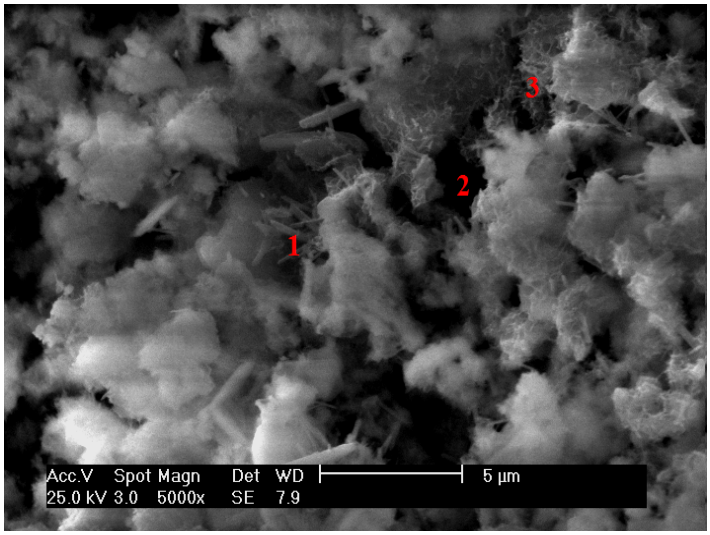


Figura 38 – Micrografia do traço A1 de referência.

A Figura 39 mostra como principais componentes da mistura o Ca, Si, Al e O. A predominância do Ca deve-se a presença da cal na argamassa. A reação do Ca com o Si é responsável pela formação do silicato de cálcio hidratado. Essa fase constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma matriz de cimento Portland completamente hidratada. Além disso, ela é a fase mais importante na determinação das propriedades da argamassa. A presença do Al contribuiu na formação da etringita. Ressalta-se que a etringita contêm pequenas quantidades de óxido de ferro, o qual pode substituir o óxido de alumínio na estrutura dos cristais.

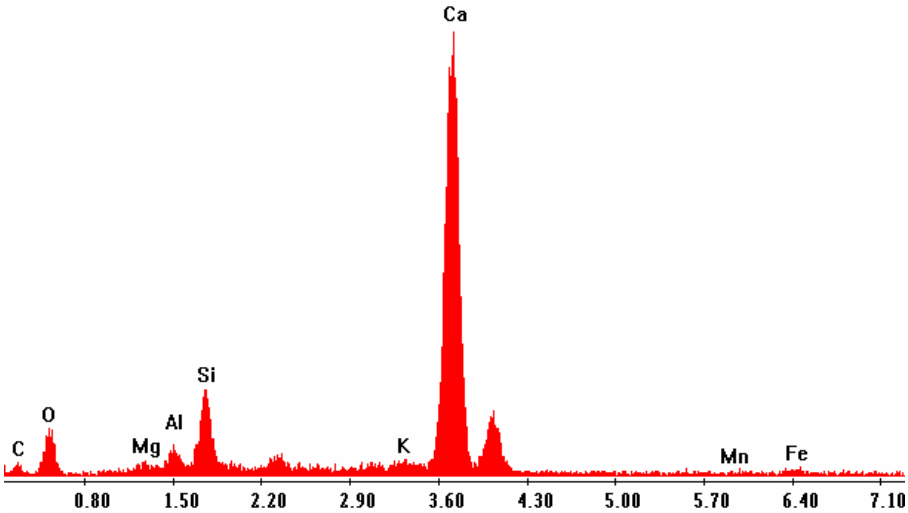


Figura 39 – Análise espectroscópica realizada no traço A1 de referência.

A Figura 40 ilustra o traço A1 produzido com 30% de RPPC. Pode-se verificar a presença de vazios capilares (1), formação de agulhas de etringita (2), hidróxido de cálcio (3) e silicatos de cálcio hidratado (4). A análise espectroscópica deste traço se encontra na Figura 41. A mesma foi realizada na área central da Figura 40.

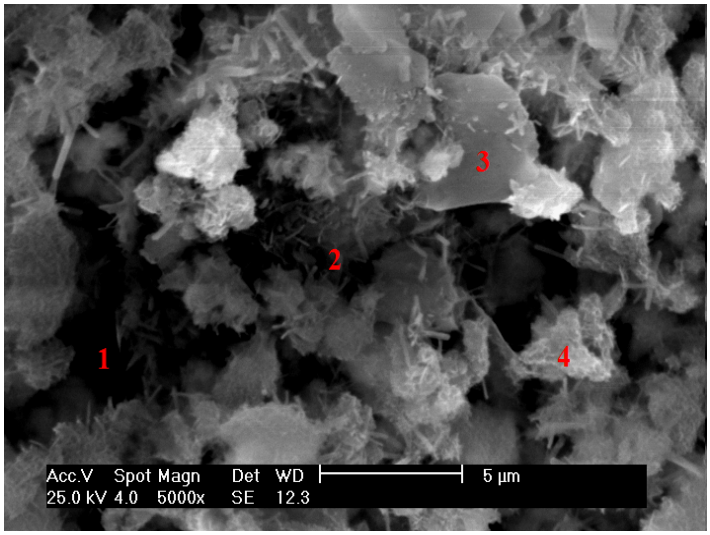


Figura 40 – Micrografia do traço A1 produzido com 30% de RPPC.

Na Figura 41 constata-se a predominância do Ca, decorrente da presença da cal na mistura. O Ca e Si são responsáveis pela formação do silicato de cálcio hidratado. O Al está contribuindo na formação da etringita. O Ca e O estão reagindo e contribuindo na formação do hidróxido de cálcio, essa fase constitui de 20 a 25% do volume de sólidos de uma matriz de cimento Portland.

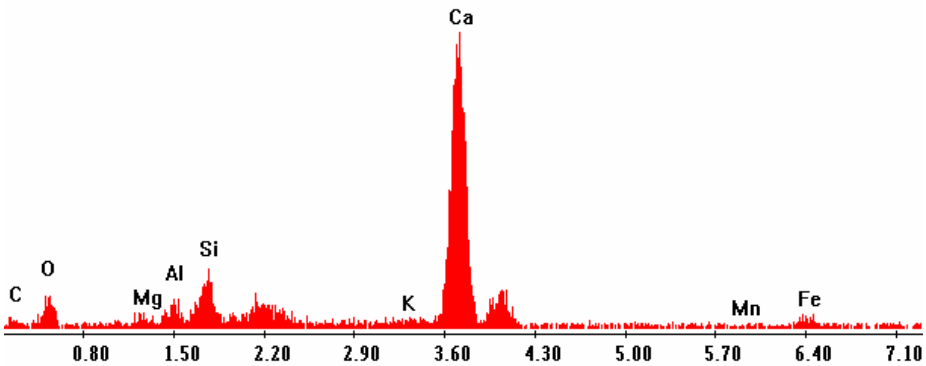


Figura 41– Análise espectroscópica do traço A1 produzido com 30% de RPPC.

A Figura 42 ilustra o traço A1 produzido com 30% de RPP. Ela ilustra claramente a presença de poros capilares (1) e silicatos de cálcio hidratados (2). Na Figura 43 encontra-se a análise espectroscópica realizada na área central da Figura 42.

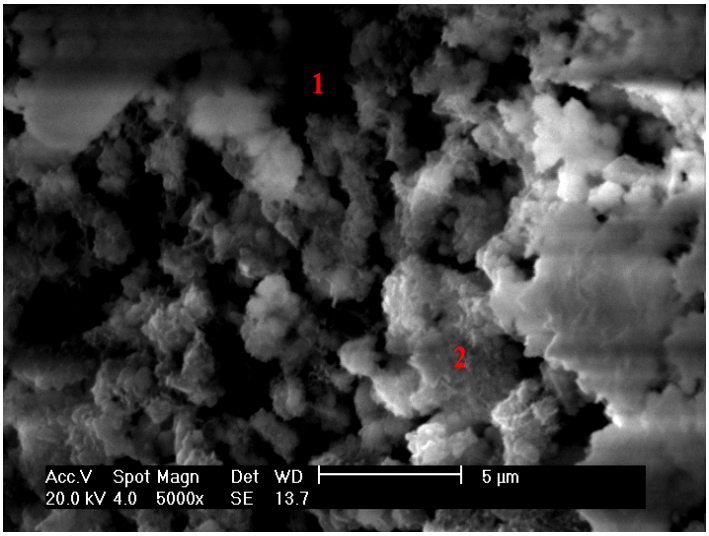


Figura 42 – Micrografia do traço A1 produzido com 30% de RPP.

Na Figura 43 a análise espectroscópica mostra a presença do Ca e Si, que ao reagirem confirmam a formação dos silicatos de cálcio hidratados encontrados na análise microestrutural (Figura 42).

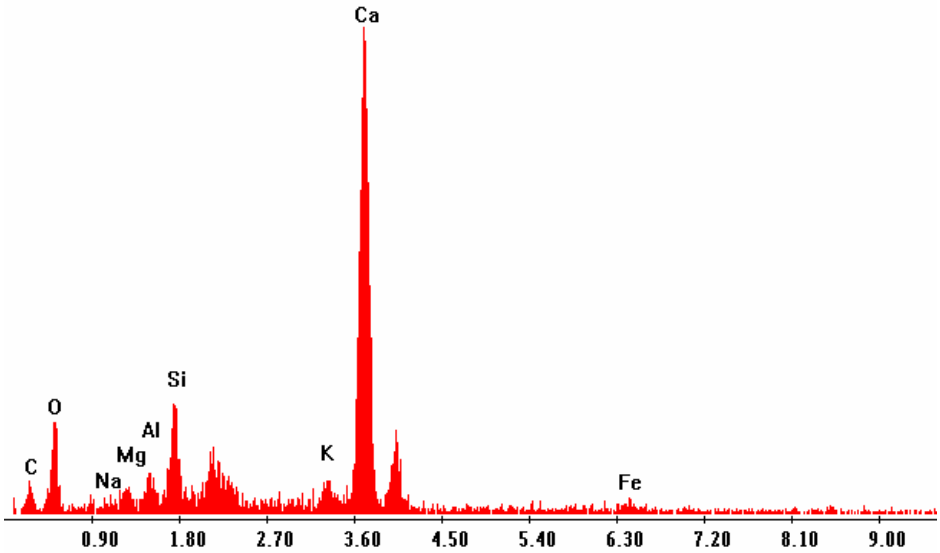


Figura 43 – Análise espectroscópica do traço A1 produzido com 30% de RPP.

Na Figura 44 pode-se observar grãos de cimento não hidratados (1), vazios capilares (2), silicatos de cálcio hidratado (3), hidróxido de cálcio (4) e formação de agulhas de etringita (5). A Figura 45 ilustra a análise espectroscópica do traço A2 de referência realizada na área central da Figura 44.

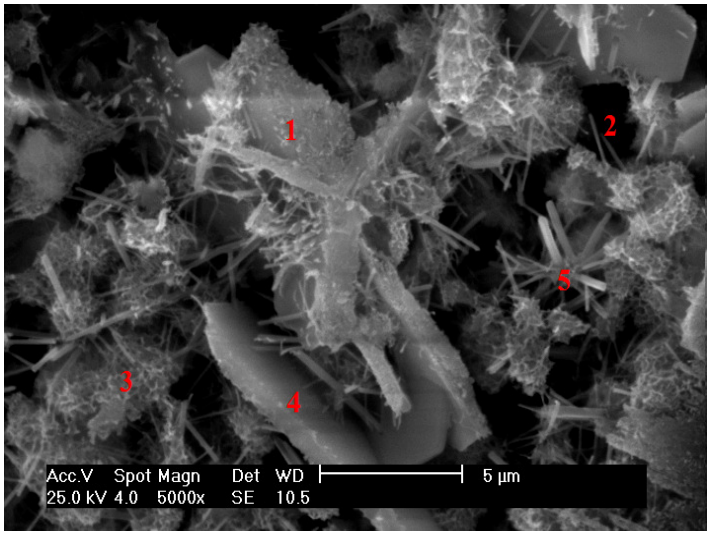


Figura 44 – Micrografia do traço A2 de referência.

A Figura 45 mostra a presença predominante de Ca, Si, Al e O na mistura. O Ca e Si são responsáveis pela formação do silicato de cálcio. O Ca e O contribuem na formação do hidróxido de cálcio e o Al na formação dos cristais de etringita.

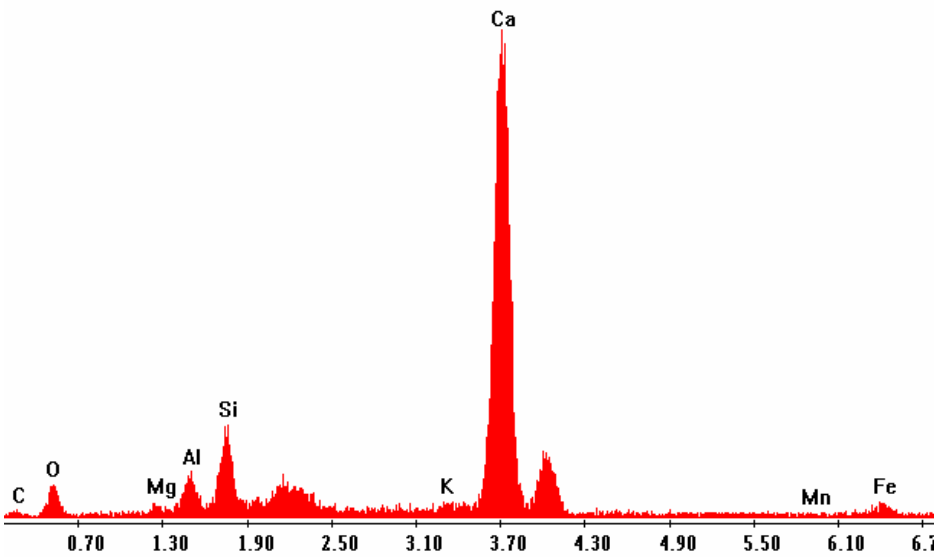


Figura 45 – Análise espectroscópica do traço A2 de referência.

A Figura 46 ilustra a micrografia realizada no traço A2 com 30% de RPPC. A análise mostra a formação de silicatos de cálcio hidratados (1), cristais de etringita (2), hidróxido de cálcio (3) e vazios capilares (4) e análise espectroscópica realizada na área central da referida figura encontra-se ilustrada na Figura 47.

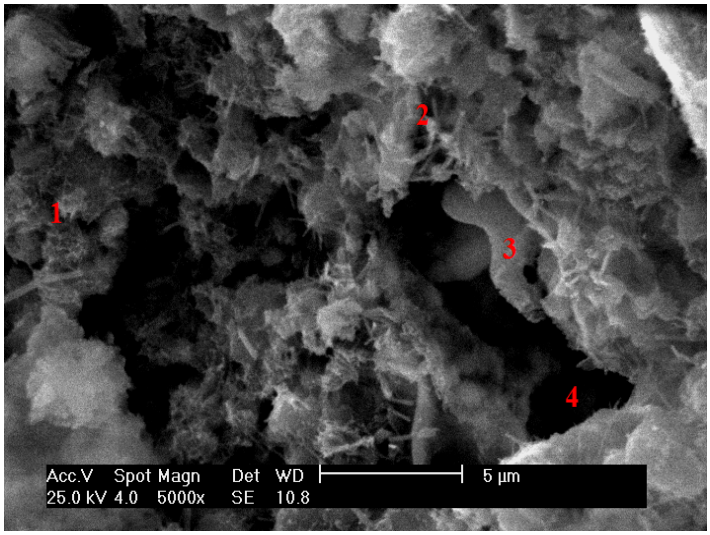


Figura 46 – Microscopia do traço A2 produzido com 30% de RPPC.

Na Figura 47 a análise espectroscópica mostra a presença predominante do Ca, Si, O, e Al. O Al está contribuindo na formação dos cristais de etringita. Ao reagirem o Ca e Si contribuem para a formação dos silicatos de cálcio hidratados. O Ca e O contribuem para a formação do hidróxido de cálcio.

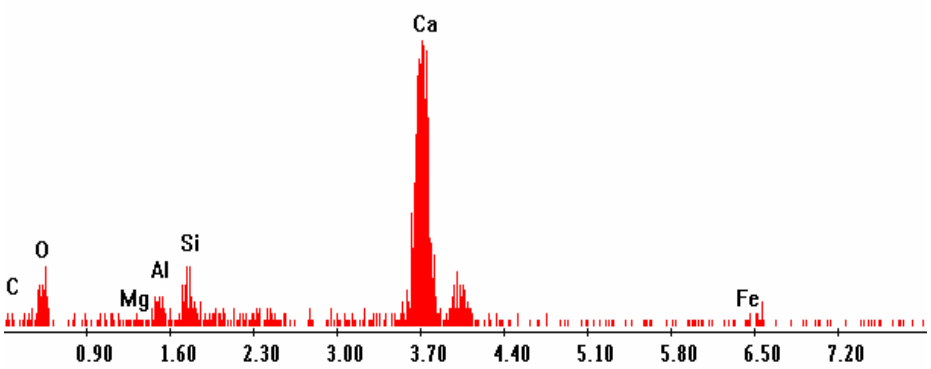


Figura 47 – Análise espectroscópica do traço A2 produzido com 30% de RPPC.

A Figura 48 ilustra a micrografia do traço A2 produzido com 30% de RPP. Observa-se a formação de silicatos de cálcio hidratados (1), vazios capilares (2), agulhas de etringita (3) e hidróxido de cálcio (4). A espectroscopia deste traço foi realizada na área central da Figura 48 e encontra-se ilustrada na Figura 49.

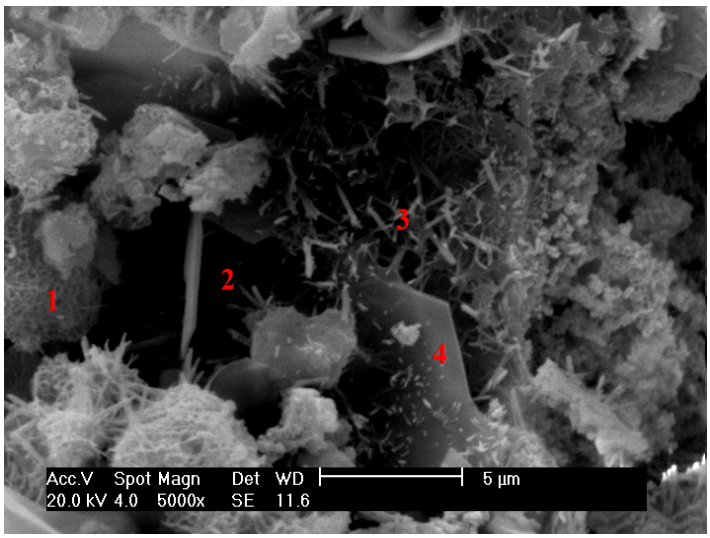


Figura 48 – Micrografia do traço A2 produzido com 30% de RPP.

Na análise espectroscópica (Figura 49), verifica-se como elementos predominantes o Ca, Si, O e Al. A formação de silicatos de cálcio hidratado deve-se a presença do Ca e Si. O Al está contribuindo na formação de etringita e a reação do Ca e O na formação de hidróxido de cálcio.

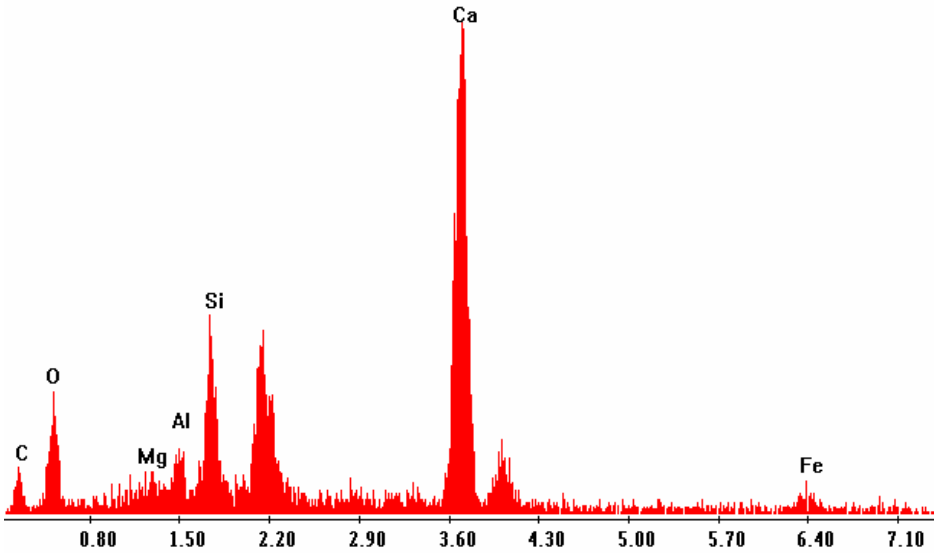


Figura 49 – Análise espectroscópica do traço A2 produzido com 30% de RPP.

Quando da análise microestrutural das argamassas constatou-se que, a substituição parcial do cimento por percentuais de resíduos, independente do tipo, influencia na microestrutura das argamassas. As argamassas produzidas com RPPC apresentaram microestrutura mais densa que as produzidas com RPP, independentemente do traço utilizado. Tal fato se deve ao RPPC possuir maior massa específica, e conseqüentemente, maior teor maior de material pulverulento que o RPP. A maior formação de cristais ocorreu nas argamassas produzidas com o traço A2, possivelmente por possuir uma relação cal/cimento inferior ao traço A1. Nas análises realizadas não foram identificadas partículas de RPPC e RPP. Possivelmente, as mesmas reagiram com a cal, sugerindo que os resíduos estudados apresentam atividade pozolânica. A análise por microscopia eletrônica de varredura mostrou uma maior formação de cristais nos traços A2, independente do tipo de resíduo utilizado.

A análise espectroscópica realizada em alguns pontos identificou os diferentes elementos constituintes das argamassas. Pode-se observar que não ocorreu diferença de constituintes entre as argamassas estudadas.

5.2.7 Análise por Difratometria de Raios-X e Fluorescência de Raios-X

A Figura 50 ilustra a análise por difratometria de raios-X para o traço A1 de referência. A análise mostra a predominância do quartzo, decorrente da presença da areia na

argamassa, além, do hidróxido de cálcio e da calcita, provenientes da presença da cal na mistura.

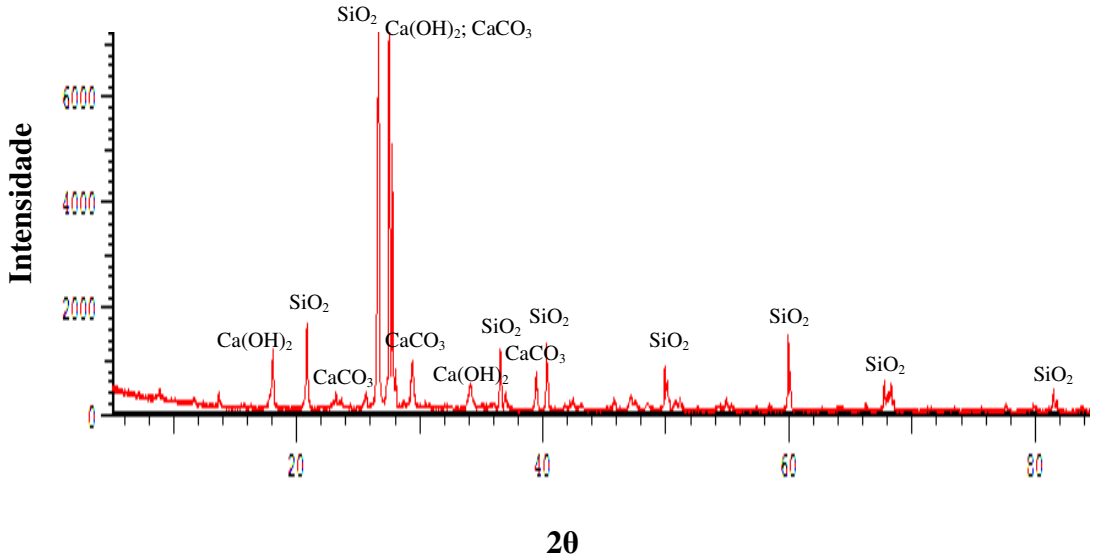


Figura 50 – DRX do traço A1 de referência.

Na Tabela 37 encontra-se o resultado da análise por fluorescência de raio-X do traço A1 de referência. A análise mostra o Ca e Si como os principais componentes do traço. O Ca contribui na formação de hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio e da calcita. O Si decorre da presença da areia na argamassa. A presença do Si deve-se a areia contida na mistura.

Tabela 37 – Fluorescência de raios-X do traço A1 de referência.

Fase	Percentual
SiO_2	43,311%
CaO	39,611%
Al_2O_3	8,944%
SO_3	3,581%
Fe_2O_3	2,057%
K_2O	1,856%
Outros	0,640%

A Figura 51 apresenta as principais fases formadas pelo traço A1 com 30% de RPPC. A análise por difratometria de raios-X mostra a formação de hidróxido de cálcio, calcita e quartzo.

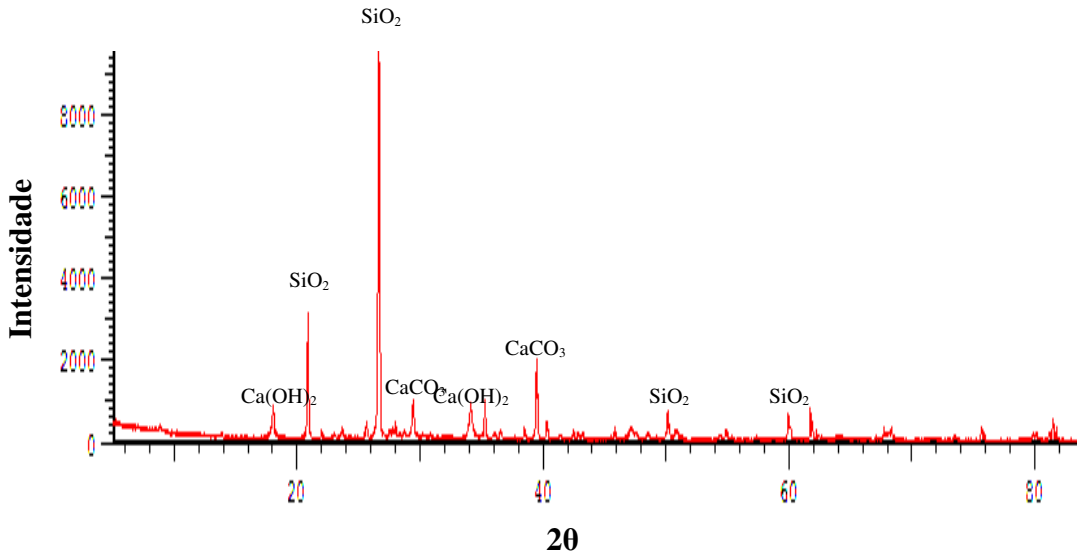


Figura 51 – DRX do traço A1 com 30% de RPPC.

Na Tabela 38 a análise por fluorescência de raios-X mostra que o Ca contribui na formação da fase de hidróxido de cálcio e calcita encontradas na análise por DRX (Figura 51). A presença do Si decorre da areia ser um dos componentes do traço.

Tabela 38 – Fluorescência de raios-X do traço A1 com 30% de RPPC.

Fase	Percentual
SiO_2	45,023%
CaO	38,978%
Al_2O_3	8,055%
SO_3	3,329%
Fe_2O_3	2,014%
K_2O	1,808%
Outros	0,793%

A Figura 52 ilustra a análise por difratometria de raios-x do traço A1 com 30% de RPP. A análise mostra a presença de quartzo, hidróxido de cálcio e calcita na argamassa.

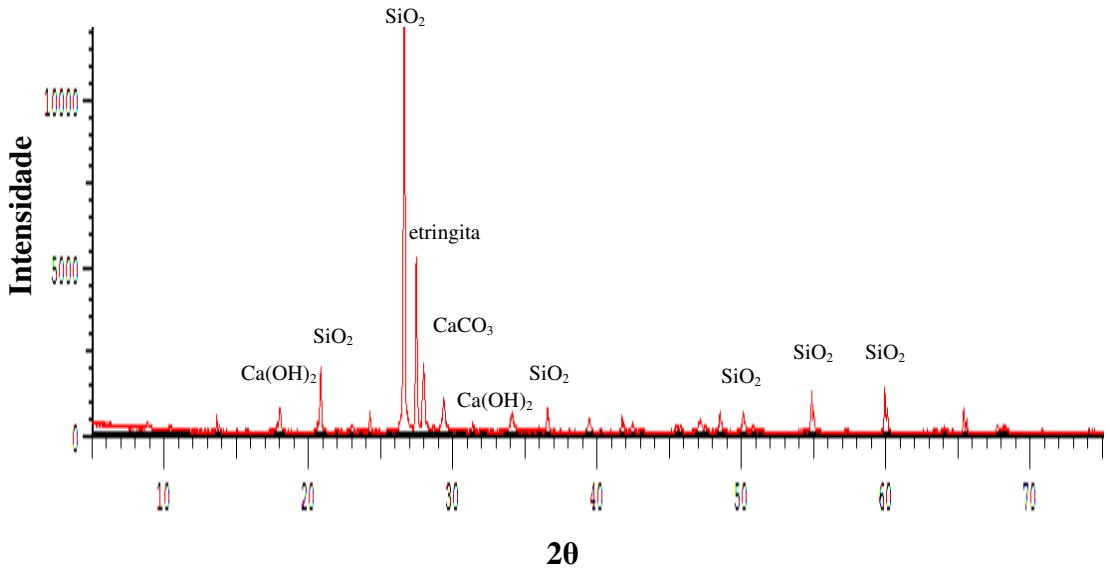


Figura 52 – DRX do traço A1 com 30% de RPP.

A Tabela 39 mostra o resultado da análise por fluorescência de raios-X do traço A1 com 30% de RPP. O Si decorre da presença da areia na argamassa. O Ca está contribuindo na formação de hidróxido de cálcio e de calcita, e em conjunto com o Al_2O_3 e Fe_2O_3 na formação dos cristais de etringita.

Tabela 39 – Fluorescência de raios-X do traço A1 com 30% de RPP.

Fase	Percentual
SiO_2	42,150%
CaO	41,017%
Al_2O_3	8,557%
SO_3	3,365%
Fe_2O_3	2,127%
K_2O	1,873%
Outros	0,911%

A análise por difratometria de raios-X do traço A2 de referência mostra como fases predominantes quartzo, etringita, hidróxido de cálcio e calcita.

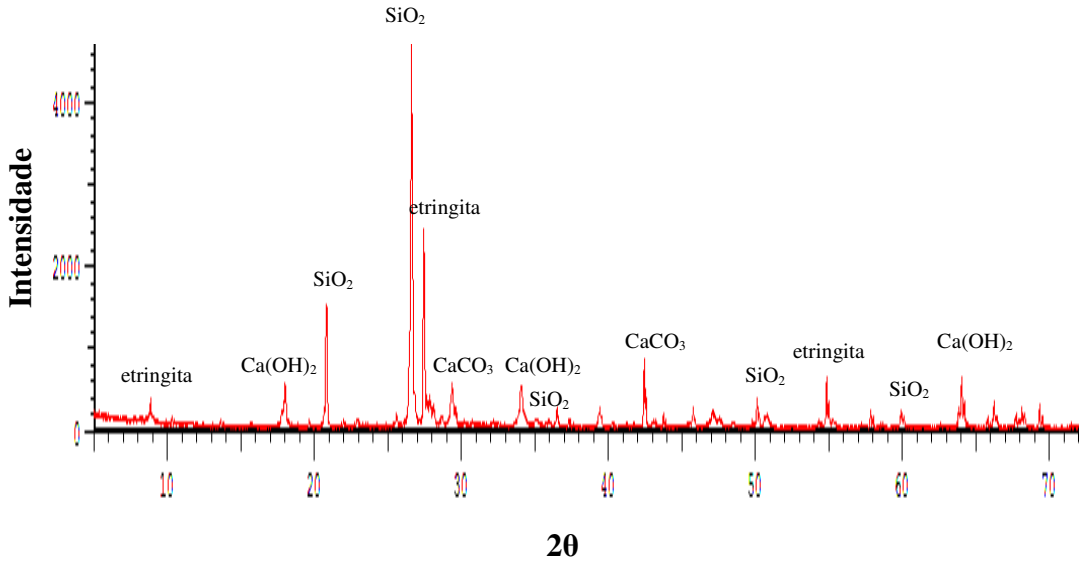


Figura 53 – DRX do traço A2 REF.

Na Tabela 40 encontra-se o resultado da análise por fluorescência de raios-X do traço A2 de referência. A análise mostra o Ca e Si como componentes predominantes. O Si é decorrente da presença da areia no traço. O Ca contribui na formação de hidróxido de cálcio e calcita, e em conjunto com o Al_2O_3 e Fe_2O_3 contribui na formação dos cristais de etringita.

Tabela 40 – Fluorescência de raios-X do traço A2 REF.

Fase	Percentual
CaO	42,102%
SiO_2	41,426%
Al_2O_3	7,893%
SO_3	3,960%
Fe_2O_3	2,315%
K_2O	1,467%
Outros	0,837%

A Figura 54 apresenta a análise por difratometria de raios-X do traço A2 com 30% de RPPC. A análise mostra o quartzo, etringita, calcita e hidróxido de cálcio.

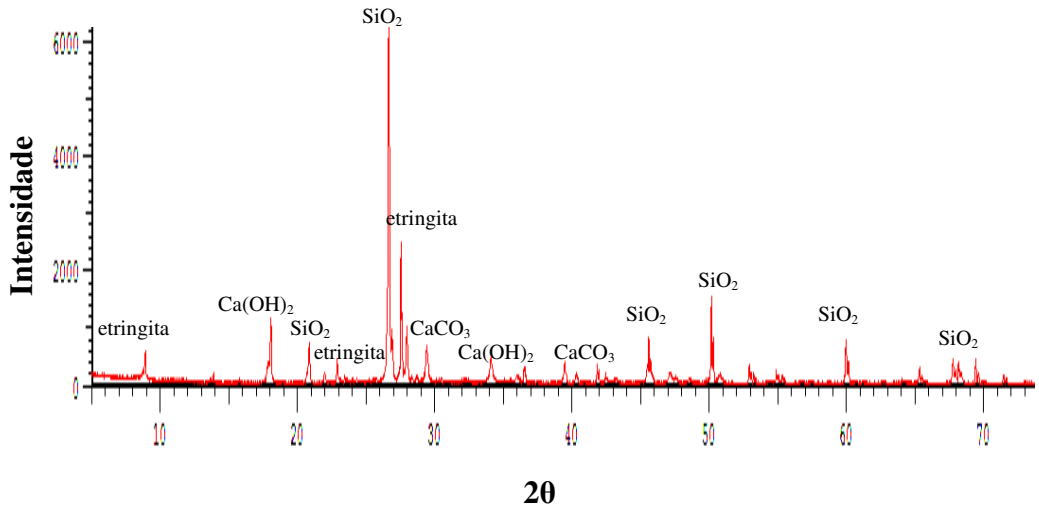


Figura 54 – DRX do traço A2 com 30% de RPPC.

Na Tabela 41 encontra-se o resultado da análise por fluorescência de raios-X do traço A2 com 30% de RPPC. O Si e Ca são os componentes predominantes da mistura. O Ca contribui na formação de hidróxido de cálcio e calcita, e em conjunto com o Al_2O_3 e Fe_2O_3 contribui na formação dos cristais de etringita. O Si deve-se ao fato da areia estar presente na argamassa.

Tabela 41 – Fluorescência de raios-X do traço A2 com 30% de RPPC.

Fase	Percentual
SiO_2	44,051%
CaO	38,934%
Al_2O_3	8,644%
SO_3	3,591%
Fe_2O_3	2,179%
K_2O	1,769%
Outros	0,832%

A Figura 55 mostra o resultado da análise por difratometria de raios-X do traço A2 com 30% de RPP. A análise mostra a predominância do quartzo, etringita, calcita e hidróxido de cálcio.

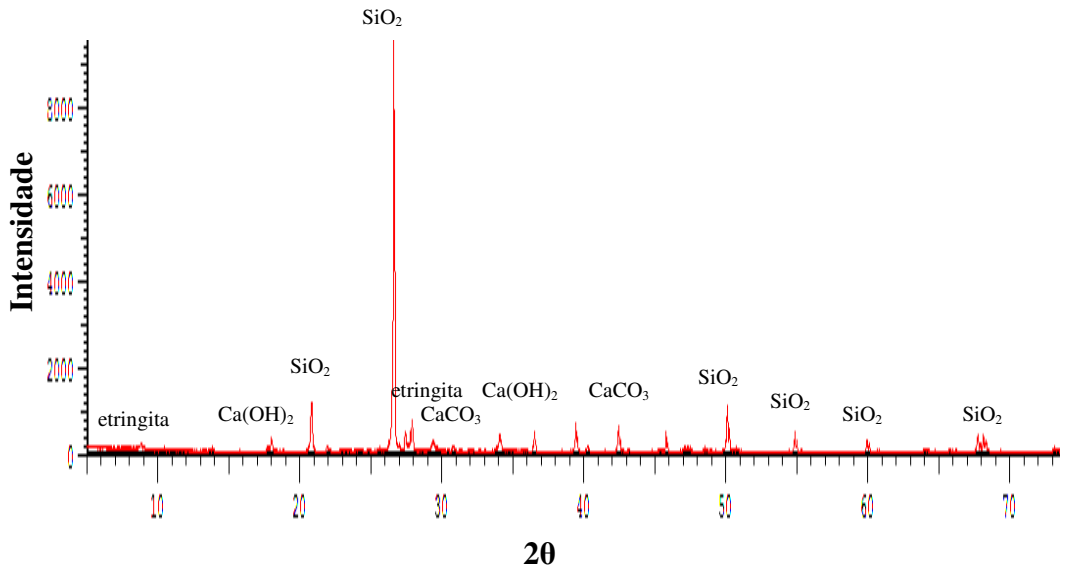


Figura 55 – DRX do traço A2 com 30% de RPP.

A Tabela 42 apresenta o resultado da análise por fluorescência de raios-X do traço A2 30% de RPP. A análise mostra que o Si e o Ca são os componentes predominantes do traço. O Ca contribui na formação de calcita e hidróxido de cálcio, e em conjunto com o Al_2O_3 e Fe_2O_3 contribui na formação de cristais de etringita. O Si decorre da presença da areia no traço.

Tabela 42 – Fluorescência de raios-X do traço A2 com 30% de RPP.

Fase	Percentual
SiO_2	49,833%
CaO	31,368%
Al_2O_3	9,904%
SO_3	3,236%
K_2O	1,901%
Fe_2O_3	1,821%
MgO	1,227%
Outros	0,710%

As análises por difratometria de raios-X e fluorescência de raios-X mostram que as fases formadas (quartzo, hidróxido de cálcio, etringita e calcita) quando da substituição parcial do cimento por resíduos nas argamassas formuladas são similares as fases formadas nas argamassas de referência. Sendo assim, provavelmente a presença dos resíduos na mistura não altera as fases das argamassas convencionais. Tais análises confirmam o os resultados encontrados nas micrografias e análises espectroscópicas.

CAPÍTULO 6
CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

O objetivo geral da pesquisa foi mostrar a viabilidade da substituição parcial do cimento por resíduos na mistura de argamassas mistas sem causar danos no desempenho das mesmas.

Neste capítulo encontram-se as principais conclusões obtidas no Programa Experimental desta pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros. Ressalta-se que os resultados obtidos devem ser confirmados através da realização de novas pesquisas, que apresentem resultados que possam complementar os obtidos nesse estudo.

Quanto às propriedades das argamassas no estado fresco, foi observado que:

A presença do resíduo na mistura quando da produção das argamassas diminui o índice de consistência das argamassas, consequentemente, as mesma têm sua coesão aumentada. Ressalta-se ainda que, as argamassas produzidas com RPPC tiveram sua consistência diminuída em no máximo 9%. Quando se compara os índices de consistência das argamassas com o mesmo traço em relação ao tipo de resíduo utilizado nas suas formulações, constata-se que as argamassas produzidas com RPPC apresentaram diminuição do índice de consistência inferior àquelas produzidas com RPP. Essa perda na consistência e ganho na coesão pode proporcionar ganhos relativos à qualidade e produtividade quando da utilização das argamassas. As correlações mostram que há uma tendência das argamassas em diminuir seu índice de consistência quando ocorre o aumento do percentual de resíduo presente na mistura.

Quanto à retenção de água a presença do resíduo praticamente não alterou essa propriedade, independentemente do tipo do resíduo e traço utilizado. Porém, ao se correlacionar os percentuais de resíduos presentes na mistura com a porcentagem de água retida pode-se verificar que todas as argamassas produzidas com resíduos, tendem a aumentar a retenção de água à medida em há um aumento no teor de resíduo presente na composição das mesmas. Quanto a classificação, os resultados mostram que as argamassas estudadas estão

em conformidade com o estabelecido pela NBR 13281 (ABNT, 2005), visto que as mesmas foram classificadas nas faixas mais altas da tabela, conforme determinado pela norma, e que não há diferença relevante entre as argamassas formuladas com resíduo e as de referência.

Através dos resultados encontrados na pesquisa, pode-se constatar que a presença de resíduo na mistura das argamassas não alterou a densidade de massa das mesmas, independentemente do tipo do resíduo e traço utilizado. Todavia, para as argamassas produzidas com RPPC, ao se correlacionar o percentual de resíduo presente nas misturas com a densidade de massa, pode-se observar a tendência ao aumento da densidade. No tocante a classificação, os resultados mostram que não há variação entre as argamassas formuladas com resíduo e a de referência e que as argamassas estão na faixa central da tabela de classificação estabelecida pela norma.

Em relação ao teor de ar incorporado os resultados mostram que esta propriedade não tem seu desempenho alterado quando da presença do resíduo nas misturas das argamassas. Porém, há uma tendência ao aumento do teor de ar incorporado nas argamassas produzidas com RPP quando comparadas as produzidas com RPPC.

Quanto às propriedades das argamassas no estado endurecido, se observou que:

A presença do resíduo na mistura, independentemente do teor não modificou a densidade de massa das argamassas formuladas. Porém, as correlações encontradas entre os traços estudados mostram que as argamassas produzidas com resíduos tendem a reduzir a sua densidade de massa na medida em que há um aumento do teor de resíduo na mistura. Quanto à classificação, verificou-se que não há diferença de classificação entre as argamassas formuladas com resíduo e a de referência. Todavia, as argamassas encontram-se na faixa alta da tabela de classificação. Diante disso, possivelmente, as mesmas podem ter seu desempenho e durabilidade comprometidos quando da sua aplicação.

Em relação ao módulo de elasticidade das argamassas os ensaios mostraram que quanto maior a relação resíduo/cimento menor será o módulo de elasticidade das mesmas visto que, as argamassas dosadas com resíduo apresentaram uma menor velocidade de propagação da onda ultra-sônica, consequentemente, um maior tempo de propagação da onda, ocorrendo assim à diminuição do módulo de elasticidade. As argamassas produzidas com

RPPC foram as que apresentaram menor módulo de elasticidade. As correlações indicam que há uma tendência pelas argamassas formuladas na diminuição do módulo de elasticidade quando do aumento do teor de resíduos na mistura das mesmas, independentemente do traço ou resíduo utilizado.

As argamassas produzidas com resíduos apresentaram desempenho comprometido nas propriedades de resistência à tração na flexão e resistência à compressão. As argamassas produzidas com o traço A1 apresentaram uma diminuição mais desfavorável que as produzidas com o traço A2. Em relação ao tipo de resíduo utilizado na mistura não se observou diferença relevante entre as produzidas com RPPC e RPP. As correlações indicam que quanto maior o teor de resíduo presente na mistura menor será o desempenho mecânico das argamassas. Quanto a classificação, os resultados mostram claramente que em relação à resistência à tração na flexão as argamassas A1 estão classificadas na faixa mais baixa da tabela e as argamassas A2 nas faixas intermediárias. Já em relação à resistência à compressão, as argamassas A1 estão classificadas na faixa intermediária e a A2 na faixa mais alta. Tanto em relação à resistência à tração na flexão como na resistência à compressão ressalta-se que, entre as argamassas produzidas com o mesmo traço e tipo de resíduo não ocorreu diferença na classificação quando do aumento do percentual de resíduo presente na mistura.

Os resultados mostraram que a propriedade de absorção de água por capilaridade também foi prejudicada quando da substituição do cimento pelo resíduo na formulação das argamassas. As argamassas produzidas com RPPC foram as que apresentaram maior absorção de água, independentemente do traço utilizado. As correlações indicam que a absorção de água por capilaridade é diretamente proporcional ao teor de resíduos.

Quanto à análise microestrutural não foi possível identificar partículas de RPPC e RPP. Provavelmente as mesmas reagiram com a cal, sugerindo que os resíduos apresentaram atividade pozolânica. As micrografias ilustraram que as argamassas produzidas com RPPC possuem uma microestrutura mais densa que as produzidas com RPP. As argamassas produzidas com o traço A2 apresentaram uma maior formação de cristais que as produzidas com A1. As análises espectroscópicas mostraram que não há diferença entre os constituintes das argamassas estudadas.

As análises por DRX e FRX mostram que as fases formadas nas argamassas formuladas com resíduos são similares as formadas nas argamassas de referência. Diante disso, possivelmente os resíduos não influenciam na formação das fases das argamassas.

6.2 CONTRIBUIÇÃO ORIGINAL PARA O CONHECIMENTO

Como contribuição original para o conhecimento se pode dizer que:

- As argamassas formuladas e estudadas nessa pesquisa possivelmente poderão ser aplicadas como argamassas de assentamento e revestimento, respectivamente, quando da execução das alvenarias das edificações.
- Os resíduos podem substituir o cimento em um percentual de até 30%, quando da formulação das argamassas.
- Não há necessidade de beneficiamento dos resíduos para utilizá-los nas argamassas.
- A presença dos resíduos nas misturas reduziu o módulo de elasticidade das argamassas em mais de 40%.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a abrangência do tema e visto que, numa única pesquisa é impossível esgotar todas as possibilidades de estudo sobre o comportamento de um material, principalmente quando se trata de um novo material, existem diversos trabalhos que podem ser desenvolvidos, no sentido de contribuir para o aumento do conhecimento sobre o assunto abordado. Diante disso, sugere-se:

- Avaliar os efeitos da retração da argamassa com resíduos no estado fresco e endurecido;
- Avaliar a resistência de aderência à tração das argamassas com resíduos;
- Avaliar a influencia de aditivos em substituição a cal nas propriedades das argamassas com resíduos;
- Pesquisar a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão, à resistência à compressão e à resistência de aderência à tração no controle de fissuração em revestimentos de argamassa com resíduos;

- Realizar um estudo de porosidade de argamassas produzidas com resíduos para baixas relações água/cimento;
- Estudar o efeito de diferentes tipos de cura nas propriedades e durabilidade das argamassas com resíduos;
- Realizar um estudo mais profundo sobre a caracterização do RPPC e RPP;
- Realizar um estudo do uso de RPPC ou RPP em conjunto com o agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição na produção de argamassas;
- Avaliar o índice de absorção das argamassas com resíduo;
- Analisar a microestrutura das argamassas formuladas com resíduos nas idades de 3, 7, 14 dias, a fim de verificar a evolução das reações dos resíduos.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 2000.

AMORIM, L. V.; PEREIRA, A. S. G.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C. **Reciclagem de rejeitos da construção civil para uso em argamassas de baixo custo. Revista Brasileira de engenharia agrícola ambiental**. Vol. 3. n. 2. 1999. p. 222-228. Disponível em: http://www.agriambi.com.br/revista/v3n2/222.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H. **Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos nas propriedades das argamassas e dos revestimentos**.In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais...CD-ROM. São Paulo: ANTAC/POLI-USP, 2003. p. 401-416.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. São Paulo, 2005. 167 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/caracterizacaoSA1.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 – **Cimento Portland – determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 – **Agregado para concreto**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217 – **Agregados – determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7251 – **Agregado em estado solto – determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776 – **Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do fraco de Chapman**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 – **Argamassa e concretos endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13277 – **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água**. Rio de Janeiro, 1995.

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13530 – **Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259 – **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. CB-18/PROJETO 18:400.04-008 – **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro, 2008.

BAÍA, L. L.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras. 1. ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000. 82 p.

BARBOSA, K. C. **Avaliação experimental do fenômeno de retração em alvenaria de blocos de concreto**. São Carlos, 2005. 233 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: http://www.bdtd.ufscar.br/tde_arquivos/7/TDE-2005-04-1/T06:34:38Z-592/Publico/DissKCB.pdf. Acesso em: 05 jul. 2008.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A. **Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas. Anais... CD ROM. Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 95-105.

BERNARDINI, A. M.; FELISBERTO, D. S.; DAROS, M. T.; RIELLA, H.G. **Reaproveitamento de resíduos de polimento e de esmaltação para obtenção de cerâmica celular**. Cerâmica Industrial. Revista. Vol. 11. n. 5. Set/Dez, 2006. São Paulo/SP. Disponível em: http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v11n05/v11n5a05.pdf. Acesso em: 07 jul. 2008.

BORTOLUZZO, C. W.; LIBORIO, J. B. L. **Determinação das tensões devido retração impedida em argamassas de revestimento**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. **Anais**... CD ROM. Vitória: UEFS/PPGEC, 1999. Vol. 1. p. 125-136.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS 5628: **Part 3: materials and components, desing and workmanship**. Londres, 1985.

BRIZOLA, R. M. **Microestrutura do cobrimento de concretos com altos teores de escória e cinza volante ativadas por cimento Portland e cal hidratada**. Santa Maria, 2007. 178 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: http://coralx.ufsm.br/gepecon/Brizola.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

BUDINSKI, K. G. **Engineering materials: porperties and selection**. 5. ed. New Jersey: Prentice Hall Internacional, 1996. 653 p.

CALHAU, E. L. **Argamassas de revestimento com aditivo incorporador de ar - propriedades e recomendações**. Vitória, 2000. 144 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo.

CALLISTER, JR, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais**. Rio de Janeiro: LCT, 2002. 589 p.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. **Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento**. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. Salvador, 1997. p. 64-75.

CAPELLO, G. **Cimento ecológico – produto tem nível de CO_2 reduzido em sua fórmula, causando menos impactos no meio ambiente**. Disponível em: http://planetasustentavel.abril.uol.com.br/inc/pop_print.html. Acesso em: 20 jun. 2008.

CARASEK, H. **Fatores que exercem influência na resistência de aderência das argamassas**. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas. Anais... CD ROM. Salvador: CEPED/EPUFBA/UCSAL/UEFS, 1997. p. 131-146.

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

CARVALHO Jr., A. N.; BRANDÃO, P. R. G.; FREITAS, J. M. C. **Relação entre a resistência de aderência de revestimento de argamassa e o perfil de penetração de pasta de aglomerante nos poros do bloco cerâmico**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas. Anais... CD ROM. Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 518-529.

CAVANI, G. R.; ANTUNES, R. P. N.; JOHN, V. M. **Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade das argamassas mistas**. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas. Anais... CD ROM. Salvador: ANTAC, 1997. p. 110-119.

CIMENTO.ORG. **Mercado cimenteiro em março de 2008**. Disponível em: http://www.cimento.org/principal.htm. Acesso em: 20 jun. 2008.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. Boletim 68 IPT. São Paulo, 1995. 118 p.

COIMBRA, M. A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M. R. **Utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão em argamassas e concretos de cimento Portland**. Revista Cerâmica. Vol. 50. n. 316. p. 300-307. 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/ce/v50n316/a0450316.pdf. Acesso em: 29 jun. 2008.

CRUZ, A. A. de F. **Estudo sobre a utilização do resíduo da queima da biomassa em argamassas**. Joinville, 2002. 99 p. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais Universidade do Estado de Santa Catarina. Disponível em: http://www.tede.udesc.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo.340. Acesso em: 27 jun. 2008.

D'AGOSTINO, L. Z.; SOARES, L. **Preparo de argamassas com emprego de finos de pedreira**. In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas aplicações. Anais... São Paulo: IBRACON/CT-206, 2001. p. 375-386.

D'AGOSTINO, L. Z.; SOARES, L. **O uso de finos de pedreira de rocha granítico-gnáissica em substituição às areias naturais na elaboração de argamassa**. Revista geociências. Vol. 22. n. 1. p. 65-73. São Paulo, 2003. Universidade Estadual de São Paulo. Disponível em: http://petro.rc.unesp.br/revistageociencias/22_1/6.PDF. Acesso em: 29 jun. 2008.

DEL CARLO, U. **Cultura sustentável**. Revista Téchne. Ed. 133. São Paulo: PINI, 2008. p. 22-28.

DETRICHE, C. H.; RAMODA, S. **Influence de la composition volumique des mortiers sur leur résistance à la propagation des fissures**. Materials and structures/Matériaux ET constructions. Vol. 22, n. 129. 1989. p. 206-211.

FARIAS FILHO, J. de; LUCENA, L. de F. L.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C.; LEAL, A. F. **Avaliação da atividade pozolânica de resíduos da construção civil**. 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, 2006. Disponível em: http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17cbecimat-112-007.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimento**: estudos e procedimentos de execução. São Paulo: PINI, 2003. 223 p.

GARCIA, T. L.; NAVES, V. C.; ALVES, J. D.; BARROS, B. de C.; RODRIGUES, C. S. G.; PEREIRA, E. A. A.; ATAÍDES, R. L. de A. **Substituição de parte do cimento por finos inertes de pedreira em concretos com baixo fator a/c**. IV Seminário de Iniciação Científica. Goiânia: 2006. Curso de Engenharia Agrícola. Unidade Universitária de Ciências exatas e tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás. Disponível em: http://www.prp.ueg.br/06v1/ctd/pesq/inic_cien/eventos/sic2006/arquivos/engenharias/substituição_cimento.pdf. Acesso em: 28 jun. 2008.

GOLASZEWSKI, J. **Interação cimento superplastificante em presença de escória granulada de alto forno**. e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 2. n. 1. p. 105-116. Nov. 2005. Disponível em: http://www.antac.org.br/emat/e-MAT-V2-N2/e-MAT-V2-N2-p105-116(Res).pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

GOMES, A. M.; NERO, J. M. G.; APPLETON, J. A. S. **Novo método para avaliação da trabalhabilidade e consistência das argamassas**. In: I Simpósio Brasileiro de Tecnologias das Argamassas. Anais... CD ROM. Goiânia: ANTAC, 1995. p. 83-91.

GONDIM, F. L. **Estudo da interface entre o concreto e o material de reparo mediante microscopia**. Uberlândia, 2005. 143 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: HTTP://www.bdtd.ufu.br//tdebusca/arquivo.php?codArquivo=227. Acesso em: 29 jul. 2008.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2002. 341 p.

INTERNATIONAL UNION OF TESTING AND RESERCH LABORATORIES FOR MATERIALS AND STRUCTURES – RILEM. **MR 3: the complex workability – consistence – plasticity**. France: E & FN Spon. RILEM, 1982.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 113 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

JOHN, V. M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas.** In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais ... CD ROM. São Paulo: ANTAC ., 2003. p. 47-63.

KOLIAS, S. **Investigation of the possibility of estimating concrete strength by porosity measurements**. Materials and structures. Vol. 27. 1994. p. 265-272.

KOPSCHITZ, P.; FRANCINETE, Jr., P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. **Estudo da retração e do desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas para revestimento**. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. Salvador: CEPED/EPUFBA/UCSAL/UEFS, 1997. p. 120-132.

KRUS, M.; HANSEN, K. K.; KUNZEL, H. M. **Porosity and liquid absorption of cement paste**. Materials and structures/Matériaux et constructions. Vol. 30. 1997. p. 394-398.

KUMMER, L.; BASSETTI, F. de J.; RIELLA, H. G.; AZEVEDO, J. C. R. **Reutilização dos resíduos de polimento de porcelanato e feldspato na fabricação de novo produto cerâmico**. Cerâmica Industrial. Revista. Vol. 12. n. 3. Maio/Jun, 2007. São Paulo/SP. Disponível em: http://ceramicaindustrial.org.br/pdf/v12n3a05.pdf. Acesso em: 28 jun. 2008.

LANA, E. F. D. **Carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com cinza volante e cal**. Santa Maria, 2005. 138 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: http://coralx.ufsm.br/gepecon/DIS_Elinor2.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

LANG, C. L.; ROCHA, J. C. **Características da areia britada de origem basáltica e estudo de dosagem para concreto à base de cimento portland para fins estruturais**. Workshop: desempenho de sistemas construtivos. Chapecó/SC. 27 e 28 de novembro de 2006. Disponível em: HTTP://claudio.jacoski.googlepages.com/nove.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e de demolição**. Porto Alegre, 2001. 270 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Tese%20Monica%20Leite.pdf. Acesso em: 02 jul. 2008.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 2001. 194 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: http://reciclagem.pcc.usp.br/FTP/tese%20SALOMON.pdf. Acesso em: 01 jul. 2008.

MARQUES, L. N.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. **Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica**. Revista eletrônica de materiais e processos. Vol. 22. 2007. p. 34-42. Disponível em: http://www.dema.ufcg.edu.br/revista/index.php/REMAP/article/viewFile/39/69. Acesso em: 09 jul. 2008.

MELO NETO, A. A. de. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. São Paulo, 2002. 161 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: http:// www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-05022003-114904/. Acesso em: 27 jun. 2008.

MENOSSI, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. Ilha Solteira, 2004. 110 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista. Disponível em: http://www.ppgec.feis.unesp.br/teses/2004/romulo_2004.pdf. Acesso em: 19 jun. 2008.

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

MIRANDA, L. F. R. **Estudo dos fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. São Paulo, 2000. 172 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Dissertação_LEONARDO_miranda.pdf. Acesso em: 01 jul. 2008.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. **Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santos em cerâmica vermelha**. Revista Cerâmica. Vol. 49. n. 312. 2003. p. 262-267. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/ce/v49n312/a1249312.pdf. Acesso em: 30 jun. 2008.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Porto Alegre, 2000. 232 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/washington_ufrgs.pdf. Acesso em: 02 jul. 2008.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. da SILVA. **Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso**. Sitientibus. Feira de Santana. n.26. jan./jun. 2002. p. 49-61. Disponível em: http://www.uefs.br/sitientibus/pdf/26/utilizacao_do_residuo_de_corte_de_marmore.pdf. Acesso em: 30 jun. 2008.

MÜLLER, A.; GLEIZE, P. J. P.; ROMAN, H. R. **Propriedades físicas e mecânicas de argamassas de assentamento com adições minerais e orgânicas**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. Vitória: UEFES/PPGEC, 1999. Vol. 1. p. 309-322.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. BT/PCC/359. Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2004. Disponível em: http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF2003&2004_1/BT%20-%20359.pdf. Acesso em: 03 jul. 2008.

NASCIMENTO, M. R. do; GEMELLI, E.; CAMARGO, N. H. A. **Caracterização de argamassas de pastas de cimento com misturas de bentonita e de pó de carvão**. 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Salvador, 2007. Disponível em: http://www.abceram.org.br/51cbc/artigos/51cbc-6-01.pdf .Acesso em: 29 jun. 2008.

NEVES, L.; BINA, P.; NOTRISPE, E. **Estudo de aproveitamento de resíduos diversos como componentes em concretos e argamassas**. In: V Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. Anais... São Paulo: IBRACON/CT-206, 2002. p. 353-359.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI. 1997.

OLIVEIRA, I. **Natureza em pauta**. Revista FOCO. 110. ed. Ano VIII. Natal: FOCO. Maio 2008. Pág 26 e 27.

OLIVEIRA, M. L. L. **Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas**. Florianópolis, 2001. 171 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina.

PAES, I. N. L.; ANDRADE, M. A. S. de; ANGELIM, R. R.; HASPARYK, N. P.; OLIVEIRA, R. A. de.; PASSOS, J. S.; THON, D. G.; CARASECK, H. **O efeito de finos calcários nas propriedades da argamassa de revestimento**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. Vitória: UFES/PPGEC, 1999. p. 335-347.

PANDOLFO, L. M.; MASUERO, A. B.; TIECHER, F.; PANDOLFO, A. **Propriedades das argamassas de revestimento produzidas com areia natural e areia de basalto**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. Florianópolis: UFSC, 2005. p. 53-58.

PEREIRA, P. C.; IKEDA, J. A.; IKEDA, N. A.; CAMPOS, C. O.; TEXEIRA, L. M.; CARASEK, H. **Teor de cimento ou a/c: quem exerce maior influência na resistência de aderência?**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. Vitória: UFES/PPGEC, 1999. Vol. 2. p. 489-502.

PEREIRA, L. H.; JALALI, S.; AGUIAR, J. B. **Viabilidade econômica de uma central de tratamento de resíduos de construção e demolição**. Dezembro de 2004. Disponível em: http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/2596/1/Beja_BA.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

PETRY, S. B. **Estudo da permeabilidade à água na camada de cobrimento de protótipos de concretos com altos teores de cinza volante**. Santa Maria, 2004. 111 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: http://coralx.ufsm.br/gepecon/Simone.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

PINTO, J. A. N. **Elementos para dosagem de argamassas**. 2. ed. Santa Maria. 1996. 143 p.

PINTO, T. de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, 1999. 189 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: http://www.receiclagem.pcc.usp.br/ftp/tese_tarcisio.pdf. Acesso em: 01 jun. 2008.

PISSATO, E.; SOARES, L. **Adição de finos de pedreira em misturas de solo-cimento**. In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas aplicações. Anais... São Paulo: IBRACON/CT-206, 2001. p. 331-339.

PONTES, I. F.; VIDAL, F. W. H. **Valorização de resíduos de serrarias de mármore e granito e sua aplicação na construção civil**. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: http://www.cetem.gov.br/publicao/CTs/CT2005-101-00.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

QUENARD, D. A.; XU, K.; KUNZEL, H. M.; BENTZ, D. P.; MARTYS, N. S. **Microstructure and transport properties of porous building materials**. Materials and structures/Matériaux et constructions. Vol. 31. n. 209. 1998. p. 317-324.

RESCHKE, J. S.; CECCATTO, D. M.; MASUERO, A. B.; MORAES, C. A. M.; VILELA, C. F. **Avaliação da utilização de escória granulada de fundição como substituição de parte do cimento em concreto**. e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 2. n. 1. Maio 2005. p. 78-91. Disponível em: http://www.antac.org.br/emat/e-MAT-V2-N1/e-MAT-V2-N1-p78-91(Res).pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

RIPPER, E. **Manual prático de materiais de construção: recebimento, transporte interno, estocagem, manuseio e aplicação**. São Paulo: PINI, 1995.

ROCHA, M. F. P.; OLIVEIRA, L. A. P. **Influência da absorção capilar dos blocos cerâmicos na resistência à compressão da argamassa de assentamento**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... Vitória: UEFS/PPGEC, 1999. Vol. 2. p. 477-487.

ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. **Utilização de resíduos na construção civil**. Coletânea habitare. Vol. 4. Porto Alegre: ANTAC, 2003. 272 p. Disponível em: http://habitare.org.br/pdf/publicacoes/arquivo/134.pdf. Acesso em: 14 nov. 2008.

RODRÍGUEZ, C. O. **Los morteros, control de calidad**. Primera Cooperación Europea. 1994.

ROMAN, H. **Argamassas de assentamento para alvenarias**. In: III Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil. Anais... Florianópolis: CTC-UFSC/DEC/NPC, 1991. p. 111-116.

ROMAN, H. R.; MUTTI, C. N.; ARAÚJO, H. N. de. **Construindo em alvenaria estrutural**. Florianópolis: UFSC, 1999. 83 p.

SÁ, M. das V. V. A. de. **Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos**. Natal, 2006. 141 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistentes**. Boletim IPT, 1986, São Paulo, 26 p.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. de. **Obtenção de areia artificial com base em finos de pedreiras**. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro:2002. Disponível em: http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2002-194-00.pdf. Acesso em: 09 jul. 2008.

SÁNCHEZ, J. A.; BARRIOS, J.; BARRIOS, A.; AGUDO, A. R. A. **La retracción en los morteros de cal**. Materiales de construcción. Vol. 47. n. 245, enero/febrero/marzo. 1997.

SCHENINI, P. C.; BAGNATI, A. M. Z.; CARDOSO, A. C. F. **Gestão de resíduos da construção civil**. Disponível em: http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/cobrac_2004/092.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. Belo Horizonte, 2005. 92 p. Dissertação (Mestrado). Escola de engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: http://www.pos.demet.ufmg.br/hpcpgem/P/defesas/911M.PDF. Acesso em: 09 jul. 2008.

SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. **Argamassa com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. Florianópolis, 2005. p. 12-22.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Curitiba, 2006. 180 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: http://dspace.c3sl.ufpr.br:8080/dspace/bitstream/1884/4660/1/DISSERTA%c3%830%20MESTRADO.pdf. Acesso em: 01 jun. 2008.

SILVA, N. G; CAMPITELI, V. C. **Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas**. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. Anais... CD ROM. Florianópolis, 2006. Pág. 4343 a 4358.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C.; GLEIZE, P. J. P. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia de britagem de rocha calcária**. In: VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. Recife: UFPE/ANTAC/GTARGAMASSAS, 2007.

SILVEIRA, R. G. da. **Estudo da microestrutura da camada de cobrimento de concreto com altos teores de cinza volante**. Santa Maria, 2004. 164 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: http://coralx.ufsm.br/gepecon/Rodrigo.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

SOUZA, U. E. L.; FRANCO, L. S. **Subsídios para a opção entre: elevador ou grua, andaime fachadeiro ou balancim, argamassa industrializada ou produzida em obra**. BT 176. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997. Disponível em: http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF/btcap176.pdf. Acesso em: 23 jun. 2008.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

SOUZA, P. A. B. F. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. Natal, 2007. 208 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Academic press, 1990. 474 p.

TEIXEIRA, L. CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Análise do Setor de Cimento no Brasil**. Disponível em: http://www.cbicdados.com.br/files/textos/032.pdf. Acesso em: 20 jun. 2008.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios**: causas, prevenção e recuperação. 1. ed. São Paulo: PINI, 2003. 194 p.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. Florianópolis, 1995. 197 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.

TRISTÃO, F. A.; MACHADO, V. K. C. B. L. **Análise de métodos de retenção de água e consistência em argamassas**. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. São Paulo: ANTAC, 2003. p. 233-242.

TRISTÃO, F. A.; ROMAN, H. R.; VALDAMERI, C.; MESACASA, C. **Uso de areia industrial de basalto em argamassa de revestimento**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 59-64.

VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland**. Santa Maria, 1999. 118 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: http://coralx.ufsm.br/gepecon/marcos.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

VOGT, J. C.; PINHO, V. X.; CORRÊA, E. C. S.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. **Influência da adição de resíduos minerais na resistência mecânica, tenacidade à fratura e módulo de Young do concreto**. 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, 2006. p. 3756-3766. Disponível em: http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17cbecimat-210-025.pdf. Acesso em: 27 jun. 2008.

YOSHIDA, A. T.; BARROS, M. M. S. B. **Caracterização de argamassas no estado fresco: peculiaridade na análise de argamassas industrializadas**. In: I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... CD ROM. Goiânia: ANTAC, 1995. p. 53-62.

ANEXO A

Tabela A1 – Caracterização química do cimento Portland.

Ensaio	Método	Unidade	Resultados	Especificação NBR 11578 (ABNT, 1991)
Perda ao fogo - PF	NBR 5743 (1989)	%	5,24	≤ 6,5
Óxido de magnésio – MgO	NBR 9203 (1985)	%	1,33	≤ 6,5
Anidrido sulfúrico – SO_3	NBR 5745 (1989)	%	3,27	≤ 4,0
Resíduo insolúvel – RI	NBR 8347 (1992)	%	0,94	≤ 2,5
Equivalente alcalino em Na_2O	-	%	1,04	não aplicável
Óxido de cálcio livre - CaO	NBR 7227 (1990)	%	1,34	não aplicável

Fonte: Relatório fornecido pelo fabricante, período março/2008.

Tabela A2 – Caracterização física e mecânica do cimento Portland.

Ensaio	Método	Unidade	Resultados	Especificação NBR 11578 (ABNT, 1991)
Área específica (Blaine)	NBR 7224 (1996)	cm²/g	4026	≥ 2600
Finura – retido na peneira de 0,075 mm (# 200)	NBR 11579 (1991)	%	1,3	≤ 12,0
Finura – retido na peneira de 0,044 mm (#325)	NBR 11579 (1991)	%	7,7	não aplicável
Água da pasta de consistência normal	NBR 11580 (1991)	%	28,4	não aplicável
Início de pega	NBR 11581 (1991)	h:min	3:06	≥ 1
Fim de pega	NBR 11581 (1991)	h:min	4:11	≤ 10
Expansibilidade de Lê Chatelier – à quente	NBR 11582 (1991)	mm	0,17	≤ 5,0

Fonte: Relatório fornecido pelo fabricante, período março/2008.

Tabela A3 – Resistência à compressão do cimento Portland.

Idade (dias)	Mínima	Máxima	Média	Desvio	Especificação NBR – 5736 (ABNT, 1991)
3	28,7	33,3	31,7	1,00	≥ 10,0
7	35,4	39,1	37,8	1,09	≥ 20,0
28	43,0	47,3	45,5	1,07	≥ 32,0

Fonte: Relatório fornecido pelo fabricante, período março/2008.

ANEXO B

Tabela B1 – Caracterização física da cal CH I.

Ensaio	Resultado
Finura – resíduo na peneira de 0,044 mm (#325) (%)	1,50
Umidade (%)	2,00

Fonte: Relatório fornecido pelo fabricante, período março/2008.

Tabela B2 – Caracterização química da cal CH I.

Composição	Resultado
RI - insolúvel em ácido clorídrico (%)	0,5
Óxido de magnésio (MgO) (%)	3,5
Dióxido de silício (SiO_2) (%)	0,3
PPC (%)	23,0 – 25,0
$Ca(OH)_{2d}$ (%)	90,0 – 98,5
R_2O_3 (%)	1,5

Fonte: Relatório fornecido pelo fabricante, período março/2008.

ANEXO C

Classificação das argamassas segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela C1- Resistência à compressão.

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Método de ensaio
P1	≤ 2,0	NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8,0	

Tabela C2- Densidade de massa aparente no estado endurecido.

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido kg/m^3	Método de ensaio
M1	≤ 1200	NBR 13280
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	
M6	> 1800	

Tabela C3- Resistência à tração na flexão.

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Método de ensaio
R1	≤ 1,5	NBR 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	

Tabela C4- Densidade de massa no estado fresco.

Classe	Densidade de massa no estado fresco kg/m^3	Método de ensaio
D1	≤ 1400	NBR 13278
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	
D4	1600 a 2000	
D5	1800 a 2200	
D6	> 2000	

Tabela C5- Retenção de água.

Classe	Retenção de água %	Método de ensaio
U1	≤ 78	NBR 13277
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

Fonte: ABNT (2005).

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo