



**UFOP**  
Universidade Federal  
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Wanna Carvalho Fontes

**UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE  
FERRO COMO AGREGADO RECICLADO PARA ARGAMASSAS  
DE REVESTIMENTO E ASSENTAMENTO**

Ouro Preto

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE  
FERRO COMO AGREGADO RECICLADO PARA ARGAMASSAS  
DE REVESTIMENTO E ASSENTAMENTO**

**AUTORA: WANNA CARVALHO FONTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção metálica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Ouro Preto, novembro de 2013.

F683u Fontes, Wanna Carvalho.  
Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento. [manuscrito] / Wanna Carvalho Fontes - 2013.  
xv, 95f.: il. color.; graf.; tab.; equações.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Metálica.  
Linha de Pesquisa: Engenharia Estrutural e de Materiais.

1. Ferro - Minas e mineração - Teses. 2. Argamassa - Teses. 3. Agregados (materiais de construção) - Teses. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc. - Teses. 5. Barragem – Teses. I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

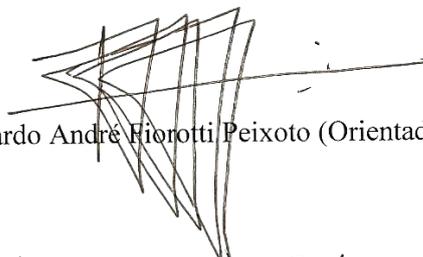
CDU: 624-033.2

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

# UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO COMO AGREGADO RECICLADO PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO E ASSENTAMENTO

**AUTORA: WANNA CARVALHO FONTES**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 19 de novembro de 2013, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto (Orientador / UFOP)



Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas (UFOP)



Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva (UFOP)



Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar (UFMG)

*Se o Senhor não edificar a casa, em vão trabalham os que a edificam.*

*Salmos 127:1*

## DEDICATÓRIA

*A Deus,  
a Giovanni,  
aos meus pais, minhas irmãs e vó Maria Francisca.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, cientista maior, por me prover forças, pelo ensinamento e por criar efetivamente os caminhos mesmo quando eles ainda não existiam.

Ao orientador, Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, por ter me inserido no projeto/linha de pesquisa com gratuidade, pela amizade, paciência, confiança e pelos ensinamentos imprescindíveis; ao Prof. Guilherme Jorge Brigolini Silva pelo suporte na orientação da pesquisa.

A UFOP, ao PROPEC, à coordenação do PROPEC, Prof. Dr. Henor Artur de Souza, e a secretaria, na pessoa de Rovadavia Aline de Jesus Ribas, pela atenção, cordialidade e presteza; bem como aos demais professores do PROPEC pela dedicação e pelos conhecimentos transmitidos;

A CAPES e FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudo; a Fundação Gorceix, e a secretaria do setor de projetos, Armanda Guimarães;

Ao meu marido, Giovanni Fontes; aos meus pais, Ewaldo e Maria José; e minhas irmãs Yanne e Blenda, eterna gratidão;

As professoras Neuza Evangelista e Arlene Maria Sarmanho Freitas pelas recomendações no exame de qualificação;

Ao Prof. Sidney Nicodemos, pela realização dos ensaios especializados de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX).

À equipe do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP, Reciclos, com deferências a Ana Cristina Pimenta Pereira, Isadora Castro de Oliveira, Rodrigo de Araújo Borges, Barbara Ponciano de Souza e Pedro Apolinário Chibli pela ajuda prestada durante os ensaios em laboratório;

Aos amigos, em especial a Denise de Souza Cerqueira Nascimento, Marcelo Nascimento Santos, Claudio Ernani Martins, Vênuncia Coelho e Mario Cabello pelo incentivo, exemplo de determinação e prontidão;

À Lincoln Rubim de Souza, Rogério Braga, Alexandre Campos, Carla Paoliello, Renata Marquez e Danielly Garcia, pela confiança e por me recomendarem ao Propec;

Aos familiares e amigos pelo apoio, orações e compreensão de minha ausência.

## RESUMO

Atualmente, a busca por soluções inovadoras e sustentáveis torna-se imprescindível diante do grande consumo de recursos naturais pelo setor da construção civil. Perante esta realidade, o presente trabalho aborda o uso do rejeito de barragens de minério de ferro (RBMF) como matéria-prima para produção de matrizes de argamassa para revestimento e assentamento de alvenarias, aplicadas em obras civis e construções metálicas. Objetiva-se, assim, contribuir para a redução dos passivos ambientais, representados por essas barragens de rejeito, diminuindo proporcionalmente as possibilidades de ocorrência de desastres ambientais, bem como os custos operacionais de manutenção, segurança e monitoramento dessas estruturas. Neste contexto foi necessária a verificação da viabilidade técnica das argamassas propostas pela realização de ensaios laboratoriais, procedidos de acordo com a normatização brasileira. Desta forma, foram realizadas as análises físicas, químicas, mineralógicas, microestruturais e ambientais para a caracterização completa do rejeito de minério de ferro. As argamassas foram dosadas segundo proporção 1:3, com agregados naturais, reciclados, cimento e cal. Foram produzidos traços com substituição da cal por rejeito nas proporções 0%, 10%, 20%, 50% e 100% para as idades de 3, 7 e 28 dias. Em sequência, as argamassas foram submetidas a ensaios, no estado fresco e endurecido, sendo possível assim classificá-las conforme as características e propriedades de interesse da engenharia. Também foram procedidas análises da viabilidade ambiental e econômica, a fim de estimar as perspectivas de desempenho dos produtos obtidos. Os resultados alcançados permitiram avaliar que é possível usar o rejeito (RBMF) como matéria-prima de forma técnica e ambientalmente adequada para a redução dos impactos ambientais da mineração com a produção de argamassas com agregados reciclados (RBMF).

Palavras chave: rejeito de minério de ferro, tecnologia de materiais, argamassa, agregado reciclado, resíduo.

## **ABSTRACT**

Nowadays, the search for innovative and sustainable solutions is essential facing the great consumption of natural resources by the construction industry. Given this reality, this paper discusses the use of tailing from dams that contain iron ore tailings, in-kind, as raw material for production of arrays of mortar and laying masonry coating, applied in civil purposes and steel construction. The aim is thus to contribute for the reduction of environmental liabilities represented by these tailing dams , decreasing proportionally the chances of the occurrence of environmental disasters, as well as operating costs of maintenance, security and monitoring of these structures . In this context it was necessary to study the technical feasibility of the proposed mortar through laboratory testing, proceeding according to the Brazilian standardization. Thus, physical, chemical, mineralogical, microstructural and environmental analyzes were carried out for full characterization of the iron ore tailings. The mortars were measured according to the 1:3 proportion, with both natural and artificial aggregates, cement, and lime. Traces were produced by substitution of the lime with 0 %, 10 %, 20 %, 50% and 100% ratios at ages 3, 7 and 28 days. Subsequently, the mortars were subjected to tests, in fresh and hardened states, so it was possible to classify them according to the characteristics and properties required in engineering. We also carried out analysis of environmental and economic feasibility in order to estimate the performance prospects of the products obtained. The results obtained allow us to assess that it is possible to use it as raw material in a technically and environmentally suitable technique for reducing environmental impacts of mining through the production of recycled aggregate mortars.

Keywords: iron ore tailings, materials technology, mortar, recycled aggregate, residue.

# SUMÁRIO

CAPÍTULO I	
1. Introdução	1
1.1. Justificativa e Relevância do Tema	8
1.2. Objetivos	9
1.2.1. Objetivo Geral	9
1.2.2. Objetivos Específicos	9
CAPÍTULO II	
2. REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1. Mineração e Reaproveitamento de Resíduos Sólidos	10
2.2. Argamassas	14
2.3. Função das Argamassas	16
2.4. Características das Argamassas	17
2.4.1. Adesão Inicial	17
2.4.2. Plasticidade	18
2.4.3. Trabalhabilidade	18
2.4.4. Retenção de Água	19
2.4.5. Aderência ao Substrato	19
2.4.6. Absorção de Deformações	20
2.4.7. Resistência Mecânica	21
2.5. Classificação das Argamassas	21
2.5.1. Argamassas de Cal	22
2.5.2. Argamassas de Cimento Portland	24
2.5.3. Argamassas de Cimento Portland e Cal	27
CAPÍTULO III	
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. Materiais	29
3.1.1. Rejeito de Barragem de Minério de Ferro	29
3.1.2. Areia	31
3.1.3. Cal	31
3.1.4. Cimento Portland	35
3.2. Preparo das Amostras	37
3.3. Métodos Instrumentais Analíticos	37
3.3.1. Métodos de Caracterização da Composição Química	37

3.3.1.1. Análise por Espectrometria de Fluorescência de raios X	38
3.3.1.2. Análise por Difractometria de raios X	38
3.3.1.3. Microscopia Eletrônica de Varredura - Análise de Espectrometria de raios X por Dispersão de Energia	38
3.3.2. Métodos de Caracterização Ambiental	39
3.3.3. Métodos de Caracterização Física	39
3.3.4. Dosagem das Argamassas	39
3.3.5. Propriedades das Argamassas no Estado Fresco	41
3.3.5.1. Índice de Consistência	41
3.3.5.2. Retenção de Água	41
3.3.5.3. Densidade de Massa no Estado Fresco	43
3.3.5.4. Teor de Ar Incorporado	44
3.3.6. Propriedades da Argamassa no Estado Endurecido	44
3.3.6.1. Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido	44
3.3.6.2. Resistência à Compressão Axial	45
3.3.6.3. Resistência à Tração na Flexão	46
3.3.6.4. Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade	47
3.4. Análise Econômica das argamassas	48
3.5. Classificação das Argamassas	49
CAPÍTULO IV	
4. RESULTADOS e DISCUSSÃO	50
4.1. Caracterização das Amostras	50
4.1.1. Análise por Espectrometria de Fluorescência de raios X	50
4.1.2. Análise por Difractometria de raios X	51
4.1.3. Microscopia Eletrônica de Varredura	52
4.1.4. Teor de Umidade	53
4.1.5. Análise Granulométrica	54
4.1.6. Massa Específica	54
4.1.7. Massa Aparente	55
4.1.8. Determinação do Teor de Argilas em Torrões	55
4.1.9. Análises Ambientais do Agregado Reciclado (RBMF)	56
4.2. Propriedades das Argamassas no Estado Fresco	56
4.2.1. Índice de Consistência	56
4.2.2. Retenção de Água	58
4.2.3. Densidade de Massa no Estado Fresco	59
4.2.4. Teor de Ar Incorporado	60
4.3. Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido	61

4.3.1. Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido	61
4.3.2. Resistência à Compressão Axial	62
4.3.3. Resistência à Tração na Flexão	63
4.3.4. Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade	64
4.4. Classificação das Argamassas	65
4.5. Análise Econômica das Argamassas	66
CAPÍTULO V	
5. Considerações e Sugestões	69
5.1 Considerações Finais	69
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	71
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	72
APÊNDICES	
Apêndice A – Dados da Distribuição Granulométrica	80
Apêndice B – Índice de Consistência	81
Apêndice C – Retenção de Água	82
Apêndice D – Densidade de Massa no Estado Fresco	83
Apêndice E – Densidade de Massa no Estado Endurecido	84
Apêndice F – Resistência à Compressão Axial	88
Apêndice G – Resistência à Tração na Flexão	89
Apêndice H – Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade	90
Apêndice I – Análises Ambientais do Agregado Reciclado (RBMF)	92

# LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO I

Figura 1.1- Área de mineração de ferro em Minas Gerais	3
Figura 1.2- Barragem de contenção de rejeitos em Minas Gerais	5
Figura 1.3- Região afetada pelo rompimento da barragem em Miraf	6

## CAPÍTULO II

Figura 2.1 - Modelo microestrutural das argamassas	15
--	----

## CAPÍTULO III

Figura 3.1 – Locação do ponto de coleta das amostras representativas	30
Figura 3.2 – Ensaio de retenção de água	42
Figura 3.3– Procedimentos de calibração do recipiente e determinação da densidade de massa das argamassas	43
Figura 3.4 – Procedimento de determinação da densidade de massa aparente das argamassas no estado endurecido	44
Figura 3.5 – Ensaio de resistência à compressão axial	45
Figura 3.6 – Ensaio de resistência à tração na flexão (a) e (b).	46
Figura 3.7 – Ensaio de absorção de água por capilaridade	47

## CAPÍTULO IV

Figura 4.1 – Difratoograma de uma amostra de rejeito (RBMF)	51
Figura 4.2 – MEV do rejeito (RBMF) - 200x	52
Figura 4.3 – MEV do rejeito (RBMF) - 500x	52
Figura 4.4 – MEV do rejeito (RBMF) - 1000x	53
Figura 4.5 – MEV do rejeito (RBMF) - 2000x	53

# LISTA DE GRÁFICOS

## CAPÍTULO II

Gráfico 2.1–Balança mineral brasileira, exportações e importações, % do valor em dólares	10
Gráfico 2.2 – Produção de agregados em milhões de toneladas por ano no Brasil	13

## CAPÍTULO IV

Gráfico 4.1 – Porcentagens dos minerais das amostras de rejeito em 2011	51
Gráfico 4.2 – Teor de umidade dos agregados.	53
Gráfico 4.3 – Distribuições granulométricas dos agregados, reciclado e natural	54
Gráfico 4.4 – Massa específica dos agregados	55
Gráfico 4.5 – Massa aparente dos agregados.	55
Gráfico 4.6 – Teor de substâncias nocivas dos agregados	56
Gráfico 4.7 – Relação água/aglomerante	57
Gráfico 4.8 – Retenção de água	58
Gráfico 4.9 – Densidade de massa no estado fresco	59
Gráfico 4.10 – Teor de ar incorporado	60
Gráfico 4.11 – Densidade de massa no estado endurecido	61
Gráfico 4.12 – Resistência à compressão axial	62
Gráfico 4.13 – Resistência à tração na flexão	63
Gráfico 4.14 – Absorção de Água por Capilaridade	64
Gráfico 4.15 – Coeficiente de Capilaridade	65
Gráfico 4.16 – Análises econômicas das argamassas experimentais	66

# LISTA DE EQUAÇÕES

## CAPÍTULO II

Equação 2.1 - Formação da cal viva	22
Equação 2.2 - Formação da cal hidratada	23

## CAPÍTULO III

Equação 3.1 - Retenção de água das argamassas	42
Equação 3.2 - Determinação do volume do recipiente	43
Equação 3.3 - Densidade de massa no estado fresco	43
Equação 3.4 - Densidade de massa no estado endurecido	45
Equação 3.5 - Resistência à tração na flexão	46
Equação 3.6 - Absorção de água por capilaridade	48
Equação 3.7 - Coeficiente de capilaridade	48

# LISTA DE TABELAS

## CAPÍTULO I

Tabela 1.1 – Principais resultados dos inventários de resíduos sólidos de mineração de Minas Gerais, referentes aos anos de 2010 e 2011.	6
--	---

## CAPÍTULO II

Tabela 2.1 – Cimentos Portland, características e normalização brasileira	25
---	----

## CAPÍTULO III

Tabela 3.1 – Propriedades físicas da cal hidratada aditivada CH I	32
Tabela 3.2 – Propriedades químicas da cal hidratada aditivada CH I	34
Tabela 3.3 – Propriedades físicas do Cimento Portland CPIII 40RS	35
Tabela 3.4 – Propriedades químicas do Cimento Portland CPIII 40RS	36
Tabela 3.5 – Planejamento da dosagem das argamassas	40
Tabela 3.6 – Classificação de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos	49

## CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 – Elementos químicos do rejeito	50
Tabela 4.2 – Porcentagens dos elementos químicos do rejeito em 2011	52
Tabela 4.3 – Análises ambientais	56
Tabela 4.4 – Designação das argamassas experimentais.	66
Tabela 4.5 – Análise econômica das argamassas de Cimento Portland	67
Tabela 4.6 – Análise econômica das argamassas de cal	67
Tabela 4.7 – Análise econômica das argamassas mistas	67
Tabela 4.8 – Análise econômica das argamassas com substituição proporcional de cal por rejeito (RBMF)	68

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ABPC - Associação Brasileira dos Produtores de Cal  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
BRICs - Brasil, Rússia, Índia e China  
BS - British Standard  
CEFET/MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral  
DRX - Difractometria de raios X  
FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente  
FRX - Fluorescência de raios X  
INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia  
LMC - Laboratório de Materiais de Construção Civil  
MEV - Microscópio eletrônico de varredura  
PIB - Produto Interno Bruto  
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos  
RBMF – Rejeito de barragem de minério de ferro  
UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto  
 $Al_2O_3$  – Óxido de alumínio ou Alumina  
 $CaCO_3$  - Carbonato de cálcio  
 $CaO$  - Óxido de cal ou cal viva  
 $Ca(OH)_2$  – Hidróxido de cálcio ou cal hidratada  
 $CO_2$  - Dióxido de carbono  
 $Fe_2O_3$  – Hematita  
 $H_2O$  – Óxido de hidrogênio ou água  
 $SiO_2$  – Sílica  
 $SO_3$  – Óxido sulfúrico  
pH - Potencial hidrogeniônico  
N/s - Newton por segundo  
MPa - Megapascal  
°C – Grau Celsius  
mm - Milímetros  
 $cm^3$  - Centímetros cúbicos  
 $kg/m^3$  - Quilo por metro cúbico  
% - Porcentagem  
R\$/kg – Real por quilo

# CAPÍTULO I

*“O conceito de sustentabilidade se refere à busca pelo desenvolvimento econômico e social, buscando minimizar ao máximo as interferências destrutivas ao meio ambiente, mantendo-o a salvo para as futuras gerações (AGOPYAN;JOHN, 2011).”*

## 1. INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva do setor construtivo se caracteriza por ser bastante diversificada e por gerar grandes impactos ambientais. Segundo John (2000) a construção utiliza entre 20 a 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade; areia, calcário, argila e outros, além da água e energia consumida no processo construtivo, utilização das edificações e na produção dos materiais. Contexto que tem estimulado a busca por novos meios que visam à sustentabilidade ambiental dos processos produtivos, como por exemplo, através da redução da exploração de recursos naturais pela apropriação adequada dos resíduos como matéria-prima. Considerando que grande parte dos produtos destinados à construção civil são de origem mineral, semelhante ao exemplo anterior, o reaproveitamento dos resíduos minerais, como no caso da lama das barragem de contenção de minério de ferro na produção de argamassas irá, do mesmo modo, contribuir para a redução do volume de recursos naturais extraídos e de resíduos sólidos gerados, podendo se apresentar, muitas vezes, como uma alternativa ambiental viável tecnicamente e economicamente.

Antes de tudo, compreende-se que mineração se refere aos processos e atividades industriais cujo objetivo é a extração de substâncias minerais a partir de depósitos ou massas minerais. E o minério é considerado o mineral ou associação de minerais que são ou podem ser aproveitados economicamente (GERMANI, 2002). Sendo assim, consideram-se os minérios indispensáveis para a manutenção da atividade industrial, tendo em vista que vários produtos são fabricados a partir destas matérias-primas.

Quanto à exploração destes minerais, o Decreto-lei nº 227/67, art. 36 do Código de Mineração entende que lavra é o conjunto de operações coordenadas objetivando o

aproveitamento industrial da jazida, desde a extração das substâncias minerais úteis que contiver, até o beneficiamento das mesmas. Dentre os métodos de lavra mais utilizados no Brasil tem-se a mineração a céu aberto, cujos processos de escavações são realizados em contato com o ar livre, como no caso da mineração de ferro. No entanto este método como os outros são responsáveis por gerar diversos impactos ambientais que ocasionam danos e desequilíbrio no solo, na água, no ar, no subsolo, ou mesmo em todo o ambiente onde foi inserido, descaracterizando-o a ponto de impossibilitar resgatar suas condições naturais originais.

Do mesmo modo é importante salientar as principais alterações ambientais causadas pela mineração, sendo estas identificadas por alguns autores Chiossi et al. (1982), Macedo et al., (1985), Teixeira (1992) citados por Bitar (1997), podendo ser resumidas em: supressão de áreas de vegetação; reconfiguração de superfícies topográficas; impacto visual; aceleração de processos erosivos; indução de escorregamentos; modificação de cursos d'água receptores; assoreamento e entulhamento de cursos d'água; intercepção do lençol freático com rebaixamento ou elevação do nível de base local; mudanças na dinâmica de movimentação das águas subterrâneas; inundações a jusante; aumento da emissão de gases e partículas em suspensão no ar; aumento de ruídos; lançamento de fragmentos rochosos à distância; sobrepressão do ar; e propagações de vibrações no solo.

Estas alterações, por sua vez, tendem a afetar os diferentes tipos de uso de solo circunvizinhos, muitas vezes gerando situações de risco, com as seguintes conseqüências: danos às fundações de habitações, edificações industriais e comerciais diversas, linhas de transmissão, ruas, estradas e outros usos próximos à mineração; insalubridade e riscos decorrentes do lançamento de resíduos em lagos abandonados e, neste contexto, acidentes de quedas ou afogamento; aumento da vulnerabilidade dos aquíferos subterrâneos com prejuízos à captação em poços e cacimbas nas proximidades; perda da qualidade das águas situadas à jusante e utilizadas como mananciais para abastecimento público; perda da qualidade do ar; vítimas ou danos decorrentes do ultra lançamento de fragmentos rochosos; incômodos às pessoas e danos

às habitações e outras edificações causados pela propagação de vibrações no solo e pela sobrepressão (BITAR, 1997).

Adicionalmente, sabe-se que a extração do minério de ferro (Figura 1.1) tende a se ampliar, embora a atividade mineral tenha sofrido redução em suas expectativas em razão da crise internacional. O crescimento econômico e o processo de urbanização dos países emergentes com expressivas áreas territoriais, alta densidade demográfica e alto PIB (Produto Interno Bruto), como os BRICs (Brasil, Rússia, Índia e China), coincidentemente, vem provocando um aumento da demanda e dos preços internacionais das commodities (produtos primários, em estado bruto, de grande importância no mercado internacional), aumentando os investimentos e a produção no setor.



Figura 1.1- Área de mineração de ferro em Minas Gerais (CREA, 2013)

O mercado mundial tende a manter dependência das exportações de minério de ferro australianas e brasileiras pelo menos até final de 2015. Estes dois países possuem um “market share” de 70-72%, devido ao alto teor de ferro contido em seus minérios de hematita. Além disso, há uma contribuição acentuada de novos projetos no médio prazo, o que irá influenciar a curva de oferta e de demanda do minério entregue à China, uma vez que a qualidade do minério estaria em declínio (IBRAM, 2012).

Diante a crescente demanda por minério de ferro, o setor de mineração teve paralelamente um progressivo avanço em termos de gestão ambiental. Um dos indicadores disto é que, das 100 maiores empresas de mineração, 25% possuem unidades certificadas pela ISSO 14.001, o que coloca a mineração como um dos segmentos com maior número de empresas certificadas. No entanto, essas certificações não atestam que a empresa não polui, demonstram que as empresas adotam sistemas de preservação e se comprometem a resolver os problemas causados ao meio ambiente (ALVES, 2009). Por outro lado, com ou sem certificação, a maior parte das empresas mineradoras de médio e grande porte já adotam programas de gestão ambiental que visam aumentar a extração e diminuir o volume de resíduos, desembolsando anualmente um expressivo orçamento para investimento em pesquisas e ações ambientais. Entre as alternativas ambientais almejadas pelas mineradoras tem-se o aprimoramento da manutenção e do monitoramento das barragens de contenção de rejeitos, bem como a destinação adequada destes resíduos de mineração.

No campo da mineração compreende-se que os rejeitos, assim como os estéreis, são os resíduos resultantes de processos de beneficiamento, a que são submetidos os minérios, visando extrair os elementos de interesse econômico (produto final). Os estéreis são materiais não beneficiados, onde são comumente destinados sob a forma de pilhas e os rejeitos, sob forma de polpa ou lama, são dispostos em reservatórios, também conhecidos como barragens de contenção de rejeito. Em função do tipo de minério processado e dos tratamentos adotados podem ser encontrados rejeitos com variadas características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas. Os rejeitos, quando de granulometria fina, são denominados lama, e quando de granulometria grossa (acima de 0,074 mm), são denominados rejeitos granulares (ESPÓSITO, 2000). Os processos de lavra e beneficiamento do minério de ferro geram quantidades expressivas de estéreis e rejeitos, a uma razão média de 2/1 entre o produto final e os resíduos gerados (Abrão, 1987). Esses processos têm a finalidade de regularizar o tamanho dos fragmentos, removerem minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final. (ESPÓSITO, 2000).

As barragens de contenção de rejeito são estruturas construídas para reter os materiais resultantes do beneficiamento do minério, sendo executadas em etapas, na medida em que os rejeitos são gerados, diluindo proporcionalmente seus custos de construção e operação (Figura 1.2). É importante ressaltar que as barragens convencionais são aquelas construídas em concreto, terra e/ou enrocamento, cuja finalidade é conter as águas provenientes das minerações, a fim de evitar que efluentes tóxicos e outros materiais potencialmente perigosos invadam os mananciais, não sendo seu intuito servir como destinação final do rejeito através de sua disposição nas barragens.



Figura 1.2- Barragem de contenção de rejeitos em Minas Gerais (FEAM, 2012).

Essas barragens são reconhecidas por gerarem um impacto ambiental significativo. Neste sentido, a gestão dos rejeitos está se tornando um dos critérios pelos quais o desempenho ambiental das empresas é julgado. Além disso, apesar da legislação, conhecimento e tecnologia disponíveis, as barragens de contenção de rejeitos continuam rompendo e causando prejuízos econômicos, sociais e ambientais (DUARTE, 2008). A ocorrência de alguns transtornos acidentais, como por exemplo, o rompimento da barragem de contenção de rejeitos de bauxita em Miraf (Figura 1.3), incentiva cada vez mais o interesse de agências ambientais e comunidades locais, tornando pública a gestão dos rejeitos e aumentando a pressão para aplicação e manutenção de técnicas seguras de operação das barragens, bem como adequada destinação dos seus resíduos.



(a)



(b)

Figura 1.3- Região afetada pelo rompimento da barragem (a e b) em Miraf (TMCRJ, 2007).

No decênio 1996 - 2005, a geração de rejeitos aumentou 1,4 vezes, passando de 202 milhões de toneladas em 1996 para 290 milhões de toneladas em 2005. Os minérios que mais contribuíram para a geração de rejeito foram o ferro (35,08%), o ouro (13,82%), o titânio (12,55%) e o fosfato (11,33%). Em conjunto, estas substâncias contribuíram com pouco mais de 70% da massa total de rejeitos gerada ao longo desses 10 anos (SILVA, VIANA, CAVALCANTE, 2011).

Há poucos anos o estado de Minas Gerais passou a realizar inventários anuais da geração de resíduos sólidos oriundos da atividade mineradora. A tabela 1.1 apresenta os principais resultados dos dois últimos inventários existentes, referentes a 2010 e 2011 (FEAM 2010 e 2011). As quantidades de rejeitos gerados, no caso de Minas Gerais, correspondem a 484 e 646 milhões de toneladas para 2010 e 2011, respectivamente. Observa-se, portanto, que os valores de rejeitos registrados nos inventários de Minas Gerais correspondem a cerca de 63,6% da quantidade registrada em 2005.

Tabela 1.1 – Principais resultados dos inventários de resíduos sólidos de mineração de Minas Gerais, referentes aos anos de 2010 e 2011.

<i>Categoria</i>	<i>2010 Quantidade(t)</i>	<i>%</i>	<i>2011 Quantidade(t)</i>	<i>%</i>	<i>Total (t)</i>	<i>%</i>
<i>Estéril</i>	260.328.768,273	53,75	428.751.253,202	66,29	689.080.021,4	60,02
<i>Rejeito</i>	212.915.662,894	43,96	184.457.533,129	28,52	397.373.195,9	36,24
<i>Resíduo</i>	11.082.693,893	2,29	33.581.244,102	5,19	44.663.937,99	3,74
<i>Total</i>	484.327.125,06	100	646.790.030,433	100	1.131.117.155,00	100

Fonte: FEAM 2010 e FEAM 2011

Cabe destacar, entretanto que, os inventários de Minas Gerais incluem apenas empreendimentos de médio e grande potencial poluidor e porte, enquanto que o levantamento aqui realizado, a partir de dados do Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), considera parte significativa da produção mineral do país, embora não tenham sido incluídas todas as substâncias.

Sendo assim, a abordagem dessa dissertação será focada na utilização do rejeito contido nas barragens de contenção de rejeitos da mineração de ferro em substituição ao agregado natural e em substituição a cal na produção de argamassa de revestimento e assentamento. Visando a redução do volume de resíduo dispostos nas barragens por meio de sua utilização como matéria-prima em produtos destinados à construção civil.

A estrutura desta dissertação se encontra dividida em 5 capítulos: No capítulo 1 têm-se a introdução, justificativa e relevância do tema, bem como os objetivos geral e específicos. O capítulo 2, revisão da literatura, apresenta informações gerais sobre a mineração, dentro de uma visão econômica e histórica, onde busca demonstrar a viabilidade, por meio de exemplos, do reaproveitamento de resíduos sólidos oriundos da mineração, bem como a importância do trabalho frente ao desenvolvimento de novos materiais destinados a construção civil e na redução dos passivos ambientais. Igualmente, encontra-se neste trabalho uma breve abordagem sobre as argamassas utilizadas para revestimento e assentamento, devido ser o material proposto para o reaproveitamento do rejeito (RBMF). No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados na composição das argamassas experimentais e os métodos de ensaios adotados na execução e na avaliação das mesmas, entre esses, têm-se os ensaios de caracterização das amostras de agregados (naturais e reciclados) e, os ensaios para a averiguação das propriedades das argamassas no estado fresco e no estado endurecido. No capítulo 4 são apresentados os resultados e as análises dos ensaios realizados nas amostras de agregados, naturais e reciclados (RBMF), bem como os das argamassas experimentais. O capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa em relação à viabilidade técnica, econômica e ambiental das argamassas propostas para revestimento e assentamento, bem como as recomendações para pesquisas futuras, com intuito de posterior aprofundamento no assunto.

## 1.1. Justificativa e Relevância do Tema

Destaca-se a importância deste estudo ao considerar que no campo de ação da mineração, grandes volumes de resíduos são gerados pelo processo de beneficiamento do minério e comumente dispostos de forma direta nas barragens de rejeitos. As barragens de contenção de rejeitos são consideradas passivos ambientais e caracterizam por ser a principal forma de disposição dos rejeitos minerários. De acordo com a FEAM (2012) somente no Estado de Minas Gerais existem 746 barragens de rejeito de mineração, o que corresponde a 91,4% do total no país. Entretanto recentes acidentes ocorridos nas barragens vêm despertando a atenção para estas estruturas, que crescem com o aumento da produção industrial.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a disposição final de resíduos no meio ambiente deve ser empregada somente como o último recurso. Neste sentido, as barragens de rejeito devem ser vistas como alternativas provisórias para o armazenamento e não como uma solução ambiental final para os resíduos sólidos originários da mineração. Contudo, o que se tem observado é que o processo de recuperação ambiental, que constitui a preparação para a devolução das áreas degradadas pela mineração à comunidade ou ao governo ou a particulares, nem sempre corresponde às expectativas almejadas perante os impactos sociais e ambientais gerados. Tais aspectos abordados levam a deduzir que um dos grandes desafios tecnológicos atuais da mineração de ferro no Brasil está relacionado, ao estudo da viabilidade do reaproveitamento dos resíduos sólidos contidos nessas barragens de rejeito.

Com intuito de reduzir as áreas degradadas pela mineração de ferro, o presente trabalho aborda o reaproveitamento do rejeito de minério de ferro como matéria-prima na produção de argamassas de revestimento e assentamento, utilizadas em obras civis; solução que se apresentou viável tanto do ponto de vista técnico, como do ponto de vista ambiental e econômico.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Produção de argamassas para revestimento e assentamento de alvenarias, utilizando o rejeito de barragens de minério de ferro como matéria prima na substituição de agregados naturais ou em substituição da cal.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Também, pretende-se com esta pesquisa:

- a) Realizar a caracterização física, química e ambiental dos rejeitos da barragem de minério de ferro.
- b) Dimensionar dosagens para os traços de argamassa de revestimento e assentamento de alvenarias, a partir da substituição de agregados naturais por rejeito de barragem de minério de ferro.
- c) Dimensionar dosagens para os traços de argamassa de revestimento e assentamento de alvenarias, a partir da substituição da cal por rejeito de barragem de minério de ferro.
- d) Analisar as propriedades das argamassas no estado fresco: determinação do índice de consistência, determinação da retenção de água, determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.
- e) Analisar as propriedades das argamassas no estado endurecido: determinação da densidade de massa aparente, determinação da resistência à tração na flexão e à compressão axial, determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.
- f) Analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental das argamassas propostas para revestimento.
- g) Contribuir para o desenvolvimento de novos materiais aplicados na construção civil, bem como para redução dos passivos ambientais de maneira sustentável.

## CAPÍTULO II

*“O desenvolvimento é a parte principal e mais extensa do trabalho ou corpo do mesmo. Consiste na fundamentação lógica do tema cuja finalidade é expor, explicar, demonstrar as suas principais idéias, com objetividade, clareza e impessoalidade (RUIZ, 1996).”*

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Mineração e Reaproveitamento de Resíduos Sólidos

O Brasil é o terceiro maior produtor de minério de ferro, conforme a Conferência das Nações Unidas para o Comércio e o Desenvolvimento (Unctad). Sua produção em 2011 foi de 390 milhões de toneladas, o que equivale a 20% do total mundial (1,92 bilhões de toneladas) ficando atrás apenas da China e Austrália. Entretanto, considerando-se as reservas em termos de ferro contido no minério, o Brasil assume lugar de destaque no cenário internacional. Os maiores estados produtores de minérios em 2012, de acordo com o recolhimento da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais, são: MG (53,2%), PA (28,6%), GO (4,1%), SP (2,8%), BA (2,0%) e outros (9,3%) (IBRAM, 2012). Prevê-se que em 2013, o minério de ferro continuará a ocupar o 1º lugar na lista de produtos que geram as maiores rendas nas exportações brasileiras (Gráfico 2.1).

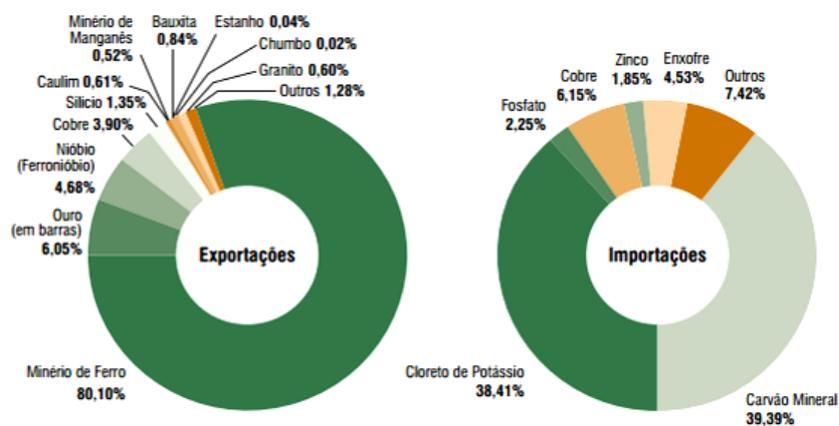


Gráfico 2.1–Balança mineral brasileira, exportações e importações,% do valor em dólares (IBRAM,2012)

Esses dados demonstram a importância da produção mineral para o país, como também para o estado de Minas Gerais. No caso de Minas Gerais, essa importância além de econômica é histórica, pois o processo de extração mineral condiz com o processo de criação de várias de suas cidades, assim como a própria legitimação do estado mineiro. O início da atividade mineradora no estado de Minas Gerais remonta ao século XVII, época marcada pela descoberta de jazidas de ouro e diamante. Tais reservas eram superficiais, não necessitavam de técnicas elaboradas para serem exploradas e conseqüentemente apresentavam danos severos ao meio ambiente. A partir do século XIX a atividade mineradora no Brasil sofreu um processo de decadência, apesar dos esforços do governo e do investimento de capital estrangeiro. No início do século XX, em 1910, descobriram-se as jazidas de ferro do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. Mesmo que a descoberta tenha sido de suma importância à exploração do minério de ferro na região iniciou apenas em 1940. Pouco tempo depois houve um forte crescimento da atividade mineradora brasileira, assim como as primeiras iniciativas de reaproveitamento dos resíduos procedentes da mineração.

No contexto atual, com o aumento da produtividade do setor de mineração ocorrido no Brasil como em outros países, devido à crescente demanda dos países em desenvolvimento por ambientes construídos de melhor qualidade; aumentou-se, conseqüentemente, a necessidade de diminuir o impacto ambiental causado pela cadeia produtiva e pelos processos construtivos. Desta forma, o Brasil e outros países têm incentivado estudos que visam o reaproveitamento dos resíduos da mineração contidos nas barragens, e alguns dos resultados obtidos indicam que os usos alternativos desses resíduos podem apresentar-se viáveis e lucrativos. Entre estes estudos realizados pode-se citar:

Yellishetty et al (2008) analisaram a adequação de resíduos de uma mina de ferro da Índia para uso na construção civil e concluíram que as partículas com granulometria de 12,5 a 20 mm são bastante adequadas para uso na fabricação de concreto, o que significa cerca de 50 a 60% do total dos resíduos. As partículas com granulometria entre 4,75 a 12,5 mm também foram avaliadas com êxito quando utilizadas como areia para

obras de construção diversas e, por fim, as partículas inferiores a 4,75 mm se mostraram adequadas à fabricação de tijolos.

Souza et al (2008) incorporaram o rejeito de minério de ferro, advindo de uma usina de pelotização, à massa argilosa utilizada para fabricação de cerâmica, a fim de avaliar as alterações na micro-estrutura do material. Os resultados mostraram que a adição do rejeito à massa argilosa altera significativamente a microestrutura da cerâmica, sendo que incorporações de até 10% em peso do rejeito são benéficas para a qualidade da cerâmica por meio da redução da porosidade aberta.

Chen et al (2010) avaliaram a possibilidade de utilização de rejeitos da mineração de ferro da China para construção de tijolos ecológicos. Além dos rejeitos foram adicionadas ao processo argila e cinzas, obtidas de precipitadores eletrostáticos de uma usina térmica, para melhoria da qualidade do tijolo. A conclusão demonstra a possibilidade de se fabricar tijolos utilizando-se rejeitos da mineração de ferro, podendo a porcentagem de rejeito utilizado ser de até 84% do peso total dos compostos, observando-se os teores de água, pressão, tempo e temperatura.

Estudos realizados em diferentes locais do Brasil também apontam resultados satisfatórios no que diz respeito à utilização de rejeitos de mineração de ferro como elementos construtivos. Paulo Abib ao tentar diminuir a porcentagem de fosfato nos rejeitos de mineração da Serrana S.A., encontrou uma solução que também permitiu o reaproveitamento do rejeito como matéria-prima na fabricação de cimento Portland (BARRETO, 2001). Coelho (2008) analisando a utilização de rejeito de uma mina de ferro do Quadrilátero Ferrífero, afirma que os rejeitos de mineração constituem agregados potencialmente interessantes como materiais de construção, desde que atendidas às premissas de melhoria de suas propriedades geotécnicas. Chaves (2009) avaliou o comportamento de argila do pólo cerâmico da grande Natal/ Rio Grande do Norte enriquecida com resíduos da mineração de ferro e obteve resultados de tensão de ruptura à flexão, em todas as amostras com até 10% de resíduos da mineração de ferro, superiores a matriz sem incorporação de resíduos. Análises realizadas com material coletado na barragem de rejeito da mina de Gongo Soco, Quadrilátero Ferrífero, constataram grande potencial de uso do rejeito de minério de ferro como agregado

alternativo para revestimentos asfálticos com ganhos de natureza ambiental quando comparados aos agregados pétreos (SILVA, 2010).

Sabe-se também que o processo construtivo demanda uma enorme quantidade de materiais – algo entre 4 a 7 toneladas por habitante a cada ano; ressaltando que no Brasil, cerca de 1/3 dos recursos naturais vão para a produção de materiais cimentícios, e que alguns países já são forçados a importar agregados (AGOPYAN; JOHN, 2011). A demanda por agregados da construção civil partiu de 460 milhões de toneladas em 1997 para 673 milhões de toneladas em 2011, crescimento correspondente a 46,2%. Sendo que a proporção de consumo de agregados por habitantes em 2011 foi correspondente a 3,50 t. Comparativamente aos países desenvolvidos, por exemplo, Estados Unidos, o Brasil ainda está muito distante do valor médio histórico de 6 a 7 toneladas por habitante/ano (IBRAM, 2012).

O Gráfico 2.2, apresentado a seguir, demonstra a produção de agregados em milhões de toneladas por ano no Brasil.

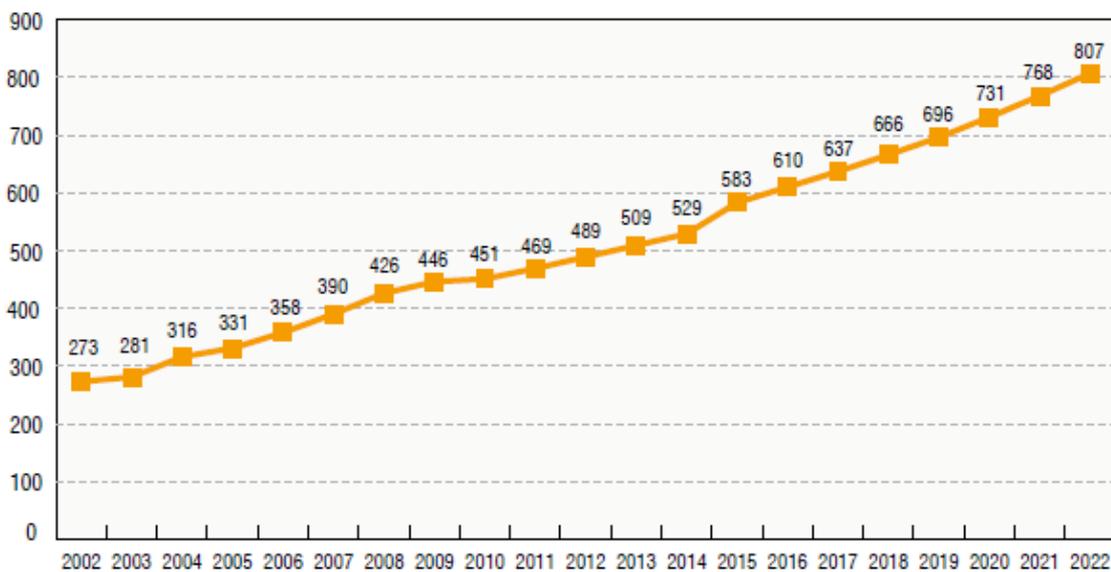


Gráfico 2.2 – Produção de agregados em milhões de toneladas por ano no Brasil (IBRAM, 2012)

Percebe-se assim que os dados apresentados indicam, a princípio, uma perspectiva favorável para o reaproveitamento dos resíduos sólidos das barragens de rejeito como matéria prima na produção de materiais construtivos, atitude que implicará diretamente na redução da extração de recursos naturais para este fim, tornando-se assim um

procedimento ambientalmente correto. Optou-se neste caso, dentre os materiais construtivos existentes, pelas argamassas, devido serem amplamente utilizadas na construção civil brasileira e pelo grande consumo de materiais, principalmente de agregados naturais, na sua execução.

## **2.2. Argamassas**

Várias são as contribuições que as argamassas proporcionaram para a engenharia, bem como para o setor da construção civil ao longo desses anos. Entre essas, a contribuição no assentamento de pedras e tijolos entre si formando as alvenarias e favorecendo a distribuição dos esforços, do mesmo modo na colagem de revestimentos cerâmicos e pétreos em paredes e piso. As argamassas também servem como revestimento, pois atuam como reguladoras e protetoras da superfície de paredes e pisos além de possuírem características de isolante térmico e acústico. Contribuem para o preenchimento de lacunas nas alvenarias e são excelentes materiais para compor mástiques de rejunte, além de participar como consolidantes em fraturas de alvenarias, em microfissuras de revestimento, entre outros (RIBEIRO, 2009). Dadas as suas propriedades, as argamassas tornaram-se muito úteis à construção, e tem sido objeto de interesse a sua evolução, de forma a encontrar soluções cada vez mais engenhosas.

No antigo Egito, assim como no Oriente Médio, encontram-se vestígios do uso da argamassa com gesso impuro como material ligante em seus monumentos. Mais tarde, a cal calcinada teria sido usada pelos Gregos e Romanos, observa-se que durante séculos que a cal foi o ligante mais utilizado. Descobriu-se depois que a calcinação de rochas para a produção de cal que contivessem certa porcentagem de argila podia fornecer maior resistência ao produto final e certo caráter hidráulico, ou seja, capaz de permanecer seca em ambientes de elevada umidade relativa, como ambientes marinhos e fluviais, e mesmo debaixo d'água, sem contato com o ar (MARQUES, 2005).

Entretanto, somente no século XIX, que químicos, engenheiros e construtores europeus começaram a se interessar pela fabricação do cimento. O ritmo acelerado das construções do período pós-guerra exigia busca por materiais que adquirissem suas propriedades de estabilidade mais rapidamente, e que tivessem boas propriedades

mecânicas. Então, em 1824, o inglês Joseph Aspdin registra a patente do processo de fabricação de um ligante hidráulico a base de uma mistura de calcário e argila. Este processo possui uma ligação muito estreita com a cal hidráulica, já que se baseia na calcinação da pedra calcária com 20-30% de argila, mas a temperaturas ligeiramente superiores as da calcinação para obtenção da cal (LANAS, et.al., 2004). Este produto resultante da calcinação da mistura anteriormente relatada adquiriu o nome de Portland, devido sua coloração assemelhar com as das pedras naturais da ilha de Portland, que também possuem propriedades hidráulicas. O nome Portland perdura até a atualidade, pois se refere a um tipo de cimento ainda muito utilizado na construção civil. Porém o cimento obtido por Aspdin tinha fracas propriedades, não muito distintas a de uma cal hidráulica, no entanto a sua patente deu-lhe prioridades para o uso do termo cimento Portland, embora pouco semelhe ao cimento usado atualmente.

Cardoso (2009) apresenta um modelo microestrutural reológico de argamassas (Figura 2.1), descrevendo-as de modo simplificado como suspensões bifásicas concentradas, compostas por fração “grossa” inerte (areia) com partículas entre 100 $\mu$ m e 2mm aproximadamente, e uma pasta reativa de água e finos, geralmente cimento e cal. Neste modelo micro estrutural reológico consideram-se as argamassas como produtos de características multifásicas, posto que possam ter em suas composições pozolanas, fíler (finos inertes), fibras (naturais e sintéticas) e teores consideráveis de ar incorporado. Deste modo, configura-se um comportamento reológico complexo além das diversas solicitações a que são submetidas nas etapas de preparo e aplicação.

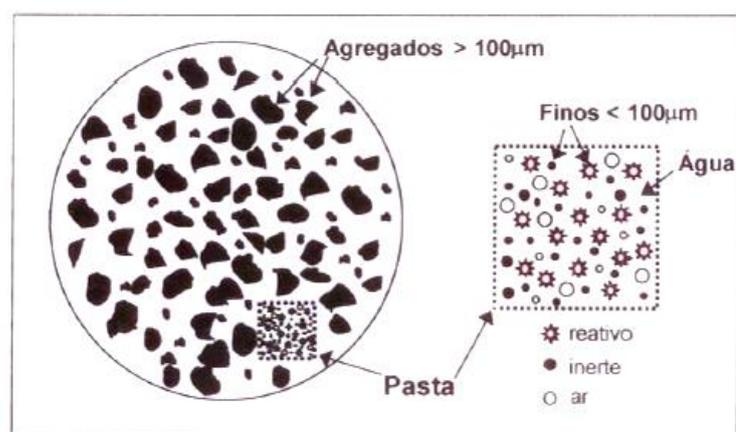


Figura 2.1 - Modelo microestrutural das argamassas (CARDOSO, 2009)

Em geral, uma argamassa adequada ao uso é aquela composta por uma mistura ideal de aglomerantes de boa reatividade, com agregado de boa qualidade e variedade e uma quantidade correta de água limpa. Outro aspecto importante seria o procedimento correto, bem como condições ambientais apropriadas, para a mistura dos materiais componentes a fim de se obter uma argamassa de qualidade; não esquecendo que a forma como a argamassa é aplicada na alvenaria, bem como o processo de cura interferem diretamente no resultado final do produto.

O agregado melhora a durabilidade da argamassa incrementando a sua resiliência (capacidade de resistir a impactos), barateando o produto final e eliminando os inconvenientes do fissuramento que advém da perda de água e do aumento de volume (RIBEIRO, 2009). Fatores como composição mineralógica e granulométrica, dimensões do agregado, forma e rugosidade superficial dos grãos devem ser considerados durante a escolha dos agregados. Quanto aos aglomerantes, esses são os responsáveis pelo aumento da resistência mecânica e resistência a água das argamassas. Fatores como disponibilidade e custo, forma e tempo de produção também devem ser considerados durante a escolha dos aglomerantes.

No entanto, sabe-se que as qualidades dos materiais constituintes das argamassas, bem como a forma de execução e aplicação dessas misturas, influenciam diretamente no desempenho de sua função.

### **2.3. Função das Argamassas**

Todo material destinado a construção civil, utilizado de forma isolada ou como parte de um sistema, possui funções definidas a serem desempenhadas na edificação. Quanto às argamassas para revestimento de alvenarias têm-se como principais funções:

- promover o acabamento apropriado das superfícies dos elementos de vedação;
- impermeabilizar as superfícies;
- regularizar as superfícies;
- absorver as deformações naturais; e
- proteger mecanicamente as superfícies constituídas por sistemas de impermeabilização ou isolamento termoacústico.

De acordo com Recena (2008), quanto às argamassas para assentamento de alvenarias têm-se como principais funções:

- unir de forma solidaria os elementos constituintes da alvenaria;
- garantir a adesão ao substrato dos elementos de revestimento;
- distribuir de forma uniforme os esforços atuantes; e
- garantir a impermeabilidade das alvenarias sem revestimentos.

Recena (2008) menciona que para alcançar resultados positivos quanto às funções relacionadas, as argamassas devem apresentar as seguintes propriedades:

- eficiência na capacidade de retenção de água;
- estabilidade química eficiente, perante aos agentes de deterioração e sem a ocorrência de alterações em seus constituintes representadas por reações retardadas.
- estabilidade física a partir de uma resistência mecânica compatível com as solicitações determinadas por ciclos alternados de molhagem e secagem;
- trabalhabilidade apropriada à função desempenhada;
- capacidade de aderir ao substrato formando um sistema com resistência de aderência compatível com as solicitações; e
- módulo de elasticidade tão baixo (menos de 10GPa) quanto o necessário para dotar as argamassas de capacidade de absorver por deformação tensões internas geradas pela movimentação da estrutura e/ou dos materiais que a compõem.

## **2.4. Características das Argamassas**

### **2.4.1. Adesão Inicial**

A adesão inicial da argamassa no estado fresco ao substrato é a propriedade que caracterizará o comportamento futuro do conjunto substrato/revestimento quanto ao desempenho decorrente da aderência (CINCOTTO et al, 1995). Esta adesão inicial esta relacionada à capacidade que a argamassa apresenta para ancorar na superfície do substrato pela penetração da pasta nos poros seguidos do endurecimento gradual da pasta. A aderência, a princípio, é obtida pelo vácuo formado no processo de deformação que a argamassa experimenta quando projetada sobre a superfície do substrato. A força de projeção da argamassa determina sua deformação sobre o substrato no momento do

impacto. No instante seguinte a tendência é de a argamassa retornar já que parte da energia tende a ser dissipada pela reflexão que é impedida pelo vácuo formado pela distensão da argamassa. Até que a pressão seja equilibrada a argamassa manter-se-á aderida ao substrato tempo suficiente para a efetivação da microaderência (RECENA,2008).

Segundo Carasek (2007) a adesão inicial está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta de aglomerante, especificamente a sua tensão superficial. A redução da tensão superficial da pasta favorece a “molhagem” do substrato, reduzindo o ângulo de contato entre as superfícies e implementação da adesão. Esse fenômeno propicia um maior contato físico da pasta com os grãos de agregado e também com sua base, melhorando, assim, a adesão. Substratos com a superfície muito lisa definirão certamente sistemas que dificultam a adesão inicial das argamassas, bem como outros fatores relacionados às condições de limpeza do substrato (RECENA, 2008).

### **2.4.2. Plasticidade**

É a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a conservar-se deformada após a redução das tensões de deformação. De acordo com Cincotto et al. (1995), a plasticidade e a consistência são as propriedades que efetivamente caracterizam a trabalhabilidade, e são influenciadas pelo teor de ar aprisionado, natureza e teor de aglomerantes, além da intensidade de mistura das argamassas. Segundo Cascudo et al. (2005), a plasticidade adequada para cada mistura, de acordo com a finalidade e forma de aplicação da argamassa, demanda uma quantidade ótima de água a qual significa uma consistência ótima, sendo esta função do proporcionamento e natureza dos materiais.

### **2.4.3. Trabalhabilidade**

A trabalhabilidade de uma argamassa refere-se à maior ou menor facilidade de dispor a argamassa na sua posição final, cumprindo adequadamente sua finalidade sem comprometer o bom andamento da tarefa em termos de rendimento e custo. Busca-se para atingir uma boa trabalhabilidade nas argamassas, a adequada interação entre a sua

consistência e coesão. A modificação da trabalhabilidade da argamassa estará sempre ligada diretamente à quantidade de água empregada em sua preparação desde que haja uma quantidade tal de material fino, preferencialmente aglomerante, suficiente para reter a água adicionada, garantindo a estabilidade de volume e a coesão necessária para promover a aderência instantânea sem a ocorrência de segregação de seus constituintes (RECENA, 2008). O excesso de água em uma argamassa pode ser prejudicial. Quando rompida à coesão entre a proporcionalidade de água e aglomerantes, sendo este material fino insuficiente em reter a água adicionada, este excesso de água tornará a argamassa fluída, menos trabalhável, incapacitando-a para a função que se destina.

#### **2.4.4. Retenção de água**

A retenção de água é a capacidade da argamassa no estado fresco de manter sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água por evaporação, sucção do substrato ou pela hidratação do cimento e carbonatação da cal (CINCOTTO et al, 1995). De acordo com Rosello (1976) citado por Selmo (1989) as argamassas tendem a conservar a água necessária para molhar as partículas dos aglomerantes e do agregado miúdo e a água em excesso é cedida facilmente, devido à absorção do substrato. Segundo Recena (2008) quanto maior a quantidade de água utilizada na preparação da argamassa, igualmente será maior o volume de água a ser evaporado, ocasionando sempre a retração por maior que seja a capacidade de uma mistura em reter água. A capacidade das argamassas em reter água é também de muita importância na garantia da aderência aos substratos, evitando o deslocamento de porções de argamassa empregadas em revestimentos de paredes e garantindo a homogeneidade das alvenarias pela manutenção da união dos vários elementos que a compõem na formação de um todo compacto.

#### **2.4.5. Aderência ao Substrato**

A aderência ao substrato está entre as principais características das argamassas. Refere-se à capacidade da argamassa de manter-se aderida ao substrato, seja no assentamento, com finalidade de unir elementos em uma alvenaria, ou em revestimentos, mesmo diante de movimentações diferenciadas, choques térmicos, impactos e outras

solicitações (RECENA, 2008). Carasek (2007) informa que a aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno essencialmente mecânico devido, basicamente, a penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação.

Taha & Shrive (2001) citados por Carvalho Jr et al. (2005) descrevem que a aderência à alvenaria 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: formada pelo intertravamento mecânico dos produtos da hidratação do cimento, transferidos para a superfície dos poros dos blocos de alvenarias devido ao efeito da sucção ou absorção capilar.

A aderência das argamassas está essencialmente relacionada às condições do substrato (porosidade e absorção de água), a textura superficial, a resistência mecânica, bem como as condições de execução do revestimento. Outros aspectos tais como a temperatura do ar, sua velocidade e sua umidade podem interferir no desempenho da aderência da argamassa. A resistência de aderência da interface argamassa/substrato depende, ainda, da capacidade de retenção de água, da consistência e do teor de ar aprisionado da argamassa (SILVA, 2006).

#### **2.4.6. Absorção de Deformações**

Outra característica está associada à capacidade que as argamassas possuem de absorver deformações. A capacidade das argamassas em absorver esforços por deformação elástica pode ser relacionada com seu módulo de elasticidade. Segundo Sabbatini (1984), elasticidade é a capacidade que a argamassa no estado endurecido apresenta em se deformar sem apresentar ruptura quando sujeita a solicitações diversas, e de retornar à dimensão original inicial quando cessam estas solicitações. De acordo com Cincotto et al. (1995), a elasticidade é, portanto, uma propriedade que determina a ocorrência de fissuras no revestimento e, dessa forma, influi decisivamente sobre o grau de aderência

da argamassa à base e, conseqüentemente, sobre a estanqueidade da superfície e sua durabilidade.

### **2.4.7. Resistência Mecânica**

Em geral, quanto à resistência mecânica das argamassas de revestimento, esta propriedade é relacionada à capacidade que os revestimentos têm em suportarem as ações mecânicas de diferentes naturezas, devidas à abrasão superficial, ao impacto e as movimentações higrotérmicas (BAIA e SABATTINI, 2000). Com relação à resistência mecânica das argamassas, principalmente a resistência à compressão, sabe-se que a argamassa de assentamento deve adquirir rapidamente alguma resistência, permitindo o assentamento de várias fiadas no mesmo dia, bem como desenvolver resistência adequada ao longo do tempo. Apesar disso, não são necessárias resistências altas das argamassas para garantir o bom desempenho das paredes; pelo contrário, a resistência da argamassa não deve ser nunca superior a resistência dos blocos. Isso ocorre porque a argamassa exerce pouca influência na resistência a compressão da alvenaria, comportamento explicado pelo estado multiaxial de tensões ao qual a junta de argamassa está submetida, devido à restrição de deformações laterais que os blocos impõem à junta (ISAIA et al., 2007).

## **2.5. Classificação das Argamassas**

Uma vez compreendida as funções e características das argamassas, pode-se assim analisá-las e compará-las quanto a sua composição e comportamento, antes disso, para facilitar, é necessário classificá-las.

A NBR 13529/13 descreve a classificação das argamassas segundos vários critérios:

- quanto a propriedades: argamassa de revestimento, comum, aditivada, colante, para rejuntamento, de proteção radiológica, hidrófuga, de impermeabilização, termoisolante, refratária, acústica;
- quanto à forma de preparo ou fornecimento: argamassa dosada em central, preparada em obra, industrializada e mistura semipronta para argamassa;
- quanto à natureza do aglomerante: argamassa aérea e hidráulica;

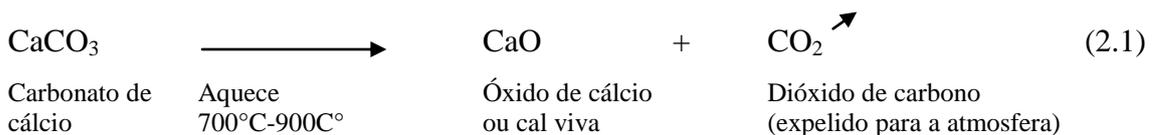
- quanto ao número de aglomerantes: argamassa simples e mista;
- quanto ao tipo de aglomerante: argamassa de cal, de gesso, de cimento e de cimento e cal.

Usualmente nas obras, as argamassas são classificadas pelo tipo de aglomerante, ou seja, em argamassas de cal, argamassas de cimento Portland e argamassas de cimento Portland e cal, também conhecidas como argamassas mistas. As especificidades de cada uma destas argamassas serão descritas nos itens a seguir.

### 2.5.1. Argamassas de Cal

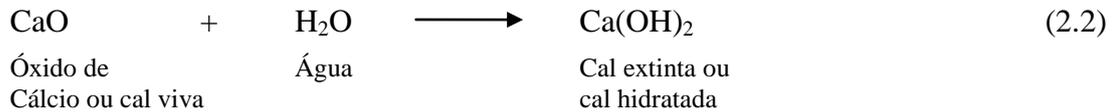
As argamassas de cal são as argamassas históricas por excelência no Brasil, por vários motivos, a cal sempre foi um aglomerante barato e produz uma argamassa resistente às intempéries. Atualmente, com o uso de aditivos cada vez mais difundido, a cal tem sido abandonada em muitos casos. No entanto, sabe-se que essa prática pode afetar a durabilidade dos revestimentos (LEJEUNE, 1996).

A qualidade da argamassa de cal esta intimamente relacionada à qualidade da cal empregada. O material calcário utilizado no Brasil durante o período colonial, mesmo sendo um material rico, não proporcionava uma cal de excelente qualidade, pois era de origem biogênica (sambaquis ou mariscos frescos retirados do fundo do mar), proporcionando assim, mesmo quando a matéria-prima sofria boa lavagem, um produto final higroscópico, devido ao cloreto de sódio (sal marinho) residual (RIBEIRO, 2009). No entanto, atualmente, a cal é obtida pela extração de um material rico em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), presente em rochas calcárias, sendo que quando calcinado a uma temperatura entre  $700^\circ\text{C}$  e  $900^\circ\text{C}$ , forma-se desse processo o óxido de cal ou cal viva ( $\text{CaO}$ ) que é hidratada para ser usada na construção civil, passando a ser chamada de cal extinta ou cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).



Entretanto no processo, é importante não haver um calor demasiado ao calcinar o carbonato de cálcio, pois senão a cal que se obtém não irá reagir bem com a água e tenderá a formar petardos (grumos reativos de material).

A cal extinta é produto da reação da cal viva com a água.



O endurecimento da cal presente nas argamassas se produz pela reação com gás carbônico proveniente do ar (carbonatação). A cal tem, portanto, necessidade de contato com o ar e de uma secagem progressiva e lenta para um endurecimento de qualidade. A cal extinta tem, contudo, o inconveniente de envelhecer rapidamente já que a sua cura se faz predominantemente pelo contato com o ar. Sendo assim, recomenda-se que a cal extinta permaneça o menor de tempo armazenada. A Associação Brasileira dos Produtores de Cal (ABPC) estabelece seis meses após a fabricação como prazo de validade do produto. No entanto profissionais da área orientam não utilizar o material fabricado a mais de três meses, a não ser que a pasta da cal extinta seja armazenada em um recipiente e mantida submersa por uma lâmina d'água de um a dois centímetros de espessura, podendo assim ser armazenada indefinidamente. Uma longa permanência da cal na água favorece a formação de grandes cristais tabulares de cal hidratada (portlandita), o que melhora sensivelmente a sua plasticidade (RIBEIRO, 2009).

As argamassas de cal são argamassas simples, constituídas basicamente pela cal e por um agregado de granulometria variada. No estado fresco, a cal propicia maior plasticidade à argamassa, permitindo melhor trabalhabilidade e, conseqüentemente, maior produtividade na execução do revestimento. Outra propriedade no estado fresco é a retenção de água, importante no desempenho da argamassa, relativo ao sistema base/revestimento, por não permitir a sucção excessiva de água pela base (RAGO e CINCOTTO, 1999). No estado endurecido a capacidade de absorver deformações, devido seu baixo módulo de deformação, é de extrema importância no desempenho da argamassa, como apontam os dados da literatura, reunidos por Cincotto et al. (1985).

A principal desvantagem do uso da argamassa de cal é seu tempo lento de cura, entretanto, em obras de restauração de edifícios antigos é largamente utilizada devido às semelhanças de comportamento mecânico e físico com os materiais existentes e suas propriedades de flexibilidade e capacidade de reconstituição autógena de pequenas fissuras. Outra vantagem é que argamassas porosas como as de cal permitem a transpirabilidade e conseqüentemente a evaporação da umidade interna da parede (RIBEIRO, 2009).

## **2.5.2. Argamassas de Cimento Portland**

As argamassas de cimento Portland são argamassas simples e compostas por cimento, agregado miúdo e água. O cimento que constitui essas argamassas, designado comercialmente cimento Portland, é um aglomerante hidráulico resultante da moagem do clínquer, produto obtido pela calcinação de uma mistura crua de calcário e argila dosados e homogeneizados convenientemente (RIBEIRO et al., 2000). As argamassas compostas por cimento Portland, devido às propriedades do cimento, adquirem elevada resistência mecânica em pouco tempo, porém, tem pouca trabalhabilidade e baixa retenção de água. São indicadas para empregos que exigem maior trabalhabilidade, requisitos de aderência, impermeabilidade, resistência e durabilidade. Este tipo de argamassa tem emprego específico para certas situações, como por exemplo, na confecção de revestimentos de alvenaria; é muito utilizada na confecção de chapisco para aumentar a resistência de aderência do revestimento de argamassas mistas.

Adquirem resistências iniciais e finais bastante elevadas em comparação com outras argamassas. As argamassas de cimento Portland possuem alta resistência à compressão, porém pouca flexibilidade e alto custo em relação à cal. O processo de cura interfere diretamente na qualidade final e na resistência dessas argamassas. A cura úmida proporciona um material demasiadamente forte, possibilitando obter um material tão resistente à compressão como as mais duras pedras naturais (RIBEIRO, 2009).

Quanto a sua plasticidade, as argamassas de cimento Portland que possuem misturas pobres não possuem trabalhabilidade adequada, no entanto, as com misturas ricas causam problemas de retração indesejáveis. Em se necessitando as características de

trabalhabilidade podem ser conseguidas com o emprego de aditivos plastificantes inorgânicos.

Variados tipos de cimentos pode constituir essas argamassas, porém cada um terá misturas de cimento Portland comum com proporções distintas de escória de alto-forno, com percentual de 0 a 70%. Esta não constitui aglomerante hidráulico propriamente dito, mas pode combinar com a cal livre existente no cimento hidratado, endurecendo lentamente e proporcionando um produto final com qualidades diferentes para diferentes finalidades (BAUER, 2000). A tabela 2.1 apresenta os tipos de cimento Portland, algumas de suas características e respectiva normalização brasileira.

Tabela 2.1 – Cimentos Portland, características e normalização brasileira (ABCP, 2002)

<i>Cimento Portland (tipo)</i>	<i>Norma NBR ABNT</i>	<i>Sigla</i>	<i>Classe</i>	<i>Clínquer Gesso (%)</i>	<i>Material carbonático (flier – F)</i>	<i>Pozolana (Z)</i>	<i>Escória (E)</i>
<i>Comum</i>	5732	<i>CP I CP I S</i>	25/32/40	100 99-95		0 0-5	
<i>Composto</i>	11578	<i>CP II E CP II Z CP II F</i>	25/32/40	94-56 94-76 94-90	0-10 0-10 6-10	0 6-14 0	6-34 0 0
<i>Alto Forno</i>	5737	<i>CP III</i>	25/32/40	65-25	0-5	0	35-70
<i>Pozôlanico</i>	5736	<i>CP IV</i>	25/32	85-45	0	15-50	0
<i>Alta Resist. Inic. (ARI)</i>	5733	<i>CP V</i>	-	100-95	0-5	0	0
<b>Outros tipos</b>							
<i>Resistente a sulfatos</i>	5737	-	25/32/40	-	-	<i>Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS.</i>	
<i>Baixo calor de hidratação</i>	13116	-	25/32/40	-	-	<i>Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC.</i>	
<i>Branco</i>	12989	<i>CPB estrut. CPB não estrut.</i>	25/32/40 -	100-75 75-50	0-25 26-50	CPB	
<i>Para poços Petrolíferos</i>	9831	<i>CPP</i>	G	<i>Clínquer e gesso, não especificados. Precauções para garantir que o produto conserve as propriedades reológicas (plasticidade) necessárias nas condições de pressão e temperatura elevadas presentes a grandes profundidades.</i>			

Quanto às patologias e conservação das argamassas de cimento Portland, de acordo com Ribeiro (2009) as argamassas de revestimento em que predomina o cimento Portland – ao contrário das argamassas a base de cal que deterioram principalmente por pulverulência – costumam degradar por deslocamento, soltando-se do substrato no qual estavam aderidas. Conjuntamente, e/ou, anteriormente, aparecem fissuras e trincas que devem ser tratadas no sentido de se voltar à antiga coesão do revestimento. O deslocamento, ou soltura de uma placa de revestimento de argamassa de cimento do seu substrato no qual a placa estava anteriormente fixada, pode ser tratado com um procedimento de readesão da placa na alvenaria, caso a placa apresente ainda características de integridade física, não se encontrando nem pulverulenta nem demasiada trincada.

As trincas e fissuras, em geral, são causadas pela retração hidráulica do cimento, que é ocasionada pela perda de água durante a mistura da argamassa, ocasionando uma heterogeneidade na reação do cimento, ou seja, algumas das partículas de cimento podem acabar por não reagir pela falta da água que evaporou durante a mistura da argamassa. Fachadas compostas de argamassas de cimento Portland executadas de forma inapropriada podem apresentar uma série de problemas em sua camada superficial, que acabam por comprometendo o apelo arquitetônico dessas construções, dando um aspecto de descuido as cidades.

Ribeiro (2009) recomenda para o fechamento de trincas e fissuras dos revestimentos dessas fachadas, a utilização de produtos fornecidos pelo mercado especificamente com este propósito: argamassas polimerizadas ou selantes acrílicos para juntas e fissuras. Estes produtos apresentam a conveniência de se encontrarem prontos para o uso, de terem ótima aderência à maioria dos materiais de construção, de conterem biocidas e fungicidas e de apresentarem excelente desempenho frente às dilatações térmicas. Como inconveniente apresentam relativa resistência ao envelhecimento e ao intemperismo, assim como a maior parte das resinas sintéticas. Contudo, se forem protegidos por uma camada de pintura de acabamento a vida útil do produto pode se estender por mais alguns anos.

### 2.5.3. Argamassas de Cimento Portland e Cal

As argamassas de cimento Portland e cal são classificadas como mistas devido ao número de aglomerantes, e também conhecidas como argamassas bastardas. Historicamente, no Brasil o uso de argamassas mistas foi predominante no final do século XIX, devido ao hábito de incorporar o saibro nestas argamassas e posteriormente a cal a fim de baratear os custos de sua composição. Outro motivo seria pelo fato destas argamassas conformarem uma boa solução para a questão da cura lenta das argamassas constituídas somente de cal, principalmente em locais úmidos, além de incorporar as boas propriedades dos dois materiais (RIBEIRO, 2009).

As argamassas mistas, em geral, são dosadas utilizando uma combinação de cimento e cal como aglomerante, areia como agregado mineral fino e água, em proporções que variam de acordo com a sua aplicação. Sabe-se que a proporção entre esses materiais influenciam as propriedades da mistura no estado fresco e endurecido e determina seu desempenho ao ser utilizado. Segundo Dafico (2007) seu uso é baseado em receitas empíricas consideradas de desempenho adequado para cada tipo de utilização, receitas essas baseadas em proporções em volume aparente dos materiais componentes.

Em cada traço são consideradas as propriedades que se deseja obter em cada mistura. A cal é um material essencial quando se deseja obter propriedades específicas em uma argamassa. De acordo com Paiva (2007), o plastificante mais recomendável a ser utilizado na preparação de argamassas é a cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) por possuir desempenho plastificante comprovado em diversos institutos de pesquisa e ter seu uso normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Segundo Guimarães (1998), além de contribuir para uma melhora significativa nas propriedades das argamassas, a adição de cal possui vantagens do ponto de vista econômico e ambiental. Como permite usar menos quantidade de agregados para uma mesma quantidade de concreto, a adição de cal diminui o preço do metro cúbico de argamassa. Além disso, a utilização da cal tem vantagens ambientais devido a algumas de suas propriedades como alcalinidade (pH maior que 11,5), que torna o meio mais asséptico, e a cor branca que ao clarear a mistura permite refletir maior quantidade de

raios solares, que transmite menos calor e diminui a necessidade de iluminação artificial.

A cal possui baixo módulo de elasticidade, com isso, quando adicionada à argamassa, potencializa sua deformabilidade elástica, o que acarreta melhor absorção das acomodações iniciais da estrutura. A resistência à compressão é uma das características das argamassas que é afetada pela adição de cal à mistura. Ainda, segundo Paiva (2007), a cal hidratada atua diminuindo essa resistência fazendo com que ela seja compatível, no caso das argamassas de assentamento, com as exigências feitas para as alvenarias estruturais. A cal hidratada, quando adicionada às argamassas de cimento e areia, introduz grandes vantagens do ponto de vista econômico, ambiental e da melhoria da qualidade de desempenho. Dentre as características, ressalta-se a função de aglomerante, a trabalhabilidade, a resistência à penetração de água, a capacidade de retenção de água, além das questões da deformabilidade e da resistência à compressão.

Em suas pesquisas, Oliveira (2006) e Guimarães (1998) afirmam que as argamassas que utilizaram a cal em sua mistura, argamassas mistas, mantêm grande atividade química ao longo do tempo, e com isso têm a propriedade de refazer suas fissuras. Enquanto houver hidróxido de cálcio e magnésio livres na massa, persiste essa auto reconstituição pela presença de reações químicas que preenchem as descontinuidades, ocasionadas pela água que flui entre seus poros.

## CAPÍTULO III

*“Escolher o método adequado nem sempre é tarefa fácil para o pesquisador, já que este deve ter o devido cuidado na determinação da pertinência dos caminhos a percorrer de modo que os resultados possam ser cientificamente confiáveis pelo uso correto dos critérios metodológicos, mas, que, por outro lado, que estes procedimentos não se sobreponham em importância como parâmetro de validação e certificação da qualidade do estudo realizado (BASTOS, 2004).”*

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

Os materiais utilizados nas argamassas experimentais foram cimento Portland CP III 40 RS e Cal Hidratada CH I, como aglomerante, sendo que o rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) em algumas das argamassas foi utilizado em substituição total ao agregado natural e em outras com substituição proporcional a cal hidratada. Argamassas naturais, constituídas sem a presença do resíduo (RBMF), também foram executadas a fim de servirem como referência em análises comparativas entre seus dados e os das argamassas compostas com o agregado reciclado (RBMF).

##### 3.1.1. Rejeito de Barragem de Minério de Ferro

A princípio foi realizada a identificação da barragem, em seguida, do ponto de coleta das amostras representativas, conforme apresentado na Figura 3.1. A determinação do ponto de coleta dessas amostras ocorreu em virtude do fácil acesso e segurança na execução da coleta, sendo assim, optou-se pela região de praia, ou seja, região localizada as margens da barragem em proximidade dos dutos de alimentação.



Figura 3.1 – Locação do ponto de coleta das amostras representativas

Posteriormente, o rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) utilizado como matéria prima para a produção de argamassas, foi coletado segundo critérios da NBR6457/86. Após a coleta, as amostras do rejeito (RBMF) foram transportadas e depositadas no pátio do laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC), do Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas – UFOP, onde se processaram as operações de preparação destas amostras para a caracterização. As amostras foram secas em estufa, destorroadas, peneiradas e armazenadas em sacos plásticos hermeticamente fechados e identificados, distintos conforme a granulometria, rejeito (RBMF) retido ou passante na peneira #200 (ASTM).

Análises laboratoriais (FRX) possibilitaram identificar que as amostras de rejeito (RBMF) são compostas essencialmente por óxidos de silício, óxido de alumínio e óxido ferro.

É importante ressaltar que os rejeitos de minério de ferro apresentam, em geral, grande heterogeneidade em suas características em função das diferenças do processo de beneficiamento do minério, do tipo de minério bruto ou mesmo da variabilidade das frentes de lavra e da sua posição na barragem de rejeito. Mudanças na litologia no maciço rochoso da jazida e nos processos de tratamento do minério de ferro podem resultar em variações nas características dos rejeitos, tais como, volumes produzidos, granulometria, densidade, e forma dos grãos que compõem o rejeito (D'AGOSTINO,

2008).O rejeito pode também apresentar particularidades em função do local onde em que foram depositados. Diferentes regiões do reservatório podem apresentar características granulométricas, mineralógicas e estruturais diferentes em função das variáveis que controlam os processos de descarga da lama (PRESOTTI, 2002).

### **3.1.2. Areia**

A areia natural utilizada como agregado nas argamassas experimentais é composta basicamente por sílica. Areia de procedência das jazidas do Rio Fonseca no distrito de Fonseca em Alvinópolis, Minas Gerais. Esta areia é limpa, característica relevante na análise e escolha do material, pois se sabe que a presença de substâncias nocivas na areia, por exemplo: matéria orgânica, torrões de argila, materiais carbonosos e pulverulentos, sais de sulfatos e cloretos, podem prejudicar o processo de endurecimento dos aglomerantes, diminuindo assim a resistência final das argamassas, podendo provocar possíveis desagregações.

Para garantir a qualidade almejada das argamassas experimentais e dos ensaios, a areia foi seca em estufa, em seguida peneirada e armazenada em sacos plásticos hermeticamente fechados e identificados. Os procedimentos descritos foram realizados no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC), do Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas – UFOP.

### **3.1.3. Cal**

A cal utilizada no experimento foi a Cal hidratada CH I, tipo cálcica, produzida pela empresa ICAL de acordo com os requisitos da NBR 7175/03, com disponibilidade e custo acessíveis. Indicada para preparo de argamassa de emboço, reboco e assentamento de tijolos e blocos. Observou-se durante a aquisição do produto a data de fabricação, sendo esta inferior a três meses, e levou-se em consideração, também, as datas previstas para a realização dos ensaios. Isso devido ao fato de que a cal com tempo de produção superior a este previsto pode comprometer na integridade dos resultados dos ensaios das argamassas. Após sua aquisição, a cal foi armazenada em recipientes plásticos de modo a preservar suas características, evitando contaminações e alterações de umidade.

A Cal Hidratada CH I usada nas argamassas experimentais encontra-se em conformidade com os critérios estabelecidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Sabe-se que para a verificação de sua qualidade os três tipos de cal existentes (CH I, CH II e CH III) são submetidos aos mesmos ensaios, mas há exigência de resultados melhores para a cal CH I, por ser considerada mais “pura” que as demais. As propriedades físicas da cal hidratada CH I pode ser observadas na Tabela 3.1, apresentada a seguir, cujos dados foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 3.1 – Propriedades físicas da cal hidratada aditivada CH I

<i>Propriedades físicas da Cal CH I</i>	
<i>Aspecto</i>	<i>Pó seco branco</i>
<i>Umidade</i>	0,76
<i>Plasticidade</i>	123,75
<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>	0,48
<i>Poder de incorporação de areia</i>	> 4,0
<i>Número de Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</i>	7200
<i>Massa unitária</i>	0,55
<i>Retenção de água</i>	> 80%
<i>Plasticidade</i>	> 120%
<i>Retido na peneira 0,600mm</i>	< 0,5
<i>Retido na peneira 0,075mm</i>	< 7,0

Fonte: Ical, 2012

Pela análise destas propriedades é possível verificar se a cal foi bem moída no processo de fabricação, se é econômica, se tem boa trabalhabilidade e se a argamassa desta cal retém a água da mistura ou a perde para a parede onde a argamassa foi assentada.

O ensaio de finura é procedido pelo peneiramento das amostras de cal, em duas peneiras diferentes, e em seguida, verifica-se quanto de material ficou retido em cada peneira. A NBR7175/03 especifica um valor máximo para estas quantidades: valores iguais ou inferiores a 0,5% para a peneira 0,600mm e valores iguais ou inferiores a 10% para a peneira 0,075mm, obtendo a cal CH I em análise, respectivamente, percentuais de

inferior a 0,5% e 7%. Quantidades maiores do que as especificadas demonstram que a cal não foi bem moída.

O resultado do ensaio de plasticidade indica se a argamassa feita com a amostra de cal está bem trabalhável. Uma mistura com boa plasticidade permite uma maior trabalhabilidade. A NBR 7175/03 especifica valores de plasticidade iguais ou superiores a 110, obtendo a cal CH I em análise plasticidade de 123,75 (NBR 9206/03).

A água utilizada na argamassa não deve ser, rapidamente, perdida para os tijolos ou para a estrutura de concreto onde esta argamassa foi aplicada, caso contrário, a argamassa poderá apresentar pequenas rachaduras, depois de seca, comprometendo sua estética. Sendo assim, o ensaio de retenção de água avalia então a capacidade da cal reter água. A NBR 7175/03 especifica que a cal CH I deve apresentar limites de retenção de água superiores a 75%, obtendo a cal em análise percentual superior a 80%.

Quanto ao poder de incorporação de areia, entende-se que a argamassa é constituída de areia, água e cal hidratada, se o pedreiro puder acrescentar mais areia na argamassa, sem prejudicar seu desempenho, mais econômica será a cal. Logo este teste verifica se a quantidade de areia incorporada na argamassa atende a um valor mínimo. A NBR7175/03 especifica que a cal CH I deve apresentar limites de porcentagens de incorporação de areia iguais ou superiores a 3,0%, obtendo a cal em análise percentual superior a 4,0%.

O ensaio de estabilidade verifica a presença de substâncias expansivas na cal hidratada, ou seja, que têm a tendência de reagir depois que a argamassa já está colocada e seca na parede. Pode ocorrer então uma expansão de volume dos grãos da argamassa e descolamento de pedaços de argamassa da parede. A NBR 7175/03 especifica que a cal CH I deve apresentar ausência de cavidades ou protuberâncias.

Quanto à composição química da cal Hidratada CH I, esta permite verificar a "pureza" da cal hidratada, avaliando o processo de fabricação do produto e a qualidade da sua matéria prima. Os ensaios químicos têm influência direta sobre o desempenho do produto. Além disso, a partir desses ensaios, pode-se verificar a existência de impurezas na matéria prima da cal hidratada. Quanto maior a porcentagem de impurezas, menor

será a quantidade de cal que o consumidor estará efetivamente comprando. A constituição química da cal hidratada do tipo CH I utilizada no experimento, pode ser observadas na Tabela 3.2, apresentada a seguir, cujos dados foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 3.2 – Propriedades químicas da cal hidratada aditivada CH I

<i>Propriedades químicas da Cal CHI</i>	
<i>Componentes</i>	<i>%</i>
<i>P.P.C. (perda por calcinação)</i>	<i>24,51</i>
<i>CaO</i>	<i>72,37</i>
<i>MgO</i>	<i>0,39</i>
<i>SiO<sub>2</sub> + RI (resíduo insolúvel)</i>	<i>1,77</i>
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>0,16</i>
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>0,36</i>
<i>SO<sub>3</sub></i>	<i>0,21</i>
<i>S</i>	<i>0,084</i>
<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>4,16</i>
<i>CaO disp. (sacarose)</i>	<i>65,92</i>

Fonte: Ical, 2012

O anidrido carbônico (CO<sub>2</sub>), ou gás carbônico, é liberado na queima das rochas que formarão a cal virgem. Se a rocha que deu origem à cal foi pouco "queimada", diminui o seu poder de "colar" na parede e de unir os outros constituintes da argamassa. A NBR7175/03 especifica para cal CH I tem limite igual ou inferior a 5%, tendo a cal em análise percentual de 4,16%.

Pela análise dos óxidos não hidratados, observa-se a quantidade de cal virgem que não hidratou com a água, obtendo a cal CH I valor igual ou inferior a 10%. Quanto maior essa quantidade, menor a fração de cal hidratada efetivamente no produto final e, quanto menos cal hidratada, menor a aderência da argamassa. Esse ensaio também verifica se há possibilidade de ocorrer o surgimento de pequenas "bolhinhas" na parede, que podem surgir na argamassa depois de seca, na parede (INMETRO, 2004).

Quanto maior for a fração de impurezas presentes na amostra, menor será a fração de óxidos totais. A NBR 7175/03 especifica para cal CH I tem limite igual ou superior a 90% de teor de óxidos totais, obtendo a cal em análise o percentual de 96,38%.

### 3.1.4. Cimento Portland

O cimento utilizado como aglomerante para produção das argamassas do trabalho experimental foi o cimento Portland CP III 40 RS, produzido pela empresa Cauê de acordo com os requisitos da NBR 5735/91 e NBR 5737/92, com disponibilidade e custo acessíveis. Aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e escória granulada de alto-forno, moído em conjunto ou em separado. De acordo com a Associação Brasileira de Cimentos Portland (ABCP) este cimento apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. É um cimento que pode ter aplicação geral em argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, entre outras.

O cimento usado nas argamassas experimentais encontra-se em conformidade com os critérios estabelecidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). As propriedades físicas do cimento Portland CP III 40 RS estão descritas na Tabela 3.3 apresentada a seguir.

Tabela 3.3 – Propriedades físicas do cimento Portland CPIII 40RS

<i>Propriedades físicas do cimento Portland CPIII 40RS</i>						
<i>Idades</i>	<i>Resistência à compressão (MPa) - 3d</i>	<i>Resistência à compressão (MPa) - 7d</i>	<i>Resistência à compressão (MPa) - 28d</i>	<i>Blainer cm<sup>2</sup>/g</i>	<i>Início de pega (min)</i>	<i>Fim de pega (min)</i>
<i>NBR5735 e NBR5737</i>	$\geq 12$	$\geq 23$	$\geq 40$	-	$\geq 60$	$\leq 720$
<i>CPIII 40 RS Cauê</i>	21*	31*	45*	4500*	200*	285*

*\*Valores médios obtidos do Mapa da qualidade do CP III 40 RS da unidade de Pedro Leopoldo/MG no período de janeiro a março de 2012.*

Fonte: Cimentos Cauê, 2012

A NBR 5735 exige que o cimento Portland CP III 40 RS apresente uma resistência a compressão, a 28 dias de idade, igual ou superior a 40 MPa, sendo que o cimento utilizado no experimento obteve resistência de 45 MPa. A sigla RS contida na classificação do cimento, significa que este material apresenta resistência a ataques por sulfatos.

A escolha por este cimento ocorreu em virtude das características de endurecimento mais lentas, como pode ser observada no tempo de início de pega do cimento (200 min), afim de que pudessem ser preservadas as características das argamassas em seu estado fresco, o maior tempo possível.

Quanto às propriedades químicas do cimento Portland CP III 40 RS, estas foram descritas na Tabela 3.4, apresentada a seguir.

Tabela 3.4 – Propriedades químicas do cimento Portland CPIII 40RS

<i>Propriedades químicas do cimento Portland CPIII 40RS</i>	
<i>Componentes</i>	<i>%</i>
<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>26,06</i>
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>8,46</i>
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>1,94</i>
<i>CaO</i>	<i>53,81</i>
<i>MgO</i>	<i>3,2</i>
<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>0,5</i>
<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>1,25</i>
<i>SO<sub>3</sub></i>	<i>2,46</i>
<i>Perda ao fogo – 1000<sup>o</sup>c</i>	<i>2,38</i>
<i>Resíduo insolúvel</i>	<i>0,40</i>

Fonte: Cimentos Cauê, 2012

Pela NBR 5735/91, percebe-se que os valores obtidos, referentes às propriedades químicas do cimento, se enquadram dentro do critério de qualidade especificado em norma, sendo estes: valores de perda ao fogo inferiores a 4,5; valores de resíduos insolúveis inferiores a 1,5; valores de trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) inferiores a 4,0; e valores de anidrido carbônico (CO<sub>2</sub>) inferiores a 3,0.

## **3.2. Preparo das Amostras**

O preparo das amostras de agregados naturais (areia) e agregados reciclados (RBMF) para a realização dos ensaios seguiu os métodos fixados pela normalização brasileira (ABNT), bem como internacionais, British Standard (BS) e American Society for Testing and Materials (ASTM). Todas as amostras (RBMF) foram secas em estufa, e inicialmente processadas em triturador de mandíbulas (RETSCH, modelo BB 200) para o completo destorroamento do material seco agrumado. Após a trituração pelas mandíbulas, o material foi cominuído em moinho de jarro com esferas em aço inox (MARCONE, modelo MA 500).

O material obtido desse processamento inicial, foi submetido a cominuição em moinho de jarros de alta eficiência (RETSCH, modelo BB 200) e esferas de aço inox, para que pudessem ser dissociados todos minerais presentes nas amostras, afim de que a caracterização química e mineralógica pudesse traduzir de fato todos elementos presentes no RBMF.

## **3.3. Métodos Instrumentais Analíticos**

A seguir, encontram-se especificados os ensaios de caracterização química e ambiental das amostras de agregados reciclados (RBMF), bem como as análises físicas dos agregados naturais e reciclados (RBMF). Posteriormente, os ensaios para a verificação das propriedades das argamassas no estado fresco e no estado endurecido. É importante ressaltar que todo o planejamento experimental foi fundamentado em análises comparativas, onde as matrizes cimentícias produzidas com agregados naturais foram tomadas como referência.

### **3.3.1. Métodos de Caracterização da Composição Química**

Foram procedidas nas amostras de agregados reciclados (RBMF) as seguintes análises químicas: análise qualitativa por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), composição mineralógica por difratometria de raios X (DRX) e análise da microestrutura por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

### **3.3.1.1. Análise por Espectrometria de Fluorescência de raios X**

A espectrometria de fluorescência de raios X do agregado reciclado (RBMF) foi procedida no Laboratório de Caracterização dos Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET, em Belo Horizonte, onde por intermédio do equipamento de fluorescência de raios X EDS-720 os elementos químicos que compõem a amostra (RBMF) foram identificados. Optou-se por este método para realizar a caracterização do agregado reciclado (RBMF), além do intuito anteriormente mencionado, sobretudo, em virtudes de seu limite de sensibilidade (ppm até ppb), de sua ampla capacidade de detecção, alta reprodutibilidade, elevada exatidão, simplicidade na preparação da amostra, versatilidade analítica e por ser de caráter não destrutivo.

### **3.3.1.2. Análise por Difratometria de raios X**

A composição mineralógica das amostras de rejeito (RBMF) foi determinada pelo processo de DRX por intermédio do difratômetro Shimadzu X-Ray 7000 do laboratório de difração de raios X do CEFET/MG, em Belo Horizonte. A difração é o fenômeno que permite com que uma onda atravesse fendas ou contorne obstáculos, atingindo regiões onde, segundo a propagação retilínea da luz, não conseguiria chegar. Com este princípio, a difratometria de raios X (DRX) consegue caracterizar a microestrutura de materiais cristalinos, o que a torna fundamentalmente aplicável e essencial na análise do resíduo (RBMF).

### **3.3.1.3. Microscopia Eletrônica de Varredura**

#### **Análise de Espectrometria de raios X por Dispersão de Energia**

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise das características microestruturais de materiais sólidos. Dentro deste princípio foram procedidas as análises morfológicas (forma e tamanho) dos materiais particulados (RBMF) através de microscópio eletrônico de

varredura (MEV), acoplado com uma espectrometria de energia dispersiva de raios X(EDS) marca Shimadzu modelo Superscan SSX – 550.

Por intermédio do microscópio eletrônico de varredura é possível determinar as porcentagens dos elementos, por microanálise de raios-X, no entanto esta operação apresenta inúmeras dificuldades. Neste caso, a análise é denominada semiquantitativa. O princípio consiste em avaliar a os picos que é proporcional à quantidade de átomos que produziu a raia. A quantificação consiste, portanto, em medir a superfície dos picos que se tem previamente identificada a ser atribuído um coeficiente e então calcular as porcentagens (DEDAVID, GOMES, MACHADO, 2007).

### **3.3.2. Métodos de Caracterização Ambiental**

Foram procedidas às análises ambientais nas amostras de agregados reciclados (RBMF) para verificação de seu potencial contaminante – NBR 10004/04 (lixiviação - NBR10005/04, solubilização – NBR 10006/04).

### **3.3.3. Métodos de Caracterização Física**

Foram procedidas nas amostras de agregados naturais e agregados reciclados (RBMF) as seguintes análises físicas: teor de umidade - NBR 9939/87; análise granulométrica - NBR7217/87; massa específica - NBR 9776/03; massa aparente - NBR 7251/82 e teor de argilas em torrões- NBR 7218/10.

### **3.3.4. Dosagem das Argamassas**

O adequado desempenho das argamassas depende fundamentalmente da correta escolha dos materiais e de seu proporcionamento, cujas operações são denominadas de dosagem (LARA et al., 1995).

A escolha do traço deve ser realizada de acordo com o desempenho esperado da argamassa ao longo do tempo, ou seja sua durabilidade. Embora existam distintos critérios de dosagens de argamassas, segundo Carneiro e Cincotto (1999) a composição e a dosagem das argamassas adotadas no Brasil são feitas com base em traços (massa ou

volume), descritos ou especificados em normas internacionais ou nacionais, como Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT).

Para argamassas de revestimento e assentamento tem-se adotado com mais frequência os traços de dosagem 1:1:6 e 1:2:9 (cimento:cal:areia), em volume, numa proporção aglomerante:agregado de 1:3. Estes traços de dosagem citados são compostos, em média, de 20% de aglomerante e 80% de agregado.

Dentro deste propósito, as argamassas experimentais foram produzidas segundo proporção 1:3. Foram produzidos traços de referência com agregados naturais; cimento Portland CPIII 40 RS e cal hidratada CH I (TN1, TN2 e TN3) e traços com agregados reciclados (RBMF) com granulometria retida na peneira #200 (ASTM), em substituição total a areia, com cimento Portland CPIII 40 RS e cal hidratada CH I (T1, T2 e T3).

Também foram produzidos traços com agregados naturais e cimento Portland CPIII 40RS, porém nestes traços a cal hidratada CH I foi substituída por agregados reciclados (RBMF) com granulometria passante na peneira #200 (ASTM), segundo proporções (T4, T5, T6 e T7). O planejamento da dosagem destas argamassas encontra-se detalhado na Tabela 3.5 apresentada a seguir.

Tabela 3.5 – Planejamento da dosagem das argamassas

<i>Argamassa</i>	<i>Traço</i>	<i>Materiais</i>
<i>TN1</i>	<i>1: 3</i>	<i>cimento : areia</i>
<i>TN2</i>	<i>1: 3</i>	<i>cal hidratada : areia</i>
<i>TN3</i>	<i>1: 1: 6</i>	<i>cimento : cal hidratada : areia</i>
<i>T1</i>	<i>1: 3</i>	<i>cimento : rejeito de minério de ferro</i>
<i>T2</i>	<i>1: 3</i>	<i>cal hidratada : rejeito de minério de ferro</i>
<i>T3</i>	<i>1: 1: 6</i>	<i>cimento : cal hidratada : rejeito de minério de ferro</i>
<i>T4</i>	<i>1: 0,9: 0,1: 6</i>	<i>cimento : cal hidratada : rejeito de minério de ferro : areia</i>
<i>T5</i>	<i>1: 0,8: 0,2: 6</i>	<i>cimento : cal hidratada : rejeito de minério de ferro : areia</i>
<i>T6</i>	<i>1: 0,5: 0,5: 6</i>	<i>cimento : cal hidratada : rejeito de minério de ferro : areia</i>
<i>T7</i>	<i>1: 0: 1: 6</i>	<i>cimento : cal hidratada : rejeito de minério de ferro : areia</i>

### **3.3.5. Propriedades das Argamassas no Estado Fresco**

#### **3.3.5.1. Índice de Consistência**

A consistência é a característica que determina a capacidade que a argamassa tende a resistir à deformação. Pela análise da consistência das argamassas, pode-se classificá-las como secas, plásticas ou fluidas, dependendo da quantidade de pasta de aglomerantes que envolvem os agregados.

Com o propósito de produzir argamassas que apresentem características idênticas de trabalhabilidade foi realizado o ensaio de determinação do índice de consistência para cada um dos traços do programa experimental, onde todos os traços obtiveram valores de abertura de  $260 \pm 5$  mm, NBR13276/05.

#### **3.3.5.2. Retenção de Água**

A retenção de água de uma argamassa está relacionada à capacidade que a argamassa fresca tem em manter a sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água. Para averiguação desta capacidade foram realizadas análises onde se determinou os valores da retenção de água das argamassas. Os ensaios de retenção de água foram realizados em concordância com as prescrições da NBR 13277/95, sendo que, utilizou-se a norma com versão do ano de 1995, devido à falta de equipamentos adequados à norma vigente.

Este ensaio foi conduzido da seguinte forma, primeiramente procedeu à verificação e registro da massa do molde vazio (Mm) e dos discos de papel-filtro seco (Mse) pelo processo de pesagem em balança com resolução de 0,1 g. Posteriormente, o preparo da argamassa a ser ensaiada para enchimento de um molde cilíndrico de aço com 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura, em 10 camadas com altura aproximadamente iguais. Após o rasamento do excesso de argamassa, pesou-se o molde com argamassa e registrou-se sua massa (Mma). Em seguida foram colocadas sobre a superfície da argamassa 2 telas de gaze, 12 discos de papel-filtro, uma placa rígida de mesmo

material e diâmetro do molde e um peso de 2 kg, sendo acionado um cronômetro após a colocação do peso. Após 2 minutos houve a remoção do peso e a placa base, para pesagem e registro da massa do conjunto de papéis-filtro ( $M_f$ ). Todo o procedimento do ensaio de retenção de água encontra-se ilustrado na Figura 3.2, apresentada a seguir.

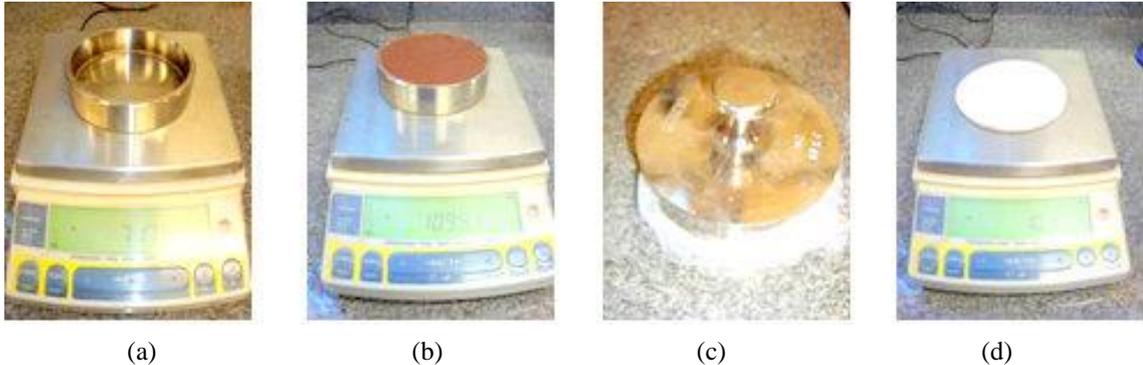


Figura 3.2 – Ensaio de retenção de água – Determinação da massa do molde (a); determinação da massa do molde com a argamassa (b); molde com telas de gases, filtros, placa rígida e peso de 2 kg (c); e determinação da massa dos filtros úmidos (d).

A aplicação dos dados do ensaio na equação 3.1, descrita em norma, possibilitou a determinação, em porcentagem, da retenção de água das argamassas ensaiadas.

$$Ra = \left[ 1 - \left( \frac{M_f - M_{se}}{AF \cdot (M_{ma} - M_{se})} \right) \right] \times 100 \quad (\%) \quad (3.1)$$

Onde:

$M_w$  = massa total de água acrescentada à mistura (g);

$M$  = massa de argamassa industrializada ou soma das massas dos componentes anidros no caso de argamassa de obra (g);

$AF = \frac{M_w}{M + M_w}$  fator água/argamassa fresca;

$M_f$  = massa do conjunto de discos molhados de papel-filtro (g);

$M_{se}$  = massa do conjunto de discos secos (g);

$M_{ma}$  = massa do molde com argamassa (g);

$M_m$  = massa do molde vazio (g);

$Ra$  = Retenção de água (%).

### 3.3.5.3. Densidade de Massa no Estado Fresco

O ensaio para determinação da densidade de massa no estado fresco foi realizado em conformidade com a NBR 13278/05. Primeiramente houve a calibração do recipiente cilíndrico de PVC com volume de 400 ml. Em sequência, introduziu-se neste recipiente a argamassa, logo após rasou-se e procedeu-se o registro da sua massa. Os procedimentos de calibração do recipiente, bem como de determinação da densidade de massa das argamassas no estado fresco encontram-se ilustrados na Figura 3.3, apresentada a seguir.

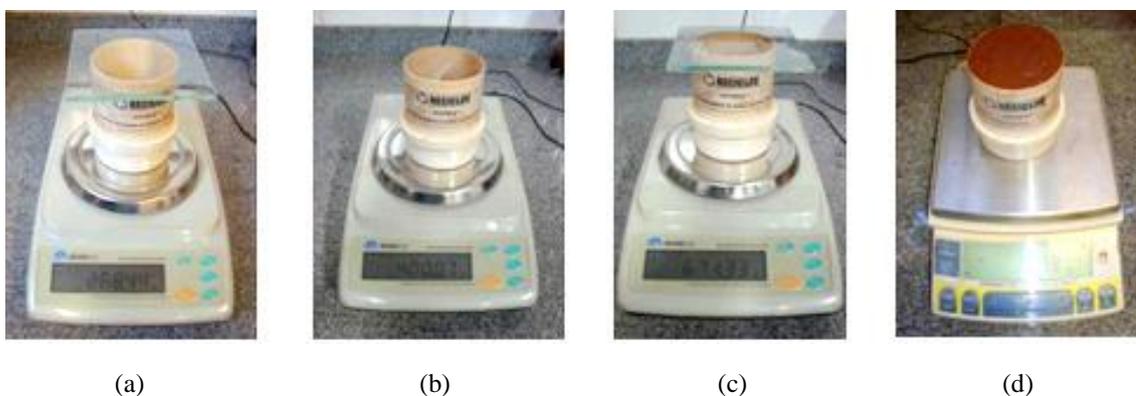


Figura 3.3 – Procedimentos de calibração do recipiente e determinação da densidade de massa das argamassas – Determinação da massa do recipiente com vidro (a); determinação da massa do recipiente com água destilada (b); determinação da massa do recipiente com água destilada e vidro (c); e determinação da massa do recipiente com argamassa (d).

O cálculo da determinação do volume é obtido a partir da equação 3.2 e a densidade pela equação 3.3, apresentadas a seguir.

$$V_r = m_a - m_v \quad (\text{cm}^3) \quad (3.2)$$

$$d = \left( \frac{m_c - m_v}{v_r} \right) \cdot 1000 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (3.3)$$

Onde:

$m_c$  = massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio (g);

$m_v$  = massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

$v_r$  = volume do recipiente cilíndrico ( $\text{cm}^3$ );

$m_a$  = massa do recipiente com água (g).

### 3.3.5.4. Teor de Ar Incorporado

Dentro deste intuito, procedeu-se a constatação do teor de ar incorporado das argamassas experimentais por intermédio do aparelho medidor de ar incorporado, modelo 1.150.001 da Solotest. Os ensaios foram procedidos de acordo com as especificações do manual do equipamento.

### 3.3.6. Propriedades da Argamassa no Estado Endurecido

#### 3.3.6.1. Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido

O ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido foi realizado segundo prescrições da NBR 13280/05. Para este ensaio foram utilizados três corpos-de-prova, moldados e curados até a idade 28 dias, conforme NBR 13279/05. Foram obtidas com auxílio de um paquímetro de resolução de 0,1mm, a largura (l), altura (h) e comprimento (c) de cada corpo-de-prova em duas posições, em centímetros, arredondando ao décimo mais próximo. E para cada corpo-de-prova foi obtido também sua respectiva massa (m). O procedimento de determinação da densidade de massa aparente das argamassas no estado endurecido encontra-se ilustrado na Figura 3.4, apresentada a seguir.

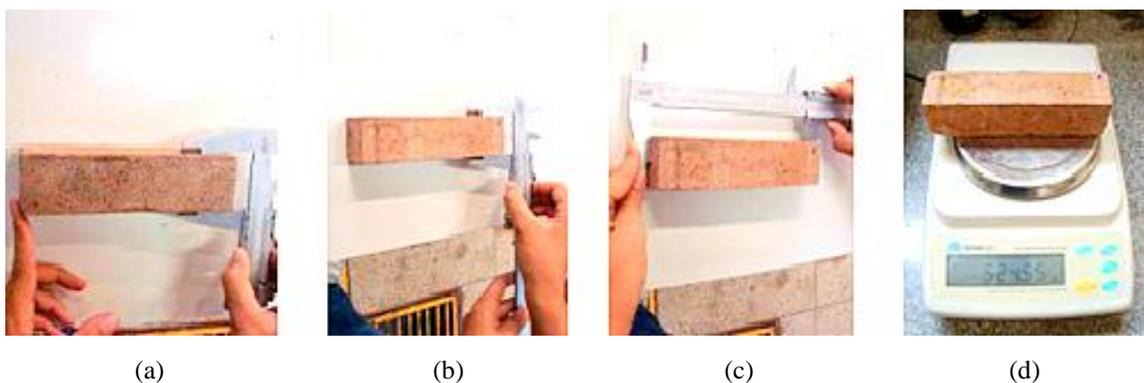


Figura 3.4 – Procedimento de determinação da densidade de massa aparente das argamassas no estado endurecido – Determinação das larguras dos corpos-de-prova prismáticos (a); determinação das alturas dos corpos-de-prova prismáticos (b); determinação dos comprimentos dos corpos-de-prova prismáticos (c); e determinação das massas dos corpos-de-prova prismáticos (d).

O valor da densidade de massa foi obtido pela equação 3.4 apresentada a seguir.

$$\rho_{\text{máx}} = \frac{m}{V} \cdot 1000 \quad (\text{kg} / \text{m}^3) \quad (3.4)$$

Onde:

m = massa (g);

V= volume (cm<sup>3</sup>). O volume (V) é obtido pela média aritmética da largura (l), da altura (h) e do comprimento (c).

### 3.3.6.2. Resistência à Compressão Axial

A NBR 13279/95 especifica o método de ensaio para determinação da resistência à compressão em argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos. Este método compreende na determinação da resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Os corpos-de-prova cilíndricos das argamassas experimentais foram desmoldados em 24 horas e curados em câmara úmida até as idades de 3, 7 e 28 dias. Estes corpos-de-prova foram capeados e rompidos pela aplicação de carga de 500 N/s, em prensa hidráulica servo-controlada, capacidade 200KN, conforme Figura 3.5.

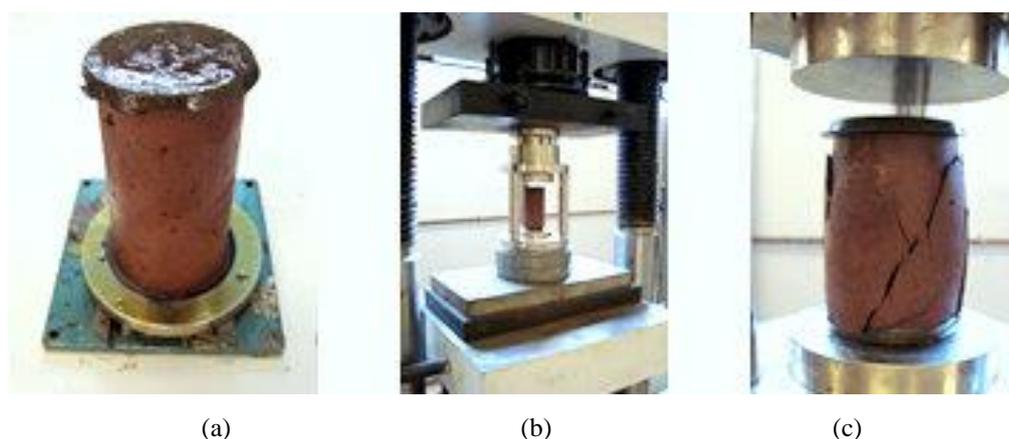


Figura 3.5 – Ensaio de resistência à compressão axial – capeamento do corpo-de-prova (a), rompimento do corpo-de-prova (b) e corpo-de-prova rompido (c).

A resistência à compressão foi obtida pelo cálculo da média das resistências individuais, em MPa, dos corpos-de-prova ensaiados na mesma idade.

### 3.3.6.3. Resistência à Tração na Flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado segundo critérios especificados pela NBR 13279/05. Para cada idade dos tratamentos foram rompidos três corpos-de-prova. Foram moldados os corpos-de-prova de dimensões 40 x 40 x 160 mm referentes às argamassas experimentais, desmoldados em 24 horas e curados em câmara úmida até as idades de 3, 7 e 28 dias. Os corpos-de-prova foram posicionados nos aparatos para ensaio, a carga aplicada à razão de  $(50 \pm 10)$  N/s centralizadamente entre os apoios  $(100,0 \pm 0,5\text{mm})$ , de modo que a face rasada não entrou em contato com os dispositivos de apoio, nem com o dispositivo de carga, conforme observado na Figura 3.6 apresentada a seguir.

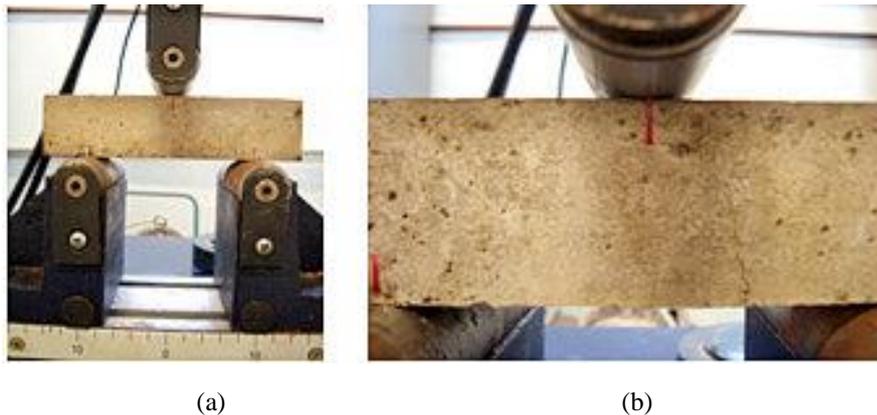


Figura 3.6 – Ensaio de resistência à tração na flexão (a) e (b).

A resistência à tração na flexão é calculada de acordo com a equação 3.6 apresentada a seguir.

$$R_f = \frac{1,5F_f \cdot L}{40^3} \quad (MPa) \quad (3.5)$$

Onde:

$R_f$  = resistência à tração na flexão, em MPa;

$F_f$  = carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

$L$  = distância entre os suportes, em mm.

### 3.3.6.4. Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade das argamassas procedeu-se pela realização de ensaios em conformidade com a NBR 15259/05.

Nestes ensaios foram utilizados três corpos-de-prova, a idade de 28 dias, armazenados a temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa de 60%. A princípio houve a determinação da massa inicial ( $m_0$ ), em gramas, de cada corpo-de-prova. Depois foi lixada a face quadrada dos corpos-de-prova, logo em seguida, posicionados sobre o recipiente de ensaio, evitando a molhagem de outras superfícies e o contato direto com o fundo do recipiente. O nível de água no recipiente permaneceu constante a  $5 \pm 1$  mm acima da face dos corpos-de-prova. A partir da colocação dos corpos de prova, em contato com a água, determinou-se a massa de cada corpo de prova, em (g), aos 10 min ( $m_{10}$ ) e aos 90 min ( $m_{90}$ ).

Os corpos-de-prova foram colocados na condição saturada superfície seca (SSS), antes de cada pesagem, retornando imediatamente ao recipiente de ensaio para continuidade do processo de absorção.

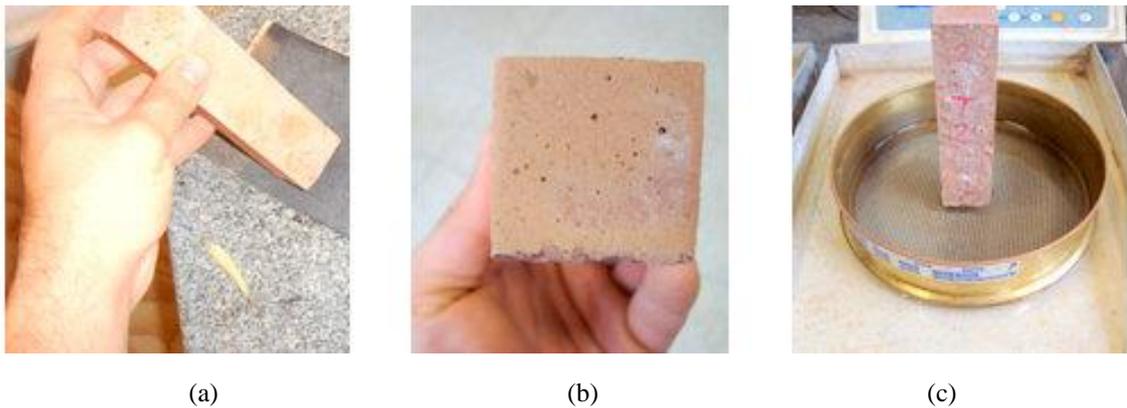


Figura 3.7 – Ensaio de absorção de água por capilaridade - lixamento da superfície quadrada do corpo-de-prova (a), superfície lixada (b) e corpo-de-prova em contato com a água do recipiente (c).

A absorção de água por capilaridade é determinada em função do tempo e de acordo com a equação 3.7 apresentada a seguir:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (\text{g} / \text{cm}^2) \quad (3.6)$$

Onde:

$A_t$  = absorção de água por capilaridade, para cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ );

$m_t$  = massa do corpo-de-prova em cada tempo (g);

$m_0$  = massa inicial do corpo-de-prova (g);

$t$  = tempos de 10 min e 90 min, em segundos;

16 = área do corpo-de-prova em contato com a água ( $\text{cm}^2$ ).

Os dados obtidos facultam a determinação do coeficiente de capilaridade. De acordo com a NBR 15259/05, o coeficiente de capilaridade assim definido é aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa aos 10 min e aos 90 min.

O resultado para cada corpo-de-prova é calculado de acordo com a seguinte equação.

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}) \quad (3.7)$$

Onde:

$C$  = coeficiente de capilaridade, em ( $\text{g}/\text{dm}^2 \text{min}^{1/2}$ )

### **3.4. Análise Econômica das argamassas**

A avaliação econômica dos traços das argamassas experimentais ocorreu por meio do somatório dos valores em R\$/kg dos materiais componentes (preço comercial, região metropolitana de Belo Horizonte - MG); onde posteriormente foi possível saber um valor preliminar de cada traço em R\$/tonelada.

### 3.5. Classificação das Argamassas

As argamassas obtidas experimentalmente por meio das dosagens foram classificadas segundo parâmetros indicados à NBR 13281/05, quais indicam-se a Tabela 3.6 apresentada a seguir:

Tabela 3.6 – Classificação de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos

<i>Características</i>	<i>Classes</i>	<i>Limites</i>	<i>Métodos</i>
<i>Resistência à compressão aos 28 dias (Mpa)</i>	<i>P1</i>	$\leq 2,0$	<i>ABNT NBR13279/05</i>
	<i>P2</i>	<i>1,5 a 3,0</i>	
	<i>P3</i>	<i>2,5 a 4,5</i>	
	<i>P4</i>	<i>4,0 a 6,5</i>	
	<i>P5</i>	<i>5,5 a 9,0</i>	
	<i>P6</i>	$> 8,0$	
<i>Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>M1</i>	$\leq 1200$	<i>ABNT NBR13280/05</i>
	<i>M2</i>	<i>1000 a 1400</i>	
	<i>M3</i>	<i>1200 a 1600</i>	
	<i>M4</i>	<i>1400 a 1800</i>	
	<i>M5</i>	<i>1600 a 2000</i>	
	<i>M6</i>	$> 1800$	
<i>Resistência á tração na flexão (Mpa)</i>	<i>R1</i>	$\leq 1,5$	<i>ABNT NBR13279/05</i>
	<i>R2</i>	<i>1,0 a 2,0</i>	
	<i>R3</i>	<i>1,5 a 2,7</i>	
	<i>R4</i>	<i>2,0 a 3,5</i>	
	<i>R5</i>	<i>2,7 a 4,5</i>	
	<i>R6</i>	$> 3,5$	
<i>Coefficiente de capilaridade (g/ dm<sup>2</sup>. Min ½)</i>	<i>C1</i>	$\leq 1,5$	<i>ABNT NBR15259/05</i>
	<i>C2</i>	<i>1,0 a 2,5</i>	
	<i>C3</i>	<i>2,0 a 4,0</i>	
	<i>C4</i>	<i>3,0 a 7,0</i>	
	<i>C5</i>	<i>5,0 a 12,0</i>	
	<i>C6</i>	$>10,0$	
<i>Densidade de massa aparente no estado fresco (kg/ m<sup>3</sup>)</i>	<i>D1</i>	$\leq 1400$	<i>ABNT NBR15278/05</i>
	<i>D2</i>	<i>1200 a 1600</i>	
	<i>D3</i>	<i>1400 a 1800</i>	
	<i>D4</i>	<i>1600 a 2000</i>	
	<i>D5</i>	<i>1800 a 2200</i>	
	<i>D6</i>	$>2000$	
<i>Retenção de água (%)</i>	<i>U1</i>	$\leq 78$	<i>ABNT NBR15277/05</i>
	<i>U2</i>	<i>72 a 1600</i>	
	<i>U3</i>	<i>80 a 90</i>	
	<i>U4</i>	<i>86 a 94</i>	
	<i>U5</i>	<i>91 a 97</i>	
	<i>U6</i>	<i>95 a 100</i>	

Fonte: ABNT, 2005

## CAPÍTULO IV

*“A pesquisa pode ser considerada um procedimento formal com método de pensamento reflexivo que requer um tratamento científico e se constitui no caminho para se conhecer a realidade ou para descobrir verdades parciais (LAKATOS, MARCONI, 1987).”*

### 4. RESULTADOS e DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios serão apresentados individualmente e, em alguns casos, posteriormente, será discutida a relação entre os resultados.

#### 4.1. Caracterização das Amostras

##### 4.1.1. Análise por Espectrometria de Fluorescência de raios X

Os elementos químicos que compõem a amostra de rejeito (RBMF) foram identificados por meio da FRX. Na Tabela 4.1 estão relacionados os elementos químicos encontrados no rejeito (RBMF) com respectivos percentuais.

Tabela 4.1 – Elementos químicos do rejeito (RBMF)

<i>Análise Qualitativa</i>	
<i>Elementos</i>	<i>Percentual</i>
<i>Si</i>	<i>13,8%</i>
<i>Fe</i>	<i>77,5%</i>
<i>Al</i>	<i>8,5%</i>
<i>Mn</i>	<i>0,2%</i>
<i>K</i>	<i>0,1%</i>

Pela análise dos resultados obtidos pela fluorescência de raios X (FRX) percebe-se que o resíduo (RBMF) pode ser constituído basicamente pelos elementos Fe (Ferro), Si (Silício) e Al (Alumínio). E considerando a possibilidade de que o ferro possa ser recuperado em processos industriais quais possam servir inclusive como matéria prima

para a mineração e fonte de recursos (INPI, 2012), assim pode-se ter um produto final constituído essencialmente por sílica.

#### 4.1.2. Análise por Difratomia de raios X

O difratograma da amostra (RBMF) possibilitou identificar os picos difratados mais intensos de cada fase cristalina, conforme apresentado no Difratograma 4.1 a seguir.

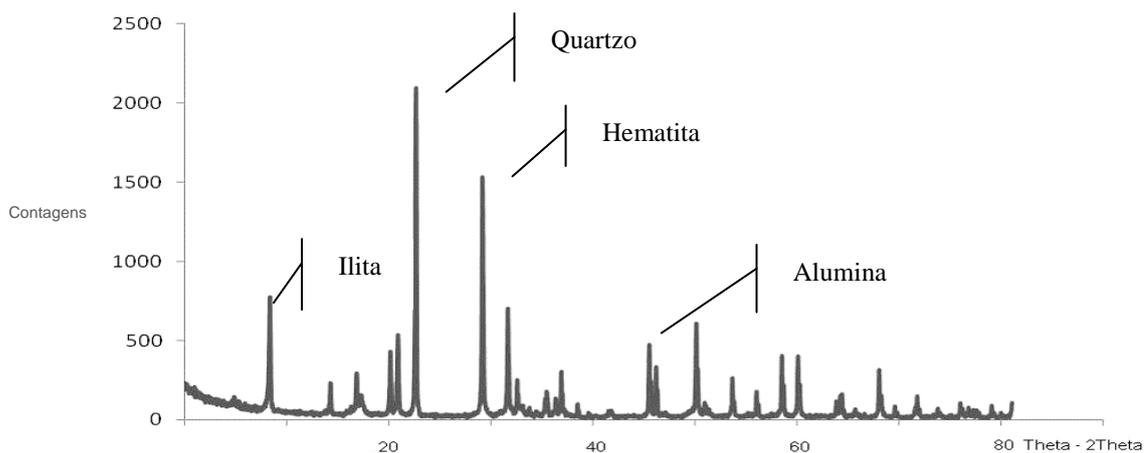


Figura 4.1 – Difratograma de uma amostra de rejeito (RBMF)

Pela análise dos picos difratados é possível identificar a presença dos seguintes minerais: ilita, quartzo, hematita e alumina.

Os resultados obtidos dos ensaios de FRX de 272 amostras de rejeito (RBMF) coletadas em 2011 possibilitaram saber os percentuais de sílica e alumina, bem como os percentuais de ferro contido nestas amostras, conforme Gráfico 4.1.

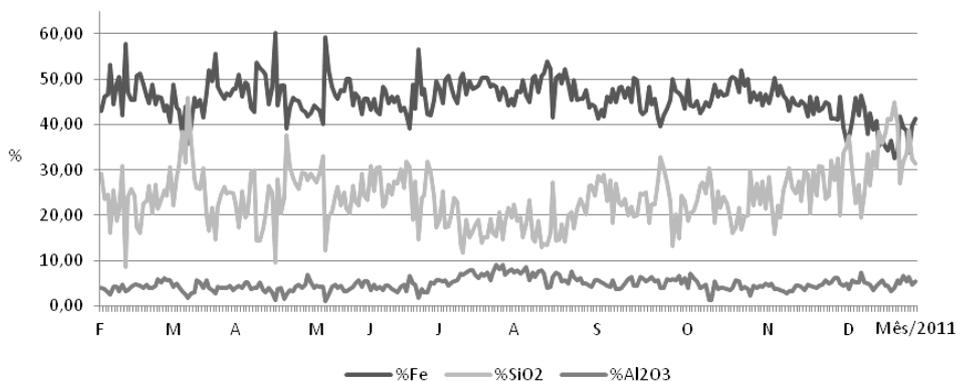


Gráfico 4.1 – Porcentagens dos minerais das amostras de rejeito (RBMF) em 2011

Da mesma forma, os resultados obtidos dos ensaios de FRX das amostras (RBMF) possibilitaram identificar a média dos percentuais de sílica e alumina, bem como dos demais elementos químicos constituintes do rejeito (RBMF), conforme apresentado na Tabela 4.2 a seguir.

Tabela 4.2 – Porcentagens dos elementos químicos do rejeito (RBMF) em 2011

<i>Elementos</i>	<i>Concentração média (%)</i>
<i>Fe</i>	<i>45,75%</i>
<i>Si O<sub>2</sub></i>	<i>24,10%</i>
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>4,80%</i>
<i>P</i>	<i>0,096%</i>
<i>Mn</i>	<i>0,025%</i>
<i>PPC</i>	<i>4,056%</i>

Percebe-se pela análise dos percentuais dos elementos químicos a grande concentração de Fe contida nestas amostras, média de 45,75%.

### 4.1.3. Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise morfológica das partículas da amostra de rejeito (RBMF) foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde com aumentos de 200 vezes (Figura 4.2) e 500 vezes (Figura 4.3) verificou-se a existência de um sistema particulado composto por unidades de variados tamanhos e formas.

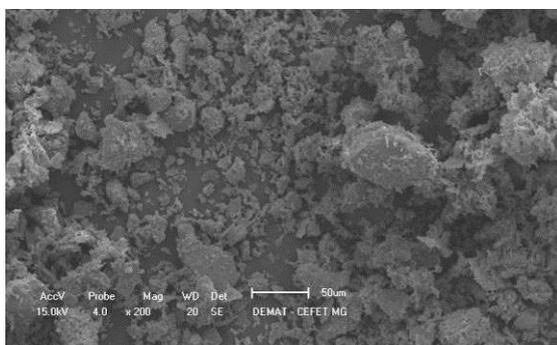


Figura 4.2 – MEV do rejeito (RBMF) - 200x

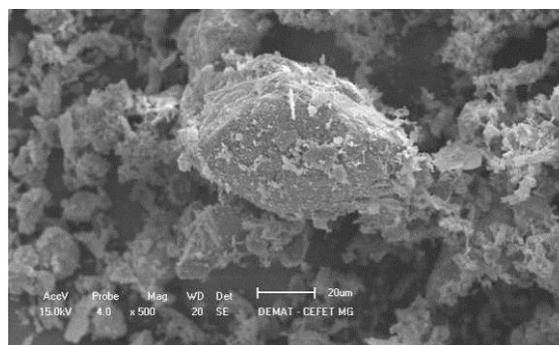


Figura 4.3 – MEV do rejeito (RBMF) - 500x

Em aumentos superiores (1000x e 2000x) foi possível observar a superfície das partículas, conforme Figuras 4.4 e 4.5. As imagens obtidas das análises apresentaram partículas de sílica (Q) com maior dimensão, associadas a partículas de hematita (H), partículas de ilita (I) e alumina (A) dispersas, identificados por EDS.

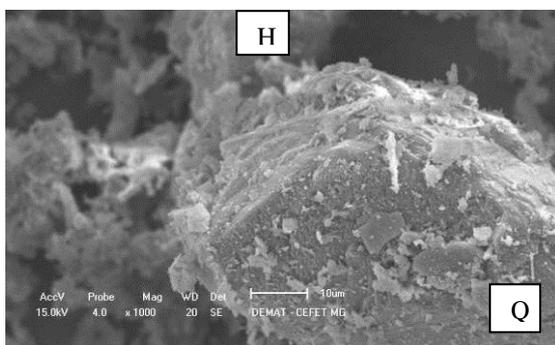


Figura 4.4 – MEV do rejeito (RBMF) - 1000x

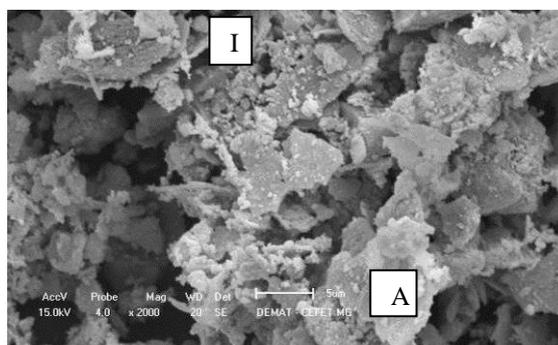


Figura 4.5 MEV do rejeito (RBMF) - 2000x

A adesão de grãos planos e com menor tamanho, aos grãos de quartzo ou hematita (Figura 4.4) pode provocar um aumento de vazios no material, o que requer maiores quantidades de água para obtenção de plasticidade ou trabalhabilidade necessárias, retratado por uma maior higroscopicidade do material.

#### 4.1.4. Teor de Umidade

As amostras de agregados, natural (areia) e reciclado (RBMF), foram devidamente preparadas e homogeneizadas, em seguida submetidas a ensaios realizados de acordo com os parâmetros da NBR 9939/01. Obteve-se o teor de umidade da areia de 0,183% e do rejeito (RBMF) de 1,081%, conforme Gráfico 4.2 a seguir.

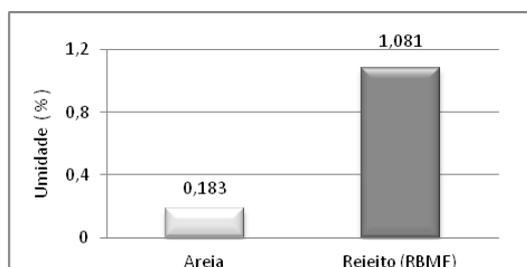


Gráfico 4.2 – Teor de umidade dos agregados.

Pela análise desses dados é possível verificar que a porcentagem da umidade do rejeito (RBMF) é aproximadamente cinco vezes superior a da areia, em função da grande presença de finos no rejeito (RBMF).

#### 4.1.5. Análise Granulométrica

As amostras de agregados, natural (areia) e reciclado (RBMF), foram ensaiadas de acordo com os parâmetros da NBR NM – 248/03.

As distribuições granulométricas dos agregados obtidas pelos ensaios, segundo as zonas ótima e utilizável para agregado miúdos, encontram-se apresentadas no Gráfico 4.3, apresentado a seguir.

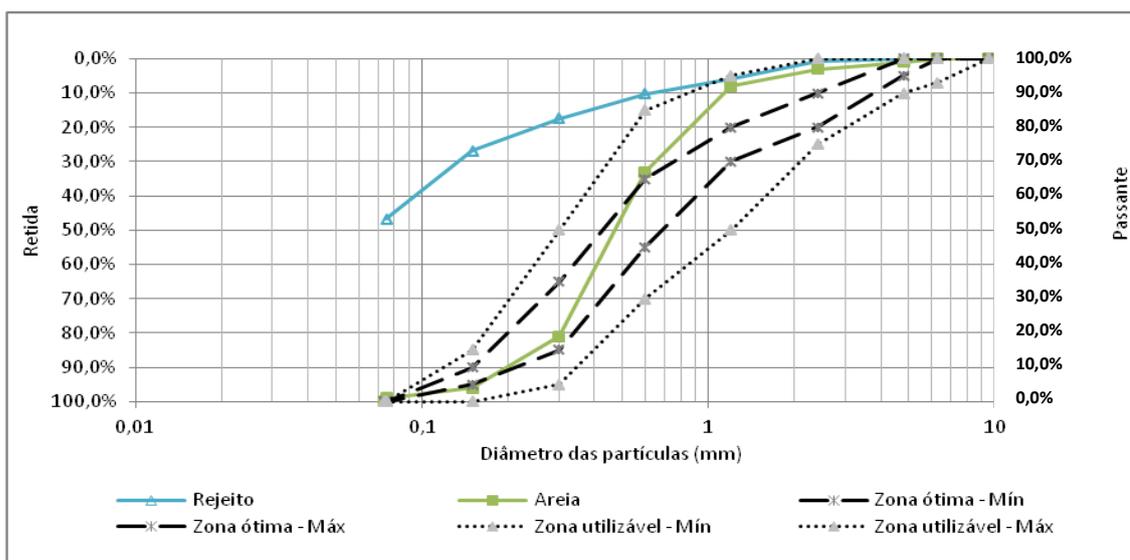


Gráfico 4.3 – Distribuições granulométricas dos agregados, reciclado (RBMF) e natural (areia).

Nota-se que a distribuição granulométrica do rejeito (RBMF) está fora das zonas utilizáveis propostas pela normalização, por tratar-se de um material muito fino, sendo mais de 50% de sua massa passante na peneira #200 (ASTM). O rejeito (RBMF) apresentou uma dimensão máxima de 2,4 mm e a areia natural de 4,8 mm. Os módulos de finuras foram respectivamente 0,61 mm e 1,56 mm.

#### 4.1.6. Massa Específica

Pelo ensaio realizado nas amostras de agregados, natural (areia) e reciclado (RBMF), de acordo com os parâmetros da NBR 9776/03, obteve-se a massa específica da areia de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, enquanto a do rejeito (RBMF) de 3,88g/cm<sup>3</sup>, conforme apresentado no Gráfico 4.4 a seguir.

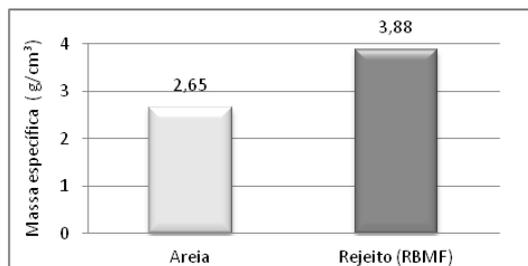


Gráfico 4.4 – Massa específica dos agregados.

Portanto, verifica-se que a massa específica do rejeito (RBMF) é 31,7% superior a da areia. Provavelmente em função da alta porcentagem de ferro, entorno de 45%, contida no rejeito (RBMF), conforme observado nos resultados obtidos pela FRX das amostras de rejeito (RBMF).

#### 4.1.7. Massa Aparente

Pelo ensaio realizado nas amostras de agregados, natural e reciclado (RBMF), de acordo com os parâmetros da NBR 7251/82, obteve-se a massa aparente da areia de 1,457 g/cm<sup>3</sup> e a do rejeito (RBMF) de 1,891 g/cm<sup>3</sup>, conforme apresentado no Gráfico 4.5. O valor da massa aparente do rejeito (RBMF) é 22,95% superior ao da areia.

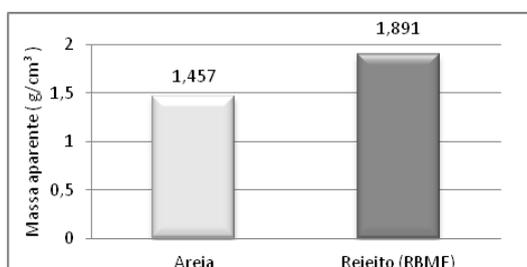


Gráfico 4.5 – Massa aparente dos agregados.

#### 4.1.8. Determinação do Teor de Argilas em Torrões

Pelo ensaio realizado nas amostras de agregados, natural (areia) e reciclado (RBMF), de acordo com os parâmetros da NBR 7218/10, pode-se verificar que o rejeito (RBMF) apresentou uma concentração de 98% de torrões, enquanto a areia apresentou 0%, conforme apresentado no Gráfico 4.6.

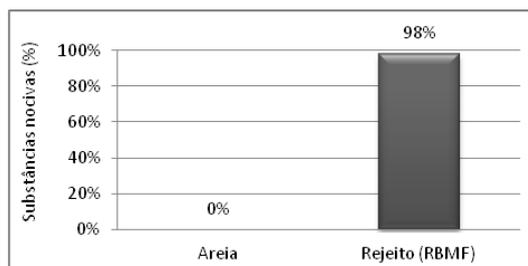


Gráfico 4.6 – Teor de substâncias nocivas dos agregados.

Este resultado demonstra a facilidade que o rejeito (RBMF) tem de formar aglomerações, isso devido ao seu alto índice de material fino e a sua alta capacidade higroscópica.

#### 4.1.9. Análises Ambientais do Agregado Reciclado (RBMF)

De acordo com os resultados obtidos das análises ambientais, lixiviação e solubilização, em concordância com os parâmetros de avaliação contidos na NBR 10004/04, as amostras de rejeito (RBMF) foram classificadas como resíduo classe II A - não perigoso e não inerte. Da mesma forma, espera-se que a adição do resíduo classe II A (RBMF) a outros materiais como cimento, cal e areia, não altere a classificação ambiental das argamassas propostas, como pode ser observado na Tabela 4.3, apresentada a seguir.

Tabela 4.3 – Análises ambientais

<i>Resíduo</i>	<i>Potencial contaminante</i>	<i>Matriz de cimento convencional</i>	<i>Matriz de cimento com resíduo</i>
<i>Rejeito (RBMF)</i>	<i>CLASSE IIA, resíduo não inerte</i>	<i>?</i>	<i>?</i>
<i>Escória de aciaria</i>	<i>CLASSE IIA, resíduo inerte</i>	<i>CLASSE IIA, resíduo não inerte</i>	<i>CLASSE IIA, resíduo não inerte</i>

Fonte: Stief, 2009.

## 4.2. Propriedades das Argamassas no Estado Fresco

### 4.2.1. Índice de Consistência

O índice de consistência das argamassas compostas com agregados natural e reciclado (RBMF) foi previamente estabelecido para um valor de  $260 \pm 5$  mm de abertura, conforme recomendação NBR 13276/05. Para este valor de consistência, obtiveram-se

as relações água/aglomerante (a/agl), conforme ilustrado no Gráfico 4.7, apresentado a seguir.

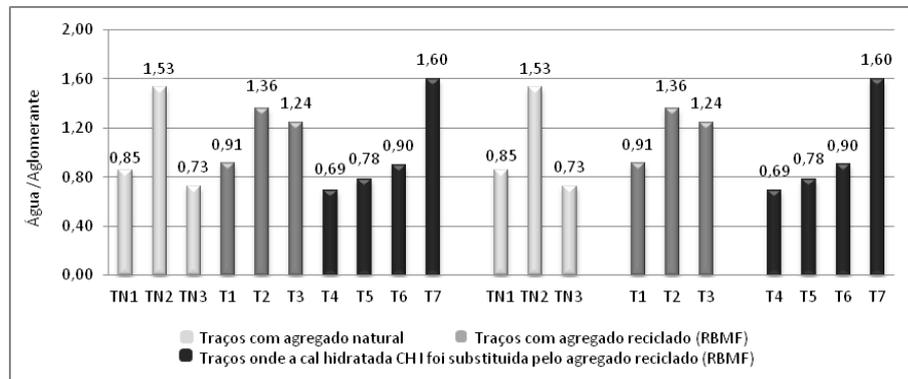


Gráfico 4.7 – Relação água/aglomerante

Os resultados obtidos permitiram considerar que os traços compostos com agregado reciclado (RBMF) em substituição ao agregado natural, T1 e T3, apresentaram maior consumo de água quando comparados aos traços naturais TN1 e TN3, isso devido à granulometria bastante fina do rejeito (RBMF). A presença do rejeito nas argamassas faz com que a mistura fique mais áspera e que requeira uma maior quantidade de água para determinada consistência. No entanto, nos traços TN2 e T2 este comportamento foi diferente, devido à propriedade aglutinante do rejeito (RBMF).

Também se percebe que nos traços onde a cal foi substituída proporcionalmente pelo rejeito (RBMF), T4 a T7, o aumento na relação água/aglomerante foi correspondente ao aumento da substituição da cal por rejeito (RBMF). Quando dissolvida em água, a cal provoca o surgimento de uma solução saturada de  $\text{CaOH}_2$ , que funciona como lubrificante/floculante entre as partículas dos agregados, por isso que a quantidade de água aumenta a medida em que substituímos a cal por rejeito. O traço com substituição de 10% da cal por rejeito, T4, apresentou menor consumo de água em relação ao traço natural - TN3, devido à propriedade aglutinante do rejeito (RBMF). Fator importante, pois se sabe que o excesso de água embora aumente a trabalhabilidade das argamassas de cimento Portland no canteiro é prejudicial, pois enfraquece a resistência final da argamassa: as propriedades mecânicas da argamassa endurecida são melhores se a quantidade de água é reduzida (RIBEIRO, 2009).

## 4.2.2. Retenção de Água

A retenção permite que as reações de endurecimento das argamassas se tornem mais gradativas, promovendo desta forma a adequada hidratação do cimento e conseqüente ganho de resistência.

Pela realização de ensaios em conformidade com a NBR 13277/95, obtiveram-se os valores de retenção de água das argamassas conforme apresentado no Gráfico 4.8.

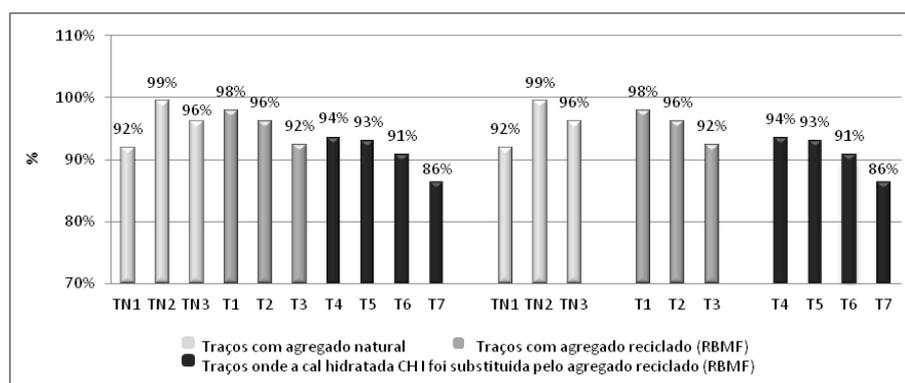


Gráfico 4.8 – Retenção de água

Pela análise dos resultados pode-se observar que os traços compostos com agregado reciclado (RBMF) em substituição ao agregado natural, T2 e T3, apresentaram valores de retenção de água inferiores aos dos traços naturais, TN2 e TN3. Além de comprometer na capacidade destas argamassas se apresentarem de forma plástica. A rápida perda de água compromete a aderência, a capacidade de absorver deformações, a resistência mecânica e, com isso, a durabilidade e a estanqueidade do revestimento e da vedação ficam comprometidas.

Entre os traços TN1 e T1, percebe-se que em T1 houve um aumento da porcentagem de água retida. Considera-se este aumento uma contribuição importante, pois conforme Maciel et al. (1998) uma maior retenção de água de amassamento da argamassa, ao entrar em contato com uma superfície de maior poder de absorção, representa maior estabilidade e disponibilidade de água para hidratação do cimento.

Por outro lado, mesmo tendo sido o rejeito (RBMF) e a cal classificados segundo a mesma granulometria, os traços com cal apresentaram maiores porcentagens de

retenção de água, isso devido às propriedades higroscópicas das cales. A capacidade absorviva dos cristais que constituem a cal também contribui para a retenção de água. Podendo ser observado nos traços onde a cal foi substituída proporcionalmente pelo rejeito (RBMF), de T4 a T7, as porcentagens de água retida foram inferiores comparadas com a do traço natural - TN3, com considerável redução entre TN3 e T7.

Fundamentalmente a cura das argamassas compostas com rejeito ocorre, em parte, pelo processo simples de secagem onde a argamassa perde água e seus componentes ficam suficientemente aglutinados, isso devido à capacidade aglutinante do rejeito (RBMF) – essa capacidade aglutinante do rejeito é função dos materiais que o compõem, da granulometria desses materiais (forma e tamanho) e de fenômenos coloidais. Ou, nas argamassas que contém o cimento Portland como componente integrante, a cura também ocorrerá por processo químico. Da mesma forma que a trabalhabilidade, os fatores influentes na retenção de água são as características e proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa. A presença da cal pode melhorar essa propriedade, conforme análise dos resultados.

### 4.2.3. Densidade de Massa no Estado Fresco

Pela realização de ensaios em conformidade com a NBR 13278/05, obtiveram-se os valores de densidade de massa no estado fresco das argamassas conforme apresentados no Gráfico 4.9.

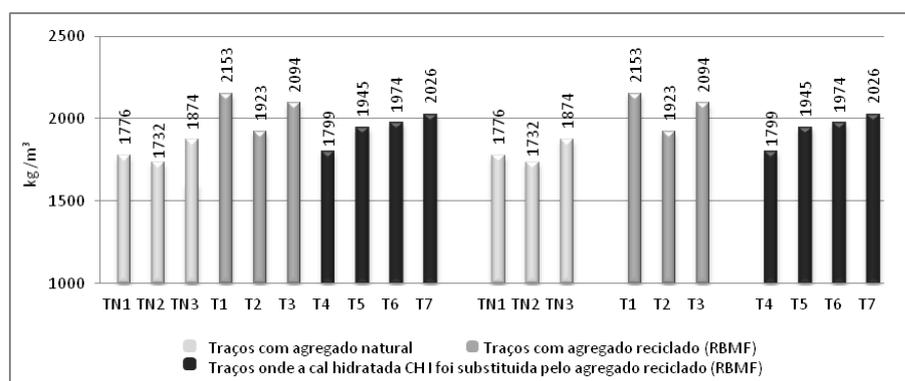


Gráfico 4.9 – Densidade de massa no estado fresco

De acordo com os resultados, os traços com presença do rejeito (RBMF) apresentaram uma densidade de massa mais elevada que os traços naturais, sendo este aumento entre TN1 e T1 de 21%, e entre TN2 e T2, TN3 e T3 de 11%, isto devido ao alto valor da massa específica do resíduo (RBMF). O aumento do teor de finos nas argamassas aumenta a densidade de massa no estado fresco. Outro aspecto importante a considerar é que quanto maior a densidade de massa no estado fresco da argamassa, menor será seu rendimento e trabalhabilidade.

Quanto aos traços onde a cal foi substituída proporcionalmente pelo rejeito (RBMF), de T4 a T7, em comparação ao traço natural – TN3 pode-se observar que o traço T4 apresentou menor densidade de massa. Nota-se que quanto maior a proporção de rejeito em substituição a cal (RBMF), maior será o valor da densidade de massa da argamassa.

#### 4.2.4. Teor de Ar Incorporado

A verificação do teor de ar incorporado das argamassas experimentais foi procedida por intermédio do aparelho medidor de ar incorporado, cujos resultados encontram-se apresentados no Gráfico 4.10 a seguir.

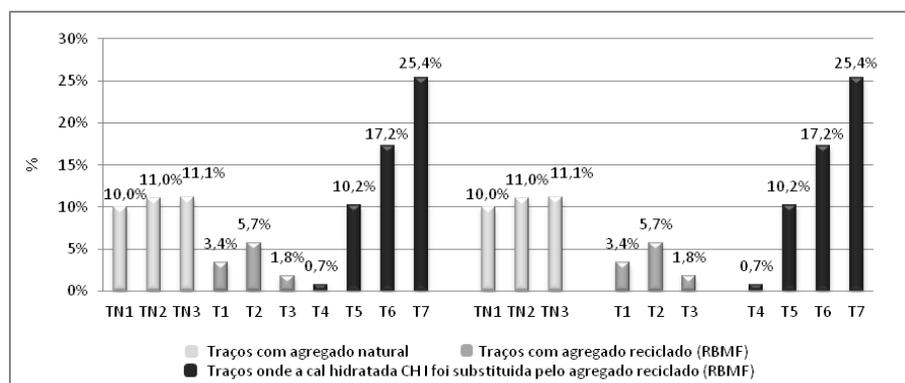


Gráfico 4.10 – Teor de ar incorporado

A cal contribuiu para o aumento do teor de ar incorporado nas argamassas naturais, conforme observado nos percentuais de TN2 e TN3 comparados com o de TN1. Nos traços onde o agregado natural foi substituído pelo agregado reciclado (RBMF), T1, T2 e T3, percebem-se uma considerável redução do teor de ar incorporado. O traço composto por cal e rejeito (RBMF), T2, apresentou uma redução do teor de ar

incorporado inferior ao traço composto por cimento e rejeito (RBMF), T1, devido à cal proporcionar uma maior incorporação de ar na argamassa.

Porém nos traços onde a cal foi substituída proporcionalmente pelo rejeito (RBMF), T4 a T7, o aumento do teor de ar incorporado foi correspondente ao aumento da substituição da cal por rejeito (RBMF). Esse fato pode ser justificado pela presença de grande quantidade de partículas finas, na periferia das partículas esféricas e pela suposta formação de vazios.

### 4.3. Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido

#### 4.3.1. Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido

Pela realização de ensaios em conformidade com a NBR 13280/05, obtiveram-se os resultados de densidade de massa no estado endurecido das argamassas conforme apresentados no Gráfico 4.11.

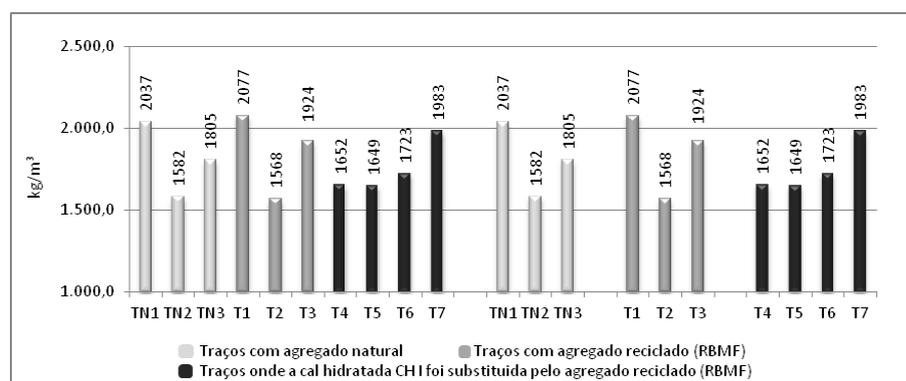


Gráfico 4.11 – Densidade de massa no estado endurecido

Estes resultados indicam que as argamassas compostas com rejeito (RBMF) como agregado são bem mais densas do que as convencionais, devido à alta densidade de massa do material (RBMF) e a ausência de ar incorporado, mesmo para os traços com cal. As argamassas de cimento portland, TN1 e T1, apresentam-se mais densas do que as demais argamassas, o que pode ser justificado pela reação do cimento com a água de amassamento, pois esta reação produz maior quantidade de produtos, e, com isso proporciona nas argamassas maior densidade no estado endurecido. Entretanto, as

argamassas com cal possuem maior teor de ar incorporado que se reflete na menor densidade endurecida.

Nos traços onde a cal foi substituída proporcionalmente pelo rejeito (RBMF), T4 a T7, percebe-se que a massa específica do rejeito (RBMF), não gera significativa variação para densidade endurecida das argamassas.

### 4.3.2. Resistência à Compressão Axial

Pela realização de ensaios em conformidade com a NBR 13279/05, obtiveram-se os resultados referentes a resistência à compressão das argamassas conforme apresentados no Gráfico 4.12.

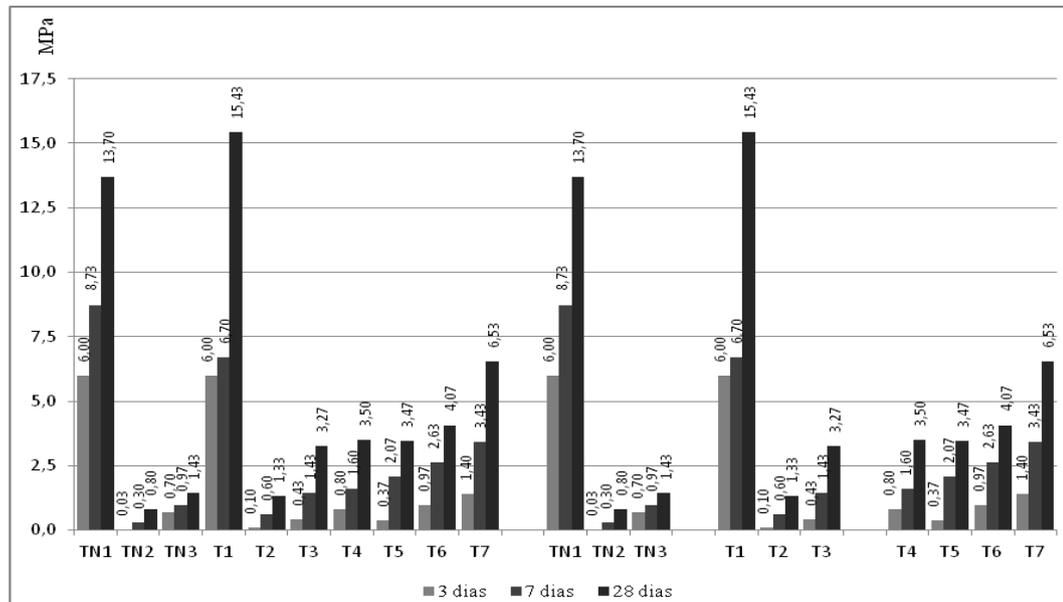


Gráfico 4.12 – Resistência à compressão axial

De acordo com estes resultados, os traços compostos com rejeito (RBMF) apresentaram um bom comportamento à compressão, sendo a resistência pouco menor quando comparada aos traços naturais, em ensaios relacionados às idades de 3 e 7 dias. Porém o resultado para a resistência à compressão foi consideravelmente superior na idade de 28 dias em todas as argamassas, principalmente nas argamassas compostas com cimento Portland em virtude das reações de hidratação do cimento. Analisando somente os

traços com rejeito (RBMF), pode-se concluir que quanto maior for a relação cimento/rejeito, maior será a resistência à compressão.

Quanto às argamassas compostas por cal, sabe-se que a cal é um aglomerante com funções importantes na argamassa, além de melhorar a trabalhabilidade, diminuir a absorção de água e o índice de vazios, porém provoca diminuição da resistência à compressão, conforme observado em TN2 em relação a TN1 e TN3, bem como T2 em relação a T1 e T3.

No entanto, para as argamassas em que a cal foi substituída pelo rejeito, T4 a T7, percebe-se que houve um melhor desempenho mecânico à compressão, proporcionalmente ao aumento da substituição de cal por rejeito; provavelmente em função do melhor envolvimento dos grãos pelos produtos de hidratação do cimento dada granulometria fina do rejeito.

### 4.3.3. Resistência à Tração na Flexão

Pela realização de ensaios em conformidade com a NBR 13279/05, obtiveram-se os resultados referentes à resistência à tração na flexão das argamassas conforme apresentados no Gráfico 4.13.

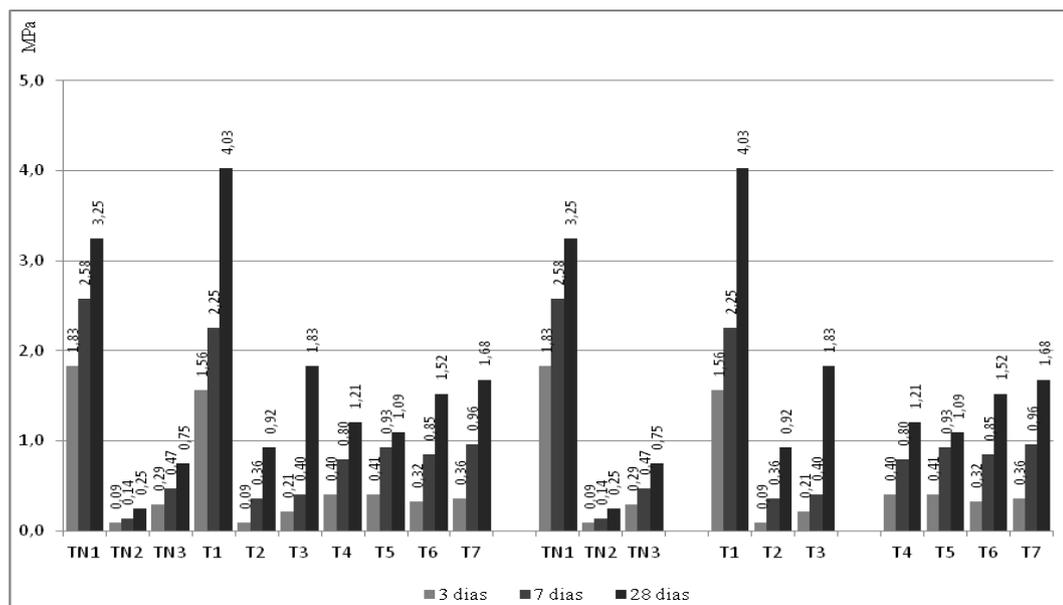


Gráfico 4.13 – Resistência à tração na flexão

Assim como na compressão, os traços compostos com rejeito (RBMF) apresentaram um bom comportamento quanto à tração na flexão, devido ao envolvimento dos grãos de rejeito (RBMF) pelos produtos de hidratação do cimento. Esses mesmos traços tiveram a resistência à tração na flexão um pouco menor do que os traços naturais, nos ensaios relativos às idades de 3 e 7 dias. Porém obtiveram um resultado superior aos 28 dias em todas as argamassas.

Analisando somente os traços compostos com resíduo (RBMF), pode-se concluir que quanto maior for à relação cimento/rejeito, maior será a resistência à tração. Também se percebe um aumento da resistência à tração na flexão nas argamassas proporcional ao aumento da substituição da cal por rejeito (RBMF), conforme análises dos resultados de T4 a T7.

#### 4.3.4. Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

Pela realização de ensaios em conformidade com a NBR 15259/05, obtiveram-se os resultados referentes absorção de água por capilaridade das argamassas conforme apresentados no Gráfico 4.14.

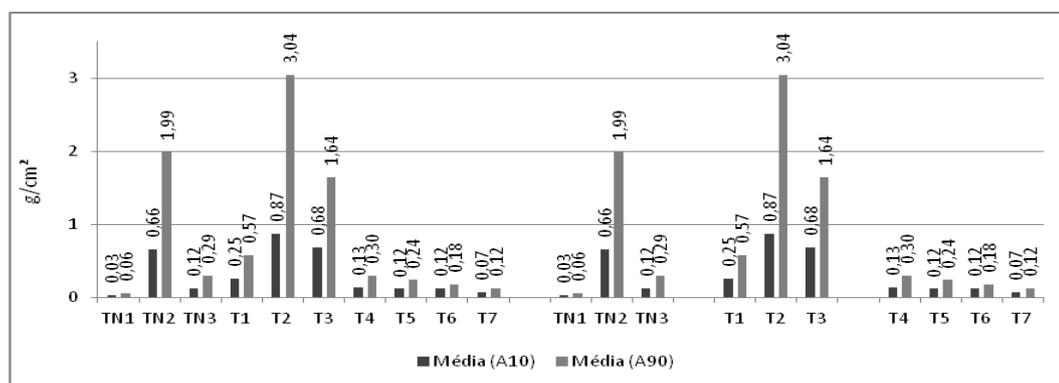


Gráfico 4.14 – Absorção de Água por Capilaridade

O coeficiente de capilaridade das argamassas experimentais foi determinado segundo especificações da NBR 15259/05, onde os resultados encontram-se apresentados no Gráfico 4.15 a seguir.

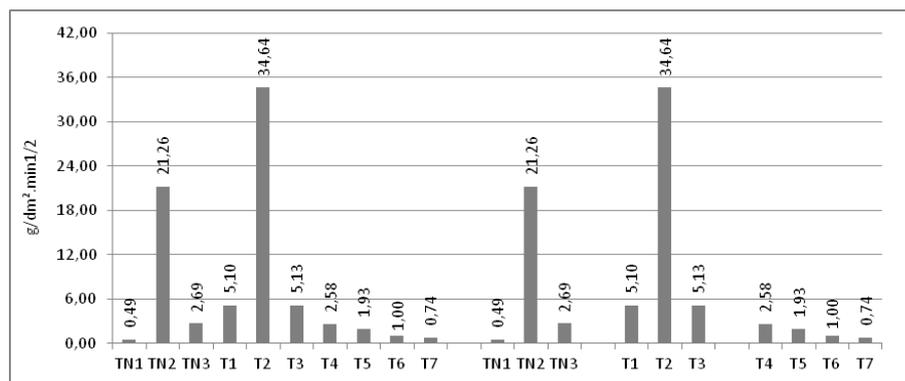


Gráfico 4.15 – Coeficiente de Capilaridade

De acordo com os resultados, verificou-se que os traços compostos com rejeito (RBMF) em substituição ao agregado natural, T1, T2 e T3, absorveram mais água por capilaridade quando comparados aos traços naturais, TN1, TN2 e TN3, pois o rejeito (RBMF) contribui para o aumento da absorção de água nas argamassas, devido à grande quantidade de partículas finas. Quanto às argamassas compostas com cal, constatou-se que estas possuem maior absorvidade, devido à capacidade absorviva dos cristais que constituem a cal. Sendo que as argamassas de cal TN2 e T2 absorveram uma quantidade elevada de água, por ação da capilaridade, e registraram velocidades iniciais de absorção muito rápidas. Observou-se também que quanto maior o teor de cal nas argamassas, maior é o coeficiente de absorção.

Nas argamassas onde a cal foi substituída proporcionalmente por rejeito (RBMF), T4 a T7, pelos resultados é possível constatar que quanto menor a proporção de cal na argamassa, menor a absorção e coeficiente de capilaridade. Relativamente à totalidade de água absorvida, as argamassas T4 e T5, registraram um desempenho razoável, o que pode estar relacionado com a proporção adotada de cal e resíduo (RBMF). Também se percebe que há uma relação entre a absorção por capilar, resistência mecânica, índice de vazios e ligantes (cimento e cal). À medida que o percentual de ligante aumenta (cal) nas argamassas, a absorção por capilaridade e a quantidade de vazios aumenta e, por outro lado, a resistência mecânica diminui.

#### 4.4. Classificação das Argamassas

As argamassas obtidas experimentalmente foram designadas segundo os parâmetros indicados pela NBR 13281/05, conforme a Tabela 4.4 apresentada a seguir:

Tabela 4.4 – Designação das argamassas experimentais.

<i>Traços</i>	<i>Designação</i>
TN1	P6, M6, R5, C1, D3, U5
TN2	P1, M4, R1, C6, D3, U6
TN3	P1, M5, R1, C3, D4, U5
T1	P6, M6, R5, C4, D5, U6
T2	P1, M3, R1, C6, D4, U5
T3	P3, M6, R2, C4, D5, U4
T4	P3, M4, R2, C3, D3, U5
T5	P3, M5, R1, C3, D4, U5
T6	P4, M5, R2, C3, D4, U4
T7	P5, M6, R3, C1, D5, U3

Esta designação tem como finalidade informar ao consumidor as propriedades do material adquirido e deve constar nas embalagens do produto, ou na documentação que acompanha o produto entregue a granel, ou ainda na documentação de execução (as built) no caso das argamassas preparadas na obra.

## 4.5. Análise Econômica das argamassas

Os resultados das análises econômicas das argamassas experimentais encontram-se no Gráfico 4.16 apresentado a seguir.

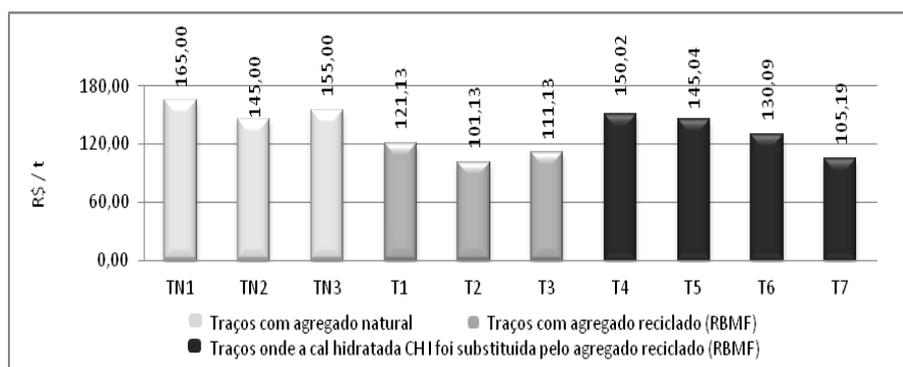


Gráfico 4.16 – Análises econômicas das argamassas experimentais

As análises econômicas das argamassas de cimento Portland encontram-se na Tabela 4.5 apresentada a seguir.

Tabela 4.5 – Análise econômica das argamassas de cimento Portland

<i>Argamassas de cimento Portland</i>	<i>Produtos</i>	<i>Valor do produto (R\$/t)</i>	<i>Valor total do produto (R\$/t)</i>	<i>Valor total do traço (R\$/t)</i>
<i>TN1</i>	<i>Cimento</i>	480	480	170
	<i>Areia</i>	60	180	
<i>T1</i>	<i>Cimento</i>	480	480	120
	<i>Rejeito (RBMF)</i>	1,5	4,5	

Pela análise dos valores dos traços das argamassas de cimento Portland percebe-se que o traço com agregado reciclado (RBMF) possui menor custo de produção em relação ao agregado natural, sendo este custo inferior em 26,6% de T1 comparado a TN1.

As análises econômicas das argamassas de cal encontram-se na Tabela 4.6 apresentada a seguir.

Tabela 4.6 – Análise econômica das argamassas de cal

<i>Argamassas de cimento Portland</i>	<i>Produtos</i>	<i>Valor do produto (R\$/t)</i>	<i>Valor total do produto (R\$/t)</i>	<i>Valor total do traço (R\$/t)</i>
<i>TN2</i>	<i>Cal</i>	400	400	150
	<i>Areia</i>	60	180	
<i>T2</i>	<i>Cal</i>	400	400	100
	<i>Rejeito (RBMF)</i>	1,5	4,5	

Pela análise dos valores dos traços das argamassas de cal percebe-se que o traço com agregado reciclado (RBMF) possui menor custo de produção em relação ao agregado natural, sendo este custo inferior em 30,2% de T2 comparado a TN2.

As análises econômicas das argamassas mistas encontram-se na Tabela 4.7 apresentada a seguir.

Tabela 4.7 – Análise econômica das argamassas mistas

<i>Argamassas de cimento Portland</i>	<i>Produtos</i>	<i>Valor do produto (R\$/t)</i>	<i>Valor total do produto (R\$/t)</i>	<i>Valor total do traço (R\$/t)</i>
<i>TN3</i>	<i>Cimento</i>	480	0,48	160
	<i>Cal</i>	400	0,40	
	<i>Areia</i>	60	0,36	
<i>T3</i>	<i>Cimento</i>	480	480	110
	<i>Cal</i>	400	400	
	<i>Rejeito (RBMF)</i>	1,5	9	

Pela análise dos valores dos traços das argamassas mistas percebe-se que o traço com agregado reciclado (RBMF) possui menor custo de produção em relação ao agregado natural, sendo este custo inferior em 28,3% de T3 comparado a TN3.

As análises econômicas das argamassas com substituição proporcional de cal por rejeito (RBMF) encontram-se na Tabela 4.8 apresentada a seguir.

Tabela 4.8 – Análise econômica das argamassas com substituição proporcional de cal por rejeito (RBMF)

<i>Argamassas de cimento Portland</i>	<i>Produtos</i>	<i>Valor do produto (R\$/t)</i>	<i>Valor total do produto (R\$/t)</i>	<i>Valor total do traço (R\$/t)</i>
<b>T4</b>	<i>Cimento</i>	480	480	<b>150</b>
	<i>Cal</i>	400	360	
	<i>Rejeito (RBMF)</i>	1,5	0,2	
	<i>Areia</i>	60	360	
<b>T5</b>	<i>Cimento</i>	480	480	<b>140</b>
	<i>Cal</i>	400	320	
	<i>Rejeito (RBMF)</i>	1,5	0,3	
	<i>Areia</i>	60	360	
<b>T6</b>	<i>Cimento</i>	480	480	<b>130</b>
	<i>Cal</i>	400	200	
	<i>Rejeito (RBMF)</i>	1,5	0,8	
	<i>Areia</i>	60	360	
<b>T7</b>	<i>Cimento</i>	480	0,48	<b>100</b>
	<i>Cal</i>	400	0,00	
	<i>Rejeito (RBMF)</i>	1,5	1,5	
	<i>Areia</i>	60	360	

Pela análise dos valores dos traços das argamassas com substituição proporcional de cal por rejeito (RBMF) constatou-se que à medida que a cal foi gradualmente substituída, os valores foram proporcionalmente reduzidos, devido ao baixo custo do rejeito (RBMF). No traço onde o rejeito (RBMF) foi usado em substituição total à cal, percebe-se que houve um decréscimo de 32,1% de T7 para TN3.

## CAPÍTULO V

*“A conclusão apresenta o resultado final do estudo, avaliando seus pontos fracos ou positivos, através da reunião sintética das principais idéias desenvolvidas ou conclusões parciais obtidas (KOOCHÉ, 1997).”*

### 5. Considerações e Sugestões

#### 5.1. Considerações Finais

Os resultados apresentados para o rejeito (RBMF) relacionam-se aos trabalhos preliminares de investigação, sendo ainda necessários estudos mais detalhados e específicos do tema.

As análises químicas das amostras de agregado reciclado (RBMF) permitiram avaliar que o resíduo é composto basicamente por Fe, Si e Al, apresentando em média 45,75% de Fe em sua composição. Pela microscopia eletrônica de varredura pode-se verificar o aspecto morfológico irregular das partículas do rejeito (RBMF), sendo possível detectar a adesão de grãos planos e com menor tamanho, aos grãos de quartzo ou hematita, o que irá, possivelmente, ocasionar um aumento de vazios no material e requer, conseqüentemente, maiores quantidades de água para obtenção de plasticidade ou trabalhabilidade necessárias nas argamassas compostas com o resíduo (RBMF).

Quanto às análises físicas das amostras dos agregados, natural e reciclado, percebe-se que o agregado reciclado apresentou uma elevada massa específica e massa aparente em relação ao agregado natural, isso se deve a grande concentração de Fe no resíduo (RBMF). Pela análise dos resultados do teor de argilas em torrões, verificou-se a facilidade que o rejeito (RBMF) tem de formar aglomerações, isso devido ao seu alto teor de finos e a sua alta capacidade higroscópica.

Quanto às análises ambientais, as amostras de rejeito (RBMF) foram classificadas como resíduo classe II A - não perigoso e não inerte. Da mesma forma, espera-se que a adição

do resíduo classe II A (RBMF) a outros materiais como cimento, cal e areia, não altere a classificação ambiental das argamassas.

Pelas análises das propriedades nos estados fresco e endurecido das argamassas experimentais, pode-se concluir que as argamassas produzidas com agregado reciclado (RBMF), T1, T2 e T3, e com agregados naturais, TN1, TN2 e TN3, apresentaram a mesma trabalhabilidade, embora as argamassas com agregado reciclado (RBMF) contivessem proporções maiores de água, menores teores de ar incorporado e maiores densidades de massa no estado fresco e endurecido, em função da elevada massa específica do rejeito (RBMF). O comportamento mecânico das argamassas compostas com rejeito (RBMF) apresentou-se superior em relação às argamassas produzidas com agregados naturais, principalmente a idade de 28 dias. Em relação às argamassas onde a cal foi substituída proporcionalmente por rejeito (RBMF), T4, T5, T6 e T7, quando comparadas à argamassa mista natural -TN3, percebem-se que as argamassas T5, T6 e T7 apresentaram maior consumo de água, menor retenção de água, maiores teores de ar incorporado, maiores densidades de massa no estado fresco e menores no estado endurecido, exceto T7 devido a grande concentração de resíduo (RBMF). Entretanto a argamassa T4, em geral, apresentou propriedades distintas das demais argamassas mencionadas quando comparadas a argamassa mista -TN3 obtendo: menor proporção de água; retenção de água e teor de ar incorporado praticamente equivalentes ao do traço natural; densidades de massa inferiores, tanto no estado fresco e quanto no estado endurecido; propriedades que tornam a argamassa T4 mais trabalhável em relação a TN3. De igual modo, é importante ressaltar que os 10% de substituição da cal por rejeito (RBMF) na argamassa, contribuíram para elevar consideravelmente a resistência mecânica da argamassa (T4).

Desta forma, os resultados alcançados permitiram avaliar que é possível usar o rejeito (RBMF) como matéria-prima de forma técnica e ambientalmente adequada para a redução dos impactos ambientais da mineração, com a produção de argamassas com agregados reciclados. A viabilidade econômica é alcançada pela produção das argamassas com o material residual da mineração (custo baixo) e pela diminuição dos

gastos relacionados aos impactos ambientais gerados, bem como a diminuição dos custos de manutenção das barragens de contenção.

## **5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Sabe-se que a durabilidade de um produto influencia decisivamente o período de tempo em que este produto vai prestar de serviços e a quantidade de recursos na manutenção, em consequência, define o seu impacto ambiental e econômico. Sendo assim recomenda-se realizar em trabalhos futuros ensaios de envelhecimento natural e ensaios de envelhecimento acelerado por meio de ciclos de molhagem e secagem, visando simular condições de utilização e avaliar a degradação das argamassas experimentais.

A aderência das argamassas é outro fator importante a ser verificado, pois sem a aderência desejável, as argamassas deixam de cumprir as funções de estanqueidade, proteção da base, além de proporcionar um aspecto esteticamente desagradável. No entanto vários fatores podem influenciar nos resultados de resistência a aderências das argamassas quando ensaiadas, entre esses: as condições climáticas (temperatura, umidade relativa do ar e vento); execução (energia de impacto, limpeza e preparo da base, cura, etc); substrato (sucção de água, rugosidade, porosidade, etc) e argamassa (reologia, adesão inicial, retenção de água, etc). Sendo assim deve-se evitar ensaiar as argamassas em condições climáticas distintas, da mesma forma os procedimentos de execução.

A capacidade do revestimento de absorver deformações pode ser avaliada pelo módulo de elasticidade, que pode ser obtido pelo método estático ou dinâmico.

A estequiometria torna-se fundamental para melhor compreensão da influência do resíduo (RBMF) nas propriedades das argamassas.

Gastos relacionados ao deslocamento do resíduo (RBMF), bem como o tempo de execução das argamassas pela mão de obra, a viabilidade de uso de equipamentos mecânicos e o rendimento do produto também devem ser considerados em análises futuras.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABRÃO, P.C. **Sobre a Deposição de Rejeitos de Mineração no Brasil**. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, 1987, Rio de Janeiro.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. V.5, São Paulo: Blucher, 2011.

ALVES, F. **A mineração está tentando fazer o seu dever de casa**. Disponível em: [http://saladeimprensa.vale.com/pt/versao\\_impresao/prt\\_detail.asp?tipo=1&id=12478](http://saladeimprensa.vale.com/pt/versao_impresao/prt_detail.asp?tipo=1&id=12478), acessado em 26 de agosto de 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**. Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5737**. Cimentos Portland Resistentes a Sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457**. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 7175**. Cal Hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7217**. Agregados - Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 7218**. Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 7251**. Agregado em estado solto - determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776**. Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 9939**. Agregados – Agregados - Determinação do teor de umidade total, por secagem. Rio de Janeiro, 1987

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**. Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005**. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006**. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13277**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 13277**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13278**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13280**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13529**. Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 15258**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15259**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

BAÍÁ, L.L.; SABATTINI, 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. 82p.

BARRETO, M. L. **Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.

BASTOS, M. A. R. **Avaliação de sistemas construtivos semi e/ou industrializados de edifícios de andares múltiplos por meio da perspectiva de seus usuários**. Ouro Preto, 2004. 458 p., 2 Vol. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. São Paulo, 2001. 172 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BITAR, O. Y. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na região metropolitana de São Paulo**. São Paulo, 1997. 193 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARASEK, H. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo, IBRACON, 2007.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassa de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese de doutorado – EPUSP, São Paulo, 2009.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, VANDERLEY M. **A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassa**. *Ambiente Construído*. São Paulo, v. 1, n. 2, p. 37-44, jul/dez. 1997.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. Boletim Técnico n. 237.

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: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. Anais. Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 518-529.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. Anais. Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

CHAVES, L. F. M. **Estudo da adição do resíduo proveniente da extração de minério de ferro em argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. 167 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: [http://bdtd.bczm.ufrn.br/tesesimplificado/tde\\_arquivos/25/TDE-2010-04-22T111701Z-2532/Publico/LeonardoFM.pdf](http://bdtd.bczm.ufrn.br/tesesimplificado/tde_arquivos/25/TDE-2010-04-22T111701Z-2532/Publico/LeonardoFM.pdf), acessado em 12 de dezembro de 2012.

CHEN, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, T. et al. **Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings**. Construction and Building Materials. 2011. v. 25. 2107–2111 p. Departamento Intersindical de estatística e estudos socioeconômicos. Estudo setorial da construção 2011. 2011. Disponível em [http://portal.mte.gov.br/data/files/8A7C816A2E7311D1012FE92DE9D55581/estudo\\_setorial\\_construcao\\_04-2011.pdf](http://portal.mte.gov.br/data/files/8A7C816A2E7311D1012FE92DE9D55581/estudo_setorial_construcao_04-2011.pdf), acessado em 25 de março de 2013.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassas de revestimento; Características, propriedades e métodos de ensaio** (Publicação IPT 2378). 1. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p.

CREA. **A força da mineração.** Disponível em <http://www.crea-mg.org.br/revista/materias/Paginas/A-for%C3%A7a-da-minera%C3%A7%C3%A3o.aspx>, acessado em 19 de outubro de 2013.

DAFICO, D. A. **Método para obtenção de independência entre resistência e elasticidade em estudos de dosagem de argamassas mistas.** Ambiente Construído, v.7, p. 35-42, 2007.

D'AGOSTINO, L. F. (2008). **Praias de Barragens de Rejeitos de Mineração: Características e Análise da Sedimentação.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, USP, São Paulo. 374p.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras.** Porto Alegre: Edipucrs, 2007.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco.** Belo Horizonte, 2008. 130 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico.** 2000. 363 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2000.

FEAM. **Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração ano base 2010.** Disponível em: [http://www.feam.br/images/stories/arquivos/inventarios/relatorio\\_inventario\\_mineracao\\_2010.pdf](http://www.feam.br/images/stories/arquivos/inventarios/relatorio_inventario_mineracao_2010.pdf), acessado em 27 de agosto de 2013.

FEAM. **Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração ano base 2011.** Disponível em: [http://www.feam.br/images/stories/inventario/\\_relatrio\\_inventrio\\_minerao\\_2012\\_ano%20base%202011-revisao03.pdf](http://www.feam.br/images/stories/inventario/_relatrio_inventrio_minerao_2012_ano%20base%202011-revisao03.pdf), acessado em 27 de agosto de 2013.

FEAM. **Inventário estadual de barragens do estado de Minas Gerais.** Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/inventario/inventrio%20de%20barragens%2012.pdf>, acessado em 10 de outubro de 2013.

GERMANI, D. J. (2002). **A Mineração no Brasil. Relatório Final.** pp. 11-48. Disponível em: <http://ftp.mct.gov.br>, acessado em 15 de maio de 2013.

GODOY, E. H. P.; BARROS, M. M. S. B. **Proposta de procedimento de ensaio para avaliação do módulo de deformação de argamassas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, III., 1999, Vitória. Anais... Vitória: ANTAC, 1999. p. 159-167.

GOMES, A. M. **A utilização da ultrasonografia na avaliação das propriedades mecânicas dos revestimentos de paredes através de ensaios “in situ”.** In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., 1997, Salvador. Anais. Salvador: ANTAC, 1997. p. 445 – 456.

GUIMARÃES, J. E. P.; **A cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil.** São Paulo: PINI, 1998.

IBRAM. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira.** 7ª edição. 2012. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>, acessado em 30 de agosto de 2013.

INMETRO. **Relatório sobre análise em cal Hidratada.** Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/calHidratada.asp>, acessado em 17 de setembro de 2013.

INPI. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. **Processo de separação do minério de ferro contido em resíduos provenientes da extração e beneficiamento do minério de ferro.** Pedido de patente BR 10 2012 008758 8, 2012.

ISAIA, G. E., et al. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais,** IBRACON, 2007.

JENKINS, R.; GOULD; R.W.; GEDCKE, D. **Quantitative X-ray Spectrometry.** 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1995.

KOOCHÉ, J. C. Elementos textuais. In: KOOCHÉ, José Carlos. **Fundamentos de Metodologia Científica.** 14. ed. rev. e ampl. Petrópolis: Vozes, 1997.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A.. Pesquisa. In: LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Técnica de pesquisa**. 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: Atlas, 1996. p. 15-123.

LARA, D.; NASCIMENTO, O.; MACEDO, A.; GALLO, G.; PEREIRA, L.; POTY, E. **Dosagem das argamassas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I., 1995, Goiânia. Anais... Goiânia: ANTAC, 1995. p. 63-72.

LEJEUNE, C. **Revestimentos inorgânicos – A contribuição francesa**, trad.: CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. *TECHNE*, n22, jun1996, p.30-34.

MARQUES, S. M. F. **Estudos de argamassas de reabilitação de edifícios antigos**. 2005. Aveiro, 2005. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Aveiro.

NAKAKURA, E. H.. **Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a meruc**. São Paulo, 2003. 198 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PAIVA, S. C.; GOMES, E. A.; OLIVEIRA, R. A. **Controle de Qualidade da Cal para Argamassas – Metodologias Alternativas**. *Revista Ciência & Tecnologia*. Ano 1, nº 1, pp.1-11, 2007.

PRESOTTI, E. S. (2002). **Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 153p.

RANGO, F.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas**. São Paulo: ESUSP, 1999. 24 p.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo Argamassa**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2008.

RIBEIRO, N. P. **Alvenarias e argamassas: restauração e conservação**. Rio de Janeiro: In-Fólio, 2009. P.63-89.

ROSELLO, M. T. V. **Morteros de cemento para albanileria**. Madrid: Instituto Eduardo Torroja, 1976. 55 p.

RUIZ, J. A. **As três partes lógicas do texto**. In: RUIZ, João Álvaro. Metodologia Científica. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1996. Cap. 3, p. 74-77.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílicocalcária**. São Paulo. 1984. 298 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. **Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração**. Caderno de Diagnóstico (Versão Preliminar). Plano Nacional de Mineração 2030. Brasília, 2011.

SILVA, N. G. **Argamassas de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Curitiba, 2006. 164 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

SOUZA, C.C.; VIEIRA, C.M.F.; MONTEIRO, S.N. **Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro**. Revista Matéria, 2008, v. 13, n. 1, pp. 194 – 202.

STIEF, J. N. P. **Análise das deformações, por extensometria, em concreto armado convencional e com agregados de escória de aciaria**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CEFET, Belo Horizonte, 2009.

TAHA, M. M. R.; SHRIVE, N. G. **The use of pozzolans to improve bond and bond strength**. In: CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, 9th., 2001, Fredericton. Proceedings. Fredericton: University of New Brunswick, 2001.

TMCRJ. **Barragem volta a vazar em Minas e atinge três cidades no Rio**. Disponível em <http://www.tcm.rj.gov.br/WEB/Site/Noticias.aspx?Categoria=41>, acessado em 19 de outubro de 2013.

YELLISHETTY M, KARPE V, REDDY EH, et al. **Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: a case study**. Resour Conserv Recycl 2008;52:1283 – 9.

## APÊNDICES

### Apêndice A – Dados da Distribuição Granulométrica

A Tabela A1 apresenta porcentagens retidas de rejeito (RBMF) acumuladas em peso nas peneiras.

Tabela A1 – Porcentagens retidas de rejeito (RBMF) nas peneiras

<i>Porcentagem retida acumulada, em peso, nas # de abertura, em mm</i>						
<i>Graduação</i>	<i>Zona Ótima</i>		<i>Zona Utilizável</i>		<i>Rejeito</i>	<i>Areia</i>
9,5	0%	0%	0%	0%	0,0%	0%
6,3	0%	0%	0%	7%	0,0%	0%
4,8	0%	5%	0%	10%	0%	1%
2,4	10%	20%	0%	25%	1%	3%
1,2	20%	30%	5%	50%	6%	8%
0,6	35%	55%	15%	70%	10%	33%
0,3	65%	85%	50%	95%	18%	81%
0,15	90%	95%	85%	100%	27%	96%
0,075	100%	100%	100%	100%	47%	99%
0,074	100%	100%	100%	100%	100%	100%

## Apêndice B – Índice de Consistência

A Tabela B1 apresenta os dados para os cálculos da relação água/aglomerante das argamassas experimentais.

Tabela B1 – Cálculo da relação água/aglomerante

<i>Relação Água/Aglomerantes</i>				
<i>Traço</i>	<i>Água (L)</i>	<i>Aglomerante (cimento) - Kg</i>	<i>Aglomerante (cal) - Kg</i>	<i>A/A</i>
<i>TN1</i>	<i>0,60</i>	<i>0,7</i>	<i>0</i>	<i>0,85</i>
<i>TN2</i>	<i>1,07</i>	<i>0</i>	<i>0,7</i>	<i>1,53</i>
<i>TN3</i>	<i>0,58</i>	<i>0,4</i>	<i>0,4</i>	<i>0,73</i>
<i>T1</i>	<i>0,55</i>	<i>0,6</i>	<i>0</i>	<i>0,91</i>
<i>T2</i>	<i>0,95</i>	<i>0</i>	<i>0,7</i>	<i>1,36</i>
<i>T3</i>	<i>1,08</i>	<i>0,433</i>	<i>0,433</i>	<i>1,24</i>
<i>T4</i>	<i>0,65</i>	<i>0,5</i>	<i>0,45</i>	<i>0,69</i>
<i>T5</i>	<i>0,56</i>	<i>0,397</i>	<i>0,317</i>	<i>0,78</i>
<i>T6</i>	<i>0,68</i>	<i>0,5</i>	<i>0,25</i>	<i>0,90</i>
<i>T7</i>	<i>0,82</i>	<i>0,515</i>	<i>0</i>	<i>1,60</i>
<i>TN1</i>	<i>0,60</i>	<i>0,7</i>	<i>0</i>	<i>0,85</i>
<i>TN2</i>	<i>1,07</i>	<i>0</i>	<i>0,7</i>	<i>1,53</i>
<i>TN3</i>	<i>0,58</i>	<i>0,4</i>	<i>0,4</i>	<i>0,73</i>
<i>T1</i>	<i>0,55</i>	<i>0,6</i>	<i>0</i>	<i>0,91</i>
<i>T2</i>	<i>0,95</i>	<i>0</i>	<i>0,7</i>	<i>1,36</i>
<i>T3</i>	<i>1,08</i>	<i>0,433</i>	<i>0,433</i>	<i>1,24</i>
<i>T4</i>	<i>3,91</i>	<i>3</i>	<i>2,7</i>	<i>0,69</i>
<i>T5</i>	<i>0,56</i>	<i>0,397</i>	<i>0,317</i>	<i>0,78</i>
<i>T6</i>	<i>4,05</i>	<i>3</i>	<i>1,5</i>	<i>0,90</i>
<i>T7</i>	<i>4,94</i>	<i>3,09</i>	<i>0</i>	<i>1,60</i>

## Apêndice C – Retenção de Água

A Tabela C1 apresenta os dados para os cálculos das porcentagens de água retidas das argamassas experimentais.

Tabela C1 – Cálculos das porcentagens de água retidas

<i>Retenção de água</i>								
<i>Traço</i>	<i>Mse</i>	<i>Mm</i>	<i>Mma</i>	<i>Mf</i>	<i>Mw</i>	<i>M</i>	<i>AF</i>	<i>Ra</i>
<i>TN1</i>	10,3	717,6	1109,3	14,9	300	1760	0,15	92%
<i>TN2</i>	10,2	717,5	1055,9	10,7	1070	2800	0,28	99%
<i>TN3</i>	9,8	717,6	1091,9	12,6	800	3200	0,20	96%
<i>T1</i>	11,8	717,5	1136,9	13,5	900	3600	0,20	98%
<i>T2</i>	10,1	717,6	1099,1	13,7	950	2800	0,25	96%
<i>T3</i>	10,3	717,6	1140,2	14,5	780	5200	0,13	92%
<i>T4</i>	10,3	717,5	1073,1	13,5	3909	24000	0,14	94%
<i>T5</i>	10,1	717,4	1103,7	14,4	600	3174	0,16	93%
<i>T6</i>	9,8	717,5	1090,03	14,71	4051	24000	0,14	91%
<i>T7</i>	9,8	717,3	1120,4	18,9	4936	24730	0,17	86%
<i>TN1</i>	10,3	717,6	1109,3	14,9	300	1760	0,15	92%
<i>TN2</i>	10,2	717,6	1055,9	10,7	1070	2800	0,28	99%
<i>TN3</i>	9,8	717,6	1091,9	12,6	800	3200	0,20	96%
<i>T1</i>	11,8	717,5	1136,9	13,5	900	3600	0,20	98%
<i>T2</i>	10,1	717,6	1099,1	13,8	950	2800	0,25	96%
<i>T3</i>	10,3	717,6	1140,2	14,5	780	5200	0,13	92%
<i>T4</i>	10,3	717,5	1073,1	13,5	3909	24000	0,14	94%
<i>T5</i>	10,1	717,4	1103,7	14,4	600	3174	0,16	93%
<i>T6</i>	9,8	717,5	1090,03	14,71	4051	24000	0,14	91%
<i>T7</i>	9,8	717,3	1120,4	18,9	4936	24730	0,17	86%

## Apêndice D – Densidade de Massa no Estado Fresco

A Tabela D1 apresenta os dados para os cálculos das densidades de massa no estado fresco das argamassas experimentais.

Tabela D1 – Cálculos das densidades de massa no estado fresco

<i>Densidade de massa no estado fresco</i>				
<i>Traço</i>	<i>Massa</i>	<i>Massa recipiente</i>	<i>Volume</i>	<i>Densidade (A) kg/m<sup>3</sup></i>
<i>TN1</i>	825,1	114,6	400	1776
<i>TN2</i>	807,5	114,8	400	1732
<i>TN3</i>	864,2	114,8	400	1874
<i>T1</i>	975,6	114,6	400	2153
<i>T2</i>	883,9	114,8	400	1923
<i>T3</i>	952,2	114,7	400	2094
<i>T4</i>	834,4	114,8	400	1799
<i>T5</i>	892,6	114,6	400	1945
<i>T6</i>	904,1	114,6	400	1974
<i>T7</i>	925,2	114,7	400	2026
<i>TN1</i>	825,1	114,6	400	1776
<i>TN2</i>	807,4	114,8	400	1732
<i>TN3</i>	864,2	114,8	400	1874
<i>T1</i>	975,6	114,6	400	2153
<i>T2</i>	883,9	114,8	400	1923
<i>T3</i>	952,2	114,7	400	2094
<i>T4</i>	834,4	114,8	400	1799
<i>T5</i>	892,6	114,6	400	1945
<i>T6</i>	904,1	114,6	400	1974
<i>T7</i>	925,2	114,7	400	2026

## Apêndice E – Densidade de Massa no Estado Endurecido

As Tabelas E1 a E10 apresentam os dados para os cálculos das densidades de massa no estado Endurecido das argamassas experimentais.

Tabela E1 – Cálculo da densidade de massa no estado endurecido de TN1

<i>TN1</i>						
	<i>C (m)</i>	<i>L (m)</i>	<i>H (m)</i>	<i>M (Kg)</i>	<i>Volume (m<sup>3</sup>)</i>	<i>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</i>
<i>Corpo de Prova I</i>	0,0401	0,0399	0,1604	0,5134		2011,812316
	0,0401	0,0395	0,1602	0,5134		
<i>Média</i>	0,0401	0,0397	0,1603	0,5134	0,000255193	2011
<i>Corpo de Prova II</i>	0,0404	0,0396	0,16	0,5113		2001,147456
	0,0402	0,0397	0,1598	0,5113		
<i>Média</i>	0,0403	0,03965	0,1599	0,5113	0,000255503	2001
<i>Corpo de prova III</i>	0,0403	0,0383	0,1588	0,5167		2098,458035
	0,0401	0,0386	0,1598	0,5167		
<i>Média</i>	0,0402	0,03845	0,1593	0,5167	0,000246228	2098
					<i>Média das Densidades:</i>	2037

Tabela E2 – Cálculo da densidade de massa no estado endurecido de TN2

<i>TN2</i>						
	<i>C (m)</i>	<i>L (m)</i>	<i>H (m)</i>	<i>M (Kg)</i>	<i>Volume (m<sup>3</sup>)</i>	<i>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</i>
<i>Corpo de Prova I</i>	0,0396	0,0397	0,1562	0,3835		1566,609758
	0,0397	0,0392	0,1568	0,3835		
<i>Média</i>	0,03965	0,03945	0,1565	0,3835	0,000244796	1567
<i>Corpo de Prova II</i>	0,04	0,0391	0,1579	0,3965		1603,009871
	0,0401	0,0393	0,1572	0,3965		
<i>Média</i>	0,04005	0,0392	0,15755	0,3965	0,000247347	1603
<i>Corpo de prova III</i>	0,0395	0,0397	0,1572	0,3873		1575,080206
	0,0395	0,0395	0,1572	0,3873		
<i>Média</i>	0,0395	0,0396	0,1572	0,3873	0,000245892	1575
					<i>Média das Densidades:</i>	1582

Tabela E3 – Cálculo da densidade de massa no estado endurecido de TN3

<b>TN3</b>						
	<b>C (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>M (Kg)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Corpo de Prova I</i>	0,0401 0,0402	0,0394 0,0395	0,1596 0,1602	0,46228 0,46228		1825,257256
<i>Média</i>	0,04015	0,03945	0,1599	0,46228	0,000253268	1825
<i>Corpo de Prova II</i>	0,0415 0,0414	0,0404 0,0405	0,1598 0,1598	0,47315 0,473,15		1765,952462
<i>Média</i>	0,04145	0,04045	0,1598	0,47315	0,000267929	1766
<i>Corpo de prova III</i>	0,0402 0,0404	0,0403 0,0405	0,16 0,16	0,47513 0,47513		1823,921148
<i>Média</i>	0,0403	0,0404	0,16	0,47513	0,000260499	1824
					<i>Média das Densidades:</i>	1805,043622

Tabela E4 – Cálculo da densidade de massa no estado endurecido de T1

<b>T1</b>						
	<b>C (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>M (Kg)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Corpo de Prova I</i>	0,0384 0,0385	0,0396 0,0395	0,1604 0,1602	0,5091 0,5091		2088,462794
<i>Média</i>	0,03845	0,03955	0,1603	0,5091	0,000243768	2088
<i>Corpo de Prova II</i>	0,0392 0,0391	0,04 0,04	0,1596 0,16	0,5101 0,5101		2038,387704
<i>Média</i>	0,03915	0,04	0,1598	0,5101	0,000250247	2038
<i>Corpo de prova III</i>	0,0394 0,0395	0,0383 0,0386	0,1588 0,1596	0,5083 0,5083		2104,910791
<i>Média</i>	0,03945	0,03845	0,1592	0,5083	0,000241483	2105
					<i>Média das Densidades:</i>	2077,25

Tabela E5 – Cálculo da densidade de massa no estado endurecido de T2

<b>T2</b>						
	<b>C (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>M (Kg)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Corpo de Prova I</i>	0,0393 0,0395	0,0397 0,039	0,1557 0,1564	0,3794 0,3794		1568,168028
<i>Média</i>	0,0394	0,03935	0,15605	0,3794	0,000241938	1568
<i>Corpo de Prova II</i>	0,0393 0,0388	0,0387 0,0388	0,1549 0,1551	0,369 0,369		1573,265151
<i>Média</i>	0,03905	0,03875	0,155	0,369	0,000234544	1573
<i>Corpo de prova III</i>	0,0391 0,0393	0,0385 0,0384	0,1553 0,1552	0,3656 0,3656		1562,399773
<i>Média</i>	0,0392	0,03845	0,15525	0,3656	0,000233999	1562
					<i>Média das Densidades:</i>	1567,944317

Tabela E6 – Cálculo da densidade de massa no estado endurecido de T3

<b>T3</b>						
	<b>C (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>M (Kg)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Corpo de Prova I</i>	0,0399	0,0409	0,1592	0,4796		1846,418645
	0,0402	0,0405	0,1595	0,4796		
<i>Média</i>	0,04005	0,0407	0,15935	0,4796	0,000259746	1846
<i>Corpo de Prova II</i>	0,0376	0,0405	0,1606	0,494		2008,627462
	0,038	0,0405	0,1607	0,494		
<i>Média</i>	0,0378	0,0405	0,16065	0,494	0,000245939	2009
<i>Corpo de prova III</i>	0,0401	0,0391	0,1609	0,482		1917,958295
	0,0401	0,0388	0,1609	0,482		
<i>Média</i>	0,0401	0,03895	0,1609	0,482	0,000251309	1918
					<i>Média das Densidades:</i>	1924,334801

Tabela E7 – Cálculo da densidade de massa no estado endurecido de T4

<b>T4</b>						
	<b>C (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>M (Kg)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Corpo de Prova I</i>	0,0392	0,04	0,1596	0,4209		1681,939589
	0,0391	0,04	0,16	0,4209		
<i>Média</i>	0,03915	0,04	0,1598	0,4209	0,000250247	1682
<i>Corpo de Prova II</i>	0,0397	0,04	0,1599	0,4175		1629,84836
	0,0405	0,04	0,1595	0,4175		
<i>Média</i>	0,0401	0,04	0,1597	0,4175	0,000256159	1630
<i>Corpo de prova III</i>	0,0398	0,0401	0,1596	0,4173		1644,99284
	0,0395	0,0401	0,1595	0,4173		
<i>Média</i>	0,03965	0,0401	0,15955	0,4173	0,000253679	1645
					<i>Média das Densidades:</i>	1652

Tabela E8 – Cálculo da densidade de massa no estado endurecido de T5

<b>T5</b>						
	<b>C (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>M (Kg)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Corpo de Prova I</i>	0,0417	0,0403	0,1616	0,43415		1600,798311
	0,0419	0,0405	0,1596	0,43415		
<i>Média</i>	0,0418	0,0404	0,1606	0,43415	0,000271208	1601
<i>Corpo de Prova II</i>	0,0405	0,0411	0,1605	0,43707		1628,569143
	0,0405	0,0415	0,1604	0,43707		
<i>Média</i>	0,0405	0,0413	0,16045	0,43707	0,000268377	1629
<i>Corpo de prova III</i>	0,0401	0,0393	0,1609	0,4405		1718,622065
	0,0404	0,0402	0,1595	0,4405		
<i>Média</i>	0,04025	0,03975	0,1602	0,4405	0,00025631	1719
					<i>Média das Densidades:</i>	1649

Tabela E9 – Cálculo da densidade de massa no estado endurecido de T6

<b>T6</b>						
	<b>C (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>M (Kg)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Corpo de Prova I</i>	0,0416	0,0415	0,16	0,45581		1658,115566
	0,0413	0,0414	0,16	0,45581		
<i>Média</i>	0,04145	0,04145	0,16	0,45581	0,000274896	1658
<i>Corpo de Prova II</i>	0,0412	0,0403	0,1622	0,46954		1747,165631
	0,0415	0,04	0,1615	0,4694		
<i>Média</i>	0,04135	0,04015	0,16185	0,46947	0,000268704	1747
<i>Corpo de prova III</i>	0,0405	0,04	0,1603	0,45993		1763,356506
	0,0403	0,0405	0,1605	0,45993		
<i>Média</i>	0,0404	0,04025	0,1604	0,45993	0,000260826	1763
					<i>Média das Densidades:</i>	1723

Tabela E10 – Cálculo da densidade de massa no estado endurecido de T7

<b>T7</b>						
	<b>C (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>M (Kg)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Corpo de Prova I</i>	0,041	0,0395	0,1608	0,52455		2026,278697
	0,04	0,0402	0,16	0,52455		
<i>Média</i>	0,0405	0,03985	0,1604	0,52455	0,000258874	2026
<i>Corpo de Prova II</i>	0,04	0,0407	0,1618	0,5195		1951,55483
	0,0405	0,041	0,162	0,5195		
<i>Média</i>	0,04025	0,04085	0,1619	0,5195	0,000266198	1952
<i>Corpo de prova III</i>	0,0402	0,041	0,1619	0,52194		360,0379726
	0,0406	0,0403	0,1604	0,52194		
<i>Média</i>	0,0404	0,04065	0,16115	0,52194	0,00264665	1972
					<i>Média das Densidades:</i>	1983

## Apêndice F – Resistência à Compressão Axial

<i>Traços</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa) - 3dias</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa) - 7 dias</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa) - 28 dias</i>
<i>TN1</i>	6,10	7,90	12,00
	6,00	8,90	14,60
	5,90	9,40	14,50
<i>Média</i>	6,00	8,73	13,70
<i>TN2</i>	0,10	0,30	0,80
	0,00	0,30	0,70
	0,00	0,30	0,90
<i>Média</i>	0,03	0,30	0,80
<i>TN3</i>	0,80	0,90	1,40
	0,60	0,90	1,50
	0,70	1,10	1,40
<i>Média</i>	0,70	0,97	1,43
<i>T1</i>	5,80	6,50	15,80
	5,90	6,70	15,60
	6,30	6,90	14,90
<i>Média</i>	6,00	6,70	15,43
<i>T2</i>	0,10	0,60	1,30
	0,10	0,60	1,30
	0,10	0,60	1,40
<i>Média</i>	0,10	0,60	1,33
<i>T3</i>	0,40	1,50	3,10
	0,40	1,20	3,40
	0,50	1,60	3,30
<i>Média</i>	0,43	1,43	3,27
<i>T4</i>	0,80	2,30	3,60
	0,80	0,50	3,40
	0,80	2,00	3,50
<i>Média</i>	0,80	1,60	3,50
<i>T5</i>	0,20	2,20	3,60
	0,30	1,90	3,60
	0,60	2,10	3,20
<i>Média</i>	0,37	2,07	3,47
<i>T6</i>	1,00	2,50	4,00
	0,80	2,80	4,20
	1,10	2,60	4,20
<i>Média</i>	0,97	2,63	4,07
<i>T7</i>	1,60	4,60	6,50
	1,20	3,90	6,90
	1,40	1,80	6,20
<i>Média</i>	1,40	3,43	6,53

## Apêndice G – Resistência à Tração na Flexão

<i>Traços</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa) - 3 dias</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa) - 7 dias</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa) - 28 dias</i>
<i>TN1</i>	1,78	2,34	3,02
	1,90	2,53	3,02
	1,80	2,86	3,70
<i>Média</i>	1,83	2,58	3,25
<i>TN2</i>	0,09	0,14	0,21
	0,09	0,16	0,35
	0,07	0,12	0,19
<i>Média</i>	0,09	0,14	0,25
<i>TN3</i>	0,25	0,49	0,83
	0,35	0,49	0,74
	0,27	0,42	0,68
<i>Média</i>	0,29	0,47	0,75
<i>T1</i>	1,42	2,27	2,81
	1,80	2,18	5,25
	1,45	2,30	4,03
<i>Média</i>	1,56	2,25	4,03
<i>T2</i>	0,09	0,52	1,02
	0,07	0,26	0,86
	0,12	0,30	0,89
<i>Média</i>	0,09	0,36	0,92
<i>T3</i>	0,23	0,43	1,87
	0,22	0,41	1,89
	0,19	0,36	1,73
<i>Média</i>	0,21	0,40	1,83
<i>T4</i>	0,38	0,82	1,03
	0,42	0,63	1,17
	0,40	0,94	1,43
<i>Média</i>	0,40	0,80	1,21
<i>T5</i>	0,40	0,75	0,98
	0,45	1,05	0,96
	0,38	0,98	1,34
<i>Média</i>	0,41	0,93	1,09
<i>T6</i>	0,09	0,73	1,59
	0,42	0,91	1,17
	0,45	0,91	1,80
<i>Média</i>	0,32	0,85	1,52
<i>T7</i>	0,30	1,01	1,43
	0,40	0,94	1,66
	0,38	0,94	1,95
<i>Média</i>	0,36	0,96	1,68

## Apêndice H – Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

As Tabelas H1 a H4 apresentam os dados para os cálculos da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade das argamassas experimentais.

Tabela H1 – Cálculo da absorção de água por capilaridade – Corpo de prova 1

<b>Traço</b>	<b><math>m_o</math></b>	<b><math>m_{10}</math></b>	<b><math>m_{90}</math></b>	<b>A10</b>	<b>A90</b>
TN1	517,4	517,8	518,2	0,026875	0,05
TN2	411,6	422,3	443,8	0,674375	2,014375
TN3	462,28	464,69	467,55	0,150625	0,329375
T1	509,1	513,1	517,8	0,25	0,54375
T2	381,19	395,17	430,37	0,87375	3,07375
T3	479,65	483,96	490,64	0,269375	0,686875
T4	443,7	445,8	448,4	0,13125	0,2925
T5	434,4	436,0	438,7	0,10125	0,2675
T6	455,31	456,9	457,56	0,099375	0,140625
T7	519,96	521,92	522,61	0,1225	0,165625

Tabela H2 – Cálculo da absorção de água por capilaridade – Corpo de prova 2

<b>Traço</b>	<b><math>m_o</math></b>	<b><math>m_{10}</math></b>	<b><math>m_{90}</math></b>	<b>A10</b>	<b>A90</b>
TN1	526,4	526,8	527,4	0,0225	0,06375
TN2	408,8	419,0	440,6	0,635	1,985625
TN3	473,15	474,93	477,39	0,11125	0,265
T1	510,1	514,3	519,5	0,2625	0,5875
T2	371,46	385,14	418,99	0,855	2,970625
T3	491,04	496,14	499,89	0,31875	0,553125
T4	438,9	440,8	443,2	0,11875	0,26875
T5	436,7	439,0	440,2	0,144375	0,22125
T6	465,72	467,5	468,89	0,11125	0,198125
T7	526,53	527,39	528,14	0,05375	0,100625

Tabela H3 – Cálculo da absorção de água por capilaridade – Corpo de prova 3

<b>Traço</b>	<b><math>m_o</math></b>	<b><math>m_{10}</math></b>	<b><math>m_{90}</math></b>	<b>A10</b>	<b>A90</b>
TN1	530,8	531,2	531,7	0,026875	0,054375
TN2	400,0	410,7	431,4	0,66875	1,96375
TN3	475,13	476,89	479,63	0,11	0,28125
T1	508,3	512,2	517,6	0,24375	0,58125
T2	368,05	382,32	417,18	0,891875	3,070625
T3	482,05	487,91	492,87	0,36625	0,67625
T4	438,6	441	443,8	0,151875	0,324375
T5	442,2	443,8	445,7	0,1025	0,220625
T6	459,98	462,24	463,2	0,14125	0,20125
T7	518,77	519,41	520,18	0,04	0,088125

Tabela H4 – Cálculo da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade

<i>Traço</i>	<i>Média (A10)</i>	<i>Média (A90)</i>	<i>Traço</i>	<i>cp1</i>	<i>cp2</i>	<i>cp3</i>	<i>Coefficiente de capilaridade</i>
<i>TN1</i>	0,02541667	0,056041667	<i>TN1</i>	0,4	0,7	0,4	0,49
<i>TN2</i>	0,659375	1,987916667	<i>TN2</i>	21,4	21,6	20,7	21,26
<i>TN3</i>	0,12395833	0,291875	<i>TN3</i>	2,9	2,5	2,7	2,69
<i>T1</i>	0,252083	0,570833	<i>T1</i>	4,7	5,2	5,4	5,10
<i>T2</i>	0,87354167	3,038333333	<i>T2</i>	35,2	33,9	34,9	34,64
<i>T3</i>	0,680000	1,64000	<i>T3</i>	6,7	3,8	5,0	5,13
<i>T4</i>	0,13395833	0,295208333	<i>T4</i>	2,6	2,4	2,8	2,58
<i>T5</i>	0,11604167	0,236458333	<i>T5</i>	2,7	1,2	1,9	1,93
<i>T6</i>	0,11729167	0,18	<i>T6</i>	0,7	1,4	1,0	1,00
<i>T7</i>	0,07208333	0,118125	<i>T7</i>	0,7	0,8	0,8	0,74

## Apêndice I – Análises Ambientais do Agregado Reciclado (RBMF)

Apresentam-se cópias dos ensaios de lixiviação, solubilização e conclusão da amostra in-natura de rejeito (RBMF).



### RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 014346

Projeto/Cliente: AVG MINERAÇÃO S/A

Código ASL: 014346/65319

Identificação da Amostra: REJEITO GERADO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO

Matriz: RESÍDUO

Data de Coleta: 25/01/2010

### RESULTADOS ANALÍTICOS

#### LAUDO DE ANÁLISE DE MASSA BRUTA

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
pH	SMEWW 4500-H+.B	U.pH	0,1	NA	2,0 A 12,5	6,0
Sulfeto	SMWW 4500 SO2 - G e H	mg/Kg	0,0013	0,2760	500	3,65
Cianeto	SMEWW 4500CN C e F	mg/L	0,0007	0,0022	250	<0,002
Óleos e Graxas	USEPA 9070A/9071B	mg/Kg	0,33	1,11	NA	586
Líquidos Livres	ABNT 12988	mL/g	1 mL/100G	NA	NA	Presente

#### LAUDO DE ANÁLISE DE TESTE DE LIXIVIAÇÃO

pH final	4,8
Tempo de lixiviação	18 horas
Teor de sólidos secos	77%

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
Arsênio	USEPA 6010 B	mg/L	0,001	0,004	1,0	<0,004
Bário	USEPA 6010 B	mg/L	0,0004	0,001	70	<0,001
Cádmio	USEPA 6010 B	mg/L	0,0004	0,001	500	<0,001
Chumbo	USEPA 6010 B	mg/L	0,001	0,005	1,0	<0,005

Cromo Total	USEPA 6010 B	mg/L	0,0008	0,003	5,0	<0,003
Fluoreto	USEPA 300.1	mg/L	0,0063	0,0210	150	<0,03
Mercurio (Lixiviado)	USEPA 7470	mg/L	0,00003	0,0001	0,1	<0,0001
Prata	USEPA 6010 B	mg/L	0,0005	0,002	5,0	<0,002
Selênio	USEPA 6010 B	mg/L	0,001	0,003	1,0	<0,003

#### LAUDO DE ANÁLISE DE TESTE DE SOLUBILIZAÇÃO

ph final	6,0
Volume de água deionizada	2 litros
Tempo de solubilização	7 dias
Membrana filtrante utilizada	0,45um

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
Fenóis	Standard Methods 5530	mg/L	0,0003	0,0009	NA	0,53
Alumínio	USEPA 3050 B	mg/L	0,0004	0,001	0,2	0,380
Arsênio	USEPA 6010 B	mg/L	0,001	0,004	0,01	<0,004
Bário	USEPA 3050 B	mg/L	0,0004	0,001	0,7	0,300
Cádmio	USEPA 3050 B	mg/L	0,0004	0,001	0,005	<0,001
Chumbo	USEPA 3050 B	mg/L	0,001	0,005	0,01	<0,005
Cianeto	SMEWW 4500-CN	mg/L	0,0007	0,0022	0,07	<0,002

É proibida a reprodução parcial deste documento.  
Os resultados referem-se exclusivamente as amostras analisadas.

Página 50 de 65

Rua 21, 470 esq. Av 13 - Rio Claro - São Paulo - Tel. 19 2112 8900 - aslaa.com.br

<https://www.aslaa.com.br/laudos/impressao.asp>

## RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 014346

Projeto/Cliente: AVG MINERAÇÃO S/A

Código ASL: 014346/65319  
Identificação da Amostra: REJEITO GERADO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO  
Matriz: RESÍDUO  
Data de Coleta: 25/01/2010

### RESULTADOS ANALÍTICOS

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
<b>Cloreto</b>	USEPA 9056a	mg/L	0,4	1,3	250	<b>0,55</b>
<b>Cobre</b>	USEPA 3050 B	mg/L	0,0005	0,002	2	<b>&lt;0,002</b>
<b>Cromo</b>	USEPA 3050 B	mg/L	0,0008	0,003	0,05	<b>&lt;0,003</b>
<b>Ferro</b>	USEPA 6010 B	mg/L	0,0005	0,001	0,3	<b>1,038</b>
<b>Fluoreto</b>	USEPA 300.1	mg/L	0,0063	0,0210	1,5	<b>&lt;0,03</b>
<b>Manganês</b>	USEPA 3050 B	mg/L	0,0002	0,0007	0,1	<b>&lt;0,0007</b>
<b>Mercurio</b>	USEPA 7470	mg/L	0,00003	0,0001	0,001	<b>&lt;0,0001</b>
<b>Nitrato</b>	USEPA 300.1	mg/L	0,04	0,14	10,0	<b>0,63</b>
<b>Prata</b>	USEPA 6010 B	mg/L	0,0005	0,002	0,05	<b>&lt;0,002</b>
<b>Selênio</b>	USEPA 6010 B	mg/L	0,001	0,003	0,01	<b>&lt;0,003</b>
<b>Sódio</b>	USEPA 3050 B	mg/L	0,02	0,05	200	<b>&lt;0,05</b>
<b>Sulfato</b>	USEPA 300.1	mg/L	0,0180	0,0600	250	<b>1,32</b>
<b>Surfactantes</b>	SMEWW 5540C	mg/L	0,069	0,23	0,5	<b>0,48</b>
<b>Zinco</b>	USEPA 3050 B	mg/L	0,0007	0,002	5,0	<b>0,076</b>

### LAUDO DE ANÁLISE DE TESTE DE LIXIVIAÇÃO

pH final	5,1
Tempo de lixiviação	18 horas
Teor de sólidos secos	82%

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
<b>Aldrin e Dieldrin</b>	EPA 8270	µg/L	0,0160	0,005	NA	<b>&lt;0,055</b>
<b>Clordano (todos os isômeros)</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0190	0,0650	20	<b>&lt;0,065</b>
<b>DDT (todos os isômeros)</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0360	0,123	200	<b>&lt;0,123</b>
<b>2,4 D</b>	USEPA 8151	µg/L	0,0112	0,0374	3000	<b>&lt;0,0374</b>
<b>Endrin</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0007	0,0024	NA	<b>&lt;0,00018</b>
<b>Heptacloro e seu Epóxido</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0013	0,0045	3	<b>&lt;0,0045</b>
<b>Lindano (γ-BHC)</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0090	0,0290	200	<b>&lt;0,029</b>
<b>Metoxicloro</b>	USEPA 8151	µg/L	0,0040	0,0130	2000	<b>&lt;0,013</b>
<b>Pentaclorofenol</b>	USEPA 8151	µg/L	0,011	0,037	900	<b>&lt;0,037</b>
<b>Toxafeno</b>	USEPA 8270	µg/L	0,00060	0,002	500	<b>&lt;0,0019</b>
<b>2,4,5 -T</b>	USEPA 8151	µg/L	0,0010	0,0033	200	<b>&lt;0,0026</b>
<b>2,4,5 -TP</b>	USEPA 8151	µg/L	0,0010	0,0033	1000	<b>&lt;0,0011</b>
<b>Benzeno</b>	USEPA 8260	µg/L	0,4891	1,6296	500	<b>&lt;1,6296</b>
<b>Benzo (a) pireno</b>	USEPA 8100	mg/L	0,0100	0,0200	70	<b>&lt;0,02</b>
<b>Cloreto de vinila</b>	USEPA 8260	µg/L	0,4891	1,6286	500	<b>&lt;1,6286</b>
<b>Clorobenzeno</b>	USEPA 8260	µg/L	0,2219	0,7391	100000	<b>&lt;0,7391</b>
<b>Clorofórmio</b>	USEPA 8260	µg/L	0,3002	0,9996	6000	<b>&lt;0,9996</b>
<b>Cresóis</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0060	0,0200	200	<b>&lt;0,02</b>
<b>o - Cresol</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0050	0,0168	200	<b>&lt;0,0168</b>
<b>m - Cresol</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0038	0,0128	200	<b>&lt;0,0128</b>
<b>p - Cresol</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0047	0,0157	200	<b>&lt;0,0157</b>
<b>1,4 - Diclorobenzeno</b>	USEPA 8260	µg/L	0,0026	0,0088	7500	<b>&lt;0,0088</b>

É proibida a reprodução parcial deste documento  
Os resultados referem-se exclusivamente as amostras analisadas.

Página 51 de 65

Rua 21, 470 esq. Av 13 - Rio Claro - São Paulo - Tel. 19 2112 8900 - aslaa.com.br

<https://www.aslaa.com.br/laudos/impressao.asp>

## RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 014346

Projeto/Cliente: AVG MINERAÇÃO S/A

Código ASL: 014346/65319

Identificação da Amostra: REJEITO GERADO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO

Matriz: RESÍDUO

Data de Coleta: 25/01/2010

### RESULTADOS ANALÍTICOS

<b>1,2 Dicloroetano</b>	USEPA 8260	µg/L	0,4811	1,6021	1000	< <b>1,6021</b>
<b>1,1 - Dicloroetileno</b>	USEPA 8260	µg/L	0,3364	1,1203	3000	< <b>1,1203</b>
<b>2, 4 Dinitrotolueno</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0100	0,0200	130	< <b>0,02</b>
<b>Hexaclorobenzeno</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0008	0,0026	100	< <b>0,0026</b>
<b>Hexaclorobutadieno</b>	USEPA 8260	µg/L	0,0100	0,0350	500	< <b>0,035</b>
<b>Hexacloroetano</b>	EPA 8270	µg/L	0,0200	0,0500	NA	< <b>0,05</b>
<b>Metilacetona</b>	USEPA 8270	µg/L	0,309	0,027	200000	< <b>0,027</b>
<b>Nitrobenzeno</b>	USEPA 8270	mg/L	0,0053	0,0175	2000	< <b>0,0175</b>
<b>Piridina</b>	USEPA 8270	µg/L	0,007	0,024	5000	< <b>0,024</b>
<b>Tetracloro de Carbono</b>	USEPA 8260	µg/L	0,3264	1,0870	200	< <b>1,087</b>
<b>Tetracloroetileno</b>	USEPA 8260	µg/L	0,2861	0,9528	NA	< <b>0,9528</b>
<b>2,4,5-Triclorobifenil</b>	USEPA 8041A	mg/L	0,2700	0,9100	400000	< <b>0,91</b>
<b>2,4,6-Triclorofenol</b>	USEPA 8041A	µg/L	0,0050	0,0106	20000	< <b>0,0106</b>

### LAUDO DE ANÁLISE DE TESTE DE SOLUBILIZAÇÃO

ph final	8,9
Volume de água deionizada	2 litros
Tempo de solubilização	7 dias
Membrana filtrante utilizada	0,45 µm

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
<b>Aldrin e Dieldrin</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0160	0,0550	0,03	< <b>0,055</b>
<b>Clordano (todos os isômeros)</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0095	0,0320	0,2	< <b>0,0320</b>
<b>2,4 D</b>	USEPA 8151	µg/L	0,0112	0,0374	30	< <b>0,0374</b>
<b>DDT (todos os isômeros)</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0360	0,123	2	< <b>0,123</b>
<b>Endrin</b>	USEPA 8270	µg/L	0,007	0,023	0,6	< <b>0,023</b>
<b>Fenóis</b>	Standard Methods 5530	mg/L	0,146	0,487	NA	< <b>0,487</b>
<b>Heptacloro e seu Epóxido</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0006	0,0021	0,03	< <b>0,00014</b>
<b>Hexaclorobenzeno</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0008	0,0026	10	< <b>0,0026</b>
<b>Lindano (γ-BHC)</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0090	0,0290	20	< <b>0,029</b>
<b>Metoxicloro</b>	USEPA 8151	µg/L	0,0040	0,0130	20	< <b>0,013</b>
<b>Toxafeno</b>	USEPA 8270	µg/L	0,0005	0,0019	5	< <b>0,0019</b>
<b>2,4,5 -T</b>	USEPA 8151	µg/L	0,0010	0,0033	2	< <b>0,0026</b>

É proibida a reprodução parcial deste documento  
Os resultados referem-se exclusivamente as amostras analisadas.

Página 52 de 65

Rua 21, 470 esq. Av 13 - Rio Claro - São Paulo - Tel. 19 2112 8900 - aslaa.com.br  
<https://www.aslaa.com.br/laudos/impressao.asp>



## RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 014346

Projeto/Cliente: AVG MINERAÇÃO S/A

Código ASL: 014346/65319

Identificação da Amostra: REJEITO GERADO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO

Matriz: RESÍDUO

Data de Coleta: 25/01/2010

### RESULTADOS ANALÍTICOS

2,4,5 -TP	USEPA 8151	µg/L	0,0010	0,0033	30	<0,0011
-----------	------------	------	--------	--------	----	---------

**Comentário:** De acordo com os resultados obtidos e pelos parâmetros de avaliação contidos na Norma NBR 10004, os resíduos da amostra em questão são classificados como **RESÍDUO CLASSE II A - NÃO PERIGOSO NÃO INERTE**

#### Legenda

**UD:** unidade; **LD:** limite de detecção; **LQ:** limite de quantificação; **NA:** não aplicável; **ND:** não detectável; **VMP:** valor máximo permitido; **NMP:** número mais provável; **AG:** intervenção agrícola; **RES:** intervenção residencial; **IND:** intervenção industrial; **SMEWW/SMWW:** "Standart Methods for the Examination of Water and Waste Water", 21a. edição da American Public Health Association (APHA), da American Water Works Association (AWWA) e da Water Pollution Control Federation (WPCF); **USEPA:** SW 846-3050/3051 (Usepa 1986, Teste Method for Evaluating Solid Waste Report Number SQ 846, Washington DC) ou similar.

\* Repetido e confirmado

\*\* Realizado em campo pelo coletor.

É proibida a reprodução parcial deste documento

Os resultados referem-se exclusivamente as amostras analisadas.

Página 53 de 65

Rua 21, 470 esq. Av 13 - Rio Claro - São Paulo - Tel. 19 2112 8900 - aslaa.com.br

<https://www.aslaa.com.br/laudos/impressao.asp>