

**Estudo da substituição da cal hidratada por resíduo de mármore na
produção de argamassa**

Gabriel Pereira Gonçalves

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Campos dos Goytacazes – RJ

Dezembro, 2011

Estudo da substituição da cal hidratada por resíduo de mármore na produção de argamassa

Gabriel Pereira Gonçalves

"Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil".

Orientador: Prof. Jonas Alexandre

Co-orientador: Prof. Dylmar Penteadó Dias

Campos dos Goytacazes – RJ

Dezembro, 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

39/2012

Gonçalves, Gabriel Pereira

Estudo da substituição da cal hidratada por resíduo de mármore na produção de argamassa / Gabriel Pereira Gonçalves. – Campos dos Goytacazes, 2011.

viii, 101 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2011.

Orientador: Jonas Alexandre.

Co-orientador: Dylmar Penteado Dias.

Área de concentração: Estruturas.

Bibliografia: f. 77-84.

1. Argamassa 2. Cal 3. Mármore 4. Resíduo I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência

Estudo da substituição da cal hidratada por resíduo de mármore na produção de argamassa

Gabriel Pereira Gonçalves

"Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil".

Aprovado em 07 de dezembro de 2011

Comissão Examinadora:

Prof. Maria Lúcia Pereira Antunes (D.Sc.), UNESP

Prof. Gustavo de Castro Xavier (D.Sc.), UENF

Prof. Dylmar Penteado Dias (D.Sc.), UENF
Co-orientador

Prof. Jonas Alexandre (D.Sc.), UENF
Orientador

*Aos meus amados pais, Ademir
Gonçalves e Vera Lúcia Pereira
Gonçalves, por todo o apoio recebido.*

AGRADECIMENTOS

Jamais poderia deixar de agradecer às pessoas que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista:

- ❖ à Deus, por mais um sonho alcançado;
- ❖ à minha família, especialmente meus pais (Ademir e Vera), pelos princípios e diretrizes necessários à minha formação pessoal e profissional;
- ❖ à minha noiva Simone Gindre Vargas, que sempre esteve ao meu lado acreditando na conclusão deste curso;
- ❖ ao Prof. Jonas Alexandre (orientador), pela orientação, paciência e pelo apoio e incentivo sempre presentes durante a elaboração desta dissertação;
- ❖ ao Prof. Dylmar Penteado Dias, pela orientação, paciência e apoio nesta dissertação;
- ❖ ao professor Guilherme Chagas Cordeiro, pelo apoio nas discussões sobre o tema e auxílio em diversos ensaios;
- ❖ ao professor Gustavo de Castro Xavier, pelo apoio e incentivo;
- ❖ aos demais professores do LECIV que de alguma maneira me auxiliaram para conquista deste objetivo;
- ❖ aos técnicos Milton Pereira Soares e Vanúzia Almeida dos Santos Ferreira do laboratório de Mecânica dos Solos, pela amizade e apoio nos diversos ensaios elaborados;
- ❖ à doutoranda Luciana Lezira Pereira de Almeida do LAMAV, pela amizade e auxílio na execução de ensaios;
- ❖ aos grandes amigos do mestrado que sempre me deram força;
- ❖ à Marmoraria Polita e seus fundadores, Julio César e Ana Cristina;
- ❖ à RPM Indústrias.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	vi
RESUMO.....	vii
Palavras-chave: argamassa, cal, mármore, resíduo.	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Justificativa	3
1.2.1 Aproveitamento do resíduo	4
1.2.2 Consumo dos recursos naturais.....	5
1.3 Estrutura da dissertação	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Conceito de argamassa e revestimento.....	7
2.2 Funções do Revestimento da Argamassa	8
2.3 Propriedades das argamassas	9
2.3.1 Massa específica e teor de ar incorporado	9
2.3.2 Retenção de água	10
2.3.3 Consistência.....	10
2.3.4 Aderência	12
2.3.5 Retração.....	13
2.3.6 Resistência Mecânica	14
2.3.7 Permeabilidade	17
2.3.8 Resiliência (elasticidade).....	17
2.4 Materiais constituintes da argamassa mista	18
2.4.1 Cimento.....	18
2.4.2 Cal.....	20
2.4.3 Agregado miúdo	23
2.4.4 Água.....	25
2.4.5 Aditivos.....	26
2.4.6 Adições minerais	26
2.5 Rochas Ornamentais	27

2.5.1 Resíduos gerados do beneficiamento de rochas ornamentais.....	28
2.5.2 Contextualização da área do resíduo estudado (Aspectos gerais do município).....	30
2.6 Bibliografia pesquisada sobre uso de resíduos de rochas ornamentais em matrizes cimentícias	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 Caracterização dos materiais	36
3.1.1 Cimento.....	36
3.1.2 Areia.....	36
3.1.3 Cal hidratada.....	37
3.1.4 Resíduo.....	39
3.1.5 Índice de atividade pozolânica	42
3.2 Preparo das argamassas.....	43
3.3 Ensaio das argamassas no estado fresco	44
3.3.1 Índice de consistência.....	44
3.3.2 Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado	45
3.4 Ensaio para as argamassas no estado endurecido	46
3.4.1 Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão	46
3.4.2 Determinação da resistência potencial de aderência à tração	49
3.5 Análise estatística adotada	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1 Caracterização do cimento	52
4.2 Caracterização da areia.....	53
4.3 Caracterização da cal hidratada e do resíduo	54
4.3.1 Índice de atividade pozolânica	63
4.4 Comparação das características físicas das argamassas comerciais.....	64
4.5 Ensaio das argamassas no estado fresco	66
4.6 Ensaio das argamassas no estado endurecido	69
4.7 Análise estatística dos resultados dos ensaios mecânicos.....	72
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.1 Conclusão.....	75
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	76
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXO A	85
ANEXO B	86

ANEXO C	89
ANEXO D	91
ANEXO E	94
ANEXO F	96
ANEXO G	97
ANEXO H	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ilustração esquemática da microestrutura de uma argamassa no estado fresco.	8
Figura 2.2 - Representação esquemática da mesa de fluidez ou consistência.	11
Figura 2.3 - Interferências que afetam a trabalhabilidade.	12
Figura 2.4 - Ensaio de tração direta.	15
Figura 2.5 - Ensaio de tração por compressão diametral (MEHTA e MONTEIRO, 2008).	16
Figura 2.6 - Ensaio de tração na flexão (MEHTA e MONTEIRO, 2008).	16
Figura 2.7 - Processo da geração de resíduos na indústria de rochas ornamentais.	30
Figura 2.8 - Mapa do Espírito Santo.	31
Figura 3.1 - Determinação da finura em cal hidratada.	38
Figura 3.2 - Determinação de CO ₂	39
Figura 3.3 - Resíduo em forma de pó.	40
Figura 3.4 - Equipamento Shimadzu EDX-700.	41
Figura 3.5 - Ensaio de condutividade.	42
Figura 3.6 - Consistências das argamassas testadas e adotadas.	44
Figura 3.7 - Mesa para índice de consistência (NBR 7215: 1991).	45
Figura 3.8 - Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.	46
Figura 3.9 - Moldes prismáticos utilizados.	47
Figura 3. 10 - Ensaio de compressão.	48
Figura 3.11 - Pastilhas coladas e preparadas para o arrancamento da argamassa.	50
Figura 4.1 - Análise Granulométrica do agregado.	53
Figura 4.2 - Comparação da granulométrica da areia de acordo com NBR 7211(2005).	54
Figura 4.3 - Análise granulométrica da cal hidratada e do resíduo.	56
Figura 4.4 - Espectro de raios-X do resíduo.	58
Figura 4.5 - Espectro de Raios-X da cal hidratada.	58
Figura 4. 6 - Imagem do MEV do resíduo de mármore (aumento de 500 X).	59
Figura 6. 7 - Imagem do MEV do resíduo, detalhe de partícula (aumento de 3000 X)...	60
Figura 4.8 – MEV do resíduo de mármore, 1000 X de aumento.	60
Figura 4.9 - Espectro de difração de raios-X por energia dispersiva da micro região 1.	61
Figura 4.10 - Espectro de difração de raios-X por energia dispersiva da micro região 2.	61
Figura 4.11 - Espectro de difração de raios-X por energia dispersiva da micro região 3.	62
Figura 4.12 - Espectro de difração de raios-X por energia dispersiva da micro região 4.	62
Figura 4.13 – MEV da cal hidratada, 7000 X de aumento.	63
Figura 4.14 - Teor de ar incorporado.	67
Figura 4.15 - Densidade de massa.	67
Figura 4.16 - Resistência das argamassas.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Reciclagem de resíduos de diversos seguimentos industriais.....	04
Tabela 2.1 - Fatores que influenciam a resistência mecânica das argamassas de revestimento.....	14
Tabela 2.2 - Fatores que influenciam no módulo de deformação das argamassas endurecidas.....	17
Tabela 2.3 - Nomenclatura do cimento Portland.....	19
Tabela 2.4 - Sumário dos dados químicos para seleção de cimentos Portland.....	20
Tabela 2.5 - Dados globais (cal virgem e cal hidratada).....	21
Tabela 2.6 - Consumo per capta de cal em alguns países.....	21
Tabela 2.7 - Características químicas e físicas de cales.....	22
Tabela 2.8 - Classificação dos agregados conforme origem.....	23
Tabela 2.9 - Classificação da areia conforme módulo de finura (MF) – NBR 7211.....	23
Tabela 2.10 - Influência da areia.....	25
Tabela 2.11 - Estimativa da produção de resíduo.....	28
Tabela 3.1 - Traços das argamassas.....	43
Tabela 4.1 - Resultados de caracterização do cimento.....	52
Tabela 4.2 - Resultados de resistência à compressão do cimento.....	52
Tabela 4.3 - Resultados de caracterização física da areia.....	54
Tabela 4.4 - Resultados das análises da cal hidratada e do resíduo.....	55
Tabela 4.5 - Valores de massa específica para os diferentes tipos de cal hidratada.....	55
Tabela 4.6 - Composição química da cal hidratada e do resíduo de mármore.....	57
Tabela 4.7: Classificação das cales (DUJAB, 2000).....	57
Tabela 4.8 - Classificação estabelecida por LÚXAN <i>et al.</i> (1989).....	63
Tabela 4.9 - Características físicas das argamassas brasileiras no estado anidro.....	65
Tabela 4.10 - Comparação entre características físicas das argamassas brasileiras no estado anidro com as argamassas produzidas neste trabalho.....	65
Tabela 4.11 - Teor de água e Índice de consistência.....	66
Tabela 4.12 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.....	69
Tabela 4.13 - Resistência à compressão e à tração.....	69
Tabela 4.14 - Aderência à tração.....	70
Tabela 4.15 - Limites propostos pela ABCP.....	70
Tabela 4.16 - Limites de resistência de aderência à tração (13749: 1996).....	71
Tabela 4.17 - Resultados obtidos e classificação das argamassas.....	72
Tabela 4.18 - Medidas de variabilidade.....	73
Tabela 4.19 - Classificação do CV (RODRIGUES, 2008).....	73
Tabela 4.20 - Teste de hipótese “t” de <i>Student</i> para diferentes ensaios.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a/c	Relação água/cimento
<i>Apud</i>	Citado por
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Argamassa confeccionada com cal hidratada
AR	Argamassa confeccionada com o resíduo de mármore
CCT	Centro de Ciência e Tecnologia
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
CV	Coeficiente de variação
DM	Densidade de massa
DRX	Difração de raios-X
EDX	Espectrometria por fluorescência de raios-X
<i>et al.</i>	E outros autores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
TD	Tração direta
TAI	Teor de ar incorporado
TCD	Tração por compressão diametral
TF	Tração por flexão
UNEF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
RPDIM	Relatório do Programa de Desenvolvimento da Indústria Mineral Paranaense (1999)

RESUMO

O município de Cachoeiro do Itapemirim (ES), situado a 136 Km da capital Vitória, é o maior produtor de rochas ornamentais do Brasil. Entre as rochas beneficiadas estão as de coloração escura, denominadas no processo como granitos, e as de coloração clara, como os mármore, cujos minerais predominantes são a calcita e a dolomita. O beneficiamento de mármore para fabricação de pisos e revestimentos produz grande quantidade de resíduos, que ainda hoje são responsáveis por grandes danos ao meio ambiente. Este trabalho visa ao estudo experimental da substituição da cal hidratada do tipo CH III (produto comercial) por este tipo de resíduo na produção de argamassas. O resíduo utilizado provém do beneficiamento de mármore em uma indústria localizada em Cachoeiro de Itapemirim. Dois traços foram confeccionados (cimento:cal:areia e cimento:resíduo:areia) nas proporções de 1:1:7, seguindo o mesmo traço indicado por alguns fabricantes. As argamassas foram avaliadas por meio de comparação de suas propriedades nos estados fresco e endurecido, a saber: índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado, resistência à compressão, tração na flexão e aderência por tração. Foram também analisadas diversas características físicas e químicas dos materiais constituintes das argamassas no estado anidro, comparando-as com outros tipos de argamassas brasileiras; neste caso, verificou-se que os resultados são satisfatórios, como por exemplo: relação água/sólido, porcentagem de volume de agregado e de finos e *etc.* Os resultados obtidos atenderam aos requisitos prescritos pela ABNT (NBR 13281, 2005), sendo perfeitamente viável a substituição da cal hidratada pelo resíduo de mármore nas mesmas condições adotadas neste trabalho.

Palavras-chave: argamassa, cal, mármore, resíduo.

ABSTRACT

Cachoeiro de Itapemirim (ES) municipality, located 136 km from Vitória, the state's capital, is the largest ornamental stones producer in Brazil. Among benefited rocks are those called in process dark-colored like granite and the light-colored like marbles, which predominant minerals are calcites and dolomites. The marbles processing for floors and coverings manufacture produces a large amount of waste that, even today, is responsible for major damages done to the environment. This article aims the experimental study of hydrated lime use type CH III (product marketed) by this kind of residue in the mortars production. The residue used comes from marble beneficiation from an industry located in Cachoeiro do Itapemirim. Two traits were made with cement:sand:hydrated lime and cement:sand:residue in proportions of 1:1:7, following the same feature indicated by some manufacturers. The mortars were evaluated by their properties comparisons in fresh and hardened states, namely: consistency index, mass density and incorporated air content, compressive strength, tensile and bending grip for traction. Physical and chemical analysis of the constituent materials in anhydrous mortars were also made, comparing them with other mortars Brazilian types, in this case it was found that the results coincide, for example: the ratio of water and solid, volume percentage of aggregate and fine and etc. The obtained results met the requirements prescribed by ABNT NBR 13281 (2005), the replacement of hydrated lime by the marble residue under the same conditions imposed by this work was satisfied.

Keywords: mortar, lime, marble, waste.

1. INTRODUÇÃO

O município de Cachoeiro de Itapemirim-ES é o maior produtor de rochas ornamentais do Brasil com cerca de 600 empresas, principalmente de beneficiamento. Grande parte dos processos produtivos desse beneficiamento (corte e polimento), realizados por essas empresas, são geradores de resíduos, os quais, em muitos casos, são altamente poluentes e provocam algum tipo de prejuízo ambiental, como as marmorarias. Essas empresas são responsáveis pelo beneficiamento de rochas ornamentais (mármore), gerando enorme quantidade de resíduos que causam grandes danos ao meio ambiente, através do grande volume depositado muitas vezes ao ar livre ou mesmo em lagoas sem qualquer cuidado e/ou tratamento.

O beneficiamento dessas rochas gera aproximadamente 800.000t/ano de resíduos nos Estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia e Ceará (MOURA, *et al.*, 2006). Por gerar uma enorme quantidade de detritos, que são lançados, muitas vezes, no próprio ecossistema, sem qualquer tratamento. As indústrias do setor vêm sendo citadas pelos ambientalistas como fonte de contaminação e/ou poluição do meio ambiente (NUNES *et al.*, 2002) e (REIS e TRISTÃO, 2007).

Duas boas alternativas podem ser empregadas para redução de impactos ambientais gerados pelos resíduos dos variados processos produtivos, estas são a reciclagem e a reutilização. De acordo com a resolução CONAMA 307/2002, artigo 2º, suas definições são: reciclagem é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação; reutilização é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo.

A reciclagem e o reaproveitamento dos resíduos gerados no beneficiamento de mármore podem ser técnico-econômicos e ecologicamente viáveis, reduzindo a quantidade de volume de resíduo nos aterros sanitários e “bota-foras”, muitos clandestinos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do planeta (ALVES, 2008).

Devido a isto, este trabalho optou por realizar um estudo de viabilidade técnica para adicionar este material residual, encontrado em larga escala no Município de Cachoeiro do Itapemirim, em argamassas de múltiplo uso.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi verificar se o resíduo de calcário proveniente de uma empresa de beneficiamento de mármore do município de Cachoeiro de Itapemirim (ES) pode substituir a cal hidratada em argamassas de múltiplo uso, que é um produto muito comercializado no mercado da construção civil, e classificar as argamassas produzidas segundo os requisitos da ABNT pela NBR 13281(2005).

O objetivo específico foi avaliar as características físicas e mecânicas das argamassas confeccionadas com resíduo e fazer uma comparação de desempenho com uma argamassa com cal hidratada de uso comercial (produção de uma argamassa como referência).

As avaliações das características físicas e mecânicas foram determinadas através dos seguintes ensaios:

- índice de consistência;
- determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado;
- determinação da resistência à tração na flexão, e à compressão;
- resistência de aderência por tração;

Antes da execução destes experimentos, os componentes das argamassas também foram analisados. Foram feitos os seguintes ensaios:

a) análise físico-química do resíduo

- análise granulométrica;
- determinação da retenção de água;
- determinação da finura;
- determinação da massa específica
- espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (EDX);
- identificação mineralógica por difração de raio X;
- microscopia Eletrônica de varredura (MEV);
- índice de atividade pozolânica.

b) análise da cal hidratada

- análise granulométrica;
- determinação da retenção de água;
- determinação da finura;
- determinação da massa específica;
- quantidade de dióxido de carbono liberado;
- espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (EDX);
- identificação mineralógica por difração de raio X;
- microscopia Eletrônica de varredura (MEV).

c) análise física da areia

- ensaio de granulometria da areia utilizada;
- porcentagem de vazios na areia;
- massa específica;
- massa unitária no estado solto.

d) Caracterização do cimento

- Massa específica;
- área específica Blaine;
- determinação de resistência à compressão;
- espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (EDX);
- finura #325.

1.2 Justificativa

A justificativa deste trabalho é dividida em duas partes através dos sub-itens 1.2.1, que aborda o aproveitamento do resíduo do processo de beneficiamento das rochas ornamentais, e 1.2.2 relatando o consumo de matéria prima no processo de fabricação da cal. Além disso pode-se destacar uma possível redução de custo na confecção da argamassa, visto que a cal hidratada é um dos produtos mais utilizados em argamassas e seu valor de mercado atualmente (outubro de 2011) supera aproximadamente 12% o valor do cimento (ver anexo G). Com a substituição da cal

pelo resíduo de mármore (a princípio sem um custo estimado para o uso) pode haver uma redução significativa do custo final de uma obra.

1.2.1 Aproveitamento do resíduo

Os Estados do Espírito Santo e Minas Gerais são os principais produtores e exportadores brasileiros de rochas ornamentais, seguidos por Bahia e Ceará.

Segundo dados apresentados por DESTEFANI (2009), somente o Estado do Espírito Santo contribuiu com 43% da produção nacional de rochas ornamentais em 2005, alcançando 6,9 milhões de toneladas (ABIROCHAS, 2006). Já em 2007, o setor totalizou cerca de 8,0 milhões (ABIROCHAS, 2008). Do total de volume de produção de rochas beneficiadas, como exemplo o mármore, há uma perda de material que pode alcançar até 70% desde a mineração, processamento, até o polimento do mineral (HEBHOUB *et al.*, 2011).

Do total de rochas beneficiadas há uma perda de material, que pode alcançar de 25 a 30% do volume do bloco (GONÇALVES, 2000).

A grande geração de resíduos proveniente de usinas de beneficiamento de mármore e granitos, para fabricação de pisos e revestimentos no município de Cachoeiro do Itapemirim no Estado do Espírito Santo (Brasil), evidencia que este setor atua como grande agente poluidor do meio ambiente e merece atenção especial.

Isso mostra a necessidade de se buscar alternativas viáveis da utilização dos resíduos gerados no processo de beneficiamento de rochas ornamentais utilizadas no setor da construção civil.

A indústria da construção civil demonstra um grande potencial na reciclagem de resíduos de outros seguimentos industriais, conforme é apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Reciclagem de resíduos de diversos seguimentos industriais. (Carvalho, 2006).

Pesquisadores	Resíduos e suas aplicações	Ações provocadas
ZELIC <i>et al.</i> (2000); MACHADO <i>et al.</i> (2002); SANTOS <i>et al.</i> (2003)	Uso de resíduos como cinza volante, escória, pó de aciaria elétrica e pó de sílica em concretos e argamassas.	Melhorias nas propriedades mecânicas, na resistência química e na durabilidade dos corpos de prova.
OLIVEIRA (2000)	Lama de cal em revestimentos cerâmicos.	Pode ser utilizada como matéria prima em até 3 % na fabricação de revestimentos cerâmicos.
CARVALHO <i>et al.</i> (2004)	Lama de cal em argamassas mistas.	Substituição da cal hidratada pela lama em argamassa mista não apresentou perda significativa de resistência.

Por todo conteúdo abordado neste item (1.2.1) e mais alguns estudos que estão na Revisão Bibliográfica (Capítulo 2) deste trabalho, no uso do mesmo resíduo em argamassas, motivou o desenvolvimento deste projeto de dissertação, com o propósito de verificar a hipótese de mais uma alternativa de aproveitamento do mesmo.

1.2.2 Consumo dos recursos naturais

Segundo Relatório do Programa de Desenvolvimento da Indústria Mineral Paranaense (1999), a cal, um dos produtos minerais mais consumidos do mundo, é fabricada por um processo de aquecimento dos carbonatos a uma temperatura em torno de 1.110°C , gerando óxido de cálcio (CaO) e eliminando gás carbônico (CO_2). Nesse processo, é consumida grande quantidade de minério, em torno de 2 toneladas para 1 de cal virgem produzida.

Além da grande quantidade de minérios extraídos para obtenção da cal, há outra questão importante neste processo, sendo esta, o uso de recursos energéticos para se fabricar este produto. Segundo dados do RPDIM de 1999, a lenha foi o energético predominante no processo de transformação deste material no período compreendido entre 1987 a 1996, com participação de 49,4%, seguido dos resíduos de madeira 44,9% e eletricidade 5,8%.

De acordo com esses dados, pode-se concluir que o uso do resíduo do beneficiamento de rochas calcárias, substituindo a cal nas argamassas, reduz a exploração dos recursos naturais tanto como matéria prima quanto como energético de produção.

1.3 Estrutura da dissertação

A estrutura deste trabalho é composta por seis capítulos.

O primeiro foi colocado a importância do tema, as justificativas e os objetivos da pesquisa, além da introdução de toda temática do trabalho.

No Capítulo dois está apresentada uma revisão bibliográfica sobre argamassa, descrevendo conceitos, funções, propriedades, materiais constituintes e alguns trabalhos sobre o tema inserido.

O Capítulo três descreve o programa experimental e os ensaios realizados nos Laboratórios de Engenharia Civil (LECIV) e nos laboratórios de Materiais Avançados (LAMAV) na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

Em seguida, no Capítulo quatro são apresentados os resultados dos ensaios em forma de tabelas e gráficos, sendo analisados e discutidos.

O Capítulo cinco apresenta as conclusões dos ensaios realizados e do projeto experimental e, também, sugestões para trabalhos futuros.

O Capítulo seis apresenta todas as referências bibliográficas para execução deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os materiais com propriedades cimentantes são usados desde a antiguidade conforme se observa em muitos trabalhos voltados a este tema, porém, são imprecisas as informações a respeito das primeiras edificações construídas com material cimentício. CORDEIRO (2006) menciona que monumentos como as ruínas do Império Romano e as pirâmides do Egito ratificam o uso de uma espécie de argamassa, composta de areia e gesso calcinado, empregada para o assentamento de blocos rochosos.

Segundo BOLTSHAUER, 1963 *apud* SELMO, 1989, a argamassa vem sendo empregada em assentamento e revestimento dos blocos de pedra que constituem as paredes das edificações, há mais de 2.000 anos. O mesmo autor relata que os gregos e os romanos preparavam misturas de cal, areia e água, ou adicionavam gesso para obter o estuque, que constitui uma especialidade para revestimentos internos, em certos casos, adicionavam também na mistura o pó de mármore. Os romanos fizeram uso amplo das argamassas, tanto no assentamento das alvenarias, como nos revestimentos de seus edifícios e possuíam o conhecimento de modificá-las, sendo o ligante predominante daquela época a cal.

No Brasil, de acordo com WESTPHAL (2004), o uso da argamassa passou a ser mais evidente no primeiro século para assentamento de alvenaria de pedra (largamente utilizada na época). A cal utilizada como aglomerante era obtida através da queima de conchas e mariscos. O óleo de baleia era também muito utilizado.

2.1 Conceito de argamassa e revestimento

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR 13529 (1995), define a argamassa para fins de revestimento como sendo “uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”. Nesta mesma norma brasileira são definidos outros termos usuais envolvendo o revestimento executado à base de cimento e cal, ou ambos, quanto ao campo de sua aplicação. Podem-se encontrar definições como:

- Argamassa de cal: argamassa preparada com cal como único aglomerante;
- argamassa de cimento: argamassa preparada com cimento como único aglomerante;
- argamassa mista: Possui 2 aglomerantes, o cimento e a cal;
- revestimento: é o recobrimento de uma superfície lisa ou áspera com uma ou mais camadas sobrepostas de argamassa, em espessura normalmente uniforme, apta a receber um acabamento final.

De um modo mais simplificado, as argamassas podem ser descritas como suspensões bifásicas concentradas compostas por uma fração “grossa” inerte (areia), com partículas entre $100\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$ aproximadamente, e uma pasta reativa de água e “finos”, conforme ilustração na Figura 2.1.

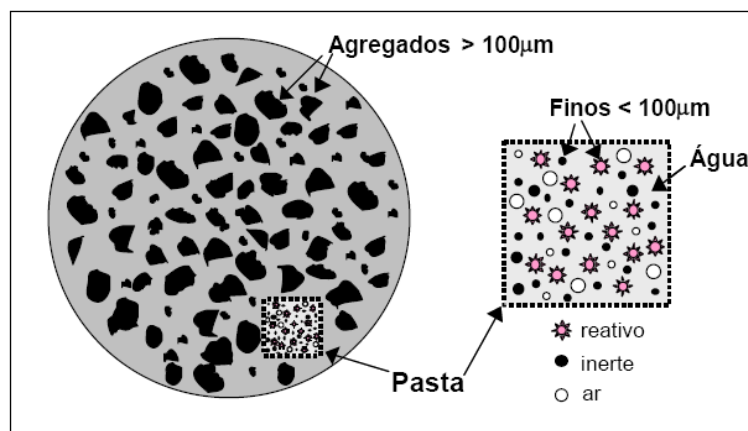


Figura 2.1 - Ilustração esquemática da microestrutura de uma argamassa no estado fresco. CARDOSO (2009).

2.2 Funções do Revestimento da Argamassa

Segundo BAÍA e SABBATINI (2008), os revestimentos de argamassas têm, em geral, as seguintes funções:

- Proteger as vedações e a estrutura contra a ação direta de agentes agressivos e, por consequência, evitar a degradação precoce das mesmas, aumentar a durabilidade e reduzir os custos de manutenção dos edifícios;

- auxiliar as vedações no cumprimento das suas funções, como: isolamento termo-acústico, estanqueidade à água e aos gases;
- regularizar a superfície dos elementos de vedação, servindo de base regular e adequada ao recebimento de outros revestimentos ou constituir-se no acabamento final;
- contribuir para a estética e valorização da construção.

2.3 Propriedades das argamassas

2.3.1 Massa específica e teor de ar incorporado

A massa específica é determinada através da relação entre massa da argamassa e o seu volume:

a) Massa específica absoluta

Não são considerados os vazios existentes no volume do material.

b) Massa específica relativa

Também pode ser chamada de massa unitária. Consideram-se os vazios presentes.

O teor de ar incorporado é a quantidade relativa de bolhas de ar incorporadas, intencionalmente ou não, na argamassa no estado fresco durante o seu processo de mistura. Quanto maior for o teor de ar incorporado, maior a trabalhabilidade da argamassa, porém, em excesso pode reduzir a resistência de aderência dos revestimentos (MATTOS, 2001).

As argamassas podem apresentar um considerável teor de ar incorporado no estado fresco, seja pelo processo de mistura mecânica ou mesmo pelo uso de aditivos que tem por finalidade específica incorporar o ar.

Há uma série de fatores que interferem no ar incorporado são eles: tipo de misturador, tempo de mistura, fator a/c , granulometria do agregado, viscosidade, velocidade de mistura, tamanho do recipiente de mistura em relação ao misturador, presença de aditivo incorporador de ar, dentre outros. Quando nenhum agente é

incorporado, os valores obtidos são geralmente baixos e praticamente independentes destes fatores devido à instabilidade das bolhas (ISAIA, 2007)

A presença de ar no sistema faz que o enrijecimento por deformação seja discreto ou quase inexistente, reduzindo drasticamente as cargas necessárias para deformação do material. Com isso, pode-se dizer que, a argamassa com alto teor de ar apresenta comportamento predominantemente plástico para os níveis de deformação impostos. As bolhas de ar aumentam o volume ocupado pela pasta e reduzem sua resistência, promovendo facilidade do fluxo da própria pasta e do escorregamento dos agregados.

2.3.2 Retenção de água

A definição retratada por CINCOTTO *et al.* (1995) e SILVA (2006) diz que 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.

A retenção de água influencia na argamassa o tempo disponível para sua aplicação, regularização e desempenho. Há uma mudança também em algumas propriedades no estado endurecido, influenciando as reações dos aglomerantes durante a cura (MATTOS, 2001). Esta propriedade pode ser relacionada com a retenção de consistência e retração por secagem. A primeira, porque a argamassa tende a conservar a água necessária para molhar a superfície dos materiais, possibilitando que as reações de hidratação dos aglomerantes se processem (MATTOS, 2001); a segunda a retenção de água influencia na retração por secagem, que é uma das principais causas de fissuração das argamassas no estado endurecido, devido à velocidade de evaporação da água de amassamento, prejudicando a estanqueidade e a durabilidade do revestimento (CARNEIRO, 1999).

2.3.3 Consistência

Segundo BARBOSA (2010), consistência é a propriedade pela qual a argamassa tende a resistir às deformações que lhe são impostas.

Para a medição da consistência de uma argamassa usa-se a mesa de consistência (*flow-table*). O teste consiste em medir o espalhamento horizontal de uma argamassa moldada na forma de um cone padrão, onde o material é submetido a inúmeros impactos e depois é retirado o cone, ver Figura 2.2.

Segundo CARDOSO (2009), “o método apresenta a vantagem de ser dinâmico, assim, considerando também a viscosidade do sistema e não só a tensão de escoamento: além disso, avalia quantitativamente a tendência à segregação de fases no sistema, em decorrência da aplicação dos golpes (impactos sofridos)”. Sua desvantagem está nos resultados obtidos que não dissociam a contribuição de cada um dos parâmetros reológicos (viscosidade e tensão de escoamento), e são apresentados quantitativamente na forma de índice de consistência ou porcentagem de espalhamento e não em termos de unidades reológicas fundamentais (KOEHLER, FOWLER, 2003). Porém, mais importante que descrever as limitações do ensaio é o fato que a correlação usualmente aceita entre a trabalhabilidade e a consistência é incompleta, uma vez que as argamassas que os profissionais pedreiros consideram com boa trabalhabilidade dependem do teor de ar incorporado e não só do valor de consistência em si (CAVANI *et al.*, 1997).

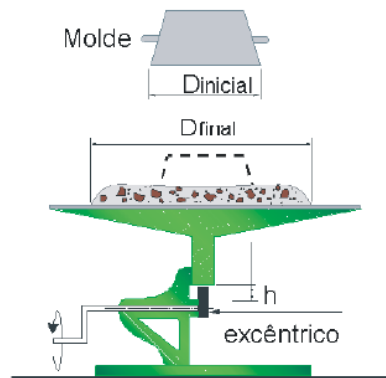


Figura 2.2 - Representação esquemática da mesa de fluidez ou consistência. CARDOSO (2009).

A trabalhabilidade está muito relacionada ao índice de consistência, sendo muito difícil sua determinação, pois diversos fatores interferem nesta. A Figura 2.3 demonstra as principais interferências que afetam a trabalhabilidade (GOMES, 2008).

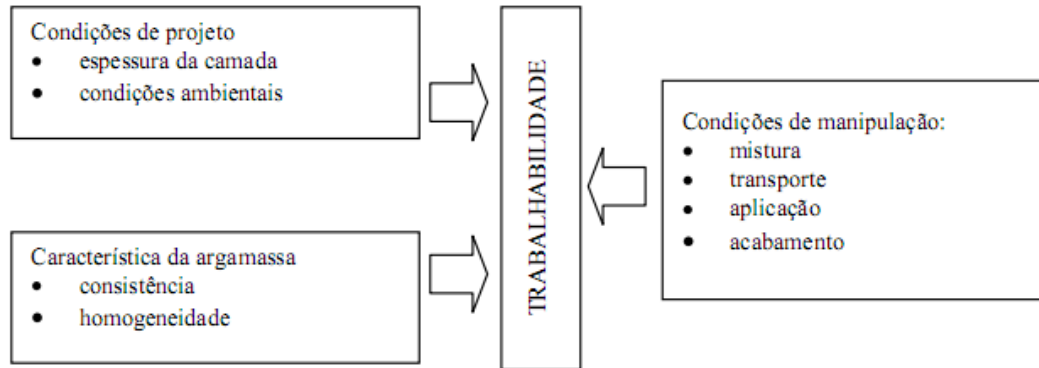


Figura 2.3 - Interferências que afetam a trabalhabilidade. GOMES (2008).

Para uma argamassa ser trabalhável, deve possuir uma consistência de fácil manuseio, não havendo segregação e exsudação desde sua mistura até sua aplicação.

Diversos ensaios podem ser realizados para a medição da consistência das argamassas. Utilizando as normas da ABNT, o ensaio utilizado é o da mesa de consistência descrito na NBR 13276 (2005).

2.3.4 Aderência

A característica principal da aderência é a capacidade de se manter aderida ao substrato. Sua função é unir elementos em uma alvenaria ou em revestimentos. Segundo DUJAB (2000) “A aderência depende da trabalhabilidade da argamassa e da técnica executiva, da natureza da base e da limpeza da mesma (poeira, fungos, eflorescência e desmoldante)”.

É uma propriedade meramente mecânica e ocorre através da ancoragem da argamassa nas reentrâncias e saliências macroscópicas da superfície e principalmente pela ancoragem microscópica da pasta aglomerante nos poros da base, lembrando que quanto menor o poro, maior a tensão capilar (DUJAB, 2000).

A resistência de aderência deve ser entendida como “o resultado do comportamento de um sistema, dependendo tanto das características da argamassa como das características do substrato de aplicação” (RECENA, 2008).

A resistência de aderência à tração do revestimento pode ser medida através do ensaio de arrancamento por tração. De acordo com a NBR 13749 (1996), o limite de resistência de aderência à tração para revestimento de argamassa (emboço e massa única) varia de acordo com o local de aplicação e tipo de acabamento.

2.3.5 Retração

A retração é um fenômeno físico que está associado a uma deformação na estrutura da pasta hidratada, que varia de acordo com fenômenos de diversas naturezas, contribuindo cada um destes com parcela diferente para a deformação total externa da argamassa (BASTOS, 2001). Segundo RECENA (2008), sua consequência inevitável é a fissuração.

Em materiais cimentícios, esta propriedade pode ser classificada nos seguintes tipos: retração plástica (a), por secagem (b), química (c), autógena (d) e contração térmica (e).

a) Retração plástica:

A retração plástica surge pela evaporação rápida inicial da água de amassamento na superfície exposta da mistura cimentícia antes do fim de pega, ainda no estado fresco. Resulta em fissuração superficial (NETO, 2002).

b) Retração por secagem:

Este tipo de retração ocorre devido à redução dimensional causada pela evaporação da água de poro da mistura cimentícia depois do fim da pega do cimento (POWERS, 1968 *apud* NETO, 2002).

c) Retração química (Contração de Le Chatelier):

Também chamada de contração de Le Chatelier, esta retração ocorre através da diminuição dimensional em razão do volume de produtos hidratados serem inferiores ao volume de produtos anidros (NETO, 2002).

d) Retração autógena:

Conforme afirma BASTOS (2001), “é a retração que ocorre em um sistema fechado, com remoção da água capilar da pasta pela hidratação do cimento ainda não hidratado”. Este tipo de variação dimensional acontece sem qualquer troca de umidade com o meio externo.

e) Retração ou contração térmica:

Conforme explica NETO (2002), “a reação entre o cimento e a água é exotérmica, gerando calor, liberado para o ambiente, sendo parte deste calor liberado nas idades iniciais quando a mistura cimentícia ainda é suscetível à deformações; em grandes volumes, parte deste calor é acumulado ocasionando uma expansão térmica”. Segundo BASTOS, a variação desta temperatura, nos produtos cimentícios ocorre de duas maneiras: acúmulo de calor de hidratação, e/ou aquecimento por exposição a uma fonte de calor externa.

2.3.6 Resistência Mecânica

Segundo definição expressa por SELMO (1989), a resistência mecânica é definida como “a propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens e que se traduzem, em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento”.

Os fatores que influenciam a resistência mecânica dos revestimentos e na sua evolução estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Fatores que influenciam a resistência mecânica das argamassas de revestimento.

<i>Aumento de consumo de cimento</i>	Resistência mecânica das argamassas são melhoradas
<i>Pequenos volumes de cal na argamassa</i>	Resistência mecânica aumenta
<i>Teores mais elevados de cal</i>	Resistência mecânica diminui
<i>Incorporador de ar</i>	Diminui a massa volumétrica aparente, reduzindo também a resistência mecânica
<i>Relação água/cimento em argamassas</i>	Afeta muito a resistência mecânica

Existem diversos ensaios de diferentes normas internacionais e nacionais para avaliação da resistência mecânica de uma argamassa. No Brasil a ABNT utiliza os ensaios padronizados da NBR 13279 (2005) que determina a resistência à compressão e resistência à tração através da flexão por meio de corpos de prova prismáticos com dimensões 4 x 4 x 16 cm.

Porém, é importante acrescentar que quando se determina a resistência à tração de uma argamassa ou concreto, existem diversos tipos de estudos da tração com tipos de ensaios diferentes, são eles: tração direta (TD), tração por compressão diametral (TCD) e tração na flexão (TF).

No ensaio de TD, considerado o de referência para concretos, a resistência à tração direta, f_{ct} , é determinada aplicando-se tração axial, até a ruptura, em corpos de prova de concreto simples, em que as dimensões são pré-estabelecidas de acordo com a norma aplicada. A Figura 2.4 demonstra como é realizado este ensaio.

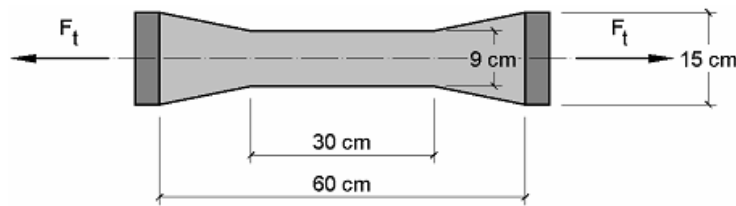


Figura 2.4 - Ensaio de tração direta.

O ensaio TCD é o mais utilizado por ser mais simples de ser executado e utilizar o mesmo corpo de prova do ensaio de compressão. Também é conhecido internacionalmente como Ensaio Brasileiro, pois foi desenvolvido por LOBO CARNEIRO, em 1943.

Para a sua realização, o corpo de prova é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da máquina de ensaio, e o contato entre o corpo de prova e os pratos devem ocorrer somente ao longo de duas geratrizes, onde são colocadas tiras padronizadas de um determinado material, diametralmente opostas (Figura 2.5), sendo aplicada uma força até a ruptura do concreto por fendilhamento, devido à tração indireta.

O valor da resistência à tração por compressão diametral, $f_{ct,sp}$, encontrado neste ensaio, é um pouco maior que o obtido no ensaio de tração direta.

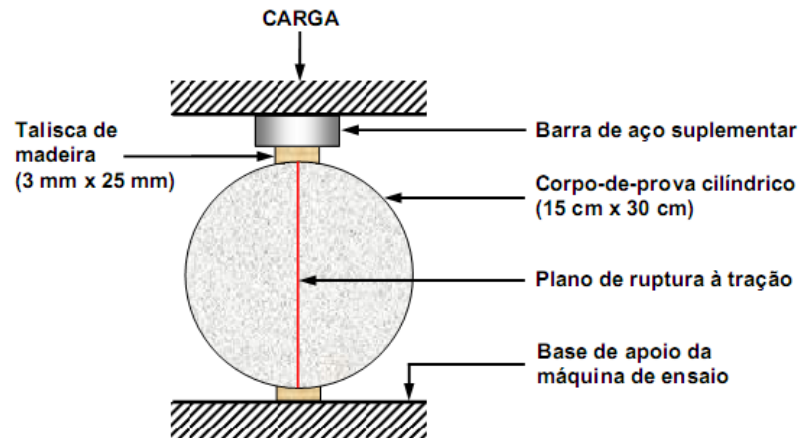


Figura 2.5 - Ensaio de tração por compressão diametral (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Para a realização do ensaio TF, um corpo de prova de seção prismática é submetido à flexão, com carregamentos em duas seções simétricas, até a ruptura cuja região de momento máximo tem-se cortante nula, portanto, o local da fratura ocorre em um trecho de flexão pura. A Figura 2.6 demonstra como é realizado este tipo de ensaio.

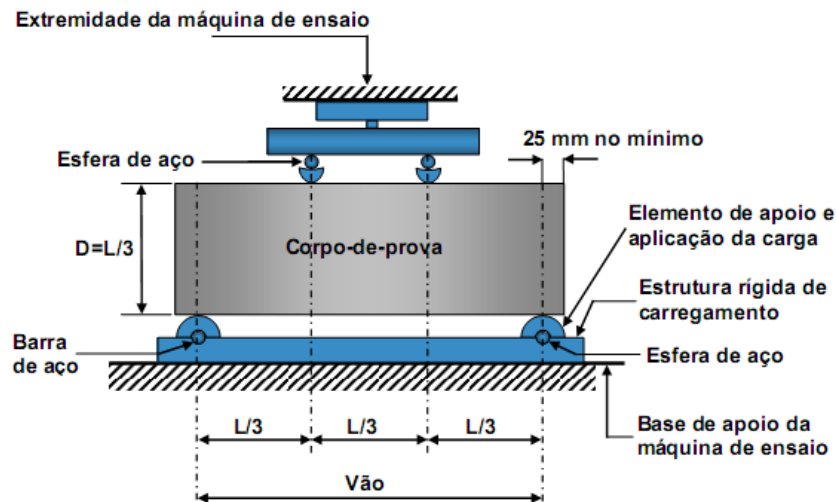


Figura 2.6 - Ensaio de tração na flexão (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os valores encontrados para a resistência à tração na flexão, $f_{ct,f}$, são maiores que os encontrados nos ensaios descritos anteriormente (TD e TCD).

Considera-se a seguinte relação entre os resultados dos ensaios: a resistência à tração direta, f_{ct} , é igual a $0,9 f_{ct,sp}$ ou $0,7 f_{ct,f}$, ou seja, coeficientes de conversão 0,9 e 0,7, para os resultados de compressão diametral e de flexão, respectivamente.

2.3.7 Permeabilidade

O Glossário Técnico de Argamassa (2010), que possui termos relacionados com as propriedades das argamassas no estado endurecido, define permeabilidade à água por um fluxo laminar de água através da argamassa no estado endurecido, em condições de equilíbrio, submetida a um gradiente hidráulico.

A permeabilidade possui relação com porosidade, estabilidade volumétrica, sendo fundamentais para um apropriado desempenho da argamassa, os quais influenciam na estanqueidade e durabilidade.

Quando, em uma massa cimentícia qualquer, houver uma grande quantidade de poros, e estes são ligados uns aos outros, pode-se concluir que este produto cimentício é considerado permeável. Quanto mais permeável for, menores serão suas propriedades mecânicas.

2.3.8 Resiliência (elasticidade)

O Glossário Técnico de Argamassa (2010) redige a resiliência como uma relação de proporcionalidade entre os esforços axiais (compressão ou tração) solicitantes sobre a argamassa no estado endurecido e as deformações por eles causadas.

A Tabela 2.2 apresenta os principais fatores que influenciam o módulo de deformação das argamassas.

Tabela 2.2 - Fatores que influenciam no módulo de deformação das argamassas endurecidas. (DUBAJ, 2000).

MARTINELLI (1989) - MODULO DE DEFORMAÇÃO	O módulo de deformação decresce com aumento da relação água/cimento da argamassa e, Aumenta com a resistência mecânica (argamassas mais rígidas).
MARTINELLI (1989) - TEOR DE AGREGADO	O módulo de deformação diminui com o aumento do teor de agregado na argamassa, mais a partir de certo teor o módulo volta a crescer, como resultado da maior rigidez da estrutura da argamassa, que contém mais agregado por m ³ .
SABBATINI (1990) - CONSUMO DE CIMENTO	Argamassas com elevado consumo de cimento, apresentam pouca capacidade de se deformarem, prejudicando o desempenho dos revestimentos.
CINCOTTO et al.(1985) - TEOR DE CAL	O módulo de deformação longitudinal decresce forte e continuamente, à medida que aumenta o volume de cal nas argamassas.

2.4 Materiais constituintes da argamassa mista

2.4.1 Cimento

Segundo CALLISTER (1991): “O cimento é produzido por moagem e íntima mistura de argila e minerais portadores de cal nas proporções apropriadas e a seguir aquecimento da mistura até cerca de 1400° C num forno rotativo; este processo, às vezes conhecido como calcinação, produz mudanças físicas e químicas nas matérias primas. O produto "Clinker" resultante é então moído para dar um pó fino ao qual uma pequena quantidade de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para retardar o processo de cura. Este produto é o cimento Portland. As propriedades do cimento Portland, incluindo o tempo de cura e a resistência mecânica final, num grande grau, depende de sua composição”.

A denominação cimento Portland se deve a Joseph Aspdin que, em 1824, recebeu na Inglaterra a patente do cimento obtido a partir da queima, em elevadas temperaturas de calcário e argila finamente moídos e misturados. Aspdin denominou esse aglomerante de cimento Portland em razão de sua semelhança, uma vez enrijecido, com as rochas calcárias da Península de Portland, localizada no sul da Inglaterra (GUIMARÃES, 2002).

Atualmente, o cimento Portland é o principal material de construção empregado pelo homem. Segundo dados do OFICEMEN (2008), a produção mundial de cimento Portland em 2007 foi de 2.800 milhões de toneladas. Os principais produtores, em ordem decrescente foram: China, Índia, Estados Unidos e Japão, que produziram aproximadamente 61,35% de todo cimento utilizado no planeta.

No Brasil, quanto ao consumo, a região Sudeste concentrou 51,0% da produção em 2009. A região Nordeste, produziu no mesmo ano, 19,0% do total, enquanto as regiões Sul, Centro-Oeste e Norte produziram 15,0%, 11,0% e 4,0%, respectivamente. As cinco principais unidades produtoras da Federação foram Minas Gerais (22,2%), São Paulo (15,1%), Paraná (11,8%), Rio de Janeiro (6,9%) e o Distrito Federal (6,1%) (SNIC, 2010).

O cimento Portland é o principal responsável pela resistência mecânica das argamassas e hoje, no Brasil, diversos tipos de cimento Portland são encontrados no mercado com diferenças básicas entre eles, de acordo, principalmente, com a sua

composição. Segundo ABREU (2001), os mais empregados nas diversas obras de construção civil são:

- cimento Portland comum;
- cimento Portland de alto-forno;
- cimento Portland pozolânico.

A Tabela 2.3 apresenta a nomenclatura do cimento Portland conforme normas da ABNT.

**Tabela 2.3 - Nomenclatura do cimento Portland.
(ABREU, 2001).**

Cimento Portland (CP)		Sigla	Classe	Identificação
Cimento Portland comum (NBR 5732)	Cimento Portland comum	CP I	25	CP I – 25
			32	CP I – 32
			40	CP I – 40
	Cimento Portland comum com adição	CP I – S	25	CP I – S – 25
			32	CP I – S – 32
			40	CP I – S – 40
Cimento Portland composto - NBR 11578	Cimento Portland composto com escória	CP II – E	25	CP II – E – 25
			32	CP II – E – 32
			40	CP II – E – 40
	Cimento Portland composto com pozolana	CP II – Z	25	CP II – Z – 25
			32	CP II – Z – 32
			40	CP II – Z – 40
	Cimento Portland composto com <i>filler</i>	CP II – F	25	CP II – F – 25
			32	CP II – F – 32
			40	CP II – F – 40
Cimento Portland de alto forno (NBR 5735)		CP III	25	CP III – F – 25
			32	CP III – F – 32
			40	CP III – F – 40
Cimento Portland pozolânico		CP IV	25	CP IV – 25
			32	CP IV – 32
Cimento Portland de alta resistência inicial (NBR 5733)		CP V – ARI	**	CP V - ARI
Cimento Portland branco estrutural (NBR 12 989)		CPB	25	CPB – 25
			32	CPB – 32
			40	CPB – 40
Cimento para poços petrolíferos (NBR 9831)		CPP	G	CPP - classe g

Segundo HEWLETT (2004), autor do livro “*Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*”, o cimento é um pó fino que em contato com a água apresenta coesão, unindo as partículas minerais entre si, formando uma massa compacta. A tabela 2.4 mostra dados da composição química encontrada no cimento.

Tabela 2.4 - Sumário dos dados químicos para seleção de cimentos Portland. (HEWLETT, 2004).

COMPONENTES (%)	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO	NÚMERO DE AMOSTRAS
SiO ₂	18,4	21,02	24,50	284
Fe ₂ O ₂	0,16	2,85	5,78	284
Al ₂ O ₃	3,10	5,04	7,56	284
CaO	58,10	64,18	68,00	284
MgO	0,02	1,67	7,10	285
SO ₃	0	2,58	5,35	280
Na ₂ O	0	0,24	0,78	263
K ₂ O	0,04	0,70	1,66	280
Álcali equivalente	0,03	0,68	1,24	280
Cal livre	0,03	1,243	3,68	132
Cloreto	0	0,016	0,047	15

2.4.2 Cal

A cal é um produto de origem mineral, que graças as suas diversas aplicações, está entre os dez mais consumidos do mundo. Provém da calcinação de calcários hidratados ou não (GUIMARÃES, 2002).

Segundo GUIMARÃES (2002), os tipos de cales são:

- cal virgem cálcica (óxido de cálcio – CaO);
- cal hidratada cálcica (hidróxido de cálcio – Ca(OH)₂);
- cal virgem dolomítica (óxidos de cálcio e magnésio – CaO MgO);
- cal dolomítica hidratada normal, tipo N (hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio – Ca(OH)₂, Mg(OH)₂, MgO);
- cal dolomítica hidratada, especial tipo S (hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio - Ca(OH)₂, Mg(OH)₂);
- tipos intermediários (classificados como cales magnesianas) das cales cálcicas e dolomíticas e a cal hidráulica.

A cal virgem é obtida a partir da calcinação do calcário a elevadas temperaturas em fornos industriais e, da sua reação com a água, obtém-se a cal hidratada utilizada na composição de argamassas de assentamento e revestimento (MELLO *et al.*, 2007).

As Tabelas 2.5 e 2.6 divulgam o consumo das cales referentes aos anos 1993 e 1994 respectivamente.

Tabela 2.5 - Dados globais (cal virgem e cal hidratada).

SETORES DE CONSUMO	FRANÇA	ALEMANHA	JAPÃO	AFRICA DO SUL	EUA
Estabilidade Solos	364	140	537	12	845
Construção civil	79	584	64	160	499
Agricultura	261	161	375	-	20
Siderúrgica	976	1850	8034	802	5002
Meio ambiente	383	772	3752	26	4180
CONSUMO TOTAL	2821	6101	10890	1913	16723

Tabela 2.6 - Consumo per capita de cal em alguns países.

PAÍS (1994)	PRODUÇÃO DE CAL (EM 1000t)	POPULAÇÃO EM MILHÕES	CONSUMO PER CAPTA (Kg)
ESTADOS UNIDOS	16649	260,7	64
JAPÃO	10890	124,7	87
ALEMANHA	6101	80,9	75
AFRICA DO SUL	1913	40,7	47
BRASIL	5289	146,9	36
CHINA	17017	1171,7	15
URSS	28082	-	-
FRANÇA	2822	57,3	49
REINO UNIDO	1297	57,9	22
TURQUIA	3860	56,5	68

Nas argamassas, a cal forma com a água e os inertes que a encorpam, uma mistura pastosa que penetra nas reentrâncias e vazios dos blocos construtivos, cimentando-os, principalmente pela recristalização dos hidróxidos e de sua reação química com o anidrido carbônico do ar. Durante o endurecimento, as partículas muito finas de hidróxidos se aglomeram, formando cristais que aumentam em número e tamanho, à medida que a água se evapora. Esses cristais se entrelaçam, formando uma malha resistente que retém os agregados (GUIMARÃES, 2002).

A cal pode proporcionar às argamassas qualidade de desempenho com relação à função de aglomerante. No estado fresco, podem-se destacar como propriedades a plasticidade e a retenção de água. A plasticidade é obtida a partir do contato da água com as partículas da cal hidratada, as quais são muito finas e funcionam como lubrificante, reduzindo o atrito entre os grãos de areia presentes na argamassa, proporcionando maior trabalhabilidade e boa aderência. A segunda propriedade mencionada é obtida pela excelente capacidade que a cal possui de reter água em torno de suas partículas. Esta característica é importante no desempenho da argamassa, relativo ao sistema alvenaria/revestimento, por não permitir a absorção excessiva de água pela alvenaria. Ao reagir com o CO_2 a cal libera a água retida em torno de suas partículas e assim colabora também na cura do cimento (RAGO e CINCOTTO, 1999 *apud* MELO *et al.*, 2007).

No estado endurecido pode-se destacar a capacidade de absorver deformações, devido ao baixo módulo de elasticidade das argamassas à base de cal. A carbonatação da cal ocorre lentamente, o que faz com que a mesma funcione tamponando eventuais fissuras ocorridas no endurecimento, contribuindo assim para a durabilidade (CARASEK *et al.*, 2007)

A norma NBR 7175 (2003) especifica os requisitos exigidos no recebimento da cal hidratada, a ser empregada em argamassas para a construção civil. Os valores estabelecidos pela ABNT são máximos e mínimos e contemplam as características físicas e químicas, ilustradas na Tabela 2.7.

**Tabela 2.7 - Características químicas e físicas de cales.
(PAIVA, GOMES e OLIVEIRA, 2007)**

Compostos		Limites		
		CH - I	CH - II	CH - III
Anidrido carbônico (CO_2)	na fábrica	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	$\leq 13\%$
	no depósito	$\leq 7\%$	$\leq 7\%$	$\leq 15\%$
Óxido de Cálcio e magnésio não hidratado calculado		$\leq 10\%$	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$
Óxidos totais na base de não voláteis ($\text{CaO}_T + \text{MgO}_T$)		$\geq 90\%$	$\geq 88\%$	$\geq 88\%$
FÍSICAS				
Finura (% retida acumulada)	peneira 0,6000mm	$\leq 0,5\%$	$\leq 0,5\%$	$\leq 0,5\%$
	peneira 0,075 mm	$\leq 10\%$	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$
Retenção de água		$\geq 75\%$	$\geq 75\%$	$\geq 70\%$
Incorporação de areia		$\geq 3,0\%$	$\geq 2,5\%$	$\geq 2,2\%$
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Legenda: CH - I; CH - II; CH - III = Tipos de cales
Fonte: (ABNT, 2003 a)

2.4.3 Agregado miúdo

A NBR 9935/87 define o agregado como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de concreto e argamassa. O agregado destinado ao preparo da argamassa é o agregado miúdo (areia) e sua definição é apresentada como “uma areia natural ou artificial, resultante do britamento de rochas estáveis, de diâmetro máximo igual ou inferior a 4,8 mm (NBR 7211). A Tabela 2.8 define a classificação dos agregados de acordo com sua origem, já a Tabela 2.9 mostra a classificação do agregado miúdo conforme módulo de finura.

**Tabela 2.8 - Classificação dos agregados conforme origem.
(BAUER, 1999 *apud* WATANABE, 2004)**

CLASSIFICAÇÃO		ORIGEM
Naturais	Densidade leve	Inorgânico constituído da matéria prima de fontes naturais. Ex: Pedras pomes, escória vulcânica ou turfo.
	Densidade média	Encontrados fragmentos na natureza já sob a forma de partículas. Ex: Areia de barranco, minas e rios
Artificiais	Densidade leve	Encontram-se os agregados da família dos inorgânicos leves celular granulados, obtidos por processos especiais de fabricação para a utilização em concretos leves. Ardósias, escória de alto forno, argila, cinzas volantes.
	Densidade média	Necessitam ser triturados para obter a forma das partículas dos agregados miúdos e/ou grãos em condições apropriadas para a utilização no concreto normal. Ex: Britagem de rochas estáveis.
	Alta densidade	Necessitam ser triturados para obter a forma das partículas dos agregados miúdos e/ou grãos em condições apropriadas para a utilização no concreto pesado: Barita, hematita e magnetita.

**Tabela 2.9 - Classificação da areia conforme módulo de finura (MF) – NBR 7211.
(BAUER, 1999 *apud* WATANABE, 2004).**

Classificação	MF
Muito finas	1,35 < MF < 2,25
Finas	1,71 < MF < 2,78
Médias	2,11 < MF < 3,28
Grossas	2,71 < MF < 4,02

TRISTÃO *et al.* (2005) afirmam existir uma grande variedade de areias para argamassas, isso é possível, graças as suas diferentes características geométricas de seus grãos (esfericidade, arredondamento e rugosidade), que acabam interferindo na confecção dos traços dos materiais nas argamassas utilizadas nas obras.

Segundo FREITAS (2007), “na composição das argamassas predomina normalmente o material inerte de origem mineral, em que se observa com mais frequência o quartzo, de diâmetro entre 0,06mm e 2,0mm em sua composição granulométrica”. Caso esse diâmetro para argamassa não esteja nesta faixa, pode-se adequar esta para uma melhor aplicação.

Segundo MARGALHA *et al.* (2007), a argamassa ganha coesão através da ligação dos grãos da areia ao aglomerante (cimento), sendo de imensa importância a qualidade do agregado para um bom comportamento global da pasta. A mistura da areia separa as partículas de cal, o que facilita a reação química da carbonatação e, por outro lado, permite distribuir as retrações que eventualmente ocorram por toda a massa.

Ensaio elaborados pelos mesmos pesquisadores comprovam que, quanto maior o volume de vazios das areias mais inferiores serão as propriedades mecânicas das argamassas, como resistência à flexão e à compressão. Verificou-se que a mistura das areias finas com as grossas torna a percentagem de volume de vazios mais adequada, melhorando características das argamassas endurecidas. Constataram também, que finos podem transmitir uma melhor coesão e uma maior trabalhabilidade às argamassas, porém, aparecendo argila, torna-se inconveniente seu uso em argamassa, devido à dificuldade do contato dos grãos do agregado miúdo com o ligante. Concluíram que é importante conhecer a granulometria, o teor de vazios e também a natureza da matéria fina.

A análise granulométrica de um agregado define a proporção de cada diâmetro da areia. Esta análise tem grande influência nas propriedades das argamassas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Segundo Reddy e Gupta (2008), estas influencias são:

- argamassas com areia fina exigem aproximadamente 25 à 30% a mais de água;
- a granulometria da areia influencia mais na resistência à compressão das argamassas de cimento-cal do que nas argamassas de cimento. Para uma determinada consistência, a resistência à compressão da argamassa diminui com o aumento da finura da areia;

- retenção de água das argamassas de cimento aumenta com o aumento na finura da areia, já a retenção de água de argamassas de cal-cimento não é sensível à variação na granulometria da areia;
- granulometria das areias afeta grandemente os valores de retração por secagem de ambas as argamassas, aumento de 1 para 3 e 2,7 vezes para argamassas de cimento e argamassas de cimento-cal, respectivamente.

Na Tabela 2.10, é apresentado um resumo da influência da areia segundo OLIVEIRA e BRITO (2002).

**Tabela 2.10 - Influência da areia.
(OLIVEIRA e BRITO, 2002).**

Propriedades	Característica da areia		
	Quanto menor o módulo de finura	Quanto mais descontínua for granulometria	Quanto maior o teor de grãos angulosos
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Elasticidade	Pior	Pior	Pior
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resist. Mecânica	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variável

2.4.4 Água

Uma das funções da água nas argamassas é a combinação química que há entre ela e os aglomerantes, fazendo com que estes endureçam e a argamassa acabe ganhando resistência (MATTOS, 2001). Outra função está relacionada à trabalhabilidade à mistura (OP CIT.). Portanto, pode-se resumir o papel da água da seguinte maneira: Quanto mais água em contato com os constituintes da argamassa (aglomerante e agregado), maior será a trabalhabilidade do produto cimentício, porém, menor será sua resistência mecânica.

2.4.5 Aditivos

Conforme especificado pela ABNT na NBR 13529 (1995), os aditivos são empregados nas argamassas com o objetivo de modificar suas propriedades nos estados fresco e/ou endurecidos.

Os principais aditivos encontrados são:

- aditivo plastificante – aumentam a plasticidade da massa;
- aditivo acelerador de pega – deixa mais veloz o processo de hidratação do cimento Portland;
- aditivo retardador de pega – desacelera as reações de hidratação;
- aditivos incorporadores de ar – melhora a trabalhabilidade e a resitência ao congelamento da argamassa no estado endurecido.

2.4.6 Adições minerais

A NBR 13529 (1995) define adições como materiais inorgânicos naturais ou industriais finamente divididos, adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades e cuja quantidade é levada em consideração no proporcionamento.

Diversos tipos de materiais podem ser usados para adição mineral tanto em argamassa, como para concreto. MATTOS (2001) define os mais conhecidos. São eles: os saibros, os solos finos beneficiados e o pó de calcário (resíduo do beneficiamento do mármore), produto usado neste trabalho.

Um dos efeitos da adição de um determinado material, como calcário por exemplo, é o efeito filler. PETRUCI (1998) define que os *fillers* são agregados bem finos, constituídos de partículas minerais e dimensões inferiores a 0,075mm, e segundo NEVILLE (1997), eles não possuem atividade química, ou seja, só agem como efeito físico, dando mais compacidade (empacotamento de grãos) a mistura, que acaba, por isso, concedendo maior resistência mecânica as matrizes cimentícias.

O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, como o mármore, em sua maior parte, é um material constituído de fragmentos de rocha, possuindo características químicas, físicas, mecânicas e mineralógicas que o habilitam para ser

usado como adição mineral tanto como agregado como para *filler* e também na substituição em até 100% da cal (REIS e TRISTÃO, 2009).

Na revisão bibliográfica apresentada por RAMEZANIANPOUR *et al.* (2009), relata-se que, antes da década de 1980, o calcário foi assumido como uma carga inerte. No entanto, durante a hidratação do cimento portland há uma interação entre o silicato tricálcico e o carbonato de cálcio, este último acelera a hidratação do C_3S e modifica a relação Si / Ca de C-S-H (PERA *et al.*, 1999).

Segundo SERSALE *et al.* (1992), a pedra calcária não apresenta propriedades pozolânicas e conseqüentemente, não produz C-S-H gel. Quando o calcário é usado em materiais cimentícios, mudanças na porosidade capilar, ocorrem diversos efeitos físicos, tais como; efeito de diluição, efeito *filler* e nucleação heterogênea (CYR *et al.*, 2006).

O aumento da quantidade de calcário envolve uma diminuição na quantidade de cimento, e conseqüentemente, um aumento no efetivo w/c (água/cimento). O efeito de enchimento implica uma modificação da porosidade inicial da mistura e isso geralmente produz uma diminuição da água necessária para manter a trabalhabilidade constante. Nucleação heterogênea ocorre porque as partículas agem como sítios de nucleação de calcário, aumentando a hidratação inicial do cimento e produzindo uma cristalização mais desorientado do CH (IRASSAR, 2009).

Alguns trabalhos, porém, afirmam que além do efeito físico promovido por um material adicionado, existem também, em certos tipos de adições, uma atividade pozolânica devido suas partículas possuírem um diâmetro bem pequeno, reagindo assim com o aglomerante (cimento).

2.5 Rochas Ornamentais

As rochas ornamentais e de revestimento, também chamadas pedras naturais, rochas lapídeas e rochas dimensionais, são as denominações empregadas para designar rochas que, “após serragem, polimento e lustração, ressaltam características intrínsecas (textura, estrutura, trama dos minerais, etc) conferindo-lhes grande beleza e permitindo seu uso em revestimentos, pisos e ornamentação” (ABREU *et al.*, 1990) e (SOUZA, 2007).

Para fins comerciais, as rochas ornamentais subdividem-se em dois grandes grupos: granitos e mármore. Esses grupos respondem por 90% da produção mundial. Os demais tipos são as ardósias, quartzitos, pedra sabão, serpentinitos, basaltos e conglomerados naturais (PEITER *et al.*, 2001 *apud* SPÍNOLA *et al.*, 2004)

O termo granito refere-se às rochas não-carbonáticas, de composição silicatada, suscetíveis de polimento e empregadas como material de revestimento. Assim, para a indústria, são considerados granitos as rochas graníticas e afins (granito propriamente dito, dioritos, granodioritos, sienitoa, etc, têm como minerais constituintes o quartzo e feldspato), como outras rochas de natureza geológicas diversas (gnaisse, migmatitos, charnockitos *etc.*) (SOUZA, 2007).

Da mesma forma, o termo mármore engloba as rochas de composição carbonática, incluindo-se aí o mármore propriamente dito, ou seja, calcário metamorfizado e recristalizado, calcários, dolomitos, travertino, brechas calcárias, etc. (GIACONI, 1998).

2.5.1 Resíduos gerados do beneficiamento de rochas ornamentais

O resíduo utilizado neste trabalho foi gerado pelo beneficiamento de um tipo de bloco de rocha ornamental, o mármore, para a transformação em chapas e posterior acabamento e polimento.

De acordo com dados apresentados na Tabela 2.11, constata-se que no processo de serragem dos blocos de rochas ornamentais geram enormes quantidades de resíduos.

Tabela 2.11 - Estimativa da produção de resíduo.

Referências encontradas em DESTEFANI (2009) e SOUZA (2007)	Estimativa de resíduo gerados (%em volume em relação ao bloco)
Freire e Mota (1995) e Souza (2001)	20% a 25%
Gonçalves (2000) e Cavalcanti (2006)	25% a 30%
Silva (1998) e Vieira (2004)	30%
Gobbo et al. (2004) e Mello et al.(2006)	30% a 40%
Almeida, Branco e Santos (2007); Acchar e Dantas (2007)	40%
Almeida e Pontes (2001)	40% a 50%
Villaschi e Sabadini (2000)	25% a 30%
INET (2001)	25%

Considerando a estimativa de 61% da capacidade de serragem do Estado do Espírito Santo (BARROS, 2004), onde 90% deste total está em Cachoeiro de Itapemirim, sugere-se que são produzidos aproximadamente 988 mil toneladas de resíduo.

O beneficiamento de rochas ornamentais é dividido em: extração dos blocos, desdobramento dos blocos e beneficiamento final.

A extração mineral, que é o procedimento de retirar blocos de rochas ornamentais do ambiente, pode ser feita por vários métodos de lavra:

- lavra por desabamento;
- lavra de matações;
- lavra por bancadas;
- bancadas baixas;
- bancadas altas;
- lavra subterrânea.

Desdobramento dos blocos, também conhecido por Beneficiamento Primário, corresponde ao corte de blocos em peças com espessura variada e próximas daquelas apresentadas pelos produtos finais, na forma de chapas, espessores (chapas grossas usadas para arte funerária, monumentos *etc.*) ou tiras.

Neste processo (desdobragem ou serragem) os principais equipamentos utilizados são os teares (dotados de quatro colunas que sustentam um quadro que realiza movimento pendular recebendo um banho constante por uma polpa abrasiva composta de água, granalha de aço e cal) e talha-blocos (equipamento cujo desdobramento é realizado por discos diamantados, de diâmetros variados, com capacidade para cortes de grandes profundidades).

O beneficiamento final corresponde ao polimento e acabamento final das chapas e outras peças. O acabamento superficial pode-se dar pelos seguintes processos:

- levigamento;
- apicoamento;
- flameamento;
- polimento;

- lustro.

Os resíduos gerados pelos processos descritos acima são apresentados na Figura 2.7:

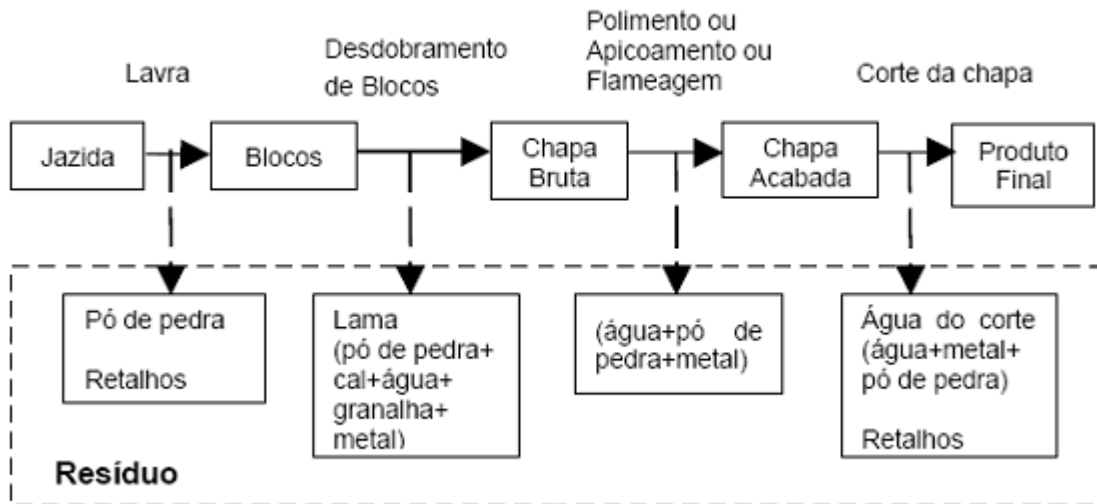


Figura 2.7 - Processo da geração de resíduos na indústria de rochas ornamentais. (REIS, 2008).

Segundo DESTEFANI (2009), a presença da granalha metálica na composição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, gera uma desconfiança entre diversos pesquisadores, quanto ao seu uso em produtos cimentícios, já que este em presença de ar e umidade sofre oxidação, o que para muitos, pode causar um efeito negativo na aparência das peças fabricadas e na sua resistência.

2.5.2 Contextualização da área do resíduo estudado (Aspectos gerais do município)

O município de Cachoeiro de Itapemirim fica localizado ao sul do estado do Espírito Santo (figura 2.8), distando aproximadamente 136 Km de Vitória, a capital do Estado. O município abrange uma área de 952Km², dos quais 241 Km² pertencem à sede e os demais se dividem entre seus sete distritos: Distrito Sede, Conduru, Burarama, Córregos dos Monos, Gruta, Itaóca, Pacotuba e Vargem Grande de Soturno.

Sua população é de 174.879 (IBGE – Censo de 2000) dos quais 88,83% estão na zona urbana. Apresenta uma densidade demográfica aproximada de 5,5 hab/Km². A bacia hidrográfica à qual pertence o município é a do Rio Itapemirim e seus afluentes. O

rio é utilizado para o abastecimento de água na cidade, geração de energia para as pequenas indústrias e para pesca.



Figura 2.8 - Mapa do Espírito Santo.

Cachoeiro de Itapemirim é o maior produtor de rochas ornamentais do Brasil, contendo diversas indústrias que fazem o beneficiamento das rochas, sendo as principais, os granitos e os mármore (cujos minerais predominantes são as calcitas e dolomitas).

As atividades mineiras e industriais com mármore e granitos deram início no estado através dos imigrantes europeus em Cachoeiro de Itapemirim, onde ocorrem as reservas naturais de mármore. A região norte concentra maior parte das jazidas de granito (Ver anexo A).

A vocação portuária do estado favoreceu a atividade exportadora, transformando o Complexo Portuário de Vitória no maior pólo brasileiro de exportação de rochas brutas e processadas. Por sua vez, a malha de ligação rodo-ferroviária centralizada pela Estrada de Ferro Vitória/Minas – EFVM, também contribuiu para o escoamento e distribuição da produção oriunda do estado de Minas Gerais. O número de empresas

capixabas exportadoras de rochas evoluiu de 86 em 1997 para 154 em 2000, quando o estado passou a concentrar 30% das empresas de exportação do Brasil. É o maior exportador de rochas ornamentais brutas e manufaturadas.

Segundo informações dos próprios munícipes, Cachoeiro de Itapemirim possui uma história longa e consolidada, cujo ponto de partida foi a exploração do calcário, que se deu de forma autônoma por famílias italianas.

O início da produção do mármore na cidade não se deu pela lavra de blocos, e sim, pelas marmorarias, instaladas na região a partir de 1930. As atividades de extração de mármore começaram em 1957. Seus pioneiros foram os empresários de origem italiana. As serrarias somente apareceram no município a partir de 1966. A exploração comercial do mármore e granito tem início, efetivamente, a partir dos anos 1960 e 1970.

2.6 Bibliografia pesquisada sobre uso de resíduos de rochas ornamentais em matrizes cimentícias

São abordados neste item, por ordem cronológica, alguns estudos realizados sobre o uso de resíduos de rochas ornamentais, sendo aplicadas em argamassas e concretos.

O trabalho de GONÇALVES (2000) foi relacionado ao uso do resíduo de corte de granito (um tipo de rocha ornamental) como adição para produção de concretos. O autor se preocupa com o tema relacionado ao Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem de resíduo.

A avaliação da viabilidade técnica para os concretos produzidos com o pó do granito foi realizado através da adição em teores de 10% e 20% em relação à massa de cimento. Através dos resultados dos ensaios realizados o autor conclui que o resíduo não apresenta riscos ambientais, seu uso como adição em concretos é viável, e que 10% dessa adição é a porcentagem que apresentou melhor desempenho (GONÇALVES, 2000).

MOURA *et al.* (2002) utilizaram o resíduo do corte de mármore e granito como agregado miúdo (teores de substituição em 5 e 10% em relação à massa de areia) para argamassas de revestimento e produção de lajotas pré-moldadas para piso. Os resultados dos ensaios mostraram ser viável essa substituição em até 10%.

LISBÔA (2004) obteve um concreto autoadensável incorporando o Resíduo do beneficiamento do mármore e granito. Para isso, ele caracterizou os materiais utilizados, avaliou as propriedades no estado fresco e propriedades mecânicas do estado endurecido deste concreto. Os resultados dos ensaios mostraram ser viável tecnicamente o uso do resíduo do beneficiamento do mármore e granito na produção de concretos (autoadensáveis).

O trabalho de BAHIENSE (2007) fundamentou-se numa pesquisa científica e tecnológica, tendo um estudo de incorporação de resíduo de rocha ornamental em argamassa com faixas de variação de misturas mais abrangentes e de forma otimizada utilizando planejamento de experimentos em rede simplex. Os resultados obtidos mostraram, em ambas as consistências apresentadas, que à medida que se aumenta a proporção do resíduo na mistura em relação a proporção de areia, cresce a resistência a compressão das argamassas, tornando viável a incorporação do resíduo conforme o comportamento mecânico requisitado.

COELHO *et al.* (2007) estudaram a substituição da argila em argamassas pelo resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. Os teores estudados foram: 25%, 50%, 75% e 100%. A utilização do resíduo não interferiu na consistência das argamassas. Os resultados dos ensaios mostraram ser mais adequado para as argamassas de revestimento e assentamento o traço com teor de 75% de substituição de argila.

ALVES (2008) avaliou o uso do resíduo (sem passar pelo processo de moagem) gerado no polimento de placas de granitos como adição mineral em concretos, não sendo este um material pozolânico, segundo resultados de sua caracterização física e química. Analisando os ensaios realizados, os concretos com adição do resíduo de granito proporcionou uma diminuição em sua porosidade e permeabilidade, melhorando suas propriedades no estado endurecido. Esta melhoria foi relacionada ao efeito fíler desta adição.

SILVA (2008) realizou ensaios para incorporar resíduo industrial de calcário em argamassas de cimento e areia a fim de reduzir custos na sua produção e tornar atrativo o uso deste material nas indústrias cimentícias. A adição do resíduo foi realizada em duas etapas: A primeira substituindo a areia pelo calcário em diversas

proporções e na segunda a troca foi feita com cimento nas mesmas condições. Os resultados foram aceitáveis quanto a substituição da areia pelo resíduo calcário.

TOPÇU *et al.* (2009) utilizaram em seus estudos o resíduo de pó de mármore em concretos autoadensáveis como material de preenchimento (*filler*). Em seus ensaios, os teores de substituição foram de 0, 50, 100, 150, 200, 250 e 300 Kg/m³, sendo detectados efeitos benéficos para ambas as propriedades no estado fresco e endurecido do concreto quando a quantidade de resíduo de mármore era abaixo de 200 Kg/m³.

ALYAMAÇ e INCE (2009) realizaram estudos com quatro diferentes pós de mármore produzido na Turquia, cuja caracterização por finura *Blaine* na faixa de 390-510 m²/Kg, mostrando em seus ensaios ser bem sucedida e economicamente viável seu uso para preenchimento em concreto autoadensável.

ARUNTAS *et al.* (2010) utilizaram o resíduo de pó de mármore na mistura com o clínquer do cimento Portland para fabricação de cimentos. Foram utilizados em seu trabalho diferentes proporções: 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10% de resíduo em massa. A quantidade de gesso foi fixada em 5%, em massa da produção de cimento neste estudo. Foram produzidas argamassas com o cimento nestas proporções utilizando formas com formato prismático nas dimensões de 40 x 40 x 160 mm.

Os ensaios de resistência foram realizados em amostras de argamassas, 7, 28 e 90 dias.

Os resultados mostraram que os resíduos de pó de mármore adicionados ao cimento estão de acordo com norma EM 197-1, e portanto, 10% de resíduo pode ser usado como material aditivo para fabricação de cimento.

CORINALDESI *et al.* (2010), o pó de mármore, obtido como subproduto da serragem e polimento do mármore, foi caracterizado a partir do ponto de vista químico e físico para avaliar a possibilidade de usá-lo em argamassas e concreto, especialmente para concreto autoadensável.

Observou-se que o pó de mármore tinha uma superfície específica elevada, dando mais coesão a argamassas e concretos, e no ponto de vista químico o pó de mármore tinha como principal mineral o Carbonato de cálcio (CaCO₃).

Foi realizado em várias pastas de cimento preparado com pó de mármore, em combinação com cimento e, eventualmente, também, com uma mistura de superplastificante, com base em seus resultados, observou-se que, na presença deste superplastificante a adição de pó é muito eficaz em aumentar a resistência à segregação, desde que fator a/c seja inferior a 0,5.

Foram preparadas 6 argamassas (ARG1, ARG2, ARG3, ARG4, ARG5, ARG6) com o mesmo traço 1:3 (cimento:areia) nas seguintes proporções: ARG1, argamassa como referência; ARG2, substituindo 10% do cimento pelo resíduo; ARG3 substituindo 10% da areia pelo resíduo; ARG4, argamassa de referência com aditivo superplastificante; ARG5, a ARG2 mais superplastificante; ARG6, a ARG3 mais superplastificante. O superplastificante usado foi adicionado na dosagem de 0,5% em peso de cimento.

O comportamento mecânico das argamassas preparadas sem adição química através dos ensaios de compressão em 3, 7, 28 e 56 dias foram inferiores aos preparados com superplastificante. As argamassas ARG2 e ARG3 diminuíram em 10-20% a resistência a compressão em idades avançadas, sendo ARG3 um pouco mais resistente que ARG2. As argamassas com superplastificante causaram uma pequena perda da resistência.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos materiais

As argamassas foram produzidas utilizando cimento, cal hidratada, areia natural e resíduo de mármore (calcário).

3.1.1 Cimento

Para a confecção das argamassas foi utilizado o cimento Portland CII E 32 da marca Votorantin, produzido na fábrica do município de Cantagalo com o número do lote L015 065914, adquirido no mercado varejista em sacos de 50 kg, por ser um dos cimentos mais utilizados em obra da região. Suas características físicas e químicas foram analisadas.

A massa específica do cimento foi obtida utilizando a NBR NM 23 (2001), utilizando o frasco de *Le Chatelier*.

A área específica foi feita por *Blaine* seguindo a NBR 7224 (1996).

Para determinar a resistência do cimento em diferentes idades, argamassas foram confeccionadas obedecendo aos procedimentos da ABNT utilizando a NBR 7215 (1996), sendo rompidas nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Para a determinação da composição química, foi utilizada a técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX), análise em um equipamento Shimadzu EDX-700 (Figura 3.4).

3.1.2 Areia

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural proveniente da bacia do Rio Paraíba do Sul, no município de Campos dos Goytacazes (RJ). Foi realizada uma análise granulométrica deste agregado por peneiramento a seco.

Para avaliação da porcentagem de vazios nas areias foi utilizada a metodologia de MARGALHA *et al.*(2007), metodologia esta semelhante a publicação no Historic Scotland (1995). O ensaio utilizou dois recipientes graduados, um dos quais foi cheio até 500 ml de água e o outro na mesma medida com areia seca. Posteriormente, saturou-se a areia com água e, verificou-se o gasto de água. Foi calculada a porcentagem de volumes vazios de cada uma das areias, que corresponde à

quantidade de água para preencher o volume de vazios. Considera-se adequada a areia ou mistura de areias com porcentagem de volumes vazios entre 30 e 35%. Observando a tabela 4.3 no item 4.2 percebe-se que a porcentagem de volume de vazios da areia utilizada ficou dentro deste limite, obtendo o valor de 35%.

Para a massa específica da areia, utilizou-se os procedimentos segundo a NBR 9779 (1987), sendo assim realizado:

- colocou-se água no frasco de Chapman até a marca de 200ml;
- adicionou-se 500g do agregado miúdo seco em estufa no Capman e agitou-se, retirando-se as bolhas de ar;
- foi anotado a leitura final no Chapman.

Utilizando a NBR NM 45 (2006) – método C, determinou-se a massa unitária no estado solto. Seguindo os procedimentos da norma, a areia tinha o dobro do volume do recipiente utilizado. Foi lançado o agregado a uma altura de aproximadamente 10 a 12 cm do topo do recipiente, sendo regularizada a superfície com uma régua. Ao final, determinou-se a massa do agregado.

3.1.3 Cal hidratada

Foi utilizada a cal hidratada do tipo CHIII, da marca Supercal produzida na fábrica da Ical, no município de São José da Lapa-MG, com validade de fevereiro de 2012. Esta marca foi escolhida devido este produto ser um dos mais utilizados no mercado de Campos dos Goytacazes e região, possuindo um alto grau de finura, conferindo a argamassa uma maior trabalhabilidade.

O que diferencia esta cal (CH III) das demais é a quantidade presente de anidrido carbônico (CO_2), enquanto a cal CH III pode conter até 13% de CO_2 , a CH I tem como limite 5%.

Neste trabalho, a cal hidratada foi caracterizada adotando os seguintes ensaios: granulometria, determinação da retenção de água, determinação da finura e quantidade de dióxido de carbono liberado e massa específica da cal.

A norma NBR 9289 (2000) foi utilizada na determinação da finura da cal hidratada para argamassas. Neste ensaio, um peneiramento de uma amostra

significativa foi feito em duas peneiras diferentes, verificando quanto de material ficou retido em cada peneira (Figura 3.1). A norma especifica um valor máximo para essas quantidades.

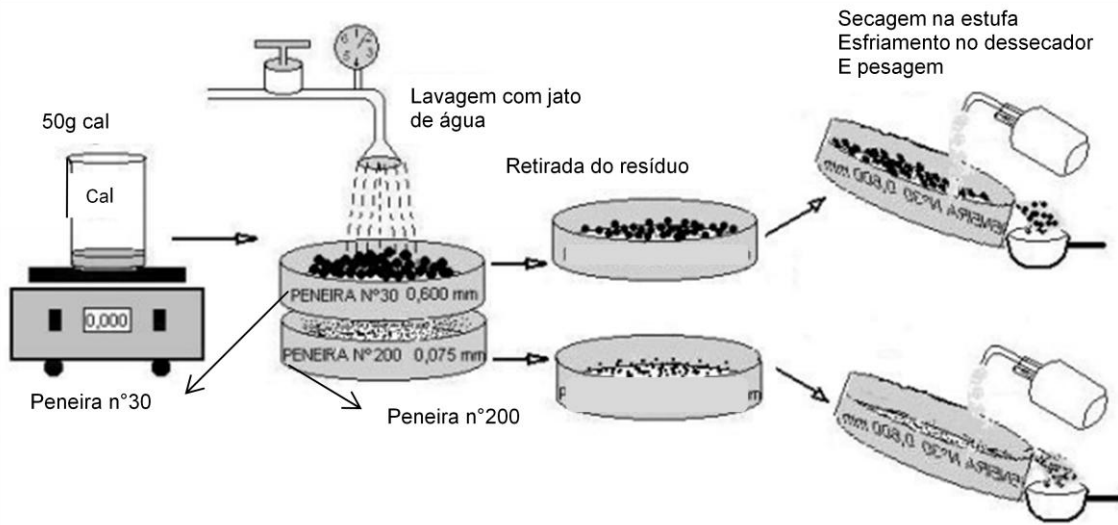


Figura 3.1 - Determinação da finura em cal hidratada.
(PAIVA *et al.*, 2007)

A incorporação de água pela cal foi caracterizada através do método proposto por PAIVA *et al.* (2007). Para este ensaio, transferiu-se 50 g de cal para uma proveta de 250 mL, em seguida 100 g de água destilada são adicionadas e homogeneizadas com auxílio de um bastão de vidro. Após a verificação do volume, deixou-se em repouso e anotou-se o volume da parte líquida que deixa de se incorporar na mistura por decantação, aos 25, 60, 90 e 150 minutos.

Na determinação do teor de CO₂, foi utilizada uma metodologia alternativa mais simples, idealizada e testada pelos mesmos autores através da qual é determinada a massa do CO₂ liberado e não o volume.

O método consistiu em pesar uma amostra da cal hidratada e colocar em um frasco de *Erlenmeyer*. Em seguida, pesar um volume (± 25 mL) de uma solução de ácido clorídrico de concentração 50 %, juntamente com a cal. Com cuidado, os dois recipientes foram retirados da balança. Após a pesagem, foram misturados o ácido com a cal, sendo necessário aguardar o tempo necessário para que a reação se processe e a temperatura da reação se reduza para a ambiente, durante aproximadamente 10 min.

Em seguida, foi efetuada a nova pesagem do conjunto, calculando, por diferença, a massa de CO_2 liberada (Figura 3.2).

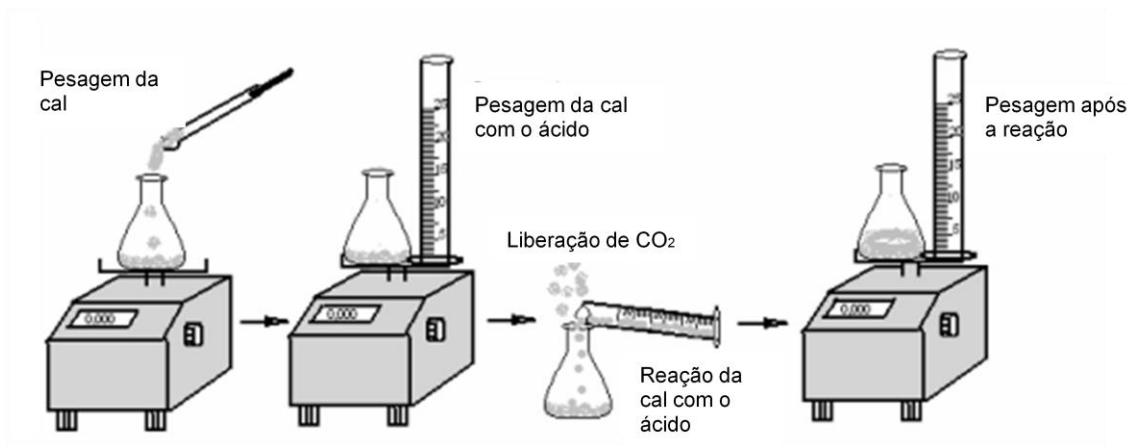


Figura 3.2 - Determinação de CO_2 .
(PAIVA *et al.*, 2007)

A massa específica da cal foi obtida utilizando o frasco de Le Chatelier seguindo os mesmos procedimentos do ensaio feito no cimento.

A análise granulométrica do material foi realizada por via seca através do equipamento Turbotrac da empresa Instrutécnica, situada no Distrito de Barão Geraldo, em Campinas-SP.

Além dos ensaios físicos, a cal também foi caracterizada por: fluorescência de raios X, identificação mineralógica por difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos mesmos equipamentos citados no item 3.1.4.

3.1.4 Resíduo

O resíduo utilizado nesta dissertação foi um calcário adquirido pelo processo de beneficiamento do mármore. Este material é retirado de uma empresa localizada no distrito de Santa Rosa, município de Cachoeiro de Itapemirim, no Estado do Espírito Santo, que é especializada em beneficiamento e desdobramento do mármore para fabricação de pisos e revestimentos. Os resíduos gerados pelos processos produtivos da empresa são tratados, havendo uma separação da parte líquida da sólida. Esta é então coletada, e enviada à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, onde foi peneirada para depois ser analisada e incorporada à argamassa. A Figura 3.3

apresenta o resíduo de mármore em forma de pó pronto para ser utilizado nos experimentos.



Figura 3.3 - Resíduo em forma de pó.

No anexo B deste trabalho são encontradas fotos da empresa, do beneficiamento do mineral, equipamento e tratamento do resíduo.

Segundo dados do site da própria empresa, a “marmoraria conta com um maquinário moderno e eficiente, desde politrizes, cortadeiras e teares de lâminas diamantadas no processo de serrada”, “não havendo a formação de lama abrasiva com granalha de aço”, fazendo com que o resíduo tenha poucas impurezas, tornando-se ideal para uso em pesquisas, portanto, não havendo problema quanto à oxidação nem a perda de resistência conforme apresentado na revisão bibliográfica, item 2.5.1.

Foram realizadas análises: química e física do resíduo, tais como: granulometria, fluorescência de raios X, identificação mineralógica por difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A análise granulométrica do material foi realizada por via seca através do equipamento Turbotrac da empresa Instrutécnica, situada no Distrito de Barão Geraldo, em Campinas-SP.

Para a determinação da composição química, foi utilizada a técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX), análise em um equipamento Shimadzu EDX-700 (Figura 3.4). A amostra foi analisada na forma de pó, sendo moída

em moinho planetário de bolas no laboratório de Engenharia Civil e peneirada (peneira da ABNT nº 325) deixando-a mais uniforme, favorecendo assim, a análise.



**Figura 3.4 - Equipamento Shimadzu EDX-700.
LECIV/CCT/UENF.**

Em relação à caracterização mineralógica, foi realizado ensaio de difração de raios-X, utilizando o aparelho do modelo URD-65, SEIFERT, anodo de Co, 40 KV / 30mA, com ângulo de varredura de 2θ (6,5 a 60°). Assim como no EDX, a amostra foi trabalhada na forma de pó (peneira nº325 da ABNT).

Antes de ser adicionado à argamassa, o resíduo passou por um processo de secagem, foi peneirado (sem passar pelo processo de moagem, deixando-o o mais natural possível) e com uma finura considerável, possibilitando uma maior área superficial.

Segundo AMORIM *et al.* (2003), “as propriedades mecânicas das argamassas melhoram circunstancialmente com o aumento da superfície específica de resíduos inseridos nas argamassas”.

Além dessas caracterizações, houve também, como comparativo da cal hidratada, os seguintes ensaios físicos já descritos no item 3.1.3. São eles: determinação da retenção de água, determinação da finura e quantidade de dióxido de carbono liberado e massa específica do resíduo.

3.1.5 Índice de atividade pozolânica

LUXÁN et al. (1989) descreve um método rápido para a avaliação de uma atividade pozolânica através da medição de condutividade que podem ser aplicadas a muitos produtos naturais. Neste método, é definido um índice de atividade pozolânica baseado na variação da condutividade elétrica de um material em uma solução saturada de hidróxido de cálcio em determinado intervalo de tempo.

A avaliação da pozolanicidade do material pela medição da condutividade pode ser classificada como: não pozolânico, pozolanicidade variável e boa pozolanicidade.

O ensaio de condutividade elétrica foi realizado no laboratório de Engenharia Civil da UENF. Para tanto, utilizou-se um condutivímetro, modelo AT 250 (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Ensaio de condutividade.

O procedimento utilizado foi:

- Colocar água para o banho em um béquer;
- colocar 70 ml de água destilada em outro béquer e aquecer até 40° C;
- adicionar 98,7 mg de Ca(OH)_2 e o ímã de homogeneização no béquer menor;
- colocar na velocidade 4 e deixar estabilizar por 20 min;
- posicionar o termostato e condutivímetro na mesma altura;

- ligar o condutímetro (primeira escala: 0-20 mS);
- adicionar 1,75 g de material (possível pozolana);
- fazer as leituras conforme apresentadas no Anexo D.

3.2 Preparo das argamassas

As argamassas foram preparadas de acordo com a ABNT utilizando a NBR 13276 (2005).

A mistura da argamassa foi feita com misturador mecânico da EMIC (Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda) modelo AG-5, provido de uma cuba de aço com capacidade de aproximadamente cinco litros e de uma pá de metal que gira em torno de si mesma, e em movimento planetário em torno do eixo da cuba.

Foram confeccionados dois traços de argamassas, um com cal hidratada de uso comercial como padrão de referência obedecendo à especificação do fabricante, e a outra substituindo a cal hidratada pelo resíduo proveniente da indústria de beneficiamento do mármore. O traço adotado é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Traços das argamassas.

Argamassa		Traço (cimento: mat. adic.: areia)	Relação água / sólido – a/s (%)
Material adicionado	Sigla		
Resíduo	AR	1 : 1 : 7	16,0
Cal	AC	1 : 1 : 7	17,0

A relação água / sólido das argamassas foi estabelecida através da fixação de uma faixa de consistência variando entre 255 e 260 mm. Para atingir esta faixa, diversas tentativas foram realizadas, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 3.6. As relações água / materiais secos (massa) utilizados estão apresentados na Tabela 3.1 e marcados em um retângulo no gráfico da Figura 3.6.

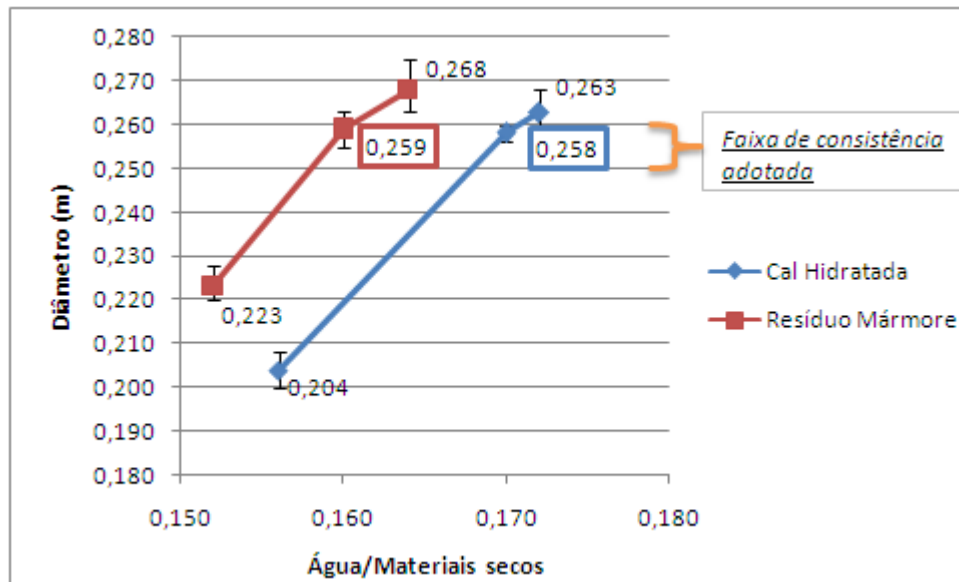


Figura 3.6 - Consistências das argamassas testadas e adotadas.

3.3 Ensaios das argamassas no estado fresco

3.3.1 Índice de consistência

O índice de consistência foi determinado utilizando os procedimentos da NBR 13276 (2005) com utilização da mesa de consistência (figura 3.7), NBR 7215 (1996), no laboratório de Engenharia Civil (LECIV).

Esse ensaio foi realizado enchendo-se um molde tronco cônico, disposto sobre a mesa de consistência (flow table), com argamassa fresca, convenientemente adensada. Após desmoldada, a argamassa foi submetida a um esforço dinâmico, impelido por uma seqüência de 30 golpes desferidos em um período de 30 segundos, produzidos por uma peça excêntrica acoplada a parte inferior da mesa, como pode ser observado na Figura 3.7. A média das medidas de diâmetros ortogonais, em milímetros, da argamassa deformada após a ação mecânica descrita, definiu o índice de consistência.

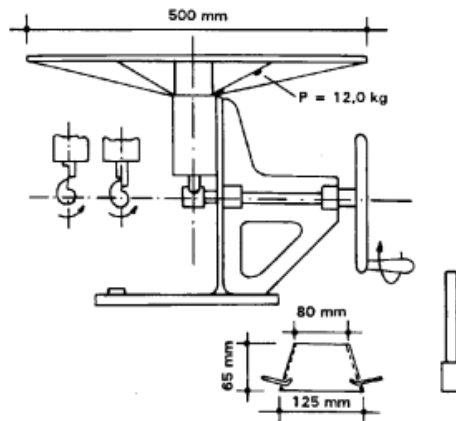


Figura 3.7 - Mesa para índice de consistência (NBR 7215: 1991).

3.3.2 Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado

A NBR 13278 (2005) estabelece o método para determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado em argamassas no estado fresco, destinadas ao assentamento e revestimento de paredes e tetos.

A aparelhagem necessária indicada nesta norma é:

- balança com resolução de 0,1g;
- recipiente cilíndrico com volume aproximado de 400cm³;
- espátula: lâmina de 150mm x 20mm;
- placa de vidro transparente quadrada;
- utensílios de laboratório.

A densidade de massa no estado fresco (d) foi calculada conforme fórmula abaixo, em quilogramas por metro cúbico (Kg/m³).

$$d = \frac{(m_c - m_v)}{v_r} \cdot 1000 \quad (3.1)$$

m_c = massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa;

m_v = massa do recipiente vazio;

v_r = volume do recipiente cilíndrico.

Para o teor de ar incorporado (A) na argamassa tem-se:

$$A = 100\left(1 - \frac{d}{dt}\right) \quad (3.2)$$

Onde:

d = densidade de massa da argamassa (g/cm^3);

dt = densidade de massa teórica da argamassa (calculada na fórmula abaixo).

$$dt = \frac{\sum mi}{\sum \frac{mi}{\gamma_i}} \quad (3.3)$$

mi = massa seca de cada componente da argamassa;

γ_i = massa específica de cada componente.

Os resultados dos ensaios de massa específica de cada componente estão expostos nos itens 4.1, 4.2, 4.3. Na Figura 3.8, há uma fotografia de como foi feita parte deste ensaio.



Figura 3.8 - Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.

3.4 Ensaios para as argamassas no estado endurecido

3.4.1 Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão

Os ensaios, para obtenção da resistência à tração na flexão e à compressão, foram realizados enchendo-se moldes prismáticos composto de três compartimentos cada, de forma poder preparar simultaneamente três corpos de prova com seção transversal de 40mm x 40mm e 160mm de comprimento, disposto sobre a mesa de

consistência (“*flow table*”), com argamassa fresca, convenientemente adensada em duas camadas. Em cada camada inserida no molde, foram aplicadas 30 quedas através da mesa de adensamento e depois os corpos de prova foram rasados. A Figura 3.9 mostra o modelo de molde utilizado nestes ensaios, apresentando um moldado com argamassa com resíduo de mármore.



Figura 3.9 - Moldes prismáticos utilizados.

Depois de aproximadamente 48 horas, os corpos de prova foram desmoldados.

A resistência de aderência à tração na flexão foi determinado pelo rompimento de três corpos-de-prova prismáticos, com dimensões 4cm x 4cm x 16cm, conforme NBR 13279 (2005), em uma máquina de ensaios da marca INSTRON 5582, aos 28 dias, no laboratório de Engenharia Metalúrgica e de Materiais LAMAV/CCT/UENF.

Aplicou-se uma carga no centro do corpo de prova bi-apoiado e a tensão de tração na flexão foi obtida através da Equação:

$$R_f = (1,5 \cdot F_f \cdot L) / 40^3 \quad (3.4)$$

Onde:

R_f = Resistência à tração na flexão (MPa);

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = distância entre os suportes (mm).

Para o ensaio de compressão foram utilizados 3 corpos de prova prismáticos serrados ao meio, dando um total de 6 CP's conforme exigência da mesma norma do

ensaio supracitado, utilizou-se 2 chapinhas de dimensões 4 x 4 x 1cm posicionadas conforme é demonstrado pela figura 3.9. Utilizou-se o mesmo equipamento de ruptura. A Figura 3.10 demonstra o CP na prensa pronto para o começo do referido ensaio.

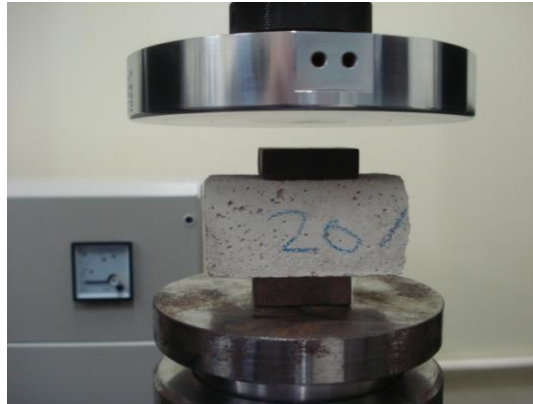


Figura 3. 10 - Ensaio de compressão.

A resistência à compressão foi calculada segundo a equação:

$$R_c = F_c / 1600 \quad (3.5)$$

Onde:

R_c = Resistência à compressão (MPa);

F_c = Carga máxima aplicada (N).

- Cálculo do desvio absoluto máximo:

O desvio absoluto máximo de uma série de corpos de prova é a diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afaste desta média para mais ou para menos.

Na resistência à tração na flexão, o desvio absoluto máximo deve ser inferior ou igual a 0,3 MPa, quando isto não ocorre, deve ser calculada uma nova média, desconsiderando o valor discrepante. O ensaio só é válido quando o resultado for constituído de no mínimo dois CP's, caso contrário o ensaio deve ser repetido.

Na resistência à compressão, quando o desvio absoluto for superior a 0,5 MPa, deve ser calculada uma nova média, desconsiderando também o valor discrepante. O ensaio poderá ser validado quando o resultado for constituído de no mínimo quatro

CP's, caso contrário, deve ser repetido. Os desvios de todos os ensaios ficaram dentro dos padrões exigidos de cada norma.

3.4.2 Determinação da resistência potencial de aderência à tração

- *Confecção da parede de alvenaria e dos painéis*

Foi confeccionada ao lado do prédio das Oficinas na UENF uma parede de alvenaria de 130 cm de largura por 150 cm de altura utilizando blocos cerâmicos de 6 furos, sobre uma viga de concreto armada, e chapiscada utilizando peneira de malha 4,8 mm, com argamassa de cimento e areia no traço 1 : 3, em massa de material seco.

A disposição da parede localizada ao ar livre, sobre efeitos climáticos, foi realizada para deixar as argamassas e seus valores ensaiados com características próximas à realidade.

A parede construída foi dividida em painéis de 60 cm de largura por 45 cm de altura, com ripas de madeira com espessura de aproximadamente dois centímetros. Para evitar que as ripas absorvessem a água das argamassas, estas foram umedecidas. O painel com a argamassas de cal (AC) e argamassa de resíduo (AR) foram dispostos lado a lado, para sofrer a mesma influência das intempéries.

- *Preparo das argamassas e revestimento dos painéis*

As argamassas foram preparadas de acordo com a NBR13276 (2005).

Após sete dias da realização do chapisco, foram revestidos os painéis (um com AC e outro com AR). Todos os painéis foram revestidos pelo mesmo oficial pedreiro, obedecendo à seguinte sequência: lançamento da argamassa, após 5 minutos fez-se o sarrafeamento e esperou-se 15 minutos para execução do desempenho

- *Ensaio para determinação da resistência de aderência por tração*

O ensaio para determinação da resistência de aderência foi realizado nos revestimentos na idade de 28 dias, seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 15258 (2005). Foi utilizado um equipamento do laboratório de engenharia civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) de comando manual da marca Enerpac com capacidade de 10.000 psi, ao qual foi

adaptado um manômetro com capacidade de 850 psi. Em cada revestimento foram realizados ensaios utilizando 6 pastilhas de ferro circulares de 5 cm de diâmetro e 6 pastilhas quadradas de 10cm de diâmetro, totalizando 12 CP's. A Figura 3.11 ilustra a parede onde foi executado estes ensaios.



Figura 3.11 - Pastilhas coladas e preparadas para o arrancamento da argamassa.

O cálculo da resistência é dado por:

$$R_i = P_i / A_i \quad (3.6)$$

Onde:

R_i = Resistência potencial de aderência à tração (MPa);

P_i = carga de ruptura indicada no aparelho (N);

A_i = área do corpo de prova (mm).

3.5 Análise estatística adotada

Após a realização dos ensaios mecânicos das argamassas, foram calculadas as medidas de dispersão utilizando uma planilha eletrônica (Excel). As medidas de variabilidade determinadas foram: variância amostral, desvio padrão, coeficiente de variação e erro-padrão da média.

Por fim, foi utilizado um teste estatístico de hipótese (Teste “t” de *Student*), criado por Willian Gosset (1908), sendo mais indicado para pequenas amostras ($n \leq 30$).

As hipóteses de nulidade (H_0) e alternativa (H_a), para comparar os valores médios das resistências mecânicas de AC e AR, foram:

$$H_0: \mu_x = \mu_y$$

$$H_a: \mu_x > \mu_y$$

Onde:

μ_x = Resistência média de AR (MPa);

μ_y = Resistência média de AC (MPa).

Antes de calcular tais hipóteses, também foi executado o teste F, verificando se as variâncias de AC e AR podem ser consideradas homogêneas, para isso testou-se as seguintes hipóteses:

$$H_0': \sigma_x = \sigma_y$$

$$H_a': \sigma_x \neq \sigma_y$$

Onde:

σ_x = Variância amostral de AR (MPa);

σ_y = Variância amostral de AC (MPa).

Para realização do Teste “t”, foi considerado o nível de confiança de 95%. Pode-se dizer que quando o resultado do teste for superior a 0,05 a hipótese nula não é rejeitada ($\mu_x = \mu_y$). Conseqüentemente, quando o valor do teste for inferior a 0,05; a hipótese nula é rejeitada ($\mu_x > \mu_y$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios efetuados nos materiais utilizados e argamassas produzidas neste trabalho.

4.1 Caracterização do cimento

Os resultados de caracterização do cimento Portland CP II E - 32 utilizado neste trabalho estão apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Resultados de caracterização do cimento.

Propriedades		Resultados	Limites Especificados (NBR 11.578: 1991)
Química	CaO (%)	71,98	-----
	SiO ₂ (%)	15,92	-----
	Al ₂ O ₃ (%)	5,65	-----
	SO ₃ (%)	3,07	≤ 4,0%
	Fe ₂ O ₃ (%)	2,15	-----
	K ₂ O (%)	0,56	-----
	TiO ₂ (%)	0,38	-----
	Outros (%)	0,29	-----
Física	Massa específica (g/cm ³)	2,901	-----
	Área específica Blaine (m ² /kg)	402,37	≥ 260,0
	Finura #325 (%)	5,8	≤ 12,0

Tabela 4.2 - Resultados de resistência à compressão do cimento.

Ensaio mecânico					Resultado médio (MPa)	Desvio relativo máximo(%)	Limites especificados (NBR 11.578/1991)
Resistência à compressão (MPa)							
Idade (dias)	Corpo-de-prova n°						
	1	2	3	4			
3	13,0	12,6	12,7	12,5	12,7	2,4	≥ 10,0 MPa
7	21,0	21,5	20,9	21,1	21,1	1,9	≥ 20,0 MPa
28	36,3	35,9	35,5	36,0	35,9	1,1	≥ 30,0 MPa

O que se observa é de acordo com as características físicas, químicas e mecânicas do cimento apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2, o aglomerante utilizado está em conformidade com a NBR 11578 (1991) para cimento Portland do tipo CP II.

4.2 Caracterização da areia

A granulometria da areia é apresentada na Figura 4.1. Pela análise granulométrica realizada no Laboratório de Solos, o agregado utilizado possui aproximadamente 57% de areia grossa, 36% média, pouco mais de 3% de areia fina e 3% de fração silte.

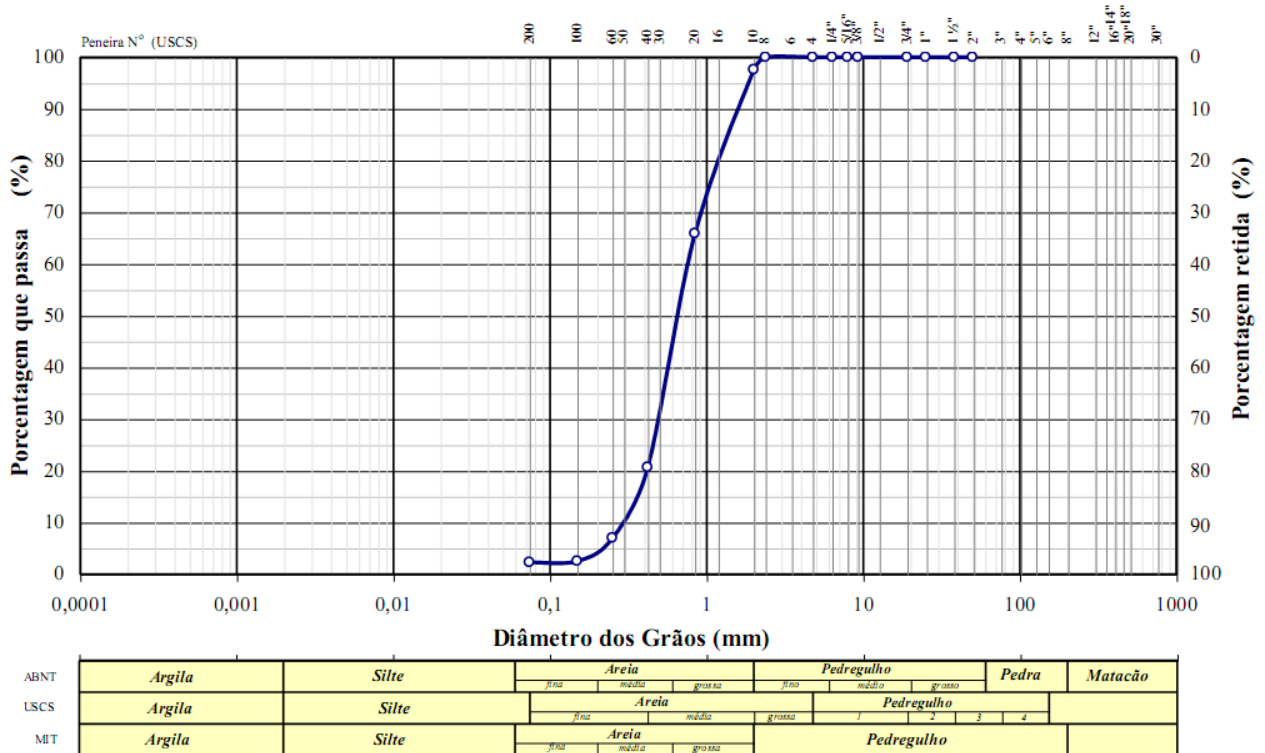


Figura 4.1 - Análise Granulométrica do agregado.

A curva granulométrica da areia e os limites mínimos e máximos de agregados miúdos mostrados na Figura 4.2 (Anexo E), estabelecidos pela NBR 7211 (2005), mostra que a curva (vermelha) da areia ficou entre os limites máximo e mínimo utilizável, portanto, apta para ser utilizado em argamassas.

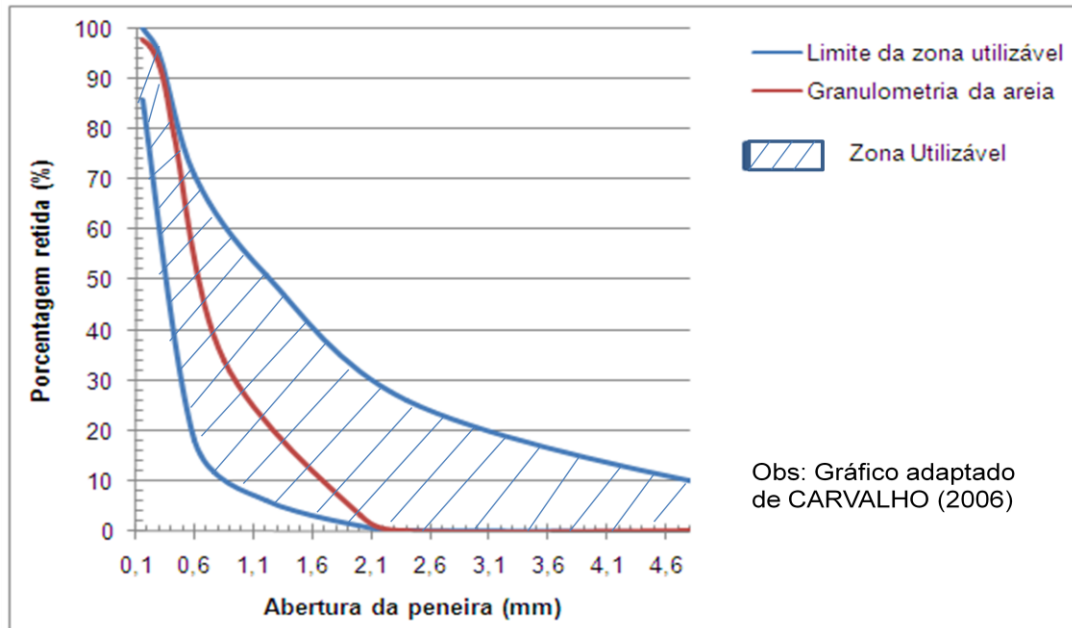


Figura 4.2 - Comparação da granulométrica da areia de acordo com NBR 7211(2005).

A Tabela 4.3 apresenta as demais caracterizações do agregado utilizado.

Tabela 4.3 - Resultados de caracterização física da areia.

Ensaio físico	Resultado	Referência
Massa específica (g/cm ³)	2,65	NBR 9770 (1987)
Porcentagem de vazios (%)	35	MARGALHA <i>et al.</i> (2007)
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,39	NBR NM 45 (2006)

Os valores encontrados da massa específica e massa unitária no estado solto são respectivamente, 2,65g/cm³ e 1,39g/cm³. Os resultados de caracterização da areia estão de acordo com os valores encontrados para uso em argamassa (MARGALHA *et al.*, 2007).

A porcentagem de vazios da areia ficou em torno de 35%, valor este dentro do limite recomendado, entre 30 e 35% (MARGALHA *et al.*, 2007)

4.3 Caracterização da cal hidratada e do resíduo

Na Tabela 4.4 é apresentada a caracterização da cal hidratada em diversos ensaios e os valores máximos permitidos pela NBR 7175 (2003). Analisando estes resultados, a cal utilizada está dentro dos padrões estabelecidos pela ABNT, sendo,

portanto, classificada como cal hidratada do tipo CH-III, confirmando a especificação do fabricante. Além da cal, estão dispostos na mesma tabela os resultados da caracterização do resíduo empregado.

Tabela 4.4 - Resultados das análises da cal hidratada e do resíduo.

Determinação	Limites estabelecidos por norma (CH-III)	Cal hidratada	Resíduo
Retenção de água (%)	≥ 70	85,4	72,0
Finura (Φ 0,60 mm) (%) *	≤ 0,5	0,28	0,09
Finura (Φ 0,075 mm) (%) *	≤ 15	7,79	6,19
Densidade real dos grãos	-	2,38	2,78
Quantidade de CO ₂ liberado	< 15	9	-

* Os valores apresentados na tabela são referentes à porcentagem retida nas peneiras supracitadas

A massa específica da cal hidratada varia em função do tipo de mineral encontrado, conforme mostrado na Tabela 4.5. Portanto, de acordo com classificação apresentada por BOYNTON (1996), pode-se definir que o componente empregado é uma cal hidratada calcítica, cuja massa específica está entre 2,3 e 2,4 g/cm³.

Tabela 4.5 - Valores de massa específica para os diferentes tipos de cal hidratada (BOYNTON, 1966).

Tipo de cal hidratada	Massa específica (g/cm ³)
Cal hidratada calcítica	2,3 a 2,4
Cal dolomítica altamente hidratada	2,4 a 2,6
Cal dolomítica hidratada normal	2,7 a 2,9

Analisando a massa específica dos componentes na Tabela 4.4, verifica-se que o resíduo de mármore (2,38 g/cm³) é mais denso que a cal hidratada (2,78 g/cm³), o que interfere diretamente na densidade de massa e no teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com estes elementos (Figuras 4.14 e 4.15).

A Figura 4.3 apresenta o resultado do ensaio de granulometria da cal hidratada (curva azul) e do resíduo (curva vermelha). No Anexo C é apresentada a análise granulométrica detalhada de ambos os materiais.

Apesar das curvas serem semelhantes na Figura 4.3, nota-se que a cal hidratada é mais fina que o resíduo de mármore; porém, este possui uma granulometria mais descontínua (bem graduada) em relação àquela, o que junto com sua massa específica mais densa, influencia satisfatoriamente na compacidade da mistura com os demais

componentes das argamassas (METHA e MONTEIRO, 2008), resultando em uma matriz mais compacta contendo um menor índice de vazios na produção de AR.

Diminuindo a quantidade de vazios na confecção de AR, conseqüentemente, o teor de ar incorporado é reduzido (Figura 4.14) e, com isso, é aumentada a resistência mecânica da argamassa (*op. cit.*).

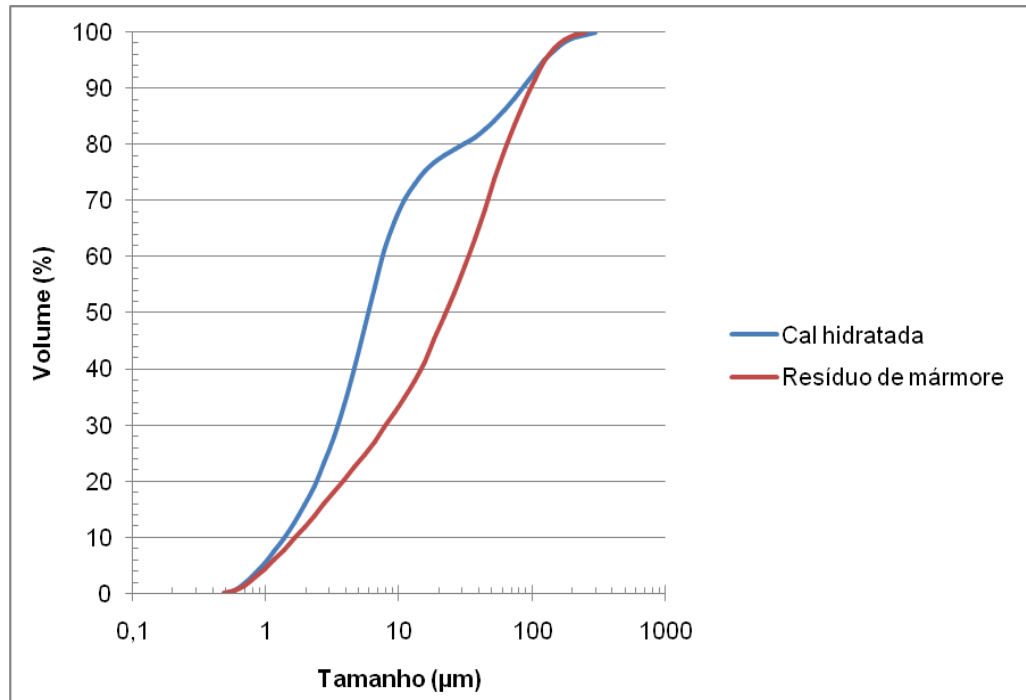


Figura 4.3 - Análise granulométrica da cal hidratada e do resíduo.

Além dos ensaios físicos prescritos pelas normas da ABNT, a cal hidratada e o resíduo também foram caracterizados por fluorescência de raios-X, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura.

- **Análise química por fluorescência de raios-X**

A composição química dos materiais (cal e resíduo) foi determinada através de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (Tabelas 4.6). Observa-se nesta tabela a presença de óxidos de cálcio e de magnésio no resíduo dolomítico, corroborando o resultado de difração de raios X apresentado na Figura 4.4.

Tabela 4. 6 - Composição química da cal hidratada e do resíduo de mármore.

	CaO	MgO	SiO ₂	K ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂
Cal hidratada	95,70	-	1,65	1,21	0,89	0,28	0,26	0,01
Resíduo dolomítico	78,93	15,04	4,39	0,92	0,71	-	0,02	-

A composição química da cal hidratada (Tabela 4.6) não possui nenhum teor de magnésio, obtendo 95,7% de CaO. De acordo com DUBAJ (2000) na Tabela 4.7, em função do teor de óxido de cálcio, a cal utilizada é classificada como cálcica. Esta classificação é ratificada através dos resultados de difração de raios-X (Figura 4.5) e da análise de sua massa específica (2,38 g/cm³), estando dentro dos padrões estabelecidos na Tabela 4.5 (BOYNTON, 1966).

Tabela 4. 7: Classificação das cales (DUJAB, 2000)

Tipos de cales	Teor de óxido de cálcio
Cálcicas ou calcíticas	> 90%
Magnesianas	Entre 65% e 90%
Dolomíticas	< 65%

- **Análise mineralógica por difração de raios-X**

A composição mineralógica do resíduo foi obtida por difração de raios-X (DRX) e está apresentada na Figura 4.4.

O difratograma apresenta as seguintes fases cristalinas: Diopsídio (CaMgSi₂O₆), Dolomita [CaMg(CO₃)₂] e Quartzo (SiO₂), demonstrando assim que o resíduo é um tipo de calcário dolomítico.

A composição mineralógica da cal hidratada está apresentada na Figura 4.5 e apresenta como principais fases cristalinas: Portlandita [Ca(OH)₂] e calcita [CaCO₃].

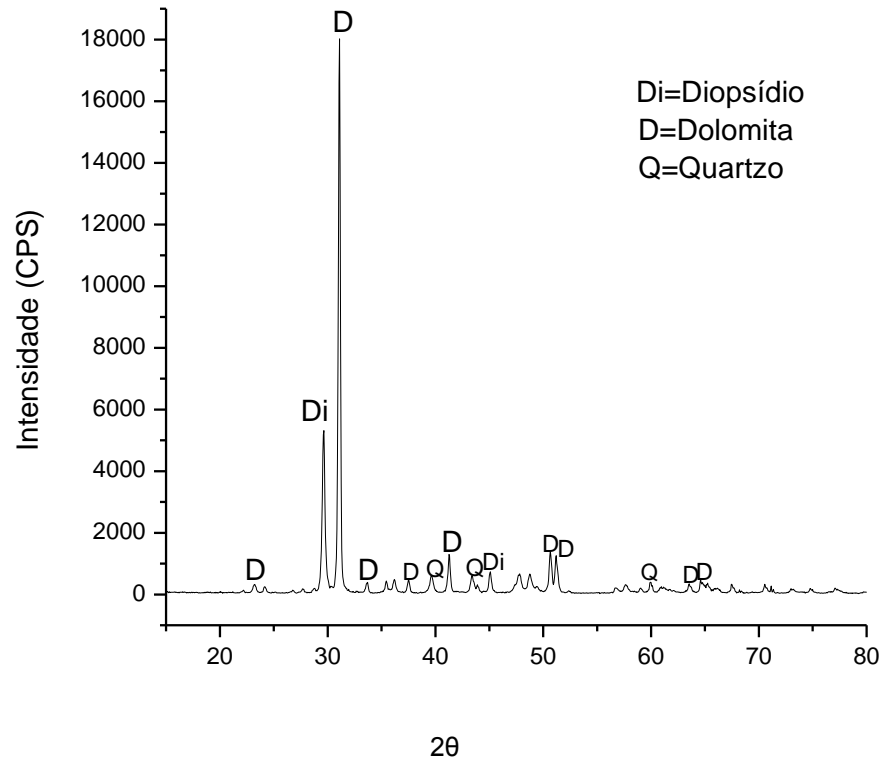


Figura 4.4 - Espectro de raios-X do resíduo.

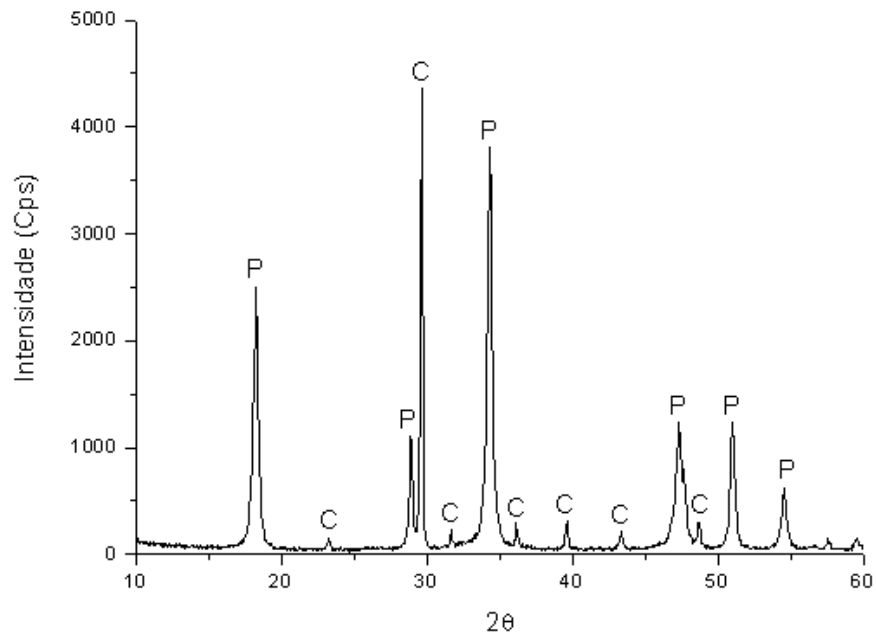


Figura 4.5 - Espectro de Raios-X da cal hidratada.

A partir do espectro de difratometria de raios-X apresentado nas Figuras 4.4 e 4.5, observa-se a presença de picos bem definidos de minerais. Analisando a Figura 4.4, esses picos indicam a presença de fases cristalinas na amostra, sendo, portanto, possível dizer que o material que gerou o resíduo é um material constituído de cristais bem definidos. A ausência de Halo difuso no espectro é um indicador da baixa reatividade potencial do material, o que foi confirmado no ensaio para o índice de atividade pozolânica.

- **Análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Realizou-se ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no resíduo, de modo a determinar sua morfologia.

De acordo com as Figuras 4.6 e 4.7, nota-se que o resíduo utilizado tem uma morfologia predominantemente romboédrica, típica desse mineral (dolomita) (OLIVEIRA, 2005).

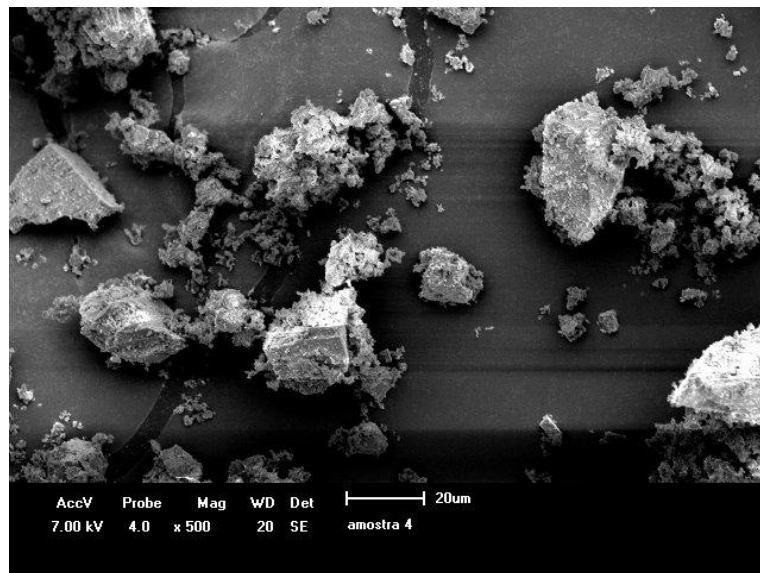


Figura 4. 6 - Imagem do MEV do resíduo de mármore (aumento de 500 X).

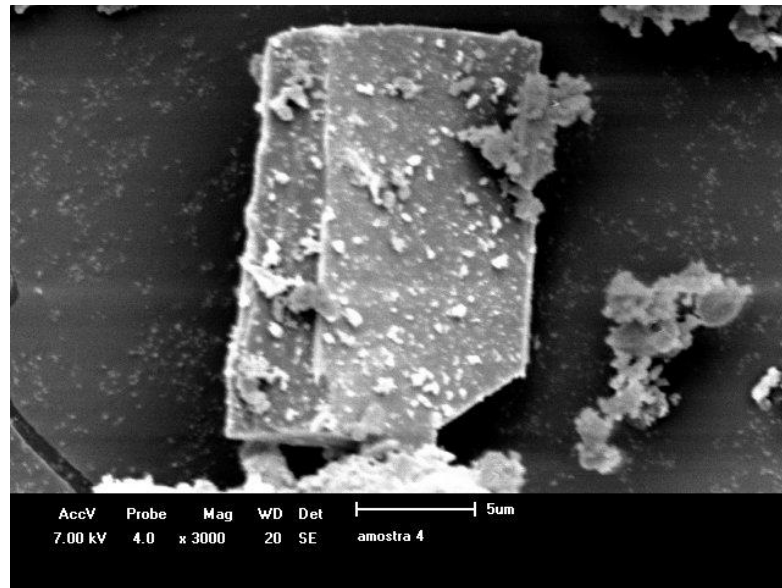


Figura 6. 7 - Imagem do MEV do resíduo, detalhe de partícula (aumento de 3000 X).

Foram marcados na amostra (Figura 4.8) do resíduo, quatro pontos nos quais foram identificadas a composição química por meio da energia dispersiva de raios-X, equipamento acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (Figuras 4.9 à 4.12). Identificando os elementos de cada ponto da figura, percebe-se que os mesmos elementos estão presentes no ensaio que determina a composição química do resíduo (Tabela 4.6).

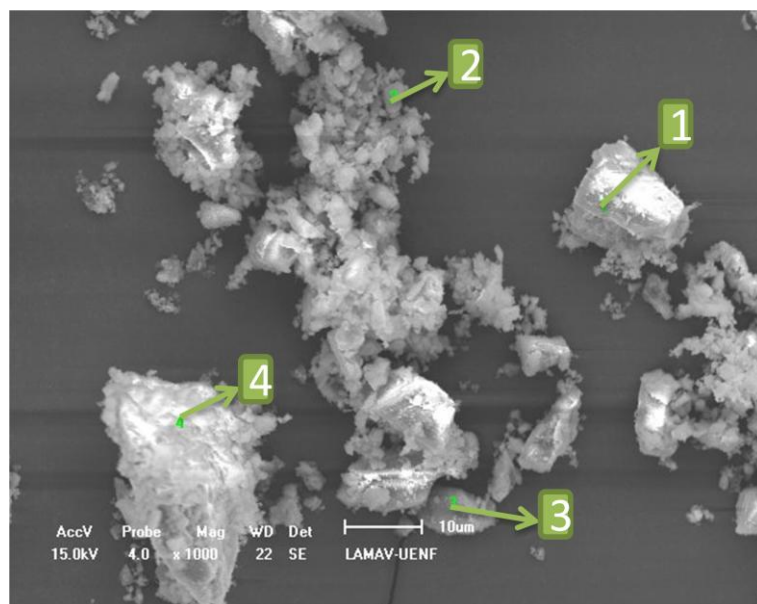


Figura 4.8 – MEV do resíduo de mármore, 1000 X de aumento.

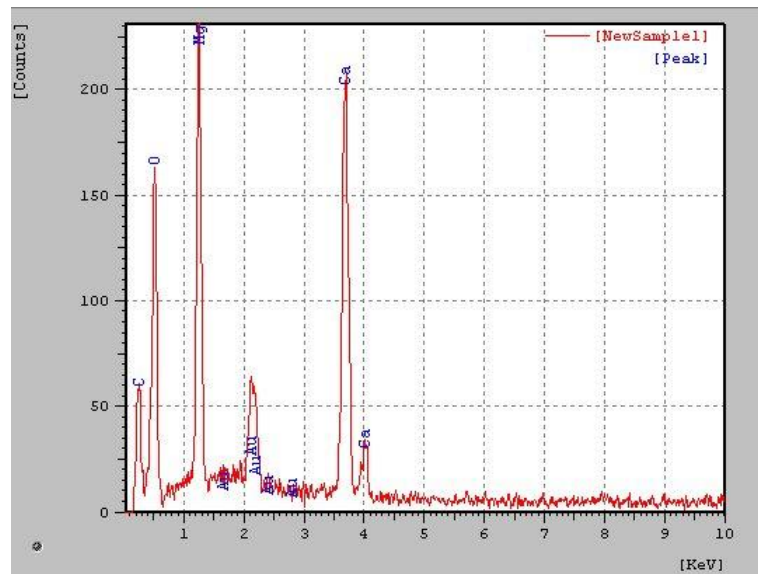


Figura 4.9 - Espectro de difração de raios-X por energia dispersiva da micro região 1.

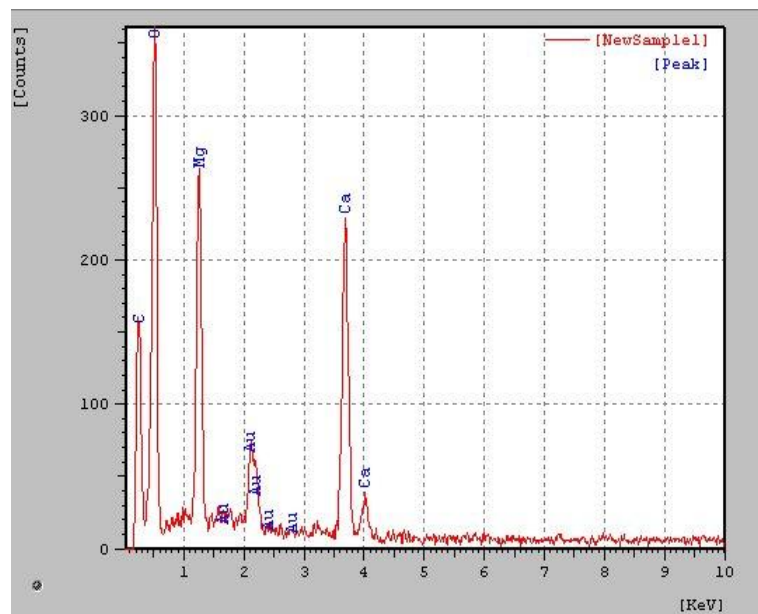


Figura 4.10 - Espectro de difração de raios-X por energia dispersiva da micro região 2.

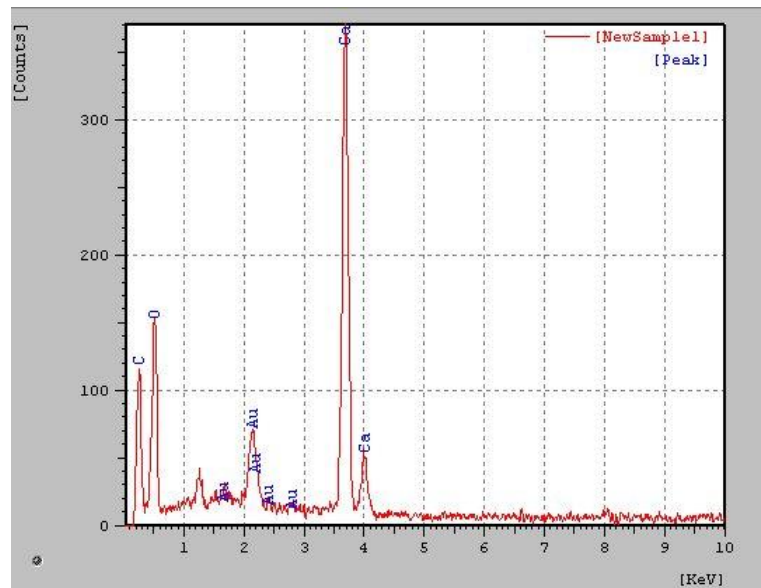


Figura 4.11 - Espectro de difração de raios-X por energia dispersiva da micro região 3.

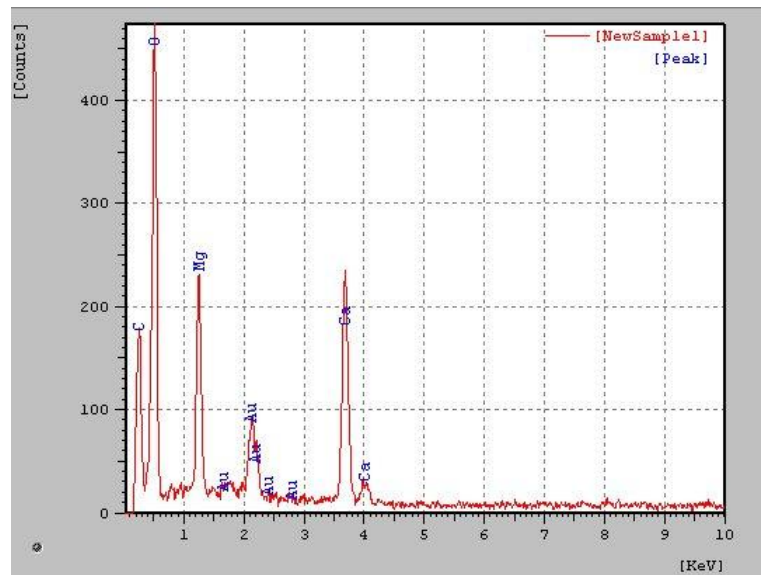


Figura 4.12 - Espectro de difração de raios-X por energia dispersiva da micro região 4.

A estrutura morfológica da cal hidratada pode ser observada na Figuras 4.11.

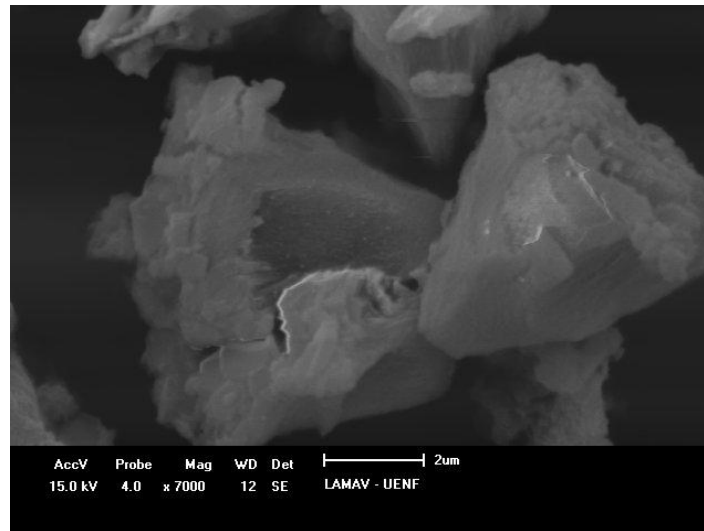


Figura 4.13 – MEV da cal hidratada, 7000 X de aumento.

4.3.1 Índice de atividade pozolânica

A avaliação da atividade pozolânica através do método de condutividade elétrica demonstrou que o resíduo utilizado neste trabalho não apresenta atividade pozolânica (sua variação de condutividade aos 2 minutos foi de 0,15) conforme pode ser visto na Tabela 4.8. Segundo LUXAN *et al.* (1989), para ser considerado um material com boa pozolanicidade o resultado deveria ser maior que 1,2 mS/cm. Desse modo, pode-se afirmar que o resíduo de mármore deste trabalho faz parte da matriz cimentícia de AR como um material de preenchimento, o que fisicamente contribuiu para o aumento da resistência mecânica.

Tabela 4.8 - Classificação estabelecida por LÚXAN *et al.* (1989).

Classificação do material	Variação na condutividade elétrica (mS/cm) aos 2 minutos
Não pozolânico	Menor que 0,4
Média pozolanicidade	Entre 0,4 e 1,2
Boa pozolanicidade	Maior que 1,2
Variação na condutividade elétrica (MS/cm aos 2 minutos do material ensaiado): 0,15	
Classificação do resíduo: <u>NÃO POZOLÂNICO</u>	

O Anexo D apresenta de forma detalhada os resultados deste ensaio.

Este resultado já era esperado devido à caracterização mineralógica do resíduo.

O espectro de difratometria de raios-X apresenta picos indicando a presença de fases cristalinas; portanto, não havendo Halo difuso, o que indica baixa reatividade potencial do material.

4.4 Comparação das características físicas das argamassas comerciais

As argamassas presentes no Brasil tendem a apresentar, considerando a grande extensão territorial do país, diferenças significativas de desempenho em função da diversidade de matérias primas, além do uso de práticas tecnológicas que se diferenciam em cada local, resultando assim, em uma gama de argamassas diferentes aplicadas por todo território nacional. Há também diferenças devido ao clima, trazendo demandas diferentes em relação ao comportamento do material fluido (CARDOSO, 2009).

Tendo como base 25 tipos de argamassas de CARDOSO (2009), conforme mostra a Tabela 4.9, as argamassas desenvolvidas neste trabalho serão comparadas àquelas do autor supracitado (Tabela 4.10).

Na Tabela 4.9, constam, os teores de agregado em volume e finos (aglomerante mais qualquer tipo de adição) presentes, densidade real dos mesmos e o teor de água para mistura. Os valores médio, máximo e mínimo para cada característica são também apresentados.

Diferentes produtos apresentam volume de agregados na faixa de 60,2 e 83,9% e de finos entre 16,1 e 39,8%, representando formulações bastante diferentes. Observando a Tabela 4.10, percebe-se que os valores encontrados nas argamassas produzidas neste trabalho estão dentro da faixa das argamassas brasileiras.

A densidade dos agregados varia entre 2,58 e 2,82 g/cm³ em função da natureza mineralógica e presença de eventual porosidade fechada nas partículas. A densidade real da areia utilizada para produção das argamassas (tanto com resíduo, como com cal hidratada) apresentou valor (2,65 g/cm³) bem próximo a média geral das argamassas brasileiras especificadas (2,68 g/cm³).

Tabela 4.9 - Características físicas das argamassas brasileiras no estado anidro.

Argamassa	Agreg (%v)	Finos (%v)	ρ Agreg (g/cm ³)	ρ Finos (g/cm ³)	Água /ms (g/g)
A	71,6	28,4	2,67	3,06	0,15
C	68,5	31,5	2,75	2,65	0,16
D	66,8	33,2	2,68	2,6	0,16
E	80,2	19,8	2,6	2,57	0,18
F	62,9	37,1	2,79	2,62	0,17
G	80,2	19,8	2,58	3,09	0,15
H	60,2	39,8	2,82	2,9	0,17
I	62,3	37,7	2,75	3,05	0,19
J	76,1	23,9	2,71	3,19	0,17
K	71,6	28,4	2,58	2,19	0,18
M	75,3	24,7	2,61	2,96	0,14
N	76,6	23,4	2,76	2,89	0,18
O	76,7	23,3	2,63	2,99	0,2
P	66,9	33,1	2,59	2,88	0,16
Q	81,7	18,3	2,64	3,01	0,14
R	74,2	25,8	2,65	2,85	0,14
S	83,9	16,1	2,58	3,43	0,17
T	74,4	25,6	2,58	2,74	0,16
V	77,9	22,1	2,72	3,13	0,17
X	77,5	22,5	2,73	3	0,15
Z	76,0	24	2,76	2,88	0,17
ALFA	67,8	32,2	2,6	2,47	0,16
BETA	78,4	21,6	2,76	2,93	0,16
GAMA	69,9	30,1	2,7	2,8	0,17
DELTA	78,0	22	2,73	2,87	0,15
Média	73,4	26,6	2,68	2,87	0,16
Máximo	83,9	39,8	2,82	3,43	0,20
Mínimo	60,2	16,1	2,58	2,19	0,14

Tabela 4.10 - Comparação entre características físicas das argamassas brasileiras no estado anidro com as argamassas produzidas neste trabalho.

Fontes	Argamassa	Agreg (%v)	Finos (%v)	ρ Agreg (g/cm ³)	ρ finos (g/cm ³)	Água /ms (g/g)
Argamassas produzidas neste trabalho	AR	79,1	20,9	2,65	2,78 à 2,98	0,16
	AC	77,4	22,6	2,65	2,38 à 2,98	0,17
CARDOSO (2009)	Média	73,4	26,6	2,68	2,87	0,16
	Máximo	83,9	39,8	2,82	3,43	0,20
	Mínimo	60,2	16,1	2,58	2,19	0,14

A densidade da fração fina varia na Tabela 4.9 entre 2,19 e 3,43 g/cm³, cujo valor médio é igual a 2,85 g/cm³, visto que a maioria dos finos de diversos produtos é composta por cimento (densidade aproximada de 3,0 g/cm³). Com exceção da

argamassa S ($3,43 \text{ g/cm}^3$), que apresenta valor muito superior ao típico do cimento, as possíveis adições presentes nos finos como a cal hidratada ($2,3 \text{ g/cm}^3$), calcário ($2,7 \text{ g/cm}^3$) e outras são responsáveis pelo desvio da densidade em relação ao valor típico do cimento, ocorrendo também nas argamassas produzidas deste trabalho: os valores apresentados na Tabela 4.10 estão dentro da faixa da massa específica de finos das argamassas brasileiras.

O teor de água para mistura (conforme indicado pelos fabricantes) variou entre 14 e 20% (Tabela 4.10), sendo o valor típico em torno de 16%, o mesmo encontrado nas argamassas produzidas (AR e AC) nesta dissertação.

Em conclusão, os valores encontrados (porcentagem de volume de agregados e finos, massa específica dos constituintes e a relação água/somatório dos materiais secos utilizados para produção de argamassa) demonstram que tanto a argamassa adicionada com cal hidratada (AC), quanto a com resíduo (AR) estão dentro dos padrões médios encontrados nas argamassas usadas no Brasil.

4.5 Ensaio das argamassas no estado fresco

Os ensaios realizados nas argamassas no estado fresco foram: índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado.

A Tabela 4.11 apresenta o teor de água utilizado e o índice de consistência das argamassas produzidas.

Tabela 4. 11 - Teor de água e Índice de consistência.

Argamassa	Método de ensaio: NBR 13276: 2005	
	Teor de água (%)	Índice de consistência (mm)
AR	H=16,0	IC=259,6
AC	H =17,0	IC=258,0

A média obtida das medidas de diâmetros ortogonais na mesa de consistência de AC e AR foram, respectivamente, 258 mm e 259,5 mm. Conforme já mencionado no sub-ítem 3.2; para atingir estes valores, foram realizadas diversas tentativas modificando a relação água/sólido (componentes no estado anidro) conforme a Figura 3.6, para que a consistência fosse fixada como correspondente a um diâmetro entre

255 à 260 mm. Este valor foi estipulado tendo em vista a prática de utilização das argamassas, em função da sua facilidade de aplicação.

A argamassa AC apresentou maior relação água/materiais secos ($H=17\%$), ou seja, necessitou de mais água do que AR para atingir a consistência estabelecida (258 mm). Isto ocorreu, dentre vários fatores, em função da alta porcentagem de retenção de água da cal hidratada (Tabela 4.4), seu valor foi 85,4% contra 72,0% do resíduo.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam, respectivamente, o teor de ar incorporado e a densidade de massa de AC e AR.

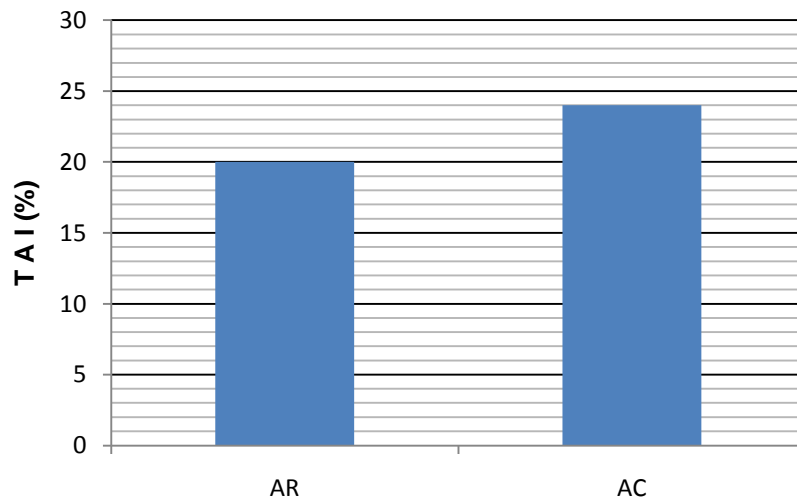


Figura 4.14 - Teor de ar incorporado.

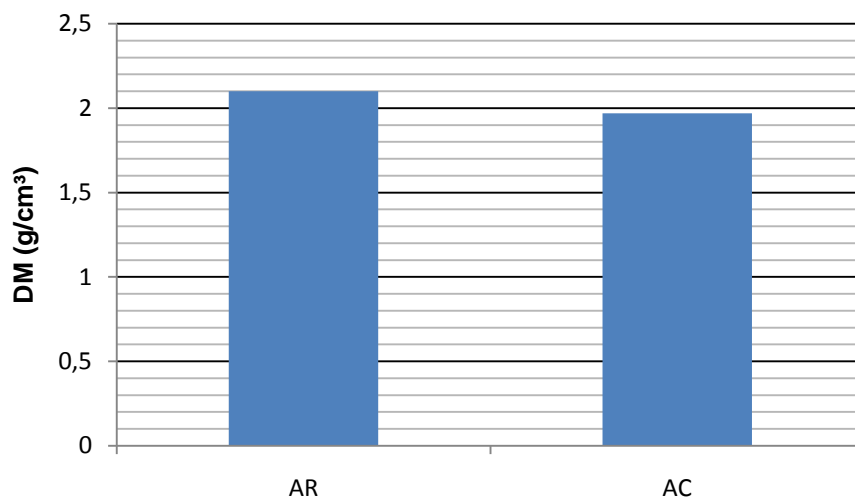


Figura 4.15 - Densidade de massa.

A argamassa produzida com cal hidratada (AC) apresentou teor de ar incorporado maior do que a argamassa produzida com resíduo (AR), sendo 24% e 20%, respectivamente, superiores aos padrões de referência utilizados nos limites propostos pela ABCP.

A massa específica de AR e AC foi respectivamente 2,10 e 1,97g/cm³.

Como esperado, AC apresentou menor densidade de massa, pois de acordo a literatura, o teor de ar incorporado e a massa específica são propriedades no estado fresco das argamassas inversamente proporcionais, ou seja, com aumento da densidade, há uma diminuição dos vazios da matriz, ocasionando um menor teor de ar incorporado (MATTOS, 2001). Dois dos fatores que contribuíram para a diferença de densidades das duas argamassas foram:

- a massa específica de cada componente (cal hidratada x resíduo). Como já mencionado, o resíduo de mármore (2,78 g/cm³) é mais denso que a cal hidratada (2,38 g/cm³), o que interfere diretamente na densidade de massa da argamassa;
- relação aglomerante/agregado: Segundo RÊGO (2008), a massa específica diminui com o aumento da relação aglomerante/agregado. A substituição da cal hidratada, um componente fino aglomerante (reativo), por um resíduo de mármore cujo ensaio de pozolanicidade apresentou um material não reagente ao carbonato de cálcio do cimento hidratado, portanto, sendo considerável um material fino inerte (não apresenta reação química considerável), faz com que a relação aglomerante/agregado diminua e assim deixa AR mais denso.

Com a substituição da cal hidratada pelo resíduo, diminuindo o teor de ar incorporado, houve aumento da resistência à tração, à compressão e de aderência, como pode ser visto no item 4.6.

A Tabela 4.12 apresenta a classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco segundo ISAIA (2007).

Comparando os resultados obtidos das argamassas confeccionadas (AC e AR) e a Tabela 4.12, observa-se que as argamassas produzidas são classificadas como

normais (densidade variando entre 1,4 e 2,3 g/cm³) podendo ser utilizadas em aplicações convencionais (revestimentos não estruturais) em emboços internos, externos e tetos de casas e apartamentos.

Tabela 4.12 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco (ISAIA, 2007).

Argamassa	Densidade de massa A (g/cm ³)	Principais agregados empregados	Usos/observações
Leve	< 1,40	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	Entre 1,40 e 2,30	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	> 2,30	Barita (sulfato de bário)	Blindagem de radiações

4.6 Ensaio das argamassas no estado endurecido

As propriedades das argamassas analisadas no estado endurecido foram: resistência à tração na flexão, resistência à compressão e aderência por tração. Os ensaios mecânicos executados ficaram dentro dos padrões exigidos pela ABNT.

O ensaio para determinar a resistência à compressão e à tração na flexão foi realizado em corpos de prova prismáticos, com dimensões 4cm x 4cm x 16cm, na idade de 28 dias. Os resultados médios de AR e AC são mostrados na Tabela 4.13.

Tabela 4. 13 - Resistência à compressão e à tração.

Argamassa	Método de ensaio: NBR 13279: 2005	
	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)
AR	4,87 ± 0,40	1,65 ± 0,15
AC	3,64 ± 0,39	1,51 ± 0,19

No ensaio de aderência realizado na idade de 28 dias, o arrancamento da argamassa foi executado colando pastilhas de ferro circulares com 5 cm de diâmetro e quadradas com 10 cm de lado no painel (Figura 3.11). Os resultados médios de AR e AC são mostrados na Tabela 4.14.

Tabela 4. 14 - Aderência à tração.

Argamassa	Método de ensaio: NBR 13528: 2005
	Aderência à tração (MPa)
AR	0,36 ± 0,09
AC	0,28 ± 0,05

Os resultados obtidos para resistência à tração, resistência à compressão e aderência da AR e AC mostraram-se adequados, enquadrando-se dentro dos limites médios (Tabela 4.15) estabelecidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), com exceção da resistência de aderência de AC, cujo valor (0,28 MPa) ficou um pouco abaixo da referência supracitada.

Tabela 4.15 - Limites propostos pela ABCP.

Limites médios estabelecidos		
Resistência à compressão	Resistência à tração	Resistência de aderência
3,0 a 4,0 (Máx 5,0) MPa	Acima de 1,2 MPa	Acima de 0,3 MPa

A figura 4.16 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos de AR e AC com os seus respectivos desvios absolutos. Na resistência à compressão e à tração na flexão, os desvios absoluto máximos devem ser, respectivamente, inferior ou igual 0,5 MPa e 0,3 MPa. Analisando a Tabela 4.13, estes limites foram atendidos.

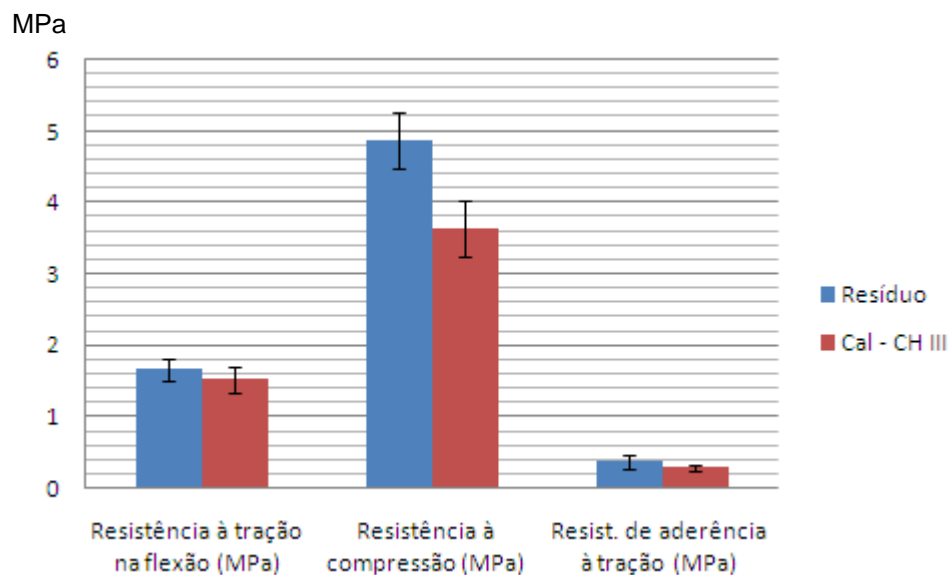


Figura 4.16 - Resistência das argamassas.

Comparando-se as duas argamassas confeccionadas, AR obteve maior valor de resistência (tanto compressão, como tração) e também aderência. Isso foi devido a uma série de parâmetros, tais como:

- relação a/c

Do ponto de vista da resistência, a relação água/cimento é o fator mais importante, porque independente de outros, afeta a porosidade da matriz da argamassa de cimento e também da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

- teor de ar incorporado e densidade de massa

O ar incorporado corresponde aos vazios formados (poros) no interior da argamassa, apesar de favorecer a sua trabalhabilidade, atua de forma desfavorável em relação às resistências mecânicas (ISAIA, 2007).

A NBR 13749 (1996) estabelece um limite de resistência de aderência (R_a) à tração para o revestimento de argamassa (uso como emboço ou massa única) variando de acordo com o local de aplicação e tipo de acabamento, conforme mostra a Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Limites de resistência de aderência à tração (13749: 1996).

Local		Acabamento	R_a (MPa)
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$
		Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
	Externa	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,30$
		Cerâmica	$\geq 0,30$
Teto		—	$\geq 0,20$

De acordo com NBR 13749 (1996), a AR pode ser utilizada tanto em acabamento de paredes internas e externas quanto no teto em uma obra convencional em concreto armado. A AC é mais indicada para ser usada somente como acabamento em paredes internas (pintura ou base para reboco) e teto.

Por fim, a Tabela 4.17 apresenta um quadro geral dos resultados obtidos no programa experimental deste trabalho, assim como suas respectivas classificações segundo a NBR 13281 (2005).

Tabela 4.17 - Resultados obtidos e classificação das argamassas.

Propriedade	Método de ensaio - ABNT	Resultados		Classificação	
		Resíduo	Cal	Resíduo	Cal
Teor de água / Índice de consistência (mm)	NBR 13276: 2005	H=16,0% / 259,5	H=17,0% / 258,0	***	***
Densidade de massa (g/cm ³)	NBR 13278: 2005	2,10	1,97	D5	D5
Teor de ar incorporado (%)	NBR 13278: 2005	≈ 20	≈ 24	***	***
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279: 2005	1,65 ± 0,15	1,51 ± 0,19	R2 / R3	R2
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279: 2005	4,87 ± 0,40	3,64 ± 0,39	P4	P3
Resist. de aderência à tração (MPa)	NBR 13528: 2005	0,36 ± 0,09	0,28 ± 0,05	A3	A2

As argamassas destinadas ao assentamento de paredes ou revestimento devem cumprir com os requisitos estabelecidos pela NBR13281 (2005), sendo classificadas pelos diferentes métodos de ensaios tabelados da referente norma apresentada no ANEXO E. Em todos os casos, para determinação da classificação na sobreposição entre as faixas de resultados, deve ser considerado o desvio absoluto de cada ensaio.

Logo, a designação das argamassas confeccionadas, segundo esta NBR, é:

- argamassa com resíduo: P4, R3, D5, A3;
- argamassa com cal hidratada: P3, R2, D5, A2.

Para uma possível comercialização das argamassas confeccionadas, esta classificação, determinada pela NBR 13281 (2005), deve vir indicada na especificação do produto.

4.7 Análise estatística dos resultados dos ensaios mecânicos

A análise estatística contida neste tópico teve como meta fundamental realizar testes de hipótese (“t” de *Student*), comparando os pares (AC e AR) de ensaios no

estado endurecido, para verificar e comprovar se os valores de resistência mecânica de AR são maiores que AC.

Antes da aplicação do teste de hipótese, foram determinadas as medidas de variabilidade de cada ensaio, tais como: variância amostral, desvio padrão, coeficiente de variação e erro-padrão da média. Os resultados são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4. 18 - Medidas de variabilidade.

Tipos de ensaios	Argamassas	Média (MPa)	Desvio absoluto máximo *	Variância - s ² -	Desvio padrão	CV (%)	Erro-padrão
Resistência à compressão	AR	4,87	0,40	0,109	0,33	6,8	0,165
	AC	3,64	0,39	0,078	0,28	7,75	0,114
Resistência à tração na flexão	AR	1,65	0,15	0,010	0,10	6,06	0,058
	AC	1,51	0,19	0,015	0,15	11,11	0,087
Aderência à tração	AR	0,36	0,09	0,008	0,09	24,99	0,040
	AC	0,28	0,05	0,002	0,05	17,86	0,022

* Desvio absoluto: calculado segundo NBR 13279 (2005)

O coeficiente de variação (CV) expressa o desvio padrão obtido em porcentagem. Quanto maior for a dispersão no conjunto de observações, maior será o valor deste CV. A Tabela 4.19 apresenta a classificação do CV segundo RODRIGUES (2008).

Tabela 4. 19 - Classificação do CV (RODRIGUES, 2008).

Coeficiente de Variação (CV)	Classificação
CV < 10%	Ótimo
11% < CV < 20%	Bom
21% < CV < 30%	Regular

Analisando a Tabela 4.18, todos os CV's apresentaram valores abaixo de 30%, sendo considerado um CV satisfatório, validando os ensaios realizados. Verificando o erro-padrão de cada ensaio e as demais medidas dispersivas, conclui-se que os ensaios realizados possuem uma boa precisão.

- Teste de Hipótese "t" de *Student*

O teste utilizado assume a hipótese de que a diferença entre os ensaios de AC e AR seja nula ($H_0 = 0$), ou seja, de que não existe diferença significativa entre as

médias; neste caso, “não rejeita-se H_0 ” ; todavia, quando existir diferença significativa entre os ensaios, “rejeita-se H_0 ”. Os valores obtidos nos testes dos ensaios de resistência à compressão, à tração e aderência estão apresentados no Anexo G. O nível de probabilidade “ α ” adotado foi de 5%.

No Anexo G é possível verificar estatisticamente o que já havia sido sugerido no subitem 4.6, havendo diferença significativa entre os resultados de AR e AC. A Tabela 4.20 apresenta um resumo dos resultados apresentados no referido Anexo.

Tabela 4. 20 - Teste de hipótese “t” de Student para diferentes ensaios.

Hipótese do teste T:				
		$H_0: \mu_{AR} = \mu_{AC}$	$H_a = \mu_{AR} > \mu_{AC}$	$\alpha = 5\%$
Ensaio	Resistência à compressão	Resistência à tração	Aderência	
Teste F *	F calc. < F tab.	F calc. < F tab.	F calc. > F tab.	
Resultado de F	Não rejeita-se H_0 (CASO A)	Não rejeita-se H_0 (CASO A)	Rejeita-se H_0 (CASO B)	
T cal. x T tab.	T cal. > T tab.	T cal. > T tab.	T cal. > T tab.	
Resultado Final do teste T	Rejeita-se H_0	Rejeita-se H_0	Rejeita-se H_0	

* Hipótese do teste F - $H_0: \sigma_{AR} = \sigma_{AC}$; $H_a: \sigma_{AR} \neq \sigma_{AC}$

** Caso A e Caso V: Ver anexo ____.

*** μ = valor médio; σ = variância ; α = probabilidade

Em conclusão, afirma-se que as resistências à compressão, à tração por flexão e aderência das argamassas confeccionadas com resíduo de mármore dolomítico são maiores que as argamassas produzidas com cal hidratada do tipo CH-III.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

As caracterizações dos constituintes de AC e AR demonstraram resultados dentro dos limites aceitos para confecção de uma argamassa de revestimento.

Porcentagem de volume de agregados e finos, massa específica dos constituintes e a relação água/somatório dos materiais sólidos da argamassa no estado anidro demonstram que, tanto AC quanto AR, está dentro dos padrões médios encontrados nas argamassas utilizadas no Brasil.

O ensaio de condutividade elétrica também mostrou que o resíduo de mármore não apresenta uma boa reatividade ao entrar em contato com Ca(OH)_2 . Desse modo, concluiu-se que este constituinte pode fazer parte da matriz cimentícia apenas como material fino de preenchimento.

Em geral, tanto AR quanto AC ficaram dentro dos padrões médios das pesquisas propostas pela ABCP.

A substituição da cal hidratada do tipo CHIII pelo resíduo de mármore para o traço estudado mostrou-se adequada para a confecção de argamassas de revestimento.

Os ensaios mecânicos de resistência das argamassas demonstraram que a AR foi superior à AC, principalmente no valor de resistência à compressão, devido a uma série de parâmetros que contribuíram, dentre eles:

- relação a/c;
- teor de ar incorporado e densidade de massa;
- massa específica e granulometria diferentes da cal hidratada e do resíduo de mármore.

De acordo com a NBR 13749 (1996), a AR desenvolvida pode ser usada para qualquer tipo de acabamento (teto, paredes internas ou externas).

O aproveitamento do resíduo proveniente de indústria de beneficiamento do mármore implica numa redução no impacto ambiental, causado pelo descarte inadequado deste material. Também considera-se uma conotação social, pois

reciclando um resíduo, minimizando o impacto causado por ele, indiretamente contribui-se com o bem estar social.

Com a substituição da cal hidratada pelo resíduo, propõe-se desenvolver um produto final, de uso na construção civil (argamassa), que pode vir a ter baixo valor de renda e contribuir para a redução dos custos nas construções, haja vista o alto preço da cal hidratada encontrada nas lojas de materiais de construção. Comparando com o preço do cimento, a cal hidratada está, em média, 12% mais cara (anexo H). Portanto pode-se concluir que utilizando um traço de finos 1:1 (cimento : cal), a redução poderá ser bem significativa.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, indicam-se estudos futuros sobre:

- avaliações dos mesmos materiais (cal hidratada e resíduo de mármore) utilizando diferentes traços;
- uso de modelos estatísticos para avaliar maiores possibilidades de uso destes materiais e avaliar a influência de cada componente, podendo ser usado, por exemplo, rede simplex;
- estudo de durabilidade das argamassas confeccionadas;
- estudo do resíduo de mármore para ser utilizado em outras aplicações na construção civil, exemplos: pavimentos intertravados, argamassas estruturais e colantes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. V. Palestra técnica de cimentos para pré-moldados. Seminário nacional de blocos de concreto para alvenaria e pavimento de concreto, Instituto de Engenharia de São Paulo, São Paulo / SP, 2001.
- ABREU, U.A., RUIZ, M.S., CARUSO, L.G. Perfil 7- Rochas dimensionadas e aparelhadas. In: RUIZ, M.S., NEVES, M.R. (Coord.). Mercado produtor mineral do estado de São Paulo. São Paulo: I.P.T., 1990. p.137 – 151.
- ALYAMAÇ, K.E.; INCE, R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. Original Research Article Construction and Building Materials, Volume 23, 2009, Pags 1201–1210.
- AMORIM, L. V.; LIRA, H. L; FERREIRA, H. C. Use of residencial construction waste and residues from red ceramic industry in alternative mortars. Journal of environmental engineering © ASCE. v.129, n.10, out. 2003.
- ARUNTAS, H. Y.; GÜRÜ, M.; DAVI, M.; TEKIN, I. Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. Materials & Design, Volume 31, Issue 8, September 2010, Pag. 4039-4042.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – ABIROCHAS (2006). O setor de rochas ornamentais e de revestimento. Informe 005/2006. São Paulo. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – ABIROCHAS (2008). O setor de rochas ornamentais e de revestimento. Informe 002/2008. São Paulo. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 5753: Cimento Portland Pozolânico - Determinação da Pozolanicidade. Rio de Janeiro, 1992c.
- _____. NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – procedimentos. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2009.
- _____. NBR 7215: Cimento Portland: Determinação da resistência a compressão, Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 7275: Cal hidratada para argamassas - requisitos, Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 9289: Cal hidratada para argamassas determinação de finura, Rio de Janeiro, 2000.

_____. NBR 9776 - Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman, especificação. Rio de Janeiro, 1986.

_____. NBR 13529: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 13276: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13278: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13279: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13281: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15258: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR NM 23: Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ALVES, M. S. Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos. Belo Horizonte-MG, 2008. 17 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

BAIA, L. L. M. e SABBATINI, F. H. Projeto e execução de revestimento de argamassa. 4 ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2008. p.13-14.

BAHIENSE, A. V. Incorporação de Resíduo de Rocha Ornamental em Argamassa Utilizando Planejamento de Experimentos em Rede Simplex. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 159p.

BARBOSA, M. P. Argamassa e tipos de concreto. Notas de aula do curso: Introdução à ciência dos materiais aplicados à engenharia civil. Parte 3. UNESP. Disponível: www.dec.feis.unesp.br/monica/argamassa.ppt Acesso em junho de 2010.

BASTOS, P. K. X. Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento. São Paulo, 2001. 8 -14 e 172 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

BOYNTON, Robert S. Chemistry and Technology of Lime and Limestone. New York, 1966.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – IBAMA. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Critérios básicos, diretrizes gerais e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 de julho de 2002:

CALLISTER JR, W. D. Materials Science and Engineering, An Introduction. Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1991.

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

CARDOSO, F. A. Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico, 2009. Tese (Doutorado) – EPUSP. São Paulo-SP.

CARNEIRO, A. M. P. Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas. São Paulo, 1999. 170p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CARNEIRO, F. L. (1943) Um Novo Método para Determinação da Resistência à Tração dos Concretos. Comunicação, 5. Reunião Associação Brasileira de Normas Técnicas, Publ. Inst. Nac. Tecnol., Rio De Janeiro.

CARVALHO, A. L. Avaliação das propriedades mecânicas da argamassa contendo adição de resíduo de carbonato de cálcio gerado na fabricação de celulose. Salvador-BA, 2006

CARVALHO, A. L. et al. Determinação do desempenho da argamassa com adição do resíduo gerado da produção de polpa de celulose. XVI CBECIMAT, Porto Alegre – RS, 2004.

CAVANI, G.R.; ANTUNES, R.P.N.; JOHN, V.M. Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade das argamassas mistas. In. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, II. Salvador: anais, 1997.

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

COELHO, M. A. M.; TRISTÃO, F. A.; MOREIRA, J. R.; VAZ, A. N. A.; PREZOTTI, J. Utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) em substituição à argila em argamassas. APFAC, 2^o Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa – Portugal, 2007. Acesso em 02 fev. 2010 < http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2042_07.pdf

CORINALDESI, V; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 1, January 2010, pags 113-117.

CRY, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. Cement Concrete Res. 2006; 36 (2): 264 – 277.

DESTEFANI, A. Z. Utilização do planejamento experimental na adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para produção de blocos prensados de encaixe. Campos dos Goytacazes – RJ, 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

DUBAJ, E. Estudo comparativo entre traços de argamassas de revestimento utilizadas em Porto Alegre. Rio Grande do Sul, 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FREITAS, J. M. C. Influência da variação dos constituintes no desempenho de argamassas de revestimento. Belo Horizonte, 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

GIACONI, W.J. Perfil atual da indústria de rochas ornamentais no município de Cachoeiro de Itapemirim (ES). Campinas, SP, 1998. 85 p. Dissertação de Mestrado na Área de Administração e Políticas de Recursos Minerais.

GOMES, A. O. Propriedades das argamassas de revestimento de fachadas. Comunidade da construção – Sistema à base de cimento. UFBA - Salvador, 2008. p. 3.

GONÇALVES, J. P. Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos. Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS RELACIONADOS COM ARGAMASSAS. Disponível em: http://www.valemassa.com.br/download/glossario_tecnico.pdf. Acesso em: 26 fev. 2010.

GUIMARÃES J. E. P. A CAL- Fundamentos e aplicações na engenharia civil. 2 ed. São Paulo: PINI, 2002.

HEBHOUB, H.; AOUN, H.; BELACHIA, M.; HOUARI, H.; GHORBEL, E. Use of waste marble aggregates in concrete. Original Research Article. Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 3, March 2011, Pages 1167-1171.

HEWLETT, P. C. LEA`S Chemistrys of cement and concrete. 4 ed. : Elsevier, 2004.

IRASSAR, EF. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review. Cement Concrete Reserch. 2009; 39:241 – 245.

ISAIA, G. C. Materiais de construção Civil – Princípios de ciência e engenharia de materiais. Vol. 1. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2007.

KOEHLER, E. P.; FOWLER, D. W. Summary of concrete workability test methods. ICAR Report 105.1 International Center of aggregates Research, Austin, 2003.

LISBÔA, E. M. Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas. Maceió, 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas.

LUXAN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. Cement na Concrete research. Vol. 19, 1989, p. 63-68.

MARGALHA, M. G.; VEIGA, R. V.; BRITO, J. Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea. APFAC, 2^o Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa – Portugal, 2007. Acesso em 13 jan. 2010 >http://conservarcal.Inec.pt/pdfs/GORETI_Areia_APFAC.pdf.

MACHADO, A. T.; RIBEIRO, D. V.; CARDOSO, R. J. C.; TACHARD, A. L. R.; Utilização de escória de aciaria em substituição ao agregado convencional na produção de argamassas. In: XV CBECIMAT. Natal – RN, 2002a.

MATTOS, L. R. S. Identificação e caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas na cidade de Belém-PA. Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MELO, K., A.; ANDRADE, A. F. L.; LIRA, E. M.; FRANÇA, M. S.; QUEIROZ, M. M.; CARNEIRO, A. M. P. A influência do teor de cal hidratada nas propriedades de argamassas de cimento, cal e areia. In: 2^o Congresso Nacional de Argamassas de Construção – APFAC Lisboa 2007. Disponível em: www.apfac.pt/congresso2007. Acesso em 04/10/2010.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MOURA, ET AL. Produção de pisos intertravados com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. ENTAC. 2006. Florianópolis. Santa Catarina. p. 4227-4236. 2006.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. Sitientibus- Revista da Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, n.26, p.49-61, jan./jun. 2002. Acesso em 05 dez. 2009. < <http://www.uefs.br/sitientibus/edicoes/26.htm>

NETO, A. A. M. Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

Neville, A. M., 1997, Propriedades do concreto, 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 828 p.

NUNES, R.L.S.; FERREIRA, H.S.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C. Reciclagem de resíduos de granito para uso na indústria de revestimentos cerâmicos. In: 46º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. São Paulo. 2002

OFICEMEN Agrupación de Fabricantes de Cemento de España. On-line. Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.oficemen.com/> Consultado em 14 de dezembro de 2008.

OLIVEIRA, Herbet Alves de. Estudo para Reaproveitamento Lama de cal do processo Kraft de Fabricação de Celulose e Papel em Cerâmicas de Revestimento. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2000a.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A (2002). Geologia de Engenharia, 1ª ed., 3ª reimpressão, São Paulo. Pág. 331.

OLIVEIRA, F. V. Processamento de carbonato de cálcio para aplicação nas indústrias de papel e plástico. Minas Gerais, 2005. Dissertação (mestrado) - UFMG.

PAIVA, S. C.; GOMES, E. A. O.; OLIVEIRA, R. A. Controle de qualidade da cal para argamassas – metodologias alternativas. Revista Ciências & Tecnologia. Universidade Católica de Pernambuco. v. 1, n.1, jul. – dez. 2007.

PÉRA, J.; HUSSON, S.; GUILHOT, B. Influence of finely ground limestone on cement hydration. Cement and Concrete Composites. 1999; 21: 99-105.

PETRUCI, E. G. R. (1998). Concreto de Cimento Portland – 13. ed – São Paulo: Globo.

RECENA, F. A. P. Conhecendo a argamassa. 1 ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2008. P. 48-51.

REDDY, B. V. V.; GUPTA, A. Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry. *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 8, August 2008, Pages 1614-1623.

REGO, W. A. Caracterização física dos saibros na região metropolitana do Recife utilizados em argamassas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2008, Universidade Católica de Pernambuco, 2008.

REMEZANEANPOUR, A.A.; GHIASVAND, E.; NICKSERESHT, I.; MANDIKHANI, .M MOODI, F. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. Original Research Article *Cement and Concrete Composites*, Volume 31, Issue 10, November 2009, Pages 715-720.

REIS, A. S.; TRISTÃO, F. A. Análise de argamassas com resíduo de corte de rochas ornamentais. APFAC, 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa – Portugal, 2007. Acesso em 27 nov. 2009 > http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2038_07.pdf

ROCHA, C. A. A.; FERREIRA, J. R.; MAURI, J.; J. ALEXANDRE. Caracterização química e mineralógica de um solo analisando as frações areia e silte. 51º Congresso brasileiro de cerâmica, 2007, Salvador. 2007.

RODRIGUES, W. C. Estatística aplicada. Apostila de estatística aplicada. 6º ed. Rio de Janeiro, 2008. FAETEC-RJ.

SANTOS, L ;CARVALHO, A. L; CARDOSO, R. J.C, TACHARD, A L. R, SOUZA, C. A. C; MACHADO, A.T. Avaliação do grau de penetração de cloreto no concreto de cimento Portland contendo Pó de Aciaria Elétrica. 23º CONBRASCORR - Florianópolis – SC, 2003.

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

SERSALE, K. Advences in Portland and blended cement. In: Proceeding 9th International congress of the chemistry of cement. New Delhi, India. vol.1; 1992. P. 277-279.

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

SILVA, A. D. A. Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri Cearense na formulação de argamassa. Recife, 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

SNIC Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. On-line. Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.sindicatodocimento.org.br>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

SOUZA, J. G. Análise ambiental do processo de extração e beneficiamento de rochas ornamentais com vistas a uma produção mais limpa: aplicação em Cachoeiro de Itapemirim. Juiz de Fora, 2007. Conclusão de curso na Especialidade de Análise Ambiental- UFJF.

TRISTÃO, F. A. ET AL. Uso de areia industrial de basalto em argamassas. In: . In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5, 2005, Florianópolis. Anais em CD... Florianópolis: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), 2005.

WATANABE, F. A. Estudo sobre a utilização de areia de fundição residual como agregado na confecção de pavimentos de concreto. Joinville – Santa Catarina, 2004. 21 – 24 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina.

WESTPHAL, E. H. Argamassas. Florianópolis: UFSC. Disponível em www.arq.ufsc.br/~labcon/arq5661/argamassas. Acesso em novembro de 2010.

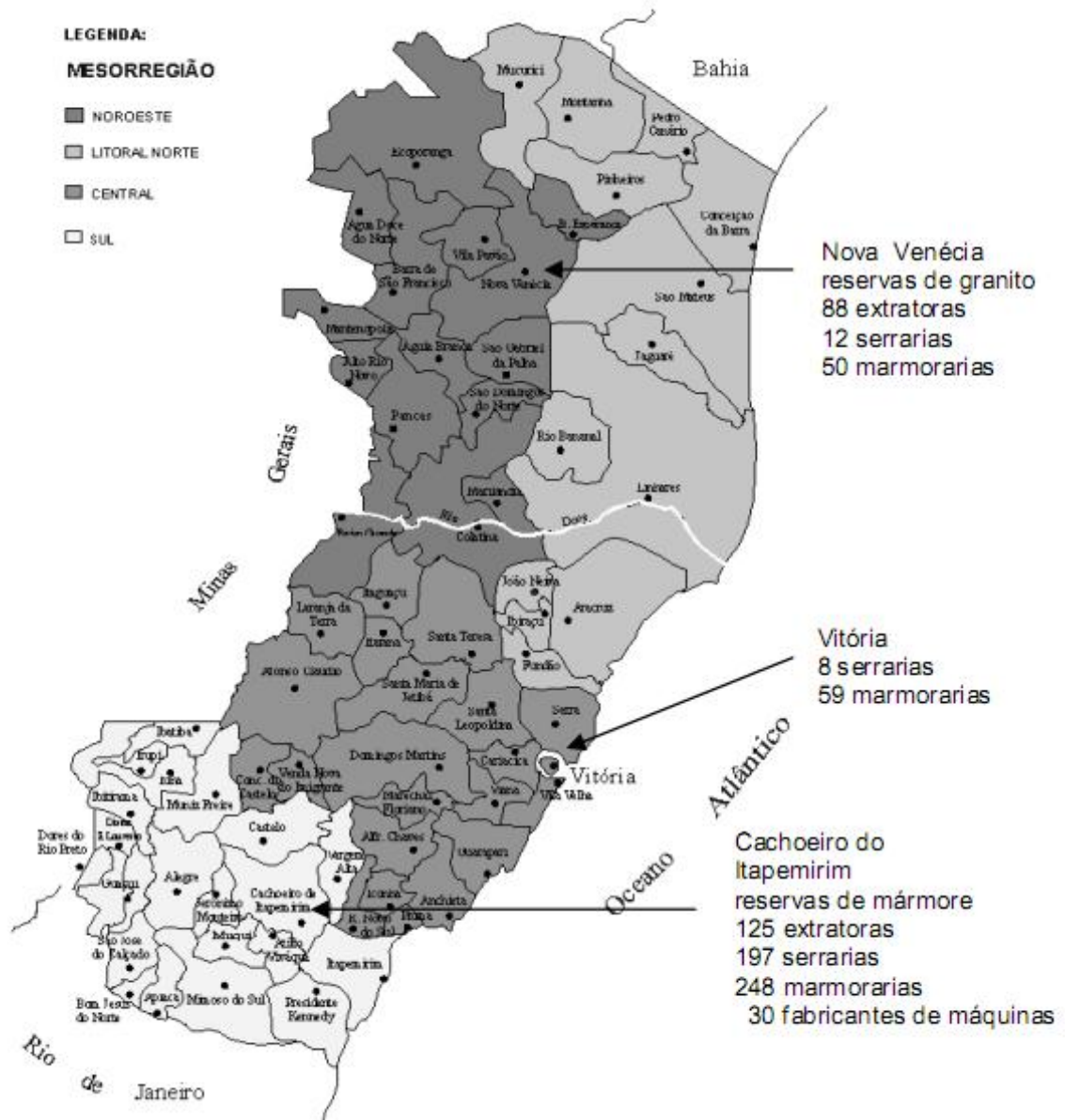
POLITA. Disponível na internet via: [http:// www.polita.com.br](http://www.polita.com.br), acesso em 13 de fev. 2010.

TOPÇU, I. B.; BILIR, T.; UYGUNOĞLU, T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. Original Research Article Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 5, May 2009, Pags 1947-1953.

ZELIĆ, J. et al.. The properties of portland cement-limestone-silica fume mortars. Cement and Concrete Research. 30, p. 145-152, 2000.

ANEXO A

(a) Mapa do estado do Espírito Santo.

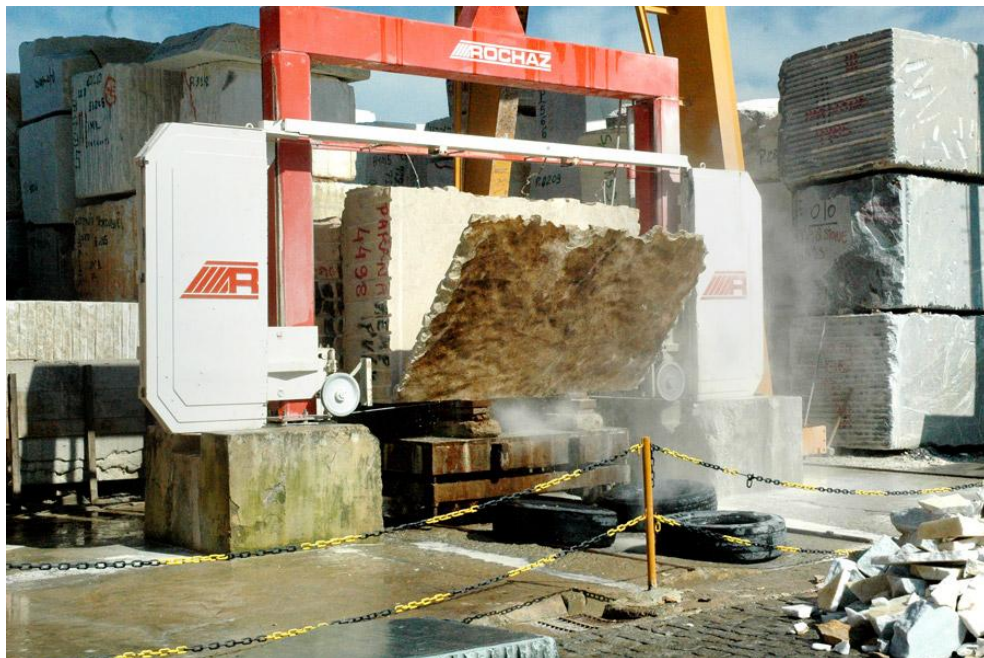


ANEXO B

Empresa doadora do resíduo de mármore.



(a) Vista aérea.



(b) Corte do bloco.



(c) Precisão dos cortes em peças.



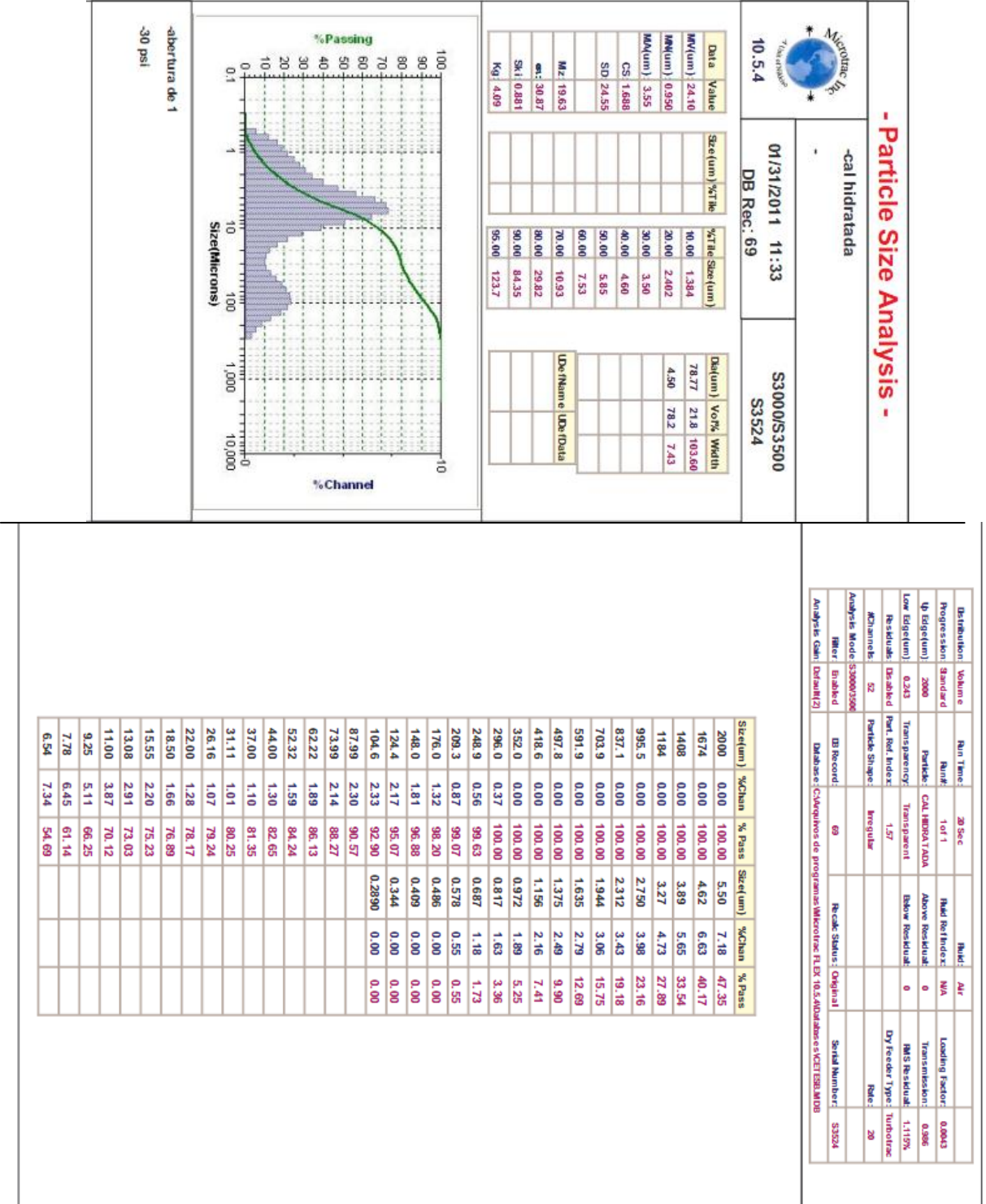
(d) Teares diamantados.



(e) Tratamento do resíduo (poço de decantação).

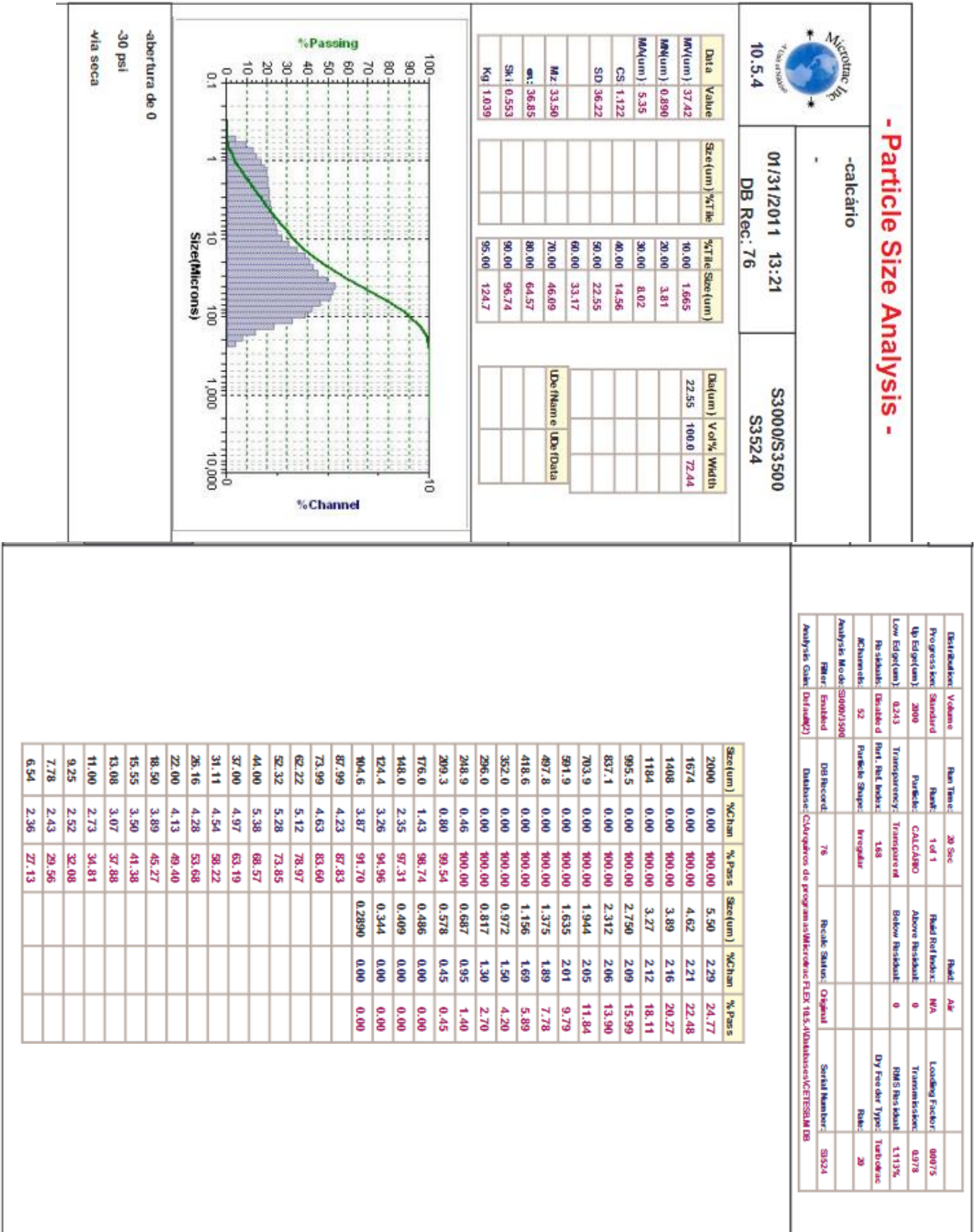
ANEXO C

(a) Análise granulométrica da cal hidratada tipo CH III.



ANEXO C

(b) Análise granulométrico resíduo de mármore.



abertura de 0

-30 psi

4/4 seca



Distribucao	Vetores	Ran Time	20 Sec	Pass	Air
Progress: Standard	2000	1 of 1	0	0	0
Up Edge(um)	0.213	Particle: CALCAR0	Above Threshold	0	0
Low Edge(um)		Transparenc	Below Threshold	0	0
No. slots:	Details d	Part. Inlet hole:	148		
Analysis Mode:	52	Particle Shape:	Irregular		
DB Record:	76	Recite Status:	Original		
Serial Number:	S3524				

Size(um)	%Chan	%Pass	Size(um)	%Chan	%Pass
2000	0.00	100.00	5.50	2.29	24.77
1674	0.00	100.00	4.62	2.21	22.48
1408	0.00	100.00	3.89	2.16	20.27
1184	0.00	100.00	3.27	2.12	18.11
995.5	0.00	100.00	2.750	2.09	15.99
837.1	0.00	100.00	2.312	2.06	13.90
703.9	0.00	100.00	1.944	2.05	11.84
591.9	0.00	100.00	1.635	2.01	9.79
487.8	0.00	100.00	1.375	1.89	7.78
418.6	0.00	100.00	1.156	1.69	5.89
352.0	0.00	100.00	0.972	1.50	4.20
295.0	0.00	100.00	0.817	1.30	2.70
248.9	0.46	100.00	0.687	0.95	1.40
209.3	0.80	99.54	0.578	0.45	0.45
176.0	1.43	98.74	0.486	0.00	0.00
148.0	2.35	97.31	0.409	0.00	0.00
124.4	3.26	94.96	0.344	0.00	0.00
104.6	3.87	91.70	0.2890	0.00	0.00
87.99	4.23	87.83			
73.99	4.63	83.60			
62.22	5.12	78.97			
52.32	5.28	73.85			
44.00	5.38	68.57			
37.00	4.97	63.19			
31.11	4.54	58.22			
26.16	4.28	53.68			
22.00	4.13	49.40			
18.50	3.89	45.27			
15.55	3.50	41.38			
13.08	3.07	37.88			
11.00	2.73	34.81			
9.25	2.52	32.08			
7.78	2.43	29.56			
6.54	2.36	27.13			

ANEXO D

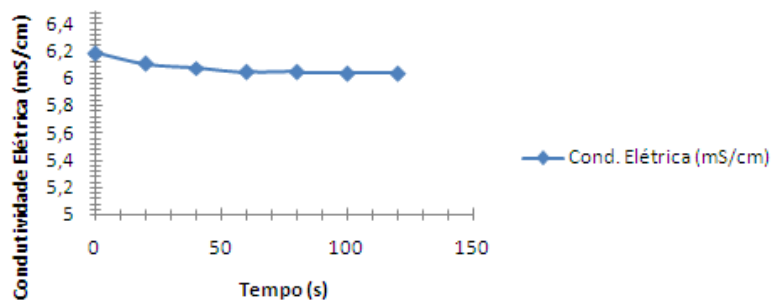
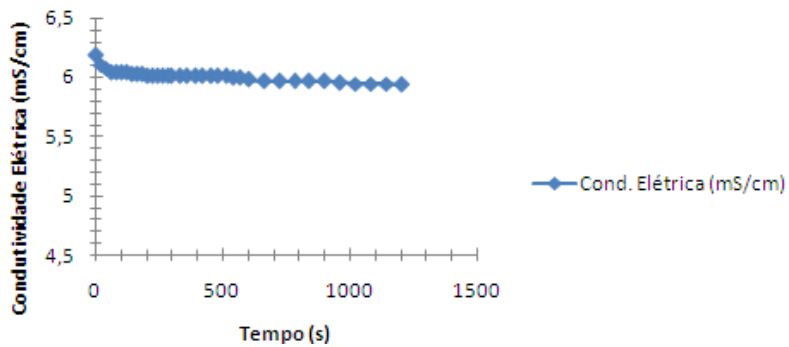
(a) Índice de pozolanicidade.

Ensaio de atividade pozolânica por condutividade elétrica (LUXAN <i>et al.</i> , 1989)		
Tempo		Condutividade Elétrica (mS/cm)
em minutos	em segundos	
0,0	0	6,19
0,3	20	6,11
0,7	40	6,08
1,0	60	6,05
1,3	80	6,05
1,7	100	6,04
2,0	120	6,04
2,3	140	6,03
2,7	160	6,03
3,0	180	6,03
3,3	200	6,02
3,7	220	6,02
4,0	240	6,02
4,3	260	6,01
4,7	280	6,02
5,0	300	6,02
5,5	330	6,02
6,0	360	6,02
6,5	390	6,02
7,0	420	6,01
7,5	450	6,02
8,0	480	6,01
8,5	510	6,01
9,0	540	6
9,5	570	6
10,0	600	5,98
11,0	660	
12,0	720	5,97
13,0	780	5,97
14,0	840	5,97
15,0	900	5,97
16,0	960	5,96
17,0	1020	5,95
18,0	1080	5,95
19,0	1140	5,95
20,0	1200	5,94

Ensaio N ^o .:	num 1	Data: <u>1/6/2011</u>
Material:	resíduo mármore	
Temperatura:	40 ± 1 (°C)	
Tempo total de ensaio:	20,0 min	
Varição da condutividade (Lúxan):	0,15	
70 ml de solução saturada de Ca(OH) ₂		
Massa de CH:	98,7	mg
Massa de amostra:	1,75	g
Blank Test:	6,19	mS/cm

ANEXO D

(b) *Índice de pozolanicidade.*

Varição da Condutividade Elétrica aos 2 minutos.**Varição da Condutividade Elétrica aos 20 minutos.**

ANEXO D

(c) Avaliação da atividade pozolânica através do método de condutividade elétrica.

Classificação estabelecida por LUXAN et al. (1989)

Classificação do material	Variação na condutividade elétrica (mS/cm) aos 2 minutos
Não pozolânico	Menor que 0,4
Média pozolanicidade	Entre 0,4 e 1,2
Boa pozolanicidade	Maior que 1,2
Variação na condutividade elétrica (mS/cm) aos 2 minutos do material ensaiado: 0,15 Classificação do material (resíduo): Não pozolânico	

Representatividade do ensaio

Variação da condutividade aos 20 minutos	0,25
Variação da condutividade aos 02 minutos	0,15
Variação da condutividade aos 2 minutos em relação ao tempo total (20 minutos)	60%

ANEXO E

(a) Classificação das argamassas – NBR 13281: 2005.

Tabela 1 – Resistência à compressão.

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Método de ensaio
P1	≤ 2,0	NBR 13279 (2005)
P2	1,5 à 3,0	
P3	2,5 à 4,5	
P4	4,0 à 6,5	
P5	5,5 à 9,0	
P6	> 8,0	

Tabela 2 – Densidade de massa aparente no estado endurecido.

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m ³)	Método de ensaio
M1	≤ 1200	NBR 13280 (2005)
M2	1000 à 1400	
M3	1200 à 1600	
M4	1400 à 1800	
M5	1600 à 2000	
M6	> 1800	

Tabela 3 – Resistência à tração na flexão.

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Método de ensaio
R1	≤ 1,5	NBR 13279 (2005)
R2	1,0 à 2,0	
R3	1,5 à 2,7	
R4	2,0 à 3,5	
R5	2,7 à 4,5	
R6	> 3,5	

ANEXO E

(Classificação das argamassas – NBR 13281: 2005)

Tabela 4 – Coeficiente de capilaridade.

Classe	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Método de ensaio
C1	≤ 1,5	NBR 15259 (2005)
C2	1,0 à 2,0	
C3	1,5 à 2,7	
C4	2,0 à 3,5	
C5	2,7 à 4,5	
C6	> 3,5	

Tabela 5 – Densidade de massa no estado fresco.

Classe	Densidade de massa aparente no estado fresco (kg/m ³)	Método de ensaio
D1	≤ 1400	NBR 13278 (2005)
D2	1200 à 1600	
D3	1400 à 1800	
D4	1600 à 2000	
D5	1800 à 2200	
D6	> 2200	

Tabela 6 – Retenção de água.

Classe	Retenção de água (%)	Método de ensaio
U1	≤ 78	NBR 13277 (2005)
U2	72 à 85	
U3	80 à 90	
U4	86 à 94	
U5	91 à 97	
U6	95 à 100	

Tabela 7 – Resistência potencial de aderência à tração.

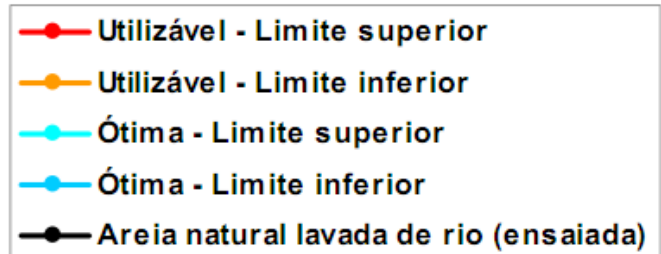
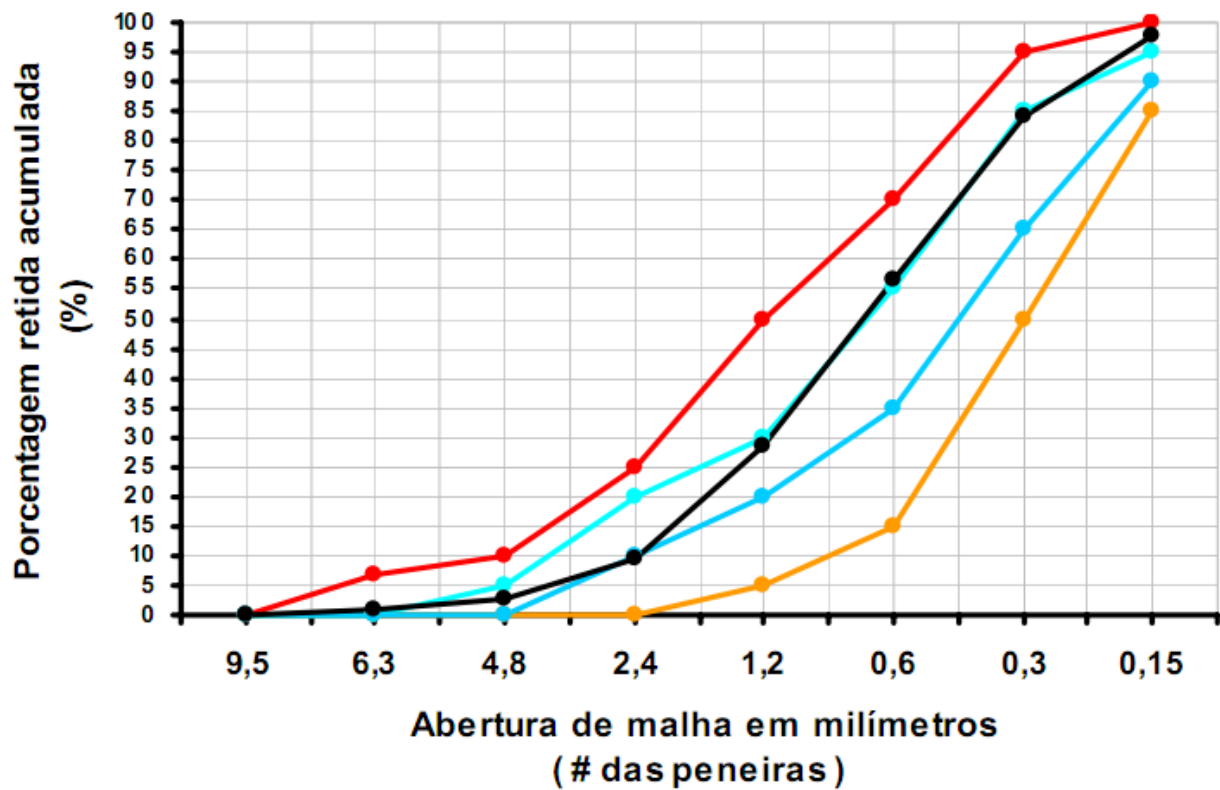
Classe	Resistência de aderência	Método de ensaio
A1	< 0,20	NBR 15258 (2005)
A2	≥ 0,20	
A3	≥ 0,30	

ANEXO F

(a) Determinação da distribuição granulométrica.

(NBR 7211:2005 NM 248:2003)

Agregado miúdo



ANEXO G

(a) Análise estatística

Teste “t” de *Student*

Ensaio de resistência à compressão					
---	--	--	--	--	--

AR

n amostra	Média	variancia	desv. Pad.	cv	ERRO
8	4,865625	0,109311	0,330622	6,80%	0,165311

AC

n amostra	Média	variancia	desv. Pad.	cv	ERRO
10	3,61675	0,078491	0,280162	7,75%	0,114376

$$F_{cal} = \text{Var1} / \text{Var2}$$

Fcal =	1,3926576
--------	-----------

Ftab =	3,29
--------	------

Não rejeita-se Ho`

CASO A

nx	s ² x	ny	s ² y
8	0,109311	10	0,078491

CASO A	s ² c =	0,091974
---------------	--------------------	----------

G.L =	16
-------	----

Ttab =	T(5%) =	1,75
--------	---------	------

Tcal =	8,681487
--------	----------

Tcal. > Ttab., Logo:

<u>Rejeita-se Ho</u>

Resultado: As médias são diferentes, logo AR é mais resistente do que AC no ensaio de resistência à compressão.

ANEXO G

(b) Análise estatística
Teste “t” de *Student*

Ensaio de resistência à tração na flexão					
AR					
n amostra	Média	variância	desv. Pad.	cv	ERRO
6	1,65	0,010	0,10	6,06%	0,057735
AC					
N amostra	Média	variância	desv. Pad.	cv	ERRO
6	1,51	0,0225	0,15	11,11%	0,086603

$$F_{cal} = \text{Var2} / \text{Var1}$$

$$F_{cal} = 2,25$$

$$F_{tab} = 5,05$$

Não rejeita-se H_0
CASO A

n_x	s^2_x	n_y	s^2_y
6	0,01	6	0,0225

CASO A $s^2_c = 0,01625$

G.L = 10

$$T_{cal} = 1,902225$$

$T_{cal} > T_{tab}$, logo:

Rejeita-se H_0

$$T_{tab} = T(5\%) = 1,81$$

Resultado: As médias são diferentes, logo AR é mais resistente do que AC no ensaio de resistência à tração na flexão.

ANEXO G

(c) Análise estatística
Teste "t" de Student

Ensaio de aderência à tração					
AR					
n amostra	Média	variância	desv. Pad.	cv	ERRO
10	0,36	0,00815	0,09	24,99%	0,040372
AC					
n amostra	Média	variância	desv. Pad.	cv	ERRO
10	0,28	0,0025	0,05	17,86%	0,022361

$$F_{cal} = \text{Var1} / \text{Var2}$$

$$F_{cal} = 3,2598432$$

$$F_{tab} = 2,82$$

REJEITA-SE Ho`
CASO B

nx	s ² x	ny	s ² y
12	0,00815	12	0,0025

$$\frac{p}{\text{CASO B}} \quad n^* = 17,16833 \approx \boxed{18}$$

$$T_{tab} = T(5\%) = 1,73$$

$$T_{cal} = 2,728882$$

T_{calc.} > T_{tab.},
logo:

Rejeita-se Ho

Resultado: As médias são diferentes, logo AR é mais resistente do que AC no ensaio de aderência por tração.

ANEXO G

(d) Análise estatística

Teste “t” de *Student*

(formulários)

	TESTE F	TESTE T
	Ho` = VAR.(res) = VAR.(cal)	Ho = med.(res) = med.(cal)
	Ha` = VAR.(res) ≠ VAR.(cal)	Ha = med.(res) ≠ med.(cal)
CASO A	Fcal < Ftab não rejeita Ho`	Tcal < Ttab não rejeita Ho
CASO B	Fcal > Ftab Rejeita-se Ho`	Tcal > Ttab Rejeita-se Ho

P/ CASO
A

$$s^2 c = \frac{(nx - 1) s^2x + (ny - 1) s^2y}{nx + ny - 2}$$

P/ CASO
B

$$n^* = \frac{((s^2x/nx) + (s^2y/ny))^2}{(((s^2x/nx)^2)/(nx-1)) + ((s^2y/ny)^2)/(ny-1))}$$

$$t \text{ calc} = \frac{(M1 - M2)}{\text{RAIZ}((s^2c * ((1/nx) + (1/ny)))}$$

$$t \text{ cal} = \frac{(M1 - M2)}{\text{RAIZ}((s^2x/nx) + (s^2y/ny))}$$

Rejeitando-se Ho , Os valores médios dos ensaios de AR são maiores do que AC.

Não rejeitando Ho: Os valores médios dos ensaios de AC são considerados iguais aos de AR.

ANEXO H

(a) Preço da Cal hidratada x Cimento CII E-32 nas principais cidades do Norte e Noroeste Fluminense.

Localização		Materiais			
Cidade	Loja	Cimento		Cal hidratada	
Campos dos Goytacazes-RJ	A	18,70	Sc 50 kg	8,60	Sc 20 kg
	B	19,00	Sc 50 kg	8,90	Sc 20 kg
	C	18,60	Sc 50 kg	8,70	Sc 20 kg
	D	19,50	Sc 50 kg	8,00	Sc 20 kg
Itaperuna - RJ	E	17,90	Sc 50 kg	8,20	Sc 20 kg
	F	18,50	Sc 50 kg	8,90	Sc 20 kg

Preço médio de compra	R\$ 18,70	Sc 50kg	R\$ 8,55	Sc 20kg
-----------------------	-----------	---------	----------	---------



Preço por quilo

R\$ 0,374	(1 kg)	R\$ 0,428	(1 kg)
-----------	--------	-----------	--------

Preço do quilo da cal menos o preço do quilo do cimento = R\$ 0,054

RESUMINDO:

O valor do quilo da cal hidratada é aproximadamente 12,5% mais caro do que o do cimento.