

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CORTE DE ROCHAS NA
PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

WLLISSES MENEZES AFONSO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES

Janeiro – 2005

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CORTE DE ROCHAS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

WLLISSES MENEZES AFONSO

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

Orientador: Prof. Jean Marie Désir

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

Janeiro – 2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

01/2005

Afonso, Willisses Menezes

Caracterização de resíduo de corte de rochas na produção de argamassas / Willisses Menezes Afonso. – Campos dos Goytacazes, 2004. 135 f. : il.

Orientador: Jean Marie Désir

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2005.

Área de concentração: Estruturas.

Bibliografia: f. 124-135

1. Resíduo de corte de rochas 2. Argamassas 3. Aproveitamento de resíduos 4. Desempenho 5. Durabilidade. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD 624.15335

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CORTE DE ROCHAS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

WLLISSES MENZES AFONSO

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

Aprovada em 14 de janeiro de 2005.

Comissão Examinadora:

Prof^a. Michèle Cristina Resende Farage (D. Sc.) - UFJF

Prof. Jonas Alexandre (D. Sc.) - UENF

Prof. Dylmar Penteado Dias (D. Sc.) - UENF

Prof. Jean Marie Désir (D. Sc.) – UENF

Orientador

*A Deus,
Minha esposa Karine,
Meus pais Domingos e M^a Auxiliadora
E meus familiares.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma especial ao meu orientador, amigo e padrinho de casamento Jean Marie, pela possibilidade de aprendizagem, orientação, grande amizade e ajuda irrestrita para elaboração deste trabalho.

A todos os professores do LECIV, pela formação que me foi dada e pela amizade desenvolvida durante estes anos de convívio. Aos professores Jonas e Dylmar pela participação no desenvolvimento desta dissertação.

Aos amigos de laboratório e de pós-graduação Gabriel, Marcos, Victor, Leonardo e Abi-Samara, pela chance de convívio tão produtivo. Especialmente a Elaine, Bruno, Schwan e Gustavo pela importante colaboração e enorme amizade.

Aos bolsistas do setor de materiais cimentícios Alexandre (*In memoria*), Thiago, Aline Nacif e principalmente a Deborah, que teve papel importante no desenvolvimento do programa experimental.

Aos técnicos de laboratório e amigos Milton, André e Vanúzia, pela contribuição com os ensaios de caracterização dos materiais utilizados neste trabalho.

Ao Sr. João Batista Lopes e à Serraria Granito Olho de Pombo pela contribuição durante a coleta das amostras de resíduo.

Ao amigo Marquinhos, pela ajuda durante a execução da micrografia das amostras de argamassa.

Aos amigos da turma de 99 e aos demais colegas da graduação e pós-graduação, valeu!

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para execução deste trabalho, meu muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Justificativa e relevância do trabalho.....	2
1.2 - Objetivos gerais.....	3
1.3 - Objetivos específicos.....	3
1.4 - Estrutura e organização da dissertação.....	3
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1- Construção Civil e seu papel no desenvolvimento sustentável.....	6
2.1.1 - Construção civil e geração de entulhos.....	6
2.1.2 - Construção civil e consumo de materiais.....	7
2.1.3 - Produção de cimento e emissão de gases.....	8
2.1.4 - Desenvolvimento sustentável.....	9
2.1.5 - Reciclagem de resíduos como materiais para a construção.....	11
2.2 - Aproveitamento de resíduos sólidos na Construção Civil	16
2.2.1 - Classificação dos resíduos sólidos.....	16
2.2.2 - Rejeitos industriais comumente reciclados no Brasil.....	17
2.2.3 - Rejeitos do setor de rochas ornamentais.....	20
2.2.4 - Setor de rochas ornamentais de Santo Antônio de Pádua.....	24
2.2.4.1 - Formação geológica e as rochas ornamentais.....	25
2.2.4.2 - Beneficiamento de rochas ornamentais e a geração do RCR.....	27
2.3 - Argamassas e adições minerais.....	33
2.3.1 - Considerações prévias sobre argamassas.....	33
2.3.2 - Propriedades e características das argamassas.....	35
2.3.3 - Prescrições normativas.....	37
2.3.4 - Argamassa como incorporador de RCR.....	38
2.3.5 - Adições minerais.....	39
3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	45
3.1 - Resíduo de corte de rochas.....	45
3.1.1 - Procedência.....	45
3.1.2 - Coleta.....	45
3.1.3 - Características do material <i>In Situ</i>	46
3.1.4 - Processamento.....	46
3.1.5 - Programa experimental – Parte I.....	48

3.1.5.1 - Composição química.....	49
3.1.5.2 - Composições mineralógicas (“XRD”).....	50
3.1.5.3 - Risco de utilização.....	51
3.1.5.4 - Potencial de oxidação.....	52
3.1.5.4.1 - Análise por raios-X (“XRD”).....	52
3.1.5.4.2 - Verificação visual.....	54
3.1.5.4.3 - Verificação da origem do ferro.....	55
3.1.5.5 - Estudo de moagem e as características físicas.....	56
3.2 - Utilização do resíduo de corte de rochas em argamassas.....	61
3.2.1 - Materiais.....	61
3.2.1.1 - Cimento.....	62
3.2.1.2 - Cal.....	62
3.2.1.3 - Agregado miúdo.....	63
3.2.1.4 - RCR.....	64
3.2.2 - Programa experimental – Parte II.....	64
3.2.2.1 - Ensaio físico-mecânicos.....	65
3.2.2.1.1 - Teor de ar incorporado.....	66
3.2.2.1.2 - Retenção de água.....	68
3.2.2.1.3 - Resistência à compressão.....	70
3.2.2.2 - Ciclagem água-estufa.....	73
3.2.2.2.1 - Variação dimensional.....	73
3.2.2.2.2 - Variação de massa.....	74
3.2.2.2.3 - Resistência à compressão.....	75
3.2.2.3 - Análise preliminar.....	77
3.2.2.4 - Estudo de dosagem.....	77
3.2.2.4.1 - Definição dos traços finais.....	80
3.3 - Desempenho de argamassas com resíduo de corte de rochas.....	80
3.3.1 - Propriedades do estado fresco.....	81
3.3.1.1 - Índice de consistência padrão.....	81
3.3.1.2 - Teor de ar incorporado.....	82
3.3.1.3 - Retenção de água.....	82
3.3.1.4 - Densidade de massa.....	83
3.3.1.5 - Plasticidade, coesividade e aplicabilidade.....	84
3.3.1.5.1 - Assentamento de blocos cerâmicos.....	86
3.3.1.5.2 - Revestimento de parede de blocos cerâmicos.....	87
3.3.2 - Propriedades do estado endurecido.....	88
3.3.2.1 - Evolução da resistência à compressão.....	88

3.3.2.2 - Evolução da resistência de aderência.....	89
3.3.2.3 - Resistência à tração por compressão diametral.....	92
3.3.2.4 - Absorção de água por capilaridade.....	94
3.3.2.5 - Absorção de água por imersão.....	97
3.3.2.6 - Diagramas tensão-deformação e módulo de deformação.....	99
3.3.3 - Parâmetros de durabilidade.....	103
3.3.3.1 - Ciclagem água-estufa.....	103
3.3.3.1.1 - Variação dimensional.....	104
3.3.3.1.2 - Variação de massa.....	104
3.3.3.1.3 - Absorção de água por imersão.....	105
3.3.3.1.4 - Resistência à compressão.....	106
3.3.4 - Análise Microestrutural.....	106
4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	110
4.1 - O resíduo de corte de rochas.....	110
4.2 - Argamassa 1:1:7R.....	111
4.3 - Argamassa 1:2:7.....	112
4.4 - Argamassa 1:1:4:10.....	113
4.5 - Argamassa 1:5:7.....	114
4.6 - Argamassa 1:7:12.....	114
4.7 - Argamassa 1:6:10.....	115
4.8 - Argamassa 1:1:3:7.....	116
4.9 - Argamassa 1:7:7.....	117
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	118
5.1 - Conclusões.....	118
5.2 - Sugestões para trabalhos futuros.....	120
ANEXO.....	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Gráfico adaptado de “ http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm ”	9
Figura 2.2	Extração de rochas em uma pedreira de Santo Antônio de Pádua - RJ	21
Figura 2.3	Recorte das rochas (Santo Antônio de Pádua)	21
Figura 2.4	Resíduo de corte de rochas como efluente em água (Santo Antônio de Pádua)	22
Figura 2.5	Mapa de situação do município de Santo Antônio de Pádua – RJ	24
Figura 2.6	(a) “ <i>granito olho-de-pombo</i> ”, (b) “ <i>granito pinta rosa</i> ” e (c) “ <i>granito fino</i> ”	26
Figura 2.7	(a) “ <i>pedra madeira amarela</i> ”, (b) “ <i>granito olho-de- pombo</i> ” (c) “ <i>pedra madeira verde</i> ”, (d) “ <i>pedra madeira rosa</i> ”	27
Figura 2.8	Pedreira Quatro Irmãos: Blocos de rochas obtidos após lavra	28
Figura 2.9	Deslocamento dos blocos em lajes (adaptada de OLIVEIRA, 1998)	28
Figura 2.10	Aspecto das chapas de rocha levadas às serrarias	29
Figura 2.11	Serraria Granito Olho de Pombo	29
Figura 2.12	Efluente despejado por uma serraria diretamente no Rio Pombo	30
Figura 2.13	Máquina de corte com disco diamantado	30
Figura 2.14	Direcionamento da água com RCR para o tanque de decantação	31
Figura 2.15	Tanque de decantação do resíduo sólido	31
Figura 2.16	Cava para deposição do resíduo retirado do fundo dos tanques	32

Figura 2.17	Cava completamente cheia de resíduo e abandonada	33
Figura 3.1	Foto da coleta de material para estudo	45
Figura 3.2	Distribuição granulométrica do resíduo destorroado e passado na peneira ABNT 100	47
Figura 3.3	Moinho de bolas	47
Figura 3.4	Peneirador mecânico	48
Figura 3.5	Equipamento Shimadzu EDX-700 LECIV/CCT/UENF	49
Figura 3.6	Espectro de difração de raios-X (XRD)	51
Figura 3.7	Espectro de difração de raios-X (XRD) recém retirado do tanque de decantação	53
Figura 3.8	Espectro de difração de raios-X (XRD) 4 meses após sua retirada do tanque de decantação	54
Figura 3.9	RCR antes dos ciclos	55
Figura 3.10	RCR depois dos ciclos	55
Figura 3.11	Permeabilímetro de Blaine	57
Figura 3.12	Curva granulométrica, superfície específica e porosidade do RCR moído a 300 ciclos	58
Figura 3.13	Curva granulométrica, superfície específica e porosidade do RCR moído a 600 ciclos	59
Figura 3.14	Curva granulométrica, superfície específica e porosidade do RCR moído a 900 ciclos	59
Figura 3.15	Curva granulométrica, superfície específica e porosidade do RCR moído a 1200 ciclos	60
Figura 3.16	Curva granulométrica, superfície específica e porosidade do RCR moído a 1500 ciclos	60
Figura 3.17	Curva granulométrica da areia	64

Figura 3.18	Capacidade de incorporação de ar das argamassas de referência e substituição	68
Figura 3.19	Capacidade de retenção de água das argamassas de referência e substituição	69
Figura 3.20	Prensa Versa Tester	71
Figura 3.21	Detalhe da ruptura dos CPs	71
Figura 3.22	Resistência à compressão das argamassas ensaiadas aos 7 dias	72
Figura 3.23	Resistência à compressão das argamassas ensaiadas aos 28 dias	72
Figura 3.24	Variação dimensional das argamassas	74
Figura 3.25	Variação de massa das argamassas	75
Figura 3.26	Resistência à compressão das argamassas de assentamento	76
Figura 3.27	Resistência à compressão das argamassas de revestimento	76
Figura 3.28	Resistência à compressão a 7 dias das argamassas, de acordo com o teor de cimento	79
Figura 3.29	Teor de água para o índice de consistência padrão	81
Figura 3.30	Teor de ar incorporado	82
Figura 3.31	Retenção de água	83
Figura 3.32	Densidade de massa	84
Figura 3.33	Pedreiro aplicando revestimento em massa única	85
Figura 3.34	Painéis de revestimento em argamassa (4 de cada lado da parede)	85
Figura 3.35	Evolução da resistência à compressão das argamassas	89
Figura 3.36	Realização do ensaio de resistência de aderência de revestimento em argamassa	90

Figura 3.37	Detalhe do acoplamento do aparelho ao revestimento	90
Figura 3.38	Evolução da resistência de aderência das argamassas	91
Figura 3.39	Montagem para o ensaio de resistência à tração por compressão	92
Figura 3.40	Forma típica de ruptura dos corpos-de-prova	92
Figura 3.41	Resistência à tração por compressão diametral	93
Figura 3.42	Esquema da montagem para o ensaio de absorção de água por capilaridade	94
Figura 3.43	Suporte flutuante com os corpos-de-prova	94
Figura 3.44	Evolução da absorção de água por capilaridade	96
Figura 3.45	Perda de massa em estufa (5 dias)	97
Figura 3.46	Evolução da absorção de água por imersão	98
Figura 3.47	Montagem para ensaio à compressão em prensa eletrônica Instron 5582	100
Figura 3.48	Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:1:7R	101
Figura 3.49	Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:2:7	101
Figura 3.50	Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:1:4:10	101
Figura 3.51	Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:5:7	101
Figura 3.52	Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:7:12	102
Figura 3.53	Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:6:10	102
Figura 3.54	Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:1:3:7	102
Figura 3.55	Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:7:7	102
Figura 3.56	Variação dimensional das argamassas submetidas à ciclagem	104
Figura 3.57	Variação de massa das argamassas submetidas à ciclagem	105

Figura 3.58	Comparação entre a absorção de água por imersão das argamassas submetidas à ciclagem e sem este efeito	106
Figura 3.59	Comparação entre a resistência à compressão das argamassas submetidas à ciclagem e sem este efeito	107
Figura 3.60	Micrografia óptica (125X) argamassa 1:1:7R	108
Figura 3.61	Micrografia óptica (125X) argamassa 1:1:4:10	108
Figura 3.62	Micrografia óptica (125X) argamassa 1:7:7	108
Figura 3.63	Micrografia óptica (125X) argamassa 1:7:12	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Exigências mecânicas e reológicas para argamassas	38
Tabela 2.2	Limites de resistência de aderência (Ra) à tração para emboço em camada única	38
Tabela 3.1	Análise da constituição química do RCR	50
Tabela 3.2	Exigências mecânicas e reológicas para argamassas	62
Tabela 3.3	Análise por EDX da cal	63
Tabela 3.4	Distribuição granulométrica da areia	63
Tabela 3.5	Nomenclatura das argamassas de substituição	65
Tabela 3.6	Observações extraídas durante o assentamento de tijolos	86
Tabela 3.7	Observações extraídas durante o revestimento da parede	87
Tabela 3.8	Módulos de deformação secante das argamassas estudadas	102
Tabela A.1	Propriedades de estado fresco das argamassas estudadas	122
Tabela A.2	Propriedades de estado endurecido das argamassas estudadas	122
Tabela A.3	Parâmetros de durabilidade das argamassas estudadas	123



RESUMO

Caracterização de Resíduo de Corte de Rochas na produção de Argamassas

A construção civil consome grande volume de recursos naturais, gerando enorme quantidade de rejeitos, sendo um dos setores mais indicados para o aproveitamento de resíduos sólidos, apresentando-se como excelente alternativa para diminuição do impacto ambiental. O resíduo gerado no beneficiamento de rochas ornamentais, resultante do processo de serragem de blocos de rochas, onde parte da peça é transformada em pó, geralmente é depositado nos pátios das empresas, por não ter destinação específica. Somente o município de Santo Antônio de Pádua é responsável pela geração de cerca de 8640 toneladas/ano. A necessidade de definir um destino sistemático para este resíduo motivou a realização de um programa experimental visando à avaliação da viabilidade de incorporação deste resíduo de corte de rochas (RCR) em argamassas. Assim, foi realizado um conjunto de ensaios para sua caracterização física, química e mecânica, tais como: análises granulométricas, finura, composições química e mineralógica e potencial de oxidação. A partir dos resultados preliminares favoráveis em traços para revestimento e assentamento, passou-se ao estudo de dosagens experimentais, visando à determinação dos traços representativos, considerando a possibilidade de aumento da incorporação do RCR e diminuição do consumo de cimento. Nos ensaios realizados, os parâmetros considerados, segundo normas brasileiras, foram as resistências à compressão, de aderência, à tração por compressão diametral, o teor de ar incorporado, a retenção de água, o módulo de deformação e as absorções de água por capilaridade e imersão. Outros fatores importantes analisados foram a plasticidade, aplicabilidade e a durabilidade sob condições adversas de temperatura e umidade. Os resultados mostraram que o RCR tem grande viabilidade quanto seu emprego em argamassas que, nesta nova composição, além de ecologicamente correta, mostrou-se durável, com bom desempenho mecânico e ainda com menor custo de produção.



ABSTRACT

Characterization of Rock Cut Residue on Mortars Production

Civil construction consumes great volume of natural resources, generating enormous amount of wastes. Based in the ideal of a sustainable world, it could be a very suitable area for the use of solid residues. It is an excellent alternative to minimize the environmental impact. The residue generated in the improvement of ornamental rocks results from the process of cutting of rock blocks. A part of the block is transformed in powder that is usually deposited around the companies for not having specific destination. The municipal district of Santo Antônio de Pádua is responsible by itself for the generation of about 8640 tons/year. A group of tests was accomplished with this residue (RCR) for its physical, chemical and mechanical characterization. The particle size, specific area, chemical and mineralogical compositions and oxidation potential are some parameters which have been investigated. An experimental study of mixtures has been started after obtaining favorable preliminary results for multiple-use mortars. This program has tried to determine the ideal mortars compositions, aiming to the incorporation of high rate of RCR and the cement consumption optimization. According to the Brazilian code the following parameters have been investigated: compressive, tensile and adherence strengths, air content, water retention, modulus of elasticity and capillarity and immersion water absorption. Others important factors also analyzed were the plasticity, applicability and the durability under adverse conditions of temperature and humidity. The results showed that RCR has great viability as an ingredient for mortars. This new idea for mortars seems to be ecologically correct, durable, with good mechanical performance and low production cost.



1 – INTRODUÇÃO

Os processos industriais de beneficiamento de matérias-primas, de uma forma geral, são responsáveis pela geração de resíduos, sejam eles líquidos, sólidos ou gasosos que, ao longo do tempo, acabam por afetar e degradar o meio ambiente, desobedecendo às exigências federais, estaduais e municipais, quando estas existem.

A construção civil é um dos setores com expressiva contribuição na geração de rejeitos, com perdas da ordem de um terço e produção de entulhos de 0,9 tonelada por metro quadrado construído (PINTO, 1986). Outro aspecto negativo é o consumo excessivo de recursos naturais. Estima-se que este setor produtivo consome até 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade.

Para garantir um desenvolvimento sustentável, torna-se imprescindível a preservação da natureza. Os processos de produção devem economizar energia e não gerar subprodutos perigosos, que podem por em risco a natureza e o ser humano (PENTTALLA, 1997).

O setor de rochas ornamentais, fornecedor de material para construção, gera resíduos em todas as fases de beneficiamento do produto, desde a extração até o acabamento final. Na fase de corte dos blocos de rochas nas dimensões comerciais ocorre a geração de um resíduo fino, oriundo da abrasão do disco de corte na rocha. O resíduo de corte de rochas (RCR) é carregado pela água utilizada na refrigeração e lubrificação dos discos de corte, tendo duas destinações principais: o despejo como efluente comum ou a deposição nos arredores das serrarias de rochas ornamentais.

O resíduo de corte de rochas produzido pelo setor de rochas ornamentais do município de Santo Antônio de Pádua será objeto de estudo deste trabalho de mestrado, por meio de uma proposta de seu aproveitamento como material para construção civil, a partir da produção de argamassas.



1.1 - Justificativa e relevância do trabalho

Apesar de já existirem estudos relevantes sobre o aproveitamento do RCR na construção civil, conforme será discutido nos próximos capítulos, ainda existe a necessidade de uma metodologia de aproveitamento racional, abrangente e, principalmente viável, para que se possa realmente difundir tecnologias, transformando as teorias em práticas convencionais.

Seguindo esta linha de pensamento, pode-se chegar a um material que é consumido em elevados teores na construção civil e que, por sua abrangência de usos, pode ser o veículo mais propício para o consumo dos resíduos provenientes do corte de rochas ornamentais. A argamassa, produto necessário em quase todas as edificações, pode se tornar mais econômica e eficiente com adição deste material que, hoje em dia, é gerado em proporções bastante elevadas.

Somente no município de Santo Antônio de Pádua, no interior do estado do Rio de Janeiro, onde a produção de rochas ornamentais é uma das principais atividades econômicas, a geração deste resíduo gira em torno de 720 toneladas mensais, contabilizando somente as indústrias que possuem tanques de decantação e separação da fase sólida do efluente. De acordo com dados da rede cooperativa de pesquisa e uso de bens minerais destinados à construção civil do Rio de Janeiro (RETECMIN/RJ), a localidade possui cerca de 100 serrarias, das quais 46 fazem a separação do resíduo de corte de rocha (RCR) da água nestas unidades de tratamento de efluentes (tanques de decantação). No restante das serrarias o RCR é despejado como efluente comum, provocando poluição e assoreamento de córregos, lagos e de partes do Rio Pomba.

O aproveitamento de forma racional dos resíduos provenientes do processo industrial de beneficiamento de rochas ornamentais se tornou então um grande desafio. Neste contexto, o emprego do RCR na produção de argamassas aparece como uma boa alternativa para a obtenção de um produto final de fácil manuseio e uso, que atenda às especificações técnicas, seja ecologicamente correto, durável e que ainda possa ter baixo custo final.



Assim, este trabalho se propõe a ser um estudo técnico/científico minucioso do comportamento destas argamassas quando produzidas com incorporação do resíduo de corte de rochas.

1.2 - Objetivos gerais

Almeja-se propor uma metodologia de aproveitamento do RCR como material para construção, sendo parte constituinte de argamassas, buscando a manutenção das propriedades necessárias à aprovação do produto de acordo com as normas técnicas vigentes no país.

Comprovada a eficiência do material como componente de argamassas, pretende-se contribuir para a minimização dos impactos ambientais causados pelo processo de beneficiamento de rochas ornamentais, bem como da própria construção civil, por meio de uma proposta de destinação racional para o RCR.

1.3 - Objetivos específicos

O objetivo específico do trabalho é o estudo do comportamento de argamassas com RCR, incluindo a caracterização do resíduo, verificação das propriedades mecânicas e da durabilidade das argamassas para suas condições de trabalho, de modo que se possa garantir um desempenho satisfatório, por meio de uma metodologia condensada, num processo economicamente viável.

1.4 - Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação de mestrado está organizada em 5 capítulos, elaborados para apresentar a seqüência do desenvolvimento do trabalho, começando com a preocupação com o papel degradante da construção civil; passando pelas possibilidades de contribuição deste mercado no aproveitamento de resíduos sólidos;



conhecendo o processo de geração de um destes rejeitos, o resíduo de corte rochas; entrando na caracterização do RCR; iniciando os estudos que envolvem seu aproveitamento em argamassa; estudando o comportamento destas argamassas; analisando os resultados obtidos e finalmente tirando as conclusões sobre o assunto abordado.

Assim, os capítulos posteriores estão constituídos da seguinte forma:

- **CAPÍTULO II** – Faz uma revisão sobre os temas relevantes a este trabalho, começando pela discussão do papel da construção civil numa proposta de crescimento baseada nos conceitos de desenvolvimento sustentável, englobando os pontos negativos deste setor produtivo, tais como a geração de resíduo e o consumo de matérias-primas. Também são tratados o aproveitamento de resíduos sólidos e de suas classificações, com citações dos resíduos comumente reciclados no país. No que tange os resíduos gerados na atividade de exploração e beneficiamento de rochas é apresentado o setor de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua, passando por todas as suas fases do processo de lavra, de modo a compreender as formas de geração de rejeitos, principalmente no que se refere ao RCR. Passa-se então a um breve histórico sobre o uso de argamassas, destacando suas características mais relevantes, prescrições normativas e tipos. Por fim, destacam-se os principais efeitos de adições minerais em materiais cimentícios, dando maior destaque para o efeito de adições inertes.
- **CAPÍTULO III** – Dedicado exclusivamente ao programa experimental, este apresenta os dados obtidos nas análises de caracterização física e química do RCR, de forma a determinar suas potencialidades para emprego na produção de argamassa. Na primeira parte do programa experimental é discutido o processo de beneficiamento necessário à utilização do RCR em argamassas. Na segunda parte são apresentados os primeiros estudos do emprego de RCR em argamassa. Nesta parte, os resultados dos ensaios realizados são discutidos,



apontando a potencialidade do uso de RCR em argamassas. Posteriormente são apresentados o estudo de dosagem e os traços selecionados para a análise de desempenho. Na terceira e última parte do programa experimental é apresentado o estudo do comportamento das argamassas produzidas com o RCR. Os ensaios realizados revelam as propriedades em estados fresco (teor de ar incorporado, retenção de água, densidade de massa, entre outros) e endurecido (resistências mecânicas, absorção de água e módulo de deformação) das argamassas, bem como suas respostas em condições adversas de solicitação. O capítulo termina com a análise de microestrutura realizada por meio de microscopia óptica.

- **CAPÍTULO IV** – É dedicado à discussão dos resultados obtidos durante a caracterização do RCR e o estudo do comportamento das argamassas produzidas. Está apresentado de forma a discutir o comportamento global de cada traço estudado.
- **CAPÍTULO V** – Último capítulo da dissertação, é destinado às conclusões retiradas de todo o trabalho desenvolvido, assim como as sugestões para trabalhos posteriores.



2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Construção Civil e seu papel no desenvolvimento sustentável

O ramo da construção civil continua demonstrando sua importância para a economia nacional e por isso não pára de receber incentivos para se manter em crescimento. Não obstante, o desenvolvimento das cidades brasileiras aumenta a demanda por novas moradias, ao mesmo tempo em que surge a construção de novas indústrias, estradas e obras de arte (OLIVEIRA *et al.* 2001).

Este crescimento é seguido por um aumento do consumo de matérias primas, geração de rejeitos e muita poluição. Isto deixa claro o quanto é importante a busca por maneiras racionais de desenvolvimento, passando decisivamente pela inserção deste grande segmento de mercado na busca por soluções que minimizem os impactos ambientais causados pelo próprio setor.

2.1.1 - Construção civil e geração de entulhos

A construção civil é certamente o setor de maior geração de resíduos de toda a sociedade. Estima-se que o volume de entulho de construção e demolição gerado seja até duas vezes superior que o volume de lixo sólido urbano. Em grandes metrópoles, o quantitativo de resíduos produzidos chega a proporções gigantescas. São Paulo produz cerca de 2500 caminhões de entulho por dia (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>).

O somatório de todo esse quantitativo de rejeitos descartados começa pelas perdas previstas em projeto, sendo acrescido pelo desperdício ocasionado pela falta de processos construtivos racionalizados. Além disto, durante toda vida útil de uma construção são gerados resíduos, seja na fase de manutenção ou em fases de reforma, reparo, ampliação e, em certos casos, demolições.



Outro agravante é o fato das obras de construção civil serem projetadas para uma vida útil de cerca de 50 anos, e muitas construções estão completando o seu ciclo de utilização, quando então começarão as reformas, recuperações, demolições etc (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>).

Na maioria das cidades brasileiras, as obras são projetadas e construídas sem considerar os impactos ambientais, resultando numa produção de grande quantidade de entulho depositada em aterros sanitários. Parte deste material é abandonada em locais inadequados, quase sempre clandestinos, provocando danos às áreas sadias, como o esgotamento e poluição de aquíferos, assoreamento das margens, poluição de cursos d'água e proliferação de vetores (OLIVEIRA *et al.* 2001).

Muito preocupante também é a ausência de espaço físico próprio para deposição do entulho gerado. Segundo BRITO FILHO (1999), na cidade de São Paulo, só a indústria da construção civil gera 90.000 m³ de entulho por mês, considerando-se apenas o material que chega a aterros oficiais.

2.1.2 - Construção civil e consumo de materiais

Além do problema de local para deposição do entulho gerado, há a agressão dupla à natureza nesse processo, tanto pelo aspecto da deposição quanto pela retirada desnecessária de recursos naturais, cujo agravante reside no fato de que a construção civil consome uma grande parcela dos recursos naturais de uma sociedade. Segundo JOHN (1999), de todos os recursos extraídos da natureza, um percentual de 15 a 50% é destinado à indústria da construção civil.

A construção civil consome cerca de 2/3 da madeira natural extraída e a maioria das florestas não são manejadas adequadamente (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>).

Segundo o ENBRI (European Network of Building Research Institute), a construção civil consome cerca de 4,5% do total de energia consumida no planeta, sendo 84% na fase de produção dos materiais para construção (JOHN, 1999).



JOHN (1995) afirma que a produção de 1 tonelada de cimento implica a mineração de 1,5 toneladas de matéria-prima, principalmente argila e calcário.

Em países desenvolvidos, como o Reino Unido, e em desenvolvimento, o consumo de materiais de construção civil é de aproximadamente 6 toneladas por ano para cada habitante. O consumo de agregados naturais varia entre 1 e 8 toneladas/habitante.ano. (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>).

No Brasil o consumo de agregados naturais somente para a produção de concreto e argamassas é de 220 milhões de toneladas (JOHN, 1999). Em volta das grandes cidades, areia e agregados naturais começam a ficar escassos e, graças ao crescente controle ambiental da extração das matérias primas, sua oferta fica cada dia menor.

Além de matéria para a britagem (produção de britas e areias de britagem), a extração de rochas ganhou força e vem em ritmo acelerado de crescimento graças ao mercado de rochas ornamentais. As pedras decorativas conquistaram a população e colaboram para o aumento do extrativismo mineral, tendo como principal destino a construção civil.

2.1.3 - Produção de cimento e emissão de gases

Além de extrair recursos naturais, a produção de materiais de construção também gera poluição: poeira, CO₂, entre outros. O processo produtivo do cimento necessariamente gera CO₂, gás importante no efeito estufa. Para cada tonelada de clínquer produzido quase uma tonelada de CO₂ é gerada (BILODEAU e MALHOTRA, 2000).

As medidas de proteção ambiental adotadas por outras indústrias e o crescimento da produção mundial do cimento fazem com que a participação do cimento na produção do total de CO₂ gerado tenha quase triplicado no período de 30 anos (1950 e 1980) (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>).

2.1.4 - Desenvolvimento sustentável

Atualmente, o crescimento econômico advindo do desenvolvimento é tido como fator preponderante para a soberania das nações, contudo, aparece com grande força a preocupação com os efeitos que esse desenvolvimento sem barreiras pode trazer, principalmente no que se refere ao meio ambiente e manutenção da qualidade de vida. Pesquisa internacional realizada pela “Civil Engineering Research Foundation” (CERF), entidade ligada à “American Society of Civil Engineers” (ASCE) dos Estados Unidos, revelou que a questão ambiental é uma das maiores preocupações dos líderes do setor (Figura 2.1), logo atrás de informática.

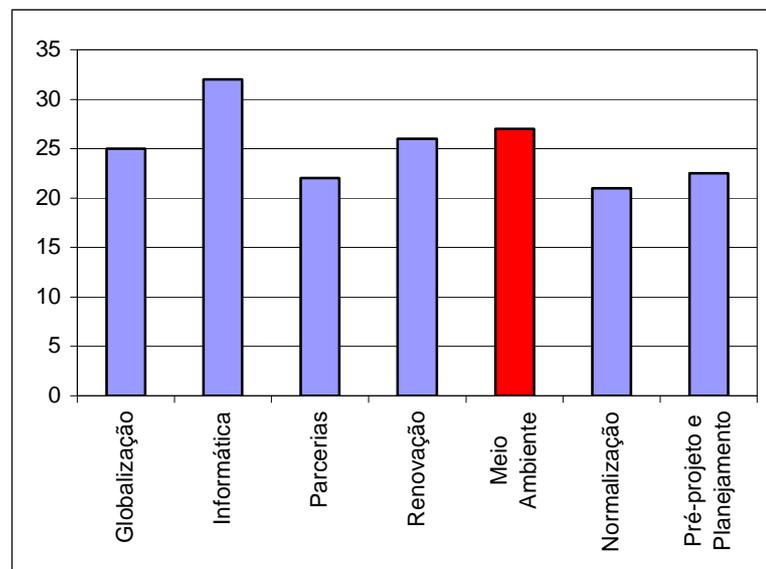


Fig. 2.1 – Gráfico adaptado de “<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>”

É evidente que a necessidade de crescimento não será deixada de lado, contudo, surge uma nova concepção de desenvolvimento, preocupada com os seus efeitos imediatos e, principalmente, futuros, provocados na vida como um todo. Divulgado em 1987 com o título de “Nosso Futuro Comum” ou “Relatório Brundtland”, o



relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, constituída pela Organização das Nações Unidas-ONU, representa um marco no enfrentamento da questão ambiental ao propor a perspectiva da busca do chamado desenvolvimento sustentável, ou seja, um desenvolvimento que permita à humanidade usufruir dos recursos naturais sem comprometer a possibilidade das gerações futuras de também fazê-lo (OLIVEIRA *et al.*, 2001).

Anos depois, na Conferência sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente das Nações Unidas (Rio 92), foi consolidada, através da AGENDA 21, a visão do desenvolvimento sustentável, de maneira a garantir para as gerações futuras iguais condições de desenvolvimento - a igualdade entre gerações e também uma maior equidade no acesso aos benefícios do desenvolvimento - a igualdade intrageração (JOHN, 2000). Este novo princípio, segundo PENTTALLA (1997), é baseado numa melhor distribuição dos recursos econômicos da humanidade, tendo uma preocupação com a preservação da natureza. Os processos de produção devem economizar energia e não gerar sub-produtos perigosos, que podem por em risco a natureza e o ser humano.

A partir de quatro grandes temas – a questão do desenvolvimento, com suas dimensões econômicas e sociais; os desafios ambientais que tratam da conservação e gerenciamento de recursos para o desenvolvimento; o papel dos grupos sociais na organização e fortalecimento da sociedade humana; e, finalmente, os meios de implementação das iniciativas e projetos para a sua efetivação – são fornecidas as bases para o encaminhamento de iniciativas voltadas à obtenção de melhores condições ambientais e de vida (BITTAR, 1999).

Entretanto, muito há de ser feito com fins à real implementação da metodologia de desenvolvimento sustentável. Exemplo disto é a esfera de recursos minerais, que são a principal matéria-prima para a produção dos materiais de construção civil, sobre o que a Agenda 21 é obsoleta. Outro exemplo da necessidade de ação mais rigorosa foi o documento apresentado pelo governo brasileiro na Conferência Rio+5, realizada em



Nova York, no ano de 1997. Neste, contemplando as ações executadas na esfera federal, estadual e municipal desde 1992, o governo reconhece que os avanços em relação ao planejamento e gestão dos recursos terrestres estão aquém das necessidades no País, tendo sido avaliados como precários (OLIVEIRA *et al.*, 2001). Por isso, atualmente, parte dos processos com atividade econômica ainda é grande fonte geradora de resíduos, na forma de gases, líquidos ou sólidos, causando grande degradação ambiental, não contribuindo para um desenvolvimento sustentável.

BILODEAU e MALHOTRA (2000) enfatizam que, para a Engenharia Civil, a concepção de desenvolvimento sustentável envolve o uso e produção de materiais de elevado desempenho a custos razoáveis, com o menor impacto ambiental possível. Ou ainda, investir na possibilidade de aproveitamento e/ou reciclagem de resíduos para uso na construção civil, dando assim contribuição dupla à sustentabilidade do meio, absorvendo materiais até então inúteis e poluidores, e diminuindo a necessidade de mais matéria-prima.

2.1.5 - Reciclagem de resíduos como materiais para a construção

A possibilidade de redução dos resíduos gerados nos processos industriais apresenta limitações financeiras para micro e pequenas empresas, e limitações técnicas e de mobilidade de adequação e/ou mudança de processos para médias e grandes empresas, de forma que os resíduos sempre existirão, seja em pequena ou em larga escala. A política ambiental vigente ainda é quase que exclusivamente voltada para a deposição controlada dos resíduos, sendo outras técnicas também utilizadas, mas em pequena escala; como a incineração e o co-processamento (GONÇALVEZ, 2000).

Diante deste quadro, a possibilidade de aproveitamento destes resíduos mostra-se como uma das alternativas mais sensatas na política de gerenciamento de resíduos sólidos. Dentre as formas de aproveitamento, alguns métodos se confundem, por isso, alguns conceitos são apresentados visando a um melhor entendimento a cerca do



assunto. De acordo com ROCHA E CHERIAF (2003), são definidos os seguintes termos:

- **Recuperação:** retirada do resíduo do seu circuito tradicional de coleta e tratamento. Exemplo: recuperação de PET, papéis, do sistema de coleta formal, ou ainda de lodos de tratamento de efluentes destinados à eliminação em aterros controlados.
- **Valorização:** dar um valor comercial a um determinado resíduo. Exemplo: vidros para a produção de silicatos e vitrocerâmicos.
- **Valorização energética:** utilização do poder calorífico dos resíduos. Exemplo: casca de arroz usada no processo de beneficiamento e secagem do arroz, madeiras destinadas à queima em caldeiras, incorporação de lodo em matrizes para redução dos tempos de queima, visando à eficiência energética.
- **Reemprego:** novo emprego de um resíduo para uso análogo ao seu primeiro ciclo de produção. Exemplo: incorporação de argamassas ainda no estado fresco reprocessadas (moinho ANVAR) para produção de uma nova argamassa, uso da água de lavagem de caminhões-betoneira na produção de concretos. Aproveitamento de resíduos na construção.
- **Reutilização:** aproveitamento de um resíduo, uma ou mais vezes, na sua forma original, sem beneficiamento. Exemplo: reutilização da areia de fundição nos moldes.
- **Reciclagem:** introduzir o resíduo no seu ciclo de produção em substituição total/parcial de uma matéria-prima. Exemplo: areia industrial oriunda do processo de extração em pedreiras, reciclagem do resíduo de construção no concreto. Reciclagem química: valorização sob a forma de produtos químicos.

VAZQUEZ (2001) divide a reciclagem em quatro classes, de acordo com o processamento sofrido pelo resíduo até seu uso como parte de um novo material.



- Reciclagem primária: aquela em que o produto original passa a ser o material de uso direto em uma mesma construção. Como exemplo pode ser citada reciclagem de aglomerado asfáltico *in situ*.
- Reciclagem secundária: que consiste em re-introduzir o material no ciclo com um propósito distinto. Como exemplo tem-se a utilização de um pavimento de concreto reciclado como material de sub-base.
- Reciclagem terciária: decomposição de um material usado para obter outro material. Usa-se no sentido de despolimerizar para obter outro plástico polimérico, por exemplo.
- Reciclagem quaternária: Conversão de materiais usados em energia, não é propriamente uma reciclagem.

A reciclagem pode contribuir bastante com a diminuição das áreas destinadas à deposição e redução das despesas relacionadas. A incorporação de resíduos na produção de materiais pode reduzir o consumo de energia para a produção do mesmo produto sem resíduos, e pode, dependendo de onde esteja localizado o resíduo e seu mercado consumidor potencial, reduzir distâncias de transporte e contribuir para a minimização do impacto ambiental.

A produção de novos materiais pode reduzir o consumo de energia, como o caso de concretos produzidos com altos teores de escória em substituição ao cimento e altos teores de pozolanas (BILODEAU e MALHOTRA, 2000).

Nesta linha de raciocínio, o mercado da construção civil se apresenta como uma das mais eficazes alternativas para consumir materiais reciclados, pois a atividade da construção é realizada em qualquer região, com a ampliação cada vez maior do ambiente construído, o que permitirá reduzir os custos de transporte. Além disso, grande parte dos componentes necessários à produção de edificações pode ser produzida sem grande sofisticação técnica (JOHN, 1996).

Entre outras vantagens da reciclagem, pode-se destacar: a preservação dos recursos ambientais, a redução do volume de aterros e incineração, a redução do



consumo energético, a redução da poluição emitida para a fabricação de um mesmo produto, a geração de empregos e o aumento da durabilidade da construção (GONÇALVEZ, 2000).

A reciclagem de resíduos pode reduzir a poluição: a utilização de escória de alto forno e cinzas volantes pela indústria cimenteira brasileira reduz acentuadamente o volume de CO₂ liberado na atmosfera; a reciclagem de sucata de aço reduz em cerca de 90% a geração de resíduos minerais (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>).

A utilização de resíduos como matéria prima reduz a quantidade de recursos naturais retirados do meio ambiente. O entulho de construção reciclado pode substituir em grande parte os agregados naturais empregados na produção de concreto, blocos e base de pavimentação. A substituição do clínquer de cimento Portland em 50% por escória de alto forno permite uma redução de cerca 40% no consumo de energia (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>).

Os resíduos não reciclados são depositados em aterros sanitários. Estes aterros ocupam espaços cada vez mais valorizados, especialmente aqueles próximos aos grandes centros urbanos. Aterros sanitários concentram resíduos, muitos deles nocivos, e significam risco de acidentes ambientais, mesmo que tomadas todas as medidas de técnicas de segurança. Resíduos nocivos podem ser "encapsulados" durante o processo de reciclagem.

A reciclagem pode auxiliar na produção de materiais de menor custo, colaborando na redução do custo das habitações, fator decisivo para o sucesso dos projetos de habitação de interesse social (HIS) e também para a redução de custo de obras de infra-estrutura, como rodovias, estradas de ferro, barragens etc (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>).

CINCOTTO (1988) apresentou alguns parâmetros para utilização de resíduos na construção civil, onde se destacam principalmente a quantidade do resíduo disponível (grande o suficiente para justificar o estudo), as distâncias de transporte e processamento e avaliação do risco de contaminação.



JOHN (1996, 2000) apresentou uma metodologia de pesquisa e desenvolvimento de reciclagem de resíduos como materiais de construção civil, ressaltando que o estudo da reciclagem de resíduos sólidos deve envolver as seguintes etapas:

- Estatística da geração do resíduo, identificação e quantificação dos resíduos disponíveis;
- Seleção do resíduo a ser pesquisado (baseada no risco de contaminação ambiental, aspectos sociais, quantidade produzida, custos de disposição e destinação, nível de envolvimento da empresa geradora e aspectos comerciais);
- Conhecimento do processo de produção do resíduo, visando à verificação da uniformidade das características do resíduo gerado, pois afetarão o desenvolvimento do novo produto;
- Caracterização do resíduo (caracterização preliminar: aspectos físicos, análise química, análise da microestrutura e risco ambiental);
- Busca de possíveis aplicações dentro da construção civil (considerando as características do resíduo); desenvolvimento de aplicações técnicas e economicamente viáveis (incluindo seu processo de produção);
- Desenvolvimento do produto (pesquisa laboratorial, desenvolvimento da tecnologia básica, desenvolvimento da tecnologia aplicada, processo de produção e controle da qualidade) e
- Análise do desempenho do novo produto com a incorporação de resíduos (desempenho estrutural e análise do impacto ambiental e de risco à saúde dos usuários deste novo produto).

Fica então evidente a importância da busca incessante por alternativas para a redução quantitativa das gerações de resíduos, principalmente quando se considera a construção civil. Neste trabalho fez-se a opção de estudo de formas de emprego de um tipo de resíduo sólido como material para construção, seguindo, de certa forma, a metodologia apresentada por JOHN (1996, 2000). Todos os detalhes são apresentados nos itens seguintes.



2.2 – Aproveitamento de resíduos sólidos na Construção Civil

2.2.1 - Classificação dos Resíduos Sólidos

Segundo as definições da NBR 10004/1987, resíduos sólidos são resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam também inclusos nesta definição os líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos de água.

A periculosidade de um resíduo é uma característica apresentada por este, que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, pode apresentar risco à saúde pública; provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças; e/ou oferecendo riscos ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado ou desposado de forma inadequada.

A ABNT classifica os resíduos sólidos de acordo com sua periculosidade, em:

- Resíduos classe I – Perigosos; quando o material possui características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade excedendo os limites impostos pela norma.
- Resíduos classe II – Não-inertes; quando não se enquadram na classe I nem na classe III, apresentando até combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos classe III – Inertes; quando submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor. Como exemplo destes materiais, podem-se citar rochas, tijolos, vidros, entre outros.



2.2.2 - Rejeitos industriais comumente reciclados no Brasil

As tentativas de reciclagem de rejeitos e subprodutos industriais como matéria-prima para outros setores ou até mesmo como produto final para determinadas atividades ganharam força desde a década passada. A necessidade crescente de um modelo de desenvolvimento sustentável impulsionou as pesquisas referentes à reutilização de materiais nos mais diversos setores. Com o setor de construção civil não foi diferente. Graças ao seu grande potencial poluidor, tornou-se quase uma questão moral o compromisso com a manutenção do equilíbrio ecológico. Assim, vários tipos de resíduos, principalmente os sólidos, vêm sendo estudados para sua incorporação em alguma fase do processo construtivo, como material tecnicamente viável no desempenho de suas funções.

Muitas empresas geradoras de rejeitos têm grande interesse e investem no desenvolvimento de pesquisas sobre o assunto. É bom lembrar que por lei a empresa que gera o resíduo é responsável pelo seu gerenciamento. De fato, no atual momento, a indústria já considera o foco ambiental como parte de sua estratégia competitiva, valorizando economicamente seus resíduos, diversificando o seu mercado consumidor. Como é o caso da indústria siderúrgica que promove incentivos para que uma parte da escória granulada gerada em altos fornos seja aproveitada na construção civil. Parte deste material é utilizada na fabricação de cimentos e outra, por meio de um processo de pelotização da escória, é transformada em agregados leves. Atualmente já existem no Brasil uma fábrica de cimento que não dispõe de forno próprio para a produção de clínquer e utiliza a escória de uma siderúrgica para a produção do cimento CP III (ÂNGULO *et al.*, 2001).

O setor de energia e outras indústrias que queimam carvão em caldeiras de leito fluidizado geram cerca de 1.500.000 toneladas de cinzas volantes todos os anos. As cinzas volantes são comercializadas especialmente para a indústria de cimento, embora existam várias pesquisas para sua utilização na produção de cal hidráulica. Segundo ÂNGULO *et al.* (2001), o mercado da cinza volante como adição mineral em concretos



de cimento Portland possui ainda um grande potencial de expansão, devido aos benefícios proporcionados por este aditivo. Enquanto na Europa a adição ao concreto alcança os 40%, no Brasil e nos EUA esse percentual não ultrapassa os 20%. Para que haja uma inserção abrangente do produto no mercado, além do apelo ecológico, é necessário que seu preço de venda seja competitivo de acordo com as tecnologias de uso existentes ou que haja certo incentivo para que o produto tenha uma vantagem competitiva significativa.

O próprio resíduo gerado pelo setor de construção civil já é objeto de inúmeras pesquisas. De acordo com estudos de ZORDAN e PAULON (1997), concretos com agregados fabricados com RCD (resíduo de construção e demolição) atendem perfeitamente às exigências de fabricação de peças de concreto para infra-estrutura urbana; como elementos de drenagem, guias, sarjetas, ou outras aplicações onde não se exijam resistências elevadas; isso de acordo com seus resultados positivos obtidos em ensaios de compressão, abrasão e permeabilidade (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>).

Trabalho desenvolvido por CORDEIRO *et al.* (2001) comprovou a viabilidade técnica de recuperação de resíduos da indústria cerâmica e sua conversão em adição mineral para materiais cimentícios. De acordo com os resultados deste estudo, a substituição parcial do cimento pela adição propicia uma melhoria significativa nas propriedades dos concretos e argamassas. Fato importante é que a melhoria vai além do efeito fíler, que aumenta a compacidade da mistura proporcionando um ganho de resistência mecânica. Existe também a atividade pozolânica da adição que consome parte do hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento, melhorando a durabilidade dos produtos. Assim, além do ponto de vista ambiental, contribuindo com a indústria cerâmica que não dispõe de locais específicos para a disposição dos resíduos, foi comprovado que uma substituição de 15% em massa de cimento representa os melhores resultados, correspondendo a uma economia apreciável no volume de cimento a ser utilizado numa determinada obra.



Tratando-se de resíduos originados de indústrias do ramo de extração mineral, particularmente do setor de rochas, existe um grande número de pesquisas de âmbito nacional e internacional para a reciclagem destes rejeitos como materiais aplicáveis na construção civil.

SILVA e PASTORE (2001) estudaram rejeitos de uma pedreira com o objetivo de aproveitamento do material como agregados para concretos. Esta pesquisa concluiu que, para a transformação deste material em agregados graúdos de graduação “1” e “0” (mais comumente consumidos) e agregados miúdos de maior graduação possível (denominados areias de britagem), o processo utilizado mostrou-se bastante acessível do ponto de vista da capacidade sócio-econômica e tecnológica (a tecnologia é de fácil incorporação no processo produtivo e o montante orçamentário para a instalação de uma unidade de britagem é relativamente baixo). Ainda segundo esta pesquisa, mesmo quando o rejeito apresentar-se como um material friável e susceptível ao desgaste à abrasão, podendo ser desqualificados como agregados, segundo a NBR 7211/1983, o seu emprego na construção civil necessita de mais estudos e de conveniência ambiental, podendo-se vislumbrar seu emprego em obras de pavimentação de vias urbanas, estradas vicinais, na produção de artefatos de concretos etc. Acredita-se que, com a proposta de agregar valor comercial a este tipo de rejeito, a sustentabilidade ambiental de uma pedreira seja assegurada.

Segundo esta linha de pesquisa, D’AGOSTINO e SOARES (2001) discutiram a possibilidade de utilização do material arenoso, resultante do processo de britagem de rocha, no preparo de argamassas. Para tanto, foram determinadas as características tecnológicas tanto dos chamados finos de pedreira quanto das argamassas produzidas com eles. Os resultados mostraram que o resíduo tem boa distribuição granulométrica, o que proporciona boa compacidade, não exercendo influência na consistência e nem na trabalhabilidade da argamassa. Os valores de resistência à compressão simples foram relativamente altos quando comparados aos valores de resistência das outras



areias analisadas, inclusive a areia padrão - IPT. Desta forma, comprovou-se que a areia de britagem de rocha é um material adequado para o preparo de argamassas.

A utilização de finos de pedreira também foi tema de pesquisa para PISSATO e SOARES (2001), que estudaram a possibilidade de utilização deste resíduo como elemento constituinte na mistura de solo-cimento para correção granulométrica de um solo argiloso, com fins de melhorar suas características físicas, oferecendo ainda, um destino para este resíduo de mineração. Foram estudadas misturas com diversas proporções entre finos de pedreira e solo, de forma a obter a quantidade mínima para estabilização do material na forma de solo-cimento, de acordo com a Norma Brasileira. Os resultados obtidos mostraram que todos os corpos de prova ensaiados apresentaram resistência à compressão simples superior ao valor mínimo de 2,1 MPa, prescrito pela Norma Brasileira. A quantidade de finos nas misturas teve influência significativa na resistência à compressão simples dos corpos-de-prova, aumentando sensivelmente a resistência mecânica, com redução da quantidade de cimento mínima para estabilização. Segundo os autores, o mais importante é que o uso de um resíduo para construção de obras com baixo custo pode representar, sob o enfoque social e ambiental, uma atividade bastante viável, contribuindo para o alcance da sustentabilidade da exploração dos recursos naturais para uso na construção civil.

2.2.3 - Rejeitos do setor de rochas ornamentais

Basicamente, este ramo industrial gera resíduos em quatro fases do beneficiamento de rochas ornamentais: a primeira é relativa à extração dos blocos de rochas *in situ*, sendo o tipo de rejeito definido pelo processo de extração. Quando esta é feita por explosões, o rejeito é formado por fragmento de rochas de tamanhos diversos, desde poucos milímetros até algumas dezenas de centímetros, dependendo da finalidade de uso do material extraído (figura 2.2). Já no caso de cortes e processos hidráulicos mais modernos, a perda é bem menor, correspondendo apenas a uma parcela de finos.



Fig. 2.2 - Extração de rochas em uma pedreira de Santo Antônio de Pádua - RJ

A segunda fase só existe em casos especiais, quando as rochas possuem planos bem definidos de clivagem e podem ser deslocadas facilmente, de forma quase artesanal. Assim, o resíduo gerado corresponde a lascas com dimensões insuficientes para seu aproveitamento.

A terceira fase, já como etapa de acabamento, diz respeito ao recorte dos blocos ou chapas nas dimensões de comercialização (figura 2.3). Nesta fase existem dois tipos de resíduos, os retalhos do corte e o pó residual do processo de serragem (figura 2.4), que é carregado pela água usada durante o processo.



Fig. 2.3 - Recorte das rochas (Santo Antônio de Pádua)



Fig. 2.4 - Resíduo de corte de rochas como efluente em água (Santo Antônio de Pádua)

A quarta e última fase é o acabamento da peça, quando as chapas de rochas são submetidas ao processo de polimento. O resíduo gerado é também um pó fino de rocha, acrescido do material abrasivo utilizado no polimento, formando um líquido pastoso, corriqueiramente denominado “lama”.

Existe um grande número de pesquisas em andamento visando sistematizar o gerenciamento destes resíduos e minimizar o seu impacto ambiental. Neste trabalho será enfatizado o emprego no campo da construção civil.

O resíduo mais fino pode ser adicionado à mistura argilosa utilizada na fabricação de peças cerâmicas. Estudos de CATARINO *et al.* (2003) sobre este assunto mostraram que a adição de finos de rocha à massa cerâmica melhorou as propriedades mecânicas de telhas quando comparadas com o produto fabricado somente com argilas. Segundo este estudo, o uso do rejeito, mesmo que sem beneficiamento, melhora o desempenho mecânico de muitos tipos de telhas normalmente comercializadas. Também sobre o mesmo tema, pesquisa realizada por XAVIER (2001) já havia comprovado a eficácia do uso de finos de mármore e granitos como adição na massa cerâmica. Os resultados obtidos em suas pesquisas possibilitaram concluir que adições de 5% de pó de granito ou 15% de mármore contribuem para a



melhoria de propriedades como absorção de água, estabilidade dimensional e resistência à flexão em peças extrudadas ou prensadas.

Outro emprego para os finos oriundos da transformação de alguns tipos de rochas em peças ornamentais (corte em engenhos e polimento) foi estudado por NAVEGA *et al.* (1998). Foi proposto seu uso na produção de clínquer de cimento Portland simples. As pesquisas demonstraram que a indústria de cimentos se mostra particularmente atrativa como receptora deste tipo de resíduo, pela capacidade de absorver, no seu processo de fabricação, grandes volumes de matérias-primas sem a necessidade de tratamentos prévios complexos. Utilizando “lamas” carbonáticas e silícias, resultantes da indústria de rochas ornamentais, obteve-se um clínquer idêntico ao produzido por uma indústria cimenteira, demonstrando que desta forma é possível produzir clínquer a partir, apenas, de resíduos de outras indústrias.

FALCÃO E STELLIN JÚNIOR (2001) estudaram o resíduo gerado nas serrarias com teares de lâminas ou diamantados que, geralmente, é depositado em barragens de rejeito improvisadas, ou vai sendo acumulado ao redor dessas serrarias ao longo do tempo. O trabalho comprovou que existe viabilidade técnica de se purificar o resíduo por meio da separação magnética de alta intensidade, retirando a parte metálica (Fe) do resíduo, constituída pela gralha utilizada como material abrasivo para polimento. Além disto, foram obtidos resultados satisfatórios no emprego do material na fabricação de blocos estruturais, com incorporações que chegaram até 50%. Os blocos assim produzidos tiveram um aumento significativo de resistência à compressão, tornando possível a sua utilização em locais onde são exigidos blocos mais resistentes.

ALMEIDA (2001) pesquisou um dos tipos de resíduos de rocha produzidos na mesma localidade de interesse desta dissertação. Neste trabalho foram realizados ensaios para caracterização da brita produzida com rejeitos do corte de chapas e lajes de rocha. Os resultados identificaram que a brita produzida tem formato cúbico e que sua resistência à compressão apresentou um valor de 23 MPa, o que a limita para utilização em obras de pequeno e médio porte.

Contudo, pesquisas com vistas ao emprego do resíduo mais fino, como material aplicado a dosagens cimentícias, são de pequeno número e recentes, mesmo após ter sido demonstrada a eficiência deste material para uso como adição mineral inerte (filler) em concretos. GONÇALVEZ (2001) estudou o efeito desta adição em algumas dosagens de concreto e comprovou que com teores ideais é possível melhorar o comportamento mecânico destes traços. Com tão poucos estudos dispensados, as pesquisas envolvendo o uso deste rejeito, aqui denominado RCR, tornam-se ainda mais expressivas. Para tanto, porém, é importante a compreensão dos aspectos relativos à origem do resíduo de interesse, pois muitas de suas características estão intimamente relacionadas a sua geração, como é mostrado a diante.

2.2.4 - Setor de rochas ornamentais de Santo Antônio de Pádua

A cidade de Santo Antônio de Pádua situa-se ao noroeste do Estado do Rio de Janeiro, distante cerca de 260 Km da capital e 135 Km de Campos dos Goytacazes (figura 2.5).



Fig. 2.5 - Mapa de situação do município de Santo Antônio de Pádua - RJ

Situado na região Noroeste Fluminense, com área de 615,2 Km² e população de aproximadamente 50.000 habitantes, o município tem mais de 120 anos de



emancipação política. Até a década de oitenta teve sustentação econômica baseada no comércio, agricultura e agropecuária. Porém, por volta do ano de 1980 o fato das rochas poderem ser facilmente deslocadas, ou melhor, por possuírem foliações, despertou o interesse em seu beneficiamento. Desde então a indústria de rochas ornamentais da região não parou de crescer.

Na década de setenta, essas rochas eram exploradas como placa de revestimento de piso de currais. A partir da década seguinte começou a ter uso mais nobre, quando passou a ser serrada para uso em construções, substituindo com melhores preços os granitos, pedra São Tomé e ardósias (SILVA, 1999). Após o beneficiamento, as pedras são utilizadas principalmente como: revestimento de paredes; revestimento de muros; piso de varandas, garagens, jardins e currais; revestimento de pilastras/colunas e paralelepípedos (ALMEIDA, 2001).

Atualmente este setor movimenta cerca de 4 a 5 milhões de Reais/mês, correspondendo a um volume de 350 000 m³ de rocha acabada produzida. Por isso, este setor tem significativa importância para o município e para a região, tornando-se a principal atividade econômica em Pádua. A extração de rochas que, segundo OLIVEIRA (1998), ainda no final dos anos 90, já gerava mais de 6.000 empregos, representa mais que a agricultura e pecuária, atividades tradicionais no local.

2.2.4.1 - Formação geológica e as rochas ornamentais

A formação rochosa está inserida na região que pertence ao contexto geológico representado pelas litologias da porção noroeste da Associação Paraíba do Sul, que é constituída por gnaisses, rochas carbonáticas (calcários e mármore), quartzitos, xistos e anfibolitos, constituindo o conjunto formado pela Serra do Bonfim, Serra da Pedra Bonita na divisa com o Estado de Minas Gerais e Serra do Catete (FERREIRA, 2004). Dentre as diversas litologias, os gnaisses representam a litologia mais marcante desta unidade, correspondendo ao principal grupo de rochas extraídas.

O gnaiss milonitizado ocorre ao longo da Serra do Bonfim, mostrando variações que dão origem a 3 (três) tipos comerciais de rochas ornamentais: “*granito olho-de-pombo*”, “*granito pinta rosa*” e “*granito fino*”.

Já os gnaisses quartzo-feldspático-milonitizados, que são denominados na região como “pedra-madeira”, são encontrados entre as Serras do Bonfim e do Catete, apresentando-se em cores claras, como branca, rosa e amarela, sendo essa variação consequência da alteração do maciço rochoso. As variações locais são conhecidas como “pedra madeira amarela”, “pedra madeira verde”, “pedra madeira branca” e “pedra madeira rosa” (Caniné,1992).

A pedra madeira é de beleza mais apreciável, porém é mais cara devido ao maior desgaste da serra de corte em seu beneficiamento. Com isso, o granito olho de pombo é a rocha ornamental mais vendida por ser mais barata.

As figuras 2.6 e 2.7 exibem amostras de peças acabadas de alguns tipos das rochas ornamentais de Santo Antônio de Pádua.

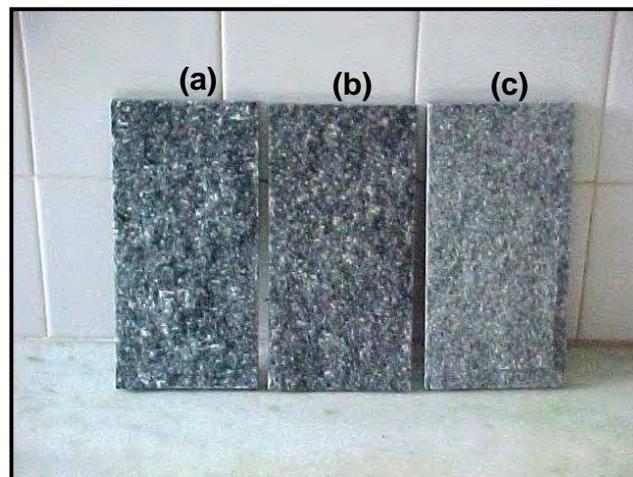


Fig. 2.6 - (a) “*granito olho-de-pombo*”, (b) “*granito pinta rosa*” e (c) “*granito fino*”.

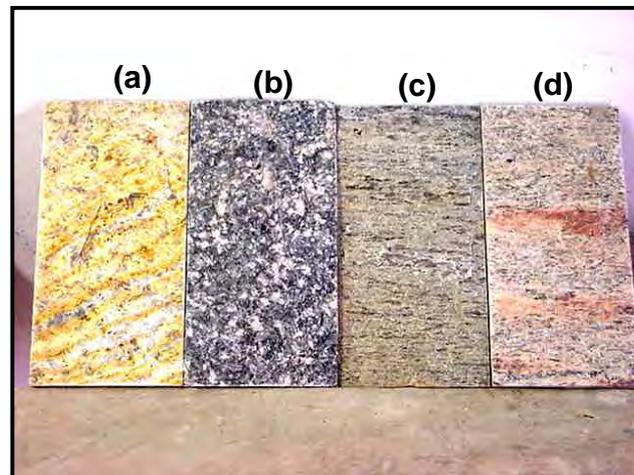


Fig. 2.7 - (a) “pedra madeira amarela”, (b) “granito olho-de-pombo” (c) “pedra madeira verde”, (d) “pedra madeira rosa”.

Fato interessante é a existência de dois maciços distintos na região, separados pela estrada Pádua-Pirapitinga. Isto pode ser visto claramente quando se posiciona na rodovia com destino a Piratininga. À esquerda da pista tem-se a formação de gnaisses quartzo-feldspático-milonitizados, em outras palavras, “pedra madeira” e suas variações de cores; e ao lado direito, a formação de gnaisses milonitizados, “granito” e suas variações.

2.2.4.2 - Beneficiamento de rochas ornamentais e a geração do RCR

No município de Santo Antônio de Pádua é comum a existência de pedreiras vinculadas a serrarias, onde todo processo de beneficiamento de rochas ornamentais, desde a exploração até o preparo nas dimensões comerciais, passa a pertencer a uma única empresa.

Segundo FERREIRA (2002), a extração desenvolvida nesta localidade vem crescendo cada vez mais com o passar dos anos, contudo, as técnicas para a lavra do material não acompanham este crescimento. As fases deste processo geralmente são: limpeza da área a ser explorada, furação do maciço com marteletes a ar comprimido,

para colocação de explosivos, furação de levante, com a colocação de explosivos e detonação dos mesmos para a liberação dos blocos.

Os produtos da extração são blocos (figura 2.8) de arestas retangulares de dimensões variadas que procuram obedecer ou aproximar-se tanto quanto possível daquelas que proporcionem o melhor aproveitamento do material e a maior utilização da capacidade produtiva dos equipamentos de beneficiamento.



Fig. 2.8 - Pedreira Quatro Irmãos: Blocos de rochas obtidos após lavra

Após a extração, o bloco é desmembrado em outros menores e posteriormente deslocado em lajes com espessura em torno de 10 cm, por meio do uso de cunhas (figura 2.9).



Fig. 2.9 - Deslocamento dos blocos em lajes (adaptada de OLIVEIRA, 1998)

Todo este processo ocorre ainda nas pedreiras. Somente depois, as chapas (figura 2.10) são levadas às serrarias para o prosseguimento do beneficiamento.



Fig. 2.10 - Aspecto das chapas de rocha levadas às serrarias

A grande maioria das serrarias é de pequeno a médio porte, com instalações simples e, em alguns casos, totalmente rudimentares. A figura 2.11 mostra uma visão panorâmica de uma destas serrarias.



Fig. 2.11 - Serraria Granito Olho de Pombo

Todas as serrarias estão localizadas próximas a rios, córregos e lagos, de onde retiram a água para uso nas serras. Nas serrarias que não possuem tratamento de seu efluente, os locais de retirada de água são, geralmente, também o destino final do efluente, o que ocasiona graves problemas ambientais, comprometendo a vida deste

local. Um dos problemas mais comuns é o assoreamento dos cursos de água. A figura 2.12 mostra o despejo do efluente de uma serraria diretamente no Rio Pomba.



Fig. 2.12 - Efluente despejado por uma serraria diretamente no Rio Pomba

Em Pádua existe cerca de 100 serrarias, totalizando quase 270 máquinas de corte (figura 2.13), sendo que algumas serrarias possuem até 12 serras e outras apenas uma.



Fig. 2.13 - Máquina de corte com disco diamantado

Deste total de indústrias apenas a metade possui sistema de coleta do efluente. Nestas serrarias, este sistema é formado por um tanque de decantação, para onde a

água, utilizada na lubrificação e refrigeração dos discos de corte, juntamente com o pó em suspensão, é canalizada (figura 2.14).



Fig. 2.14 - Direcionamento da água com RCR para o tanque de decantação

Chegando ao tanque de decantação (figura 2.15), a água entra em uma seção primária (1), passa para uma segunda (2), por uma menor intermediária (3), chegando à última seção do tanque (4), sendo sempre retirada pela superfície, onde se encontra mais limpa. No final do processo a água já se encontra com baixa quantidade de material em suspensão, podendo então ser reaproveitada. Isto representa uma economia de cerca de 300.000 litros de água/mês/serra.



Fig. 2.15 - Tanque de decantação do resíduo sólido

À medida que a água vai passando pelas divisões, o resíduo decanta no fundo dos tanques, de onde de tempos em tempos, são bombeados para os locais próximos às indústrias, geralmente em cavas especialmente abertas. O quantitativo acumulado mensalmente chega a 720 toneladas. Daí surge o problema de destinação final do resíduo, ainda sem solução específica. Quando uma cava chega a sua capacidade máxima, resta aos responsáveis pela serraria duas opções: remover o resíduo e transportá-lo para outro local ou simplesmente abandonar esta cava e abrir outra. Por razões de cunho econômico, a última opção é a mais comum. Entretanto, ambas alternativas não são apropriadas, pois a remoção do resíduo da cava implica na necessidade de um local para sua correta disposição, o que não existe; e a abertura de uma nova cava, além dos problemas relativos a esta própria operação, implica no abandono do material em local impróprio, afetando o solo e, possivelmente, comprometendo o desenvolvimento de coberturas vegetais neste local.

A figura 2.16 mostra uma destas cavas de disposição do resíduo de corte de rochas, que tem uma profundidade aproximada de 3 metros abaixo do nível do terreno e quase 2 metros de altura. Já a figura 2.17 apresenta uma cava abandonada por já ter atingido sua capacidade limite.



Fig. 2.16 - Cava para deposição do resíduo retirado do fundo dos tanques



Fig. 2.17 - Cava completamente cheia de resíduo e abandonada

Para finalizar, estima-se que a perda total na lavra e no beneficiamento seja de 70%, sendo 40% na lavra (desmonte de blocos) e o restante no beneficiamento (preparação dos blocos e lajes brutas nas pedreiras e dos produtos finais nas operações de serraria). Segundo CALAES (1999), perdas da ordem de 70% de material são muito elevadas, configurando uma exploração mineral predatória, e isto, dentro de pouco tempo, poderá comprometer as reservas da maior riqueza deste município.

Como pôde ser percebido, a quantidade de RCR gerada em Santo Antônio de Pádua é bastante considerável, com tendência de aumento deste valor à medida que outras serrarias forem adotando o sistema de tratamento de seus efluentes. Isto justifica a necessidade de pesquisas visando ao aproveitamento deste resíduo.

2.3 – Argamassa e adições minerais

2.3.1 - Considerações prévias sobre argamassas

Acredita-se que o emprego de argamassas como material de construção surgiu na Pérsia antiga, onde se usava alvenaria de tijolos secos ao sol com assentamento de argamassas de cal. Seu desenvolvimento como sistema construtivo, entretanto, ocorreu em Roma. Como as argamassas de cal não endurecem embaixo d'água, para



construções submersas, os romanos trituravam cal conjuntamente com cinzas vulcânicas ou telhas de barro cozido, finamente trituradas. A sílica ativa e a alumina das cinzas reagiam com a cal produzindo o que hoje se conhece como cimento pozolânico. Este processo deu origem às primeiras argamassas de cimento. Portanto, há mais de 2000 anos este material vem sendo utilizado para pavimentar as edificações, para unir e revestir os blocos que formam as paredes e os muros das mesmas etc.

Algumas estruturas romanas, nas quais a alvenaria de pedra era ligada com argamassa, como o Coliseu, em Roma, e a ponte Du Gard, próximo de Nimes, e estruturas de concreto como o Panteon, em Roma, resistem até hoje, com o aglomerante ainda firme e resistente. Nas ruínas de Pompéia, a argamassa se apresenta muitas vezes menos deteriorada do que a “pedra mole” (NEVILLE, 1997).

No Brasil, a argamassa passou a ser utilizada no primeiro século de colonização, para assentamento de alvenaria de pedra (largamente utilizada na época). A cal que constituía tal argamassa era obtida por meio da queima de conchas e mariscos. O óleo de baleia era também muito utilizado como aglomerante, no preparo de argamassas para assentamento.

Por definição, de acordo com a NBR 7200/1998, as argamassas são uma mistura de aglomerantes e agregados com água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência. As argamassas utilizadas em obras são comumente compostas de areia natural lavada, e os aglomerantes são em geral o cimento Portland e a cal hidratada. Sua denominação é função do aglomerante utilizado. Assim, de acordo com FIORITO (1994), tem-se argamassa de cal, de cimento ou mista (de cal e cimento). A destinação das argamassas determina o tipo de aglomerante ou a mistura de tipos diferentes de aglomerantes. As argamassas de cimento são mais resistentes, porém de mais difícil trabalhabilidade, daí a origem das argamassas mistas, com adição de cal na tentativa de torná-las mais plásticas e de melhor acabamento.

Argamassas no modelo que se conhece hoje são utilizadas nas alvenarias, estruturais ou não, de tijolos ou blocos; nos contrapisos; no assentamento de



revestimentos cerâmicos em pisos ou paredes; no preparo de paredes e pisos para receberem revestimentos cerâmicos e outros; e, especialmente nos emboços e rebocos de paredes e tetos.

2.3.2 - Propriedades e características das argamassas

Argamassas de múltiplo uso; termo utilizado para designar aquelas que podem ser empregadas em assentamento de alvenaria de vedação, revestimento de paredes e tetos, e ainda para revestimento de pisos e contrapisos (SELMO *et al.*, 2002); têm seus constituintes (cimento, cal, areia) e sua composição determinados pela finalidade de emprego do produto, de modo a conferir propriedades necessárias ao bom desempenho final. Quanto ao tipo de aglomerante, por exemplo, as argamassas de cimento são utilizadas em casos em que uma maior resistência é exigida, principalmente em curto prazo. São, assim, utilizadas para chapisco, nos revestimentos onde as condições de impermeabilidade são importantes, em pisos cimentados onde se exige resistência mecânica e ao desgaste, entre outros. Já as argamassas de cal são geralmente utilizadas quando a necessidade de plasticidade é soberana e as condições de endurecimento são favoráveis (longo prazo). O acabamento proporcionado; esmerado, plano e regular; também é outro atrativo, por isso, estas argamassas são aplicadas, mesmo que em pequenas proporções, no assentamento de alvenarias de vedação e no revestimento de paredes e tetos.

Da mesma maneira, os traços empregados são proporcionados de forma a garantir certas características às argamassas, sejam em termos de aplicação (plasticidade, trabalhabilidade etc.) ou em termos de propriedades mecânicas e físicas (resistência à compressão, aderência, absorção de água etc.).

Deste modo, quando se propõe um trabalho envolvendo argamassas, é imperativo o perfeito entendimento da finalidade para a qual o produto está sendo desenvolvido, para em seguida determinar todos os parâmetros e propriedades necessários a um desempenho final satisfatório. Esta dissertação objetiva estudar



argamassas de múltiplo uso, enfocando seu uso para assentamento de alvenaria e revestimento de paredes e tetos. Inserido no contexto de reaproveitamento de resíduos industriais, estas argamassas, em princípio mistas, serão modificadas com a adição de RCR. Por conseguinte, serão discutidos alguns parâmetros de significativa importância dentro deste contexto.

Para assentamento de blocos de alvenaria de vedação, as argamassas devem possuir características apropriadas a este fim, tais como:

- Alta retenção de água;
- Baixo teor de ar incorporado;
- Aderência entre blocos;
- Resistência à compressão;
- Durabilidade.

As argamassas para revestimentos são utilizadas internamente para tetos e interna e externamente para paredes. São destinadas a proteger as paredes de tijolos ou blocos contra as infiltrações e a ação de outros fenômenos atmosféricos, aumentando a durabilidade por meio de um revestimento de superfícies cujo acabamento final não é considerado satisfatório, melhorando também o efeito estético. Para tanto é necessário que atendam aos seguintes requisitos de desempenho:

- Capacidade de absorver deformações (movimento térmico, higroscópico e diferencial entre os componentes);
- Aderência à base (que depende da capacidade do revestimento de absorver deformações, da rugosidade da base e dos cuidados com a sua preparação);
- Resistência à compressão e ao desgaste superficial;
- Baixa permeabilidade ou impermeabilidade à água;
- Baixa absorção de água;
- Durabilidade.



Os revestimentos de argamassa podem se constituir de uma ou duas camadas. De acordo com SABBATINI (1991), estas camadas recebem diferentes denominações: emboço (massa grossa), reboco (massa fina) ou massa única (emboço paulista). O emboço é base tanto para outros revestimentos como para uma segunda camada de revestimento de argamassa, o reboco. Quando o revestimento for de uma camada e tiver acabamento em pintura ele é denominado massa única. Desta forma os revestimentos de argamassa de uma camada se dividem em: massa única, quando tiverem acabamento em pintura e emboço quando forem base para outros revestimentos. Os revestimentos em duas camadas têm usualmente acabamento em pintura e são constituídos pelo emboço e pelo reboco. Pode-se, em ambos os casos, quando necessário, aplicar previamente uma camada de chapisco; que mesmo não sendo considerado uma camada de revestimento, é utilizado para melhorar as condições de aderência entre a base e a primeira camada.

Atualmente o emprego de revestimento em massa única é mais abrangente, principalmente em virtude da melhoria da qualidade das argamassas e do aprimoramento das técnicas de execução, o que possibilita um acabamento satisfatório em uma só camada, dando maior versatilidade no andamento das obras. Por se destinar à aplicação posterior de massa corrida e ou pinturas, a massa única não deve apresentar fissuras que comprometam visualmente o acabamento. Principalmente em paredes externas, tais defeitos podem propiciar a penetração de águas de chuva, vindo a prejudicar a aderência, a durabilidade do revestimento e a estanqueidade da vedação. Neste trabalho os revestimentos analisados serão executados em massa única.

2.3.3 - Prescrições normativas

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio das normas NBR 13281/2001 e NBR 13749/1996, prescreve as propriedades de interesse para argamassas mistas, possibilitando seu enquadramento em classes de acordo com os

valores destas propriedades. A tabela 2.1 apresenta as determinações da NBR 13281/2001 para a classificação de argamassas. Já a tabela 2.2 mostra os valores mínimos especificados para a resistência de aderência.

Características	Identificação	Limites (MPa)	Método
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$	NBR 13279
	II	$\geq 4,0$ e $\leq 8,0$	
	III	$> 8,0$	
Capacidade de retenção de água (%)	Normal Alta	≥ 80 e ≤ 90 > 90	NBR 13277
Teor de ar incorporado (%)	A	< 8	NBR 13278
	B	≥ 8 e ≤ 18	
	C	> 18	

Tab. 2.1 - Exigências mecânicas e reológicas para argamassas

Local		Acabamento	Ra (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 ou laminado	$\geq 0,30$
Teto		Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$

Tab. 2.2 - Limites de resistência de aderência (Ra) à tração para emboço em camada única

2.3.4 - Argamassa como incorporador de RCR

A opção pelo estudo de argamassas como matrizes para a incorporação do resíduo de corte de rochas se deu por vários motivos, a começar pelas possibilidades de usos deste produto. A argamassa é empregada, dentre outras finalidades, em pisos e contra-pisos, assentamento e revestimento; o que permite flexibilidade nas possibilidades de aproveitamento do RCR. Outro ponto é referente ao método de produção da argamassa, que é relativamente simples, principalmente quando comparado ao do concreto. Ainda comparando com o concreto, a argamassa tem



maior poder de incorporação de finos inertes sem alteração prejudicial de suas propriedades.

Outro fator importante a ser considerado é a abrangência de emprego da argamassa na construção civil. A grande maioria das obras de edificação, no Brasil e até mesmo no mundo, faz uso de argamassa, em alguma de suas formas de uso. Isto significa que, uma vez comprovada a viabilidade da proposta de argamassas com RCR, há um mercado com grande demanda e possibilidade de absorção do produto.

2.3.5 - Adições minerais

Antes de passar ao ponto central do trabalho, que corresponde à aplicação do RCR na produção de argamassa, há de se comentar, mesmo que de forma sucinta, qual o papel de uma adição mineral no desempenho do produto final. Assim, dedica-se este item a descrição dos efeitos provocados por essas adições nas propriedades de concretos e argamassas.

Hoje em dia já é de conhecimento comum que a aplicação de adições minerais em concretos e argamassas pode significar economia de cimento na mistura e melhoria nas propriedades tecnológicas (KARIMOV, 1996). Contudo, ainda não há um consenso sobre o que exatamente ocorre para que haja tais benefícios.

Para melhor compreender o mecanismo de ação dessas adições minerais é necessário saber que alguns minerais têm a capacidade de reagir com compostos da hidratação do cimento; são adições ativas, correspondendo a materiais pozzolânicos e materiais com propriedades cimentícias. METHA e MONTEIRO (1994) definem adições minerais ativas como *materiais silicosos finamente moídos, que podem ser naturais ou sub-produtos industriais, podendo ter atividade pozzolânica ou cimentante.*

NEVILLE (1997), com base na ASTM 618-94, transcreve o seguinte: *pozzolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, tem pouco ou nenhum valor cimentício, mas, quando finamente subdividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos*



com propriedades cimentícias. Como exemplo de adições pozolânicas, pode-se destacar a microssilica, cinza volante, metacaulinita, cinza de casca de arroz, cinza do bagaço da cana-de-açúcar etc.

Já as adições com propriedades cimentantes correspondem a materiais silicosos com grandes teores de cálcio, que têm reação de endurecimento na presença de água. O principal exemplo desta classe é escória de alto-forno, apesar de existirem outros menos difundidos, como, por exemplo, um tipo especial de cinza volante com consideráveis teores de cal em sua constituição.

Existem ainda aquelas adições que são inertes aos hidratos do cimento, tendo um papel principal de enchimento, de onde surge seu nome, fíler. Segundo PETRUCCI (1993), *os fíleres são agregados muito finos, compreendidos entre 5 a 75 µm, que podem ser utilizados em concreto asfáltico, adição a cimentos, adição a concretos, entre outros.*

NEVILLE (1997) define fíler como *um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland que, devido às suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, como trabalhabilidade, densidade, segregação, permeabilidade, capilaridade, exsudação ou tendência à fissuração.*

Já VISOCKII (1994) considera que fíler para materiais cimentícios é *o material natural ou de origem industrial em condição dispersiva, constituído de compostos inorgânicos, insolúvel em água e com partículas menores que 0,16 mm.* Exemplos clássicos de fíleres são alguns materiais carbonáticos, pó de quartzo, pó de pedra, entre outros.

Quando se consideram as adições ativas, principalmente as pozolânicas, a melhoria no desempenho dos materiais cimentícios está intimamente ligada à reação pozolânica, na qual é consumido o hidróxido de cálcio, originando cristais de C-S-H secundários, que apesar de menos densos que o C-S-H primário, são mais resistentes e ocupam um volume maior que a portlandita (CH). Com isso há uma diminuição da



porosidade e possivelmente da permeabilidade, seguida de um aumento da resistência. METHA e MONTEIRO (1994) enfatizam que o emprego dessas adições minerais no concreto promove uma melhoria no seu desempenho. Isso inclui aumento da resistência à fissuração térmica devido a redução do calor de hidratação, aumento das resistências e redução da permeabilidade por refinamento dos poros, e uma durabilidade maior a ataques químicos, tais como águas sulfatadas e expansão álcali-agregado.

Contudo, para não fugir do foco principal do trabalho, atém-se às considerações que envolvem exclusivamente a influência das adições minerais no que se refere ao seu comportamento como fíler.

Assim, RAMACHANDRAN *et al.* (1988), considera que as melhorias nas propriedades de compostos de cimento estão relacionadas aos efeitos físicos originados por fenômenos superficiais dessas partículas, que muitas vezes são mais finas e com granulometria mais bem distribuída que os grãos do cimento ou mesmo de alguns produtos de hidratação.

A dosagem de aditivos minerais exige critérios porque é importante que os grãos mais finos (microfíler) não envolvam a superfície das fases geradas na hidratação, nem interfiram na formação das ligações entre os cristais na matriz (KAPRIELOV, 1995). Nesta linha de raciocínio, ZOTKIN (1994) mostrou em suas pesquisas que concretos com elevados teores de fíler têm redução de resistência, devida à deterioração da aderência entre matriz e agregados.

Já foi constatado que a adição de fíler aumenta a resistência inicial de concretos e argamassas. Este fato, segundo LARBI e BIJEN (1990) se explica pela capacidade dos microfíleres de formarem pontos de nucleação do C-S-H, o que faz acelerar a cristalização e aumentar a taxa de endurecimento.

Completando essa teoria, KRASNII (1987) e NEVILLE (1997) explicam que o aumento de resistência é devido à formação dos pontos de nucleação e cristalização na



zona de transição (interfase matriz-agregado). A formação desses pontos de nucleação acelera a hidratação do cimento, o que pode reduzir o tempo de pega.

VLASOV (1988) estudou o comportamento de concreto com adição de fíleres ultrafinos (Cinza volante e areia quartzosa moída), de onde pôde concluir que a natureza do efeito do fíler é baseada em fenômenos físico-químicos que, de acordo com seu entendimento, têm origem na energia superficial das micro-partículas.

Adições de partículas finas na mistura do concreto colaboram para a diminuição da porosidade, o que pode contribuir para reduzir a demanda de água, fato reportado por BERRY e MALHOTRA (1980) que comprovaram que a substituição de cimento por cinza volante em 30% reduz a demanda de água do concreto em 7%. Esses mesmos autores notaram que o consumo de água diminuía de 5 a 10% quando se adicionavam 33, 67 e 133% de cinza volante em argamassas com igual consistência.

DANILOVICH e SKANAVI (1988) observaram um aumento de trabalhabilidade devido ao formato esférico das partículas do fíler, que provoca uma redução do atrito interno dos agregados e outras partículas. Este autor considera ainda outro motivo para a melhoria da trabalhabilidade. Como a maioria dos fíleres tem massa específica aparente menor que a do cimento, há um aumento de volume de pasta, o que aumenta a trabalhabilidade.

Alguns pesquisadores, como AL-DZUNEID (1994), consideram que, por meio de critérios de dosagem rigorosamente científicos, os fíleres podem ser utilizados como um tipo de plastificante mineral. Para que adições minerais possam atuar como plastificante, é necessário que estas sejam formadas somente de elementos que tenham um estado coloidal. Assim, quanto maior o grau de dispersão, maior a quantidade de água retida na superfície dos grãos e maior a plasticidade da mistura. Por outro lado, a atuação destas forças de absorção de água faz com que a demanda de água aumente para elevados teores de adição, principalmente para resíduos ultrafinos.



Um outro ponto negativo, relacionado a adições de elevados teores de finos, foi verificado por CARETTE *et al.* (1993) e mais tarde por BILODEAU e MALHOTRA (1994). Eles perceberam que apesar de uma aceitável plasticidade (que aumenta com o incremento de finos), os compostos cimentícios assim constituídos não apresentam boa resistência, principalmente a poucas idades. NAIK *et al.* (1994) demonstraram que concretos com altos teores de finos apresentam menor resistência a abrasão que concretos sem adição

É importante ressaltar que um dos principais aspectos a ser considerado com adição de fíler, quanto à melhoria do desempenho de argamassas e concretos, é a influência desses minerais na porosidade do produto final. Há uma redução dos tamanhos iniciais dos poros, gerando a formação de uma matriz com poros capilares de dimensões menores. OLGINSKII (1990) relatou que fileres muito finos, principalmente pós de rocha (granito, arenito, calcário, xisto), contribuem para o aumento da resistência à água e diminuição da absorção e retração, por causa de uma formação mais densa dos hidratos do cimento no concreto.

Em resumo, os aditivos minerais trazem benefícios nos materiais cimentícios tanto no estado fresco quanto endurecido. Assim, pode-se de certa maneira afirmar que a incorporação de adições minerais melhora várias propriedades do concreto no estado fresco, conferindo aumento da coesão (WALLEVIK *et al.*, 1995), diminuição da segregação e redução da exsudação (GONÇALVEZ, 2000), podendo ou não aumentar o consumo de água (certos teores de adição diminuem a demanda de água por causa do efeito plastificante dos finos, enquanto grandes volumes de adição aumentam a necessidade de água, devida ao aumento da superfície específica). Destaca-se ainda a formação dos pontos de nucleação, acelerando o processo de endurecimento. Já no estado endurecido, a maior contribuição dos fílers está na diminuição da porosidade, permeabilidade e no refinamento da estrutura de poros. A alta finura contribui para uma maior densificação da zona de transição e da matriz cimentícia (GONÇALVEZ, 2000), o



que promove um aumento na aderência entre matriz e agregados, e um ganho de resistência à compressão.

3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 - Resíduo de corte de rochas – Caracterização

3.1.1 - Procedência

Como mencionado anteriormente, o resíduo de corte de rocha utilizado neste trabalho é proveniente da cidade de Santo Antônio de Pádua, no interior do estado do Rio de Janeiro. Foi coletado na Serraria “Granito Olho de Pombo” situada na localidade de Mangueirão, distrito do município.

3.1.2 - Coleta

O material foi coletado diretamente da área de deposição do material bombeado do fundo dos tanques de decantação, com auxílio de pá e enxada e, posteriormente, colocado em sacos plásticos. A figura 3.1 mostra esta operação.



Fig. 3.1 - Foto da coleta de material para estudo



3.1.3 - Características do material *In Situ*

O RCR, devida à grande finura, tem grande capacidade de manutenção de umidade, sendo assim, de delicado manuseio durante a coleta. Isto porque os locais de disposição são cavas de grandes profundidades, o que gera um risco iminente para quem anda sobre este material, pois mediante pequenas vibrações o material se liquefaz, tornando-se uma espécie de “lama movediça”.

O teor de umidade encontrado *in situ*, medido em laboratório, por meio da diferença entre as massas do resíduo antes e depois da secagem em estufa, chega a valores superiores a 40%, mesmo em períodos quentes. Isto torna necessária a secagem do material antes de iniciarem as etapas seguintes. Este procedimento e os demais para a preparação do resíduo são descritos no próximo item.

3.1.4 - Processamento

Após a chegada em laboratório, o resíduo passou por um processo de beneficiamento, antes de seu uso nas pesquisas. Esse processamento constituiu-se das etapas de secagem, moagem e peneiramento, conforme descrito a seguir.

Todo o material foi primeiramente seco em estufa a uma temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante um período de 24h. O RCR foi disposto em tabuleiros de alumínio em camadas finas, para facilitar a evaporação da água. Deste processo resultou um material em forma de torrões.

O processo de moagem deu-se em duas etapas: a primeira, manual, correspondeu ao destorroamento feito com o uso de almofariz de porcelana e pistilo, de onde se obtinha um material ainda com torrões, porém com diâmetros menores. Para se ter noção da distribuição granulométrica deste material após destorroamento foi feita uma análise do resíduo passado na peneira de 100 malhas (ABNT 100), de abertura de 0,15 mm. A figura 3.2 mostra a curva granulométrica obtida de acordo com o procedimento da NBR 7181/1984 MB 32 para este material.

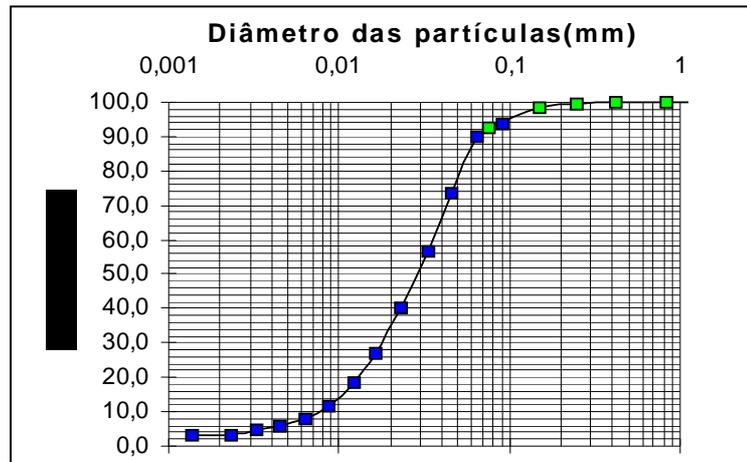


Fig. 3.2 - Distribuição granulométrica do resíduo destorroado e passado na peneira ABNT 100

A superfície específica do resíduo, obtida pelo método de Blaine (NBR NM 76/1998) ficou em torno de $340 \text{ m}^2/\text{kg}$, da mesma ordem de grandeza da área específica do cimento. A massa específica teórica (NBR 6508/1984) foi de $2,73 \text{ g}/\text{cm}^3$, valor da grandeza de rochas utilizadas na produção de britas.

Contudo, como falado anteriormente, somente o processo de destorroamento não é capaz de promover uma homogeneização satisfatória na granulometria do RCR, existindo ainda possibilidade de aumento de sua finura. Por isso, posteriormente, o material foi levado a um moinho de bolas (figura 3.3) durante o período necessário para que fossem completados 600 ciclos, aproximadamente 20 minutos.



Fig 3.3 - Moinho de bolas

Depois da moagem, o resíduo já se apresentava menos grosseiro, porém, como é de se esperar é impossível homogeneizar o RCR somente com a moagem, pois ainda permanecem, mesmo poucas, partículas de dimensões relativamente grandes. Assim, a etapa final do processo de beneficiamento foi o peneiramento, no qual o resíduo foi submetido a um regime de vibração num peneirador mecânico, figura 3.4, utilizando uma peneira de 50 malhas (ABNT 50) e correspondente abertura de 0,30 mm. Com isso resultava um material sem partes grosseiras.



Fig 3.4 - Peneirador mecânico

O processamento aqui descrito corresponde ao aplicado ao resíduo de corte de rochas utilizado durante todo o trabalho. As definições do número de ciclos de moagem e da abertura da peneira foram baseadas em estudos de granulometria e de superfície específica, que são apresentados nos itens que se seguem.

3.1.5 - Programa experimental – Parte I

Antes de iniciar os estudos relativos ao comportamento de argamassas com a adição de resíduo de corte de rochas realizou-se a etapa da determinação das características físicas e químicas deste resíduo. Isto porque o conhecimento de algumas destas propriedades permite avaliar melhor a potencialidade deste material

como adição mineral. As análises química e mineralógica podem fornecer informações pertinentes sobre a reatividade do material, bem como a existência ou não de risco e/ou restrição de seu emprego. Já as características físicas, tal como a finura, podem definir a função deste produto na argamassa (agregado, fíler, microfíler), assim como o grau de incorporação.

Nos itens a seguir apresenta-se a primeira parte do programa experimental que consiste na caracterização do resíduo de corte de rochas.

3.1.5.1 - Composição química

Para a determinação da composição química do RCR utilizou-se a técnica de análise química por fluorescência de raios-X de energia dispersiva (“EDX”), em um equipamento Shimadzu EDX-700 (figura 3.5), sob a condição de ajuste de “vácuo dois canais”. Amostras foram analisadas na forma de pó, com o auxílio de um porta-amostra. Para tanto, o RCR passou por um processo de preparo de amostras, correspondendo à secagem em estufa a 110°C e posterior peneiramento na malha ABNT 200 (abertura de 0,075 mm).



Fig. 3.5 - Equipamento Shimadzu EDX-700 LECIV/CCT/UENF



A tabela 3.1 apresenta o resultado da análise por “EDX”, juntamente com os resultados encontrados por meio de análise química (abertura de amostra) realizada no CETEM (Centro de Tecnologia Mineral). Nota-se que a constituição química do resíduo encontrada pelos dois métodos foi bastante próxima.

Elementos	“EDX”	Análise Química
SiO ₂	64,95%	67,14%
Al ₂ O ₃	16,55%	14,92%
K ₂ O	9,16%	5,18%
Fe ₂ O ₃	3,70%	4,40%
CaO	2,81%	1,91%
Na ₂ O	-	2,93%
SO ₃	1,55%	-
TiO ₂	0,58%	0,73%
BaO	0,51%	-
MgO	-	0,73%
Outros	0,20%	-
PF	-	0,50%

Tab. 3.1 - Análise da constituição química do RCR

Dois pontos importantes podem ser destacados a partir dos resultados encontrados: o primeiro diz respeito à forte presença de silício (SiO₂) e alumínio (Al₂O₃), elementos que nestas proporções podem ser indício primário de atividade pozolânica; o segundo está relacionado à presença de ferro que, se não estiver na forma mineral, pode causar problemas quanto à oxidação.

Tanto a possibilidade de pozolanicidade quanto o potencial de oxidação podem ser verificados com o auxílio de interpretações cristalográficas, conforme discutido adiante.

3.1.5.2 - Composição mineralógica (“XRD”)

Amostra do RCR foi caracterizada cristalograficamente por meio de difração de raios-X em um difratômetro Freiburger Präzisionsmechanick GmbH, modelo URD 65, com radiação Cu_{kα}, operando a 35KV e 40mA. Esta análise foi realizada no Laboratório

de Ciências Físicas (LCFIS – UENF). A preparação da amostra envolveu secagem em estufa à 110°C e posterior peneiramento na malha ABNT 325, abertura de 0,044mm. A figura 3.6 mostra o espectro obtido.

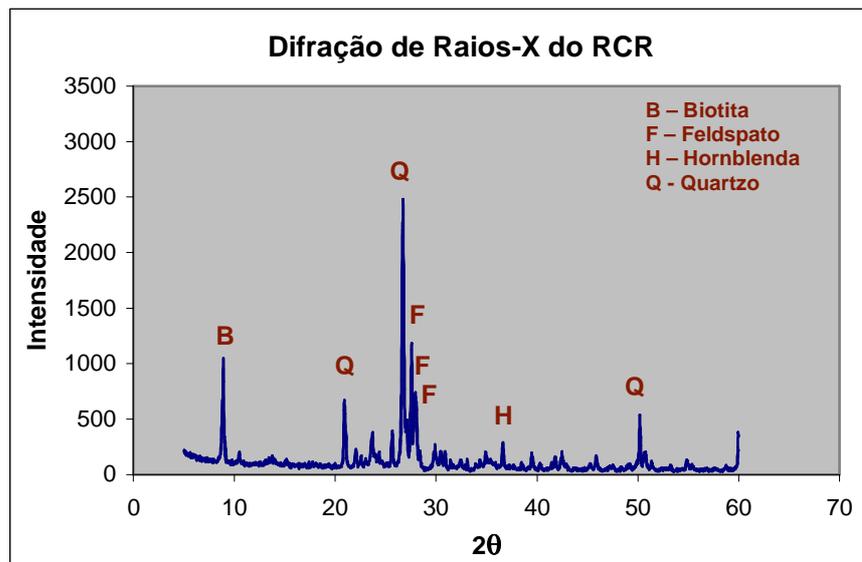


Fig. 3.6 - Espectro de difração de raios-X ("XRD") do RCR

A análise das formas cristalinas representadas pelos picos de difração possibilitou a identificação de biotita, quartzo, hornblenda e feldspato (anortita, albita e microclina). A interpretação dos dados obtidos gerou resultados bastante similares aos encontrados por ALMEIDA (2001), que também identificou a presença desses mesmos materiais por meio de análises químicas e mineralógicas. Entretanto, a identificação destas formas cristalinas elimina a hipótese de atividade pozolânica, já que o material não se encontra na forma amorfa.

3.1.5.3 - Risco de utilização

A análise da periculosidade do resíduo de corte de rochas foi realizada conforme as prescrições da NBR 10004/1987, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas.



Para um material de origem rochosa e que, como mostrado na análise química e cristalográfica, não incorporou nenhuma substância danosa durante o processo do qual se origina, torna-se irrelevante a possibilidade deste resíduo apresentar características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, bem como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água características que enquadrariam o resíduo na classe I (perigoso) ou classe II (não-inerte).

Assim, sabendo que quando este tipo de material se encontra em contato com água, seus constituintes não se solubilizam a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor, conforme define a ABNT, pode-se enquadrar o RCR na classe III (Inertes). Isto significa que o resíduo não apresenta risco à saúde pública nem ao meio ambiente, quando é manuseado e armazenado de forma adequada.

3.1.5.4 - Potencial de oxidação

Com base no conhecimento de todo processo de beneficiamento de rochas ornamentais, responsável pela geração dos resíduos de corte de rochas em estudo, pode-se afirmar previamente que a possibilidade deste material ser susceptível à oxidação é pequena. Isto porque não há indício de utilização de material abrasivo neste processo. Geralmente, o material abrasivo é utilizado no corte ou no polimento das rochas, sendo composto, dentre outros elementos, de granalha, fração metálica que apresenta uma quantidade de partículas magnéticas, susceptíveis à oxidação.

Contudo, como a constatação apresentada é apenas teórica e a existência de ferro no resíduo foi verificada na análise química, passa-se ao estudo mais aprofundado da possibilidade de oxidação do RCR.

3.1.5.4.1 - Análise por raios-X (“XRD”)

Segundo GONÇALVEZ (2000), resultados de análises “XRD” podem revelar a presença ou não de alguma fração metálica formada de íons ferro, provavelmente na

forma de hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$). Este composto, em meio a condições adversas, presença da água e oxigênio, passa de um estado menos oxidado para um estado mais oxidado, formando, no final do processo de oxidação o óxido de ferro (Fe_3O_4) ou (Fe_2O_3), dependendo da quantidade de oxigênio disponível. As figuras 3.7 e 3.8 mostram o difratogramas de raios-X obtidos de amostras de RCR coletadas de uma mesma cava de deposição em períodos distintos: a primeira pouco tempo após sua retirada do tanque de decantação e a segunda aproximadamente quatro meses depois.

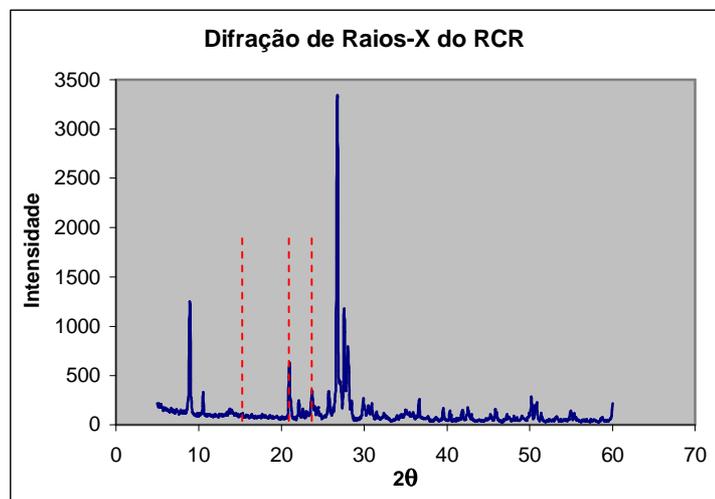


Fig. 3.7 - Espectro de difração de raios-X ("XRD") da amostra recém retirada do tanque de decantação

As linhas vermelhas representadas na figuras 3.7 ilustram as posições do padrão de picos de difração do hidróxido de ferro. Isso comprova a ausência deste composto no resíduo.

Para reforçar a justificativa inicial do baixo potencial de oxidação do RCR, também foram plotadas na figura 3.8 linhas indicando os padrões de picos de difração das formas oxidadas do ferro.

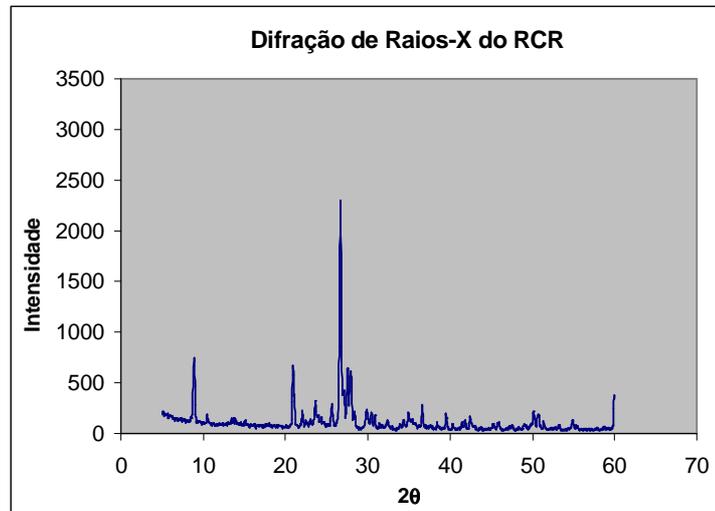


Fig. 3.8 - Espectro de difração de raios-X (“XRD”) da amostra 4 meses após sua retirada do tanque de decantação

As linhas de cor vermelha indicam os padrões do óxido de ferro (Fe_3O_4) e as pretas do (Fe_2O_3). Mais uma vez foi demonstrada a ausência destas formas de ferro.

Os picos existentes nas figuras 3.7 e 3.8 são os mesmos já identificados na figura 3.6

3.1.5.4.2 - Verificação visual

Das mesmas porções de RCR utilizados na verificação do potencial de oxidação por meio da análise por “XRD” foram retidas duas amostras, uma de cada tipo, para a identificação de uma possível evolução do processo de oxidação, quando estas amostras são submetidas durante um certo período a condições de molhagem e secagem natural.

A metodologia de execução deste procedimento é descrita a seguir: a amostra, acondicionada em recipiente aberto é inundada com água e disposta em um ambiente a 23°C e 65% de umidade relativa até que toda a água se evapore. Esta seqüência é repetida, impondo ao material um regime transiente de umidade, o que corresponde à condição mais favorável à oxidação. Regularmente é feita a verificação visual para

observar uma possível mudança de coloração, característica da presença de material oxidado.

Para o material em estudo este procedimento transcorreu por um período de seis meses e durante o qual nenhum sinal visível de oxidação, pigmentação avermelhada, foi verificado. As figuras 3.9 e 3.10 mostram, respectivamente, o aspecto do resíduo antes e depois do período de ciclos de molhagem e secagem.



Fig. 3.9 - RCR antes dos ciclos de molhagem e secagem



Fig. 3.10 - RCR depois dos ciclos de molhagem e secagem

A única diferença perceptível é a mudança de tonalidade do resíduo, passando a ser pouco mais escuro que anteriormente, provavelmente, devida à própria aceleração do processo de envelhecimento do material, provocada pela condição imposta.

3.1.5.4.3 - Verificação da origem do ferro

A presença do ferro na constituição de resíduo de corte de rochas, comprovada pelas análises químicas, pode ser justificada por meio da constituição mineralógica das rochas de origem, o que reforçaria a teoria de baixo potencial de oxidação, já que o ferro é de origem mineral.

Os gnaisses são rochas usualmente quartzo-feldspáticas, podendo ou não ser milotizadas, como no caso em estudo. Seus principais minerais, de acordo com ALMEIDA (2001), são: quartzo; feldspato potássico (microclina), cálcico (anortita) e



sódico (albita); anfibólio (hornblenda) e mica (biotita). A composição química desses minerais é a seguinte:

- Quartzo - SiO_2 (TEIXEIRA *et al.*, 2001);
- Microclina – KAlSi_2O_8 (TEIXEIRA *et al.*, 2001);
- Anortita – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (TEIXEIRA *et al.*, 2001);
- Albita – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (TEIXEIRA *et al.*, 2001);
- Hornblenda – $\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg},\text{Fe})_4(\text{Al},\text{Fe},\text{Ti})\text{AlSi}_8\text{O}_{22}(\text{O},\text{OH})_2$ (BRANCO, 1979) e
- Biotita – $\text{K}(\text{MgFe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ (DANA e HURLBUT, 1976).

Está nestes dois últimos minerais, a hornblenda e a biotita, a provável origem do ferro do RCR. De acordo com análise mineralógica feita por ALMEIDA (2001) em rejeitos de pedreiras da região, esses minerais correspondem à cerca de 12% da composição da rocha, porém este percentual pode variar no resíduo, dependendo de sua origem. Contudo, é bastante coerente aos resultados das análises químicas que identificaram cerca de 4% de ferro.

3.1.5.5 - Estudo de moagem e as características físicas

Durante o procedimento de estudo de moagem, algumas características físicas do resíduo de corte de rochas foram identificadas, tais como: massa específica teórica, granulometria, finura e porosidade.

A massa específica teórica foi obtida por meio do método da NBR 6508/1984. De acordo com a metodologia, o material em pó e seco em estufa é inserido no frasco de Le Chatelier, provocando uma variação no volume do líquido nele contido. Promovem-se então movimentos pendulares no frasco, de forma a retirar o ar contido no RCR. Dividindo-se a massa de pó inserido pelo volume de líquido deslocado pelo mesmo obtém-se a massa específica teórica do material. Neste caso, o valor encontrado foi $2,73 \text{ g/cm}^3$.

A determinação da granulometria, finura e porosidade ocorreu simultaneamente ao estudo de moagem, por meio do qual procurou-se estabelecer o tempo ideal em

moinho de bolas (figura 3.3) para se obter uma boa resposta de finura, porém com baixo consumo energético.

Os períodos de moagem estabelecidos foram: 300 ciclos (≈ 10 min), 600 ciclos (≈ 20 min), 900 ciclos (≈ 30 min), 1200 ciclos (≈ 40 min) e 1500 ciclos (≈ 50 min). Em cada passo eram retiradas amostras para a determinação de suas características.

Para a granulometria, foram montadas curvas de distribuição de diâmetros equivalentes, de acordo com os percentuais retidos em cada malha do processo de peneiramento mecânico e dos valores obtidos nos ensaios de sedimentação.

A finura foi determinada por dois métodos: o primeiro, já citado, foi a permeabilidade ao ar, método de Blaine (NBR NM 76/1998), que mede a superfície específica do material por meio de relações com o tempo necessário para o ar atravessar uma coluna de material em pó. O equipamento utilizado para tanto é o Permeabilímetro de Blaine (figura 3.11).

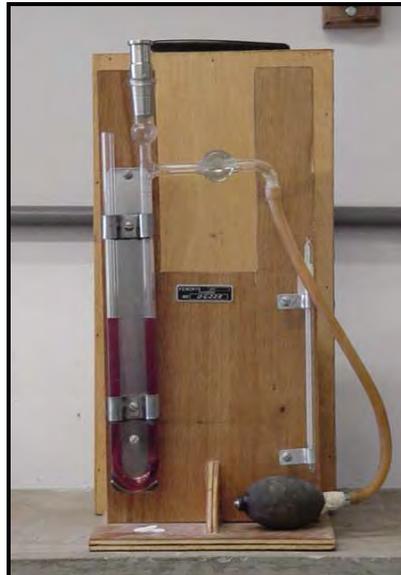


Fig 3.11 - Permeabilímetro de Blaine

Este método é utilizado principalmente para cimentos, por ser de certa forma um ensaio simples e rápido, porém, de acordo com MOTHÉ (2004), não é muito preciso, pois sofre a influência de inúmeros fatores, como a forma variável das partículas e

acamamento tortuoso. Também não fornece valores confiáveis quando utilizado para determinar superfícies específicas maiores que 500 m²/Kg. Contudo, a obtenção da finura por este método é importante, pois permite a comparação de grandeza com a finura do cimento.

O segundo método é o BET (Brunauer, Emmett e Teller), que baseado em formulações matemáticas que descrevem a adsorção das moléculas de um gás pelas superfícies dos grãos de um material finamente dividido, calcula, de forma mais precisa, a superfície específica e porosidade de um material, dentre outras características. Os ensaios das amostras de RCR foram realizados no setor de Cromatografia do Laboratório de Ciências Químicas (LCQUI - CCT - UENF). O equipamento utilizado foi o Quantachrome Instruments modelo Autosorb-1 e o gás, nitrogênio.

Abaixo são mostradas as curvas granulométricas do resíduo de corte de rochas em cada fase da moagem: 300 ciclos (figura 3.12), 600 ciclos (figura 3.13), 900 ciclos (figura 3.14), 1200 ciclos (figura 3.15) e 1500 ciclos (figura 3.16). Juntamente são apresentados os valores de porosidade (BET) e finura (Blaine e BET) correspondentes.

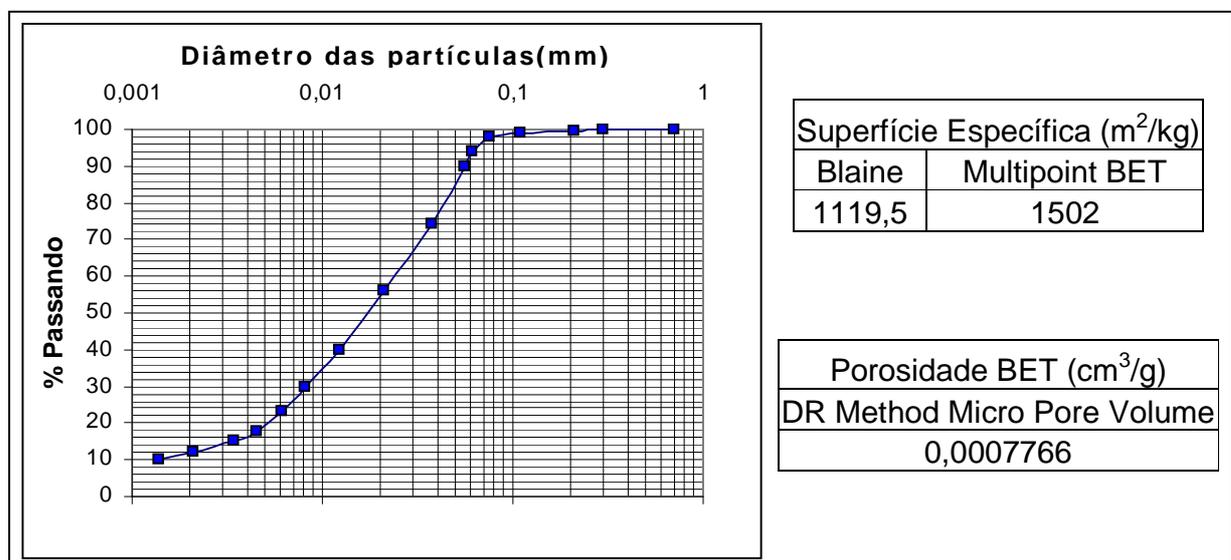


Fig. 3.12 - Curva granulométrica, superfície específica e porosidade do RCR moído a 300 ciclos

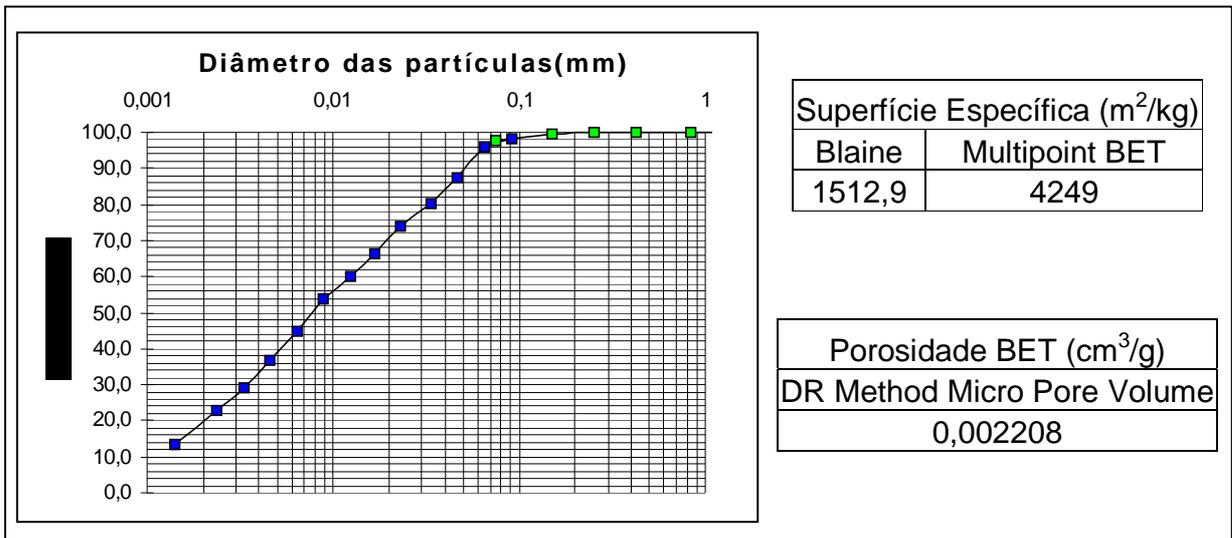


Fig. 3.13 - Curva granulométrica, superfície específica e porosidade do RCR moído a 600 ciclos

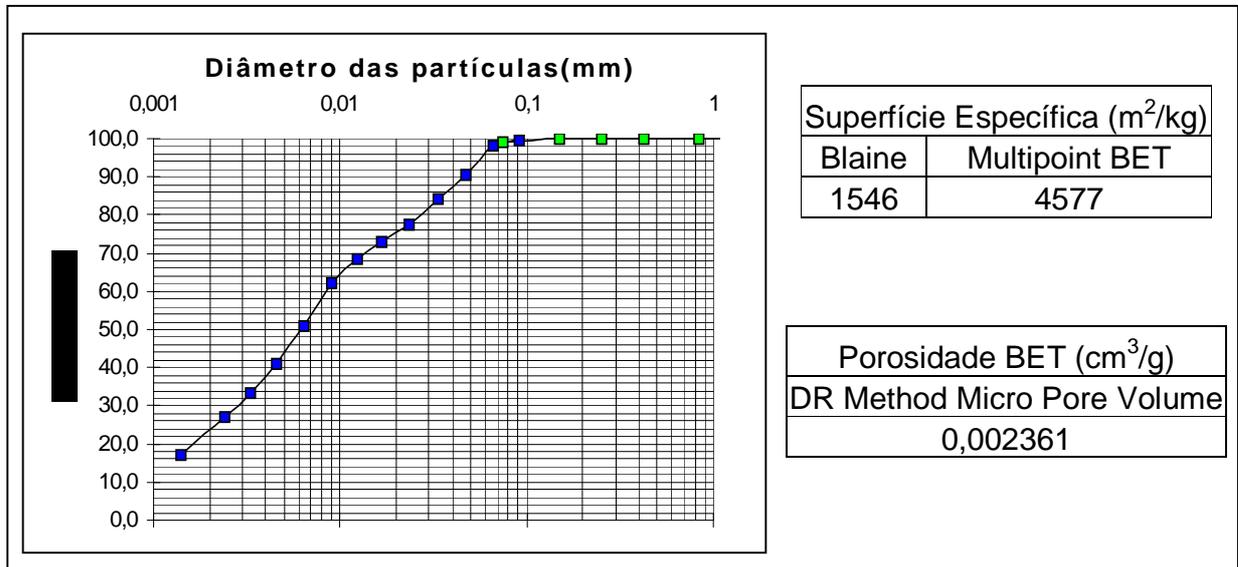


Fig. 3.14 - Curva granulométrica, superfície específica e porosidade do RCR moído a 900 ciclos

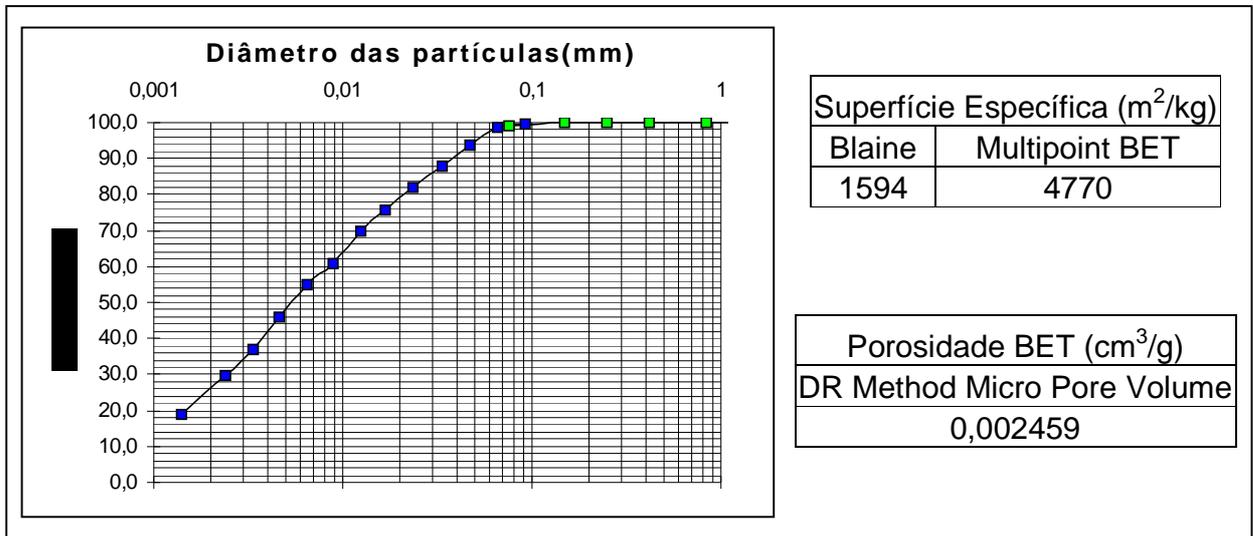


Fig. 3.15 - Curva granulométrica, superfície específica e porosidade do RCR moído a 1200 ciclos

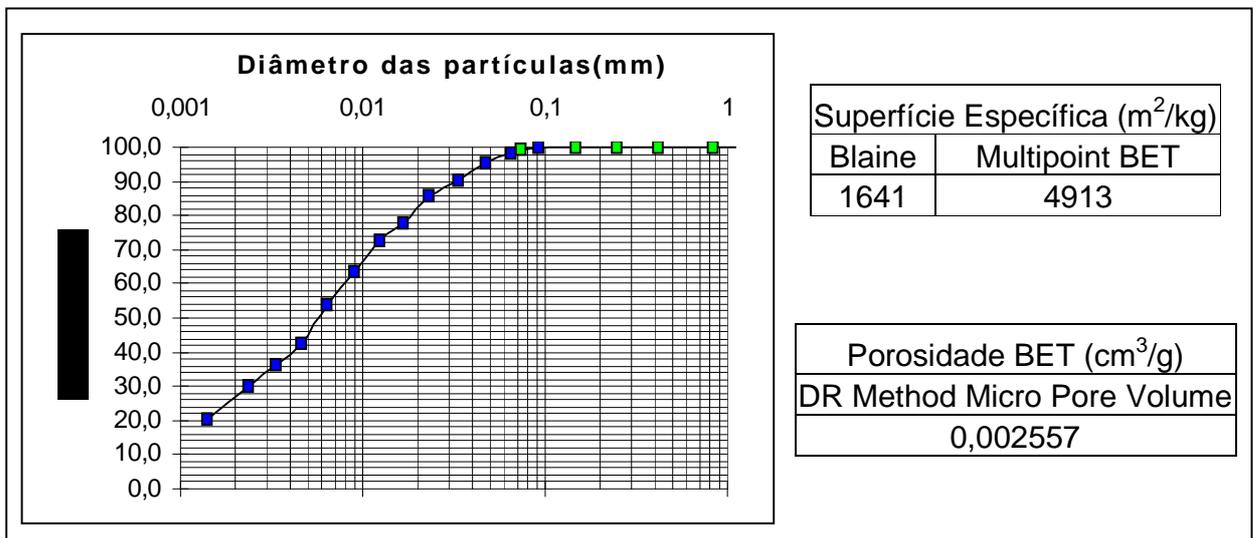


Fig. 3.16 - Curva granulométrica, superfície específica e porosidade do RCR moído a 1500 ciclos



A diferença entre os valores de superfície específica pelo método Blaine e BET já era esperada e se manteve coerente no decorrer do processo de moagem, exceto para o primeiro passo, 300 ciclos, no qual a diferença era bem pequena. Isto pode ser explicado com base na teoria de que quanto menor o valor de área específica, melhor é a precisão do Blaine e menor a divergência com o BET.

Houve uma significativa alteração nas curvas granulométricas, porosidade e superfície específica do RCR, entre o destorroamento e a primeira moagem (300 ciclos), e entre esta última e a segunda moagem (600 ciclos). Daí em diante, a diferença entre os outros tempos de moagem foi pequena. Por exemplo, tomando o diâmetro de 0,044 mm, que corresponde à peneira ABNT 325, o aumento no total de partículas menores que esta malha é algo em torno de 10%, quando se passa de zero para 300 ciclos e deste para 600 ciclos. Nos demais intervalos o aumento fica em torno de 2%. Fato similar ocorre com os outros parâmetros. Isto justifica o tempo de 600 ciclos adotado para a moagem do resíduo utilizado neste trabalho.

Depois da moagem, como já comentado anteriormente, o procedimento que encerra o beneficiamento do resíduo é o peneiramento mecânico na malha ABNT 50, com abertura de 0,15 mm. Como pode ser visto nas curvas granulométricas, todo o RCR passa por esta malha (considerando o diâmetro D_{80} percebe-se que 80% do material tem diâmetro menor que 0,06 mm, mesmo para 300 ciclos). Esta etapa é então implementada somente para a eliminação de alguma possível partícula ou contaminação grosseira.

3.2 - Utilização do resíduo de corte de rochas em argamassas

3.2.1 - Materiais

Para realização do programa experimental deste trabalho, centrado no estudo do desempenho do resíduo de corte de rocha como produto constituinte de argamassas, foram utilizados, além do próprio RCR, os componentes típicos de argamassas mistas



convencionais (cimento, cal e areia). As características desses materiais são descritas a seguir.

3.2.1.1 - Cimento

O cimento empregado na produção das argamassas foi o cimento Portland composto com adição de escória de alto-forno (CP II E 32), da marca “Votoran”, por ser o mais utilizado na região. Suas características físicas são: massa específica teórica de $2,92 \text{ g/cm}^3$ (NBR 6474/1984) e superfície específica Blaine (NBR NM 76/1998) de $342 \text{ m}^2/\text{Kg}$. A tabela 3.2 mostra os resultados da análise química, feita por meio da técnica de “EDX”.

Elementos	Percentual
CaO	70,21
SiO ₂	17,03
Al ₂ O ₃	5,89
SO ₃	3,38
Fe ₂ O ₃	1,82
K ₂ O	0,86
TiO ₂	0,44
Outros	0,38

Tab. 3.2 - Constituição química do cimento

3.2.1.2 - Cal

A cal usada é do tipo CH III, do fabricante “Ical”, comumente comercializada na região. Possui massa específica teórica de $2,24 \text{ g/cm}^3$ (NBR 6474/1984) e superfície específica Blaine de $703 \text{ m}^2/\text{Kg}$ (NBR NM 76/1998). Os resultados da análise química podem ser vistos na tabela 3.3.



Elementos	Percentual
CaO	96,24
SiO ₂	1,35
SO ₃	1,04
K ₂ O	0,95
Fe ₂ O ₃	0,18
Outros	0,24

Tab.3.3 - Análise por EDX da cal

3.2.1.3 - Agregado miúdo

Foi utilizada areia quartzosa do rio Paraíba do Sul, por ser na prática a mais usualmente empregada no preparo de argamassas na região. O material, caracterizado conforme recomendações da ABNT, possui módulo de finura de 2,65 (NBR 7211/1983); massa específica aparente no estado solto de 1,39 g/cm³ (NBR 7251/1982) e massa específica teórica de 2,65 g/cm³ (NBR 6508/1984). As características granulométricas são apresentadas na tabela 3.4 e figura 3.17.

Número da peneira (ABNT)	Abertura da peneira (mm)	Percentual retido acumulado
8	2,4	0
16	1,2	12
30	0,6	60
50	0,3	94
100	0,15	99
200	0,075	100

Tab. 3.4 - Distribuição granulométrica da areia

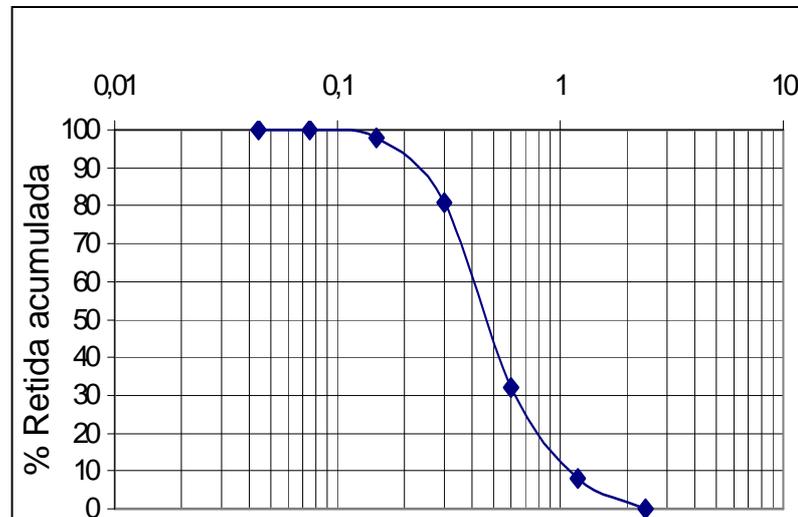


Fig. 3.17 - Curva granulométrica da areia

3.2.1.4 - RCR

As características do resíduo de corte de rochas utilizado em todo o programa experimental foram descritas no capítulo anterior. De maneira resumida, pode-se dizer que é um material em forma de pó, fino, com superfície específica de 1512,9 m²/kg (Blaine) e 4249 m²/kg (BET), porosidade de 0,002208 cm³/g (BET) e massa específica teórica de 2,73 g/cm³.

3.2.2 - Programa experimental – Parte II

Após a caracterização do resíduo de corte de rochas e a definição, de acordo com suas potencialidades, da técnica a ser empregada no estudo do aproveitamento deste resíduo como material de construção, passou-se aos estudos preliminares da viabilidade técnica do uso do RCR na produção de argamassas. Isto ocorreu em dois estágios: a avaliação do comportamento físico-mecânico, segundo as prescrições da ABNT, e a análise do comportamento em condições alternadas de temperatura e umidade. Posteriormente, os traços de argamassas utilizados no estudo de desempenho foram determinados através de um estudo de dosagem.



Os ensaios preliminares de viabilidade consistiram na avaliação do desempenho do resíduo de corte de rocha como material constituinte de argamassas, por meio da substituição da cal pelo RCR em três teores (50, 75 e 100% em massa). Assim, foram utilizados como base dois traços de argamassa, convencionalmente empregados na região. O primeiro traço, 1:1/2:5 (cimento:cal:areia), corresponde a uma argamassa de assentamento de blocos de alvenaria. O segundo, traço 1:2:9 é uma mistura para revestimento de paredes e tetos.

Para o traço 1:1/2:5, a argamassa de referência, isto é, sem resíduo, é denominada AR e as com substituições foram designadas A50, A75 e A100, de acordo com o percentual de substituição. Para o traço 1:2:9 foi adotada uma denominação similar, sendo RR a amostra referência e R50, R75 e R100 as com substituições. A tabela 3.5 apresenta um resumo das substituições para ensaios.

Tipo de Argamassa	Traço	Substituição da cal pelo resíduo (%)	Denominação
Assentamento de Blocos de Alvenaria	1:1/2:5	0	AR
		50	A50
		75	A75
		100	A100
Revestimento de Paredes e Tetos	1:2:9	0	RR
		50	R50
		75	R75
		100	R100

Tab. 3.5 - Nomenclatura das argamassas de substituição

3.2.2.1 - Ensaios físico-mecânicos

O procedimento de execução dos ensaios seguiu as determinações da Norma Brasileira que especifica e classifica as argamassas mistas industriais (NBR 13281/2001). Para o enquadramento das argamassas nos limites estabelecidos pela norma para comercialização, as propriedades avaliadas são a resistência à compressão



(NBR 13279/1995), a capacidade de retenção de água (NBR 13277/1995) e o teor de ar incorporado (NBR 13278/1995), apresentadas na tabela 2.1.

Em todos os ensaios, as argamassas foram dosadas com teores de água de acordo com a consistência padrão em mesa de abatimento (flow table), normalizada pela NBR 13276/1995.

Os corpos de prova para ensaio de resistência à compressão foram curados nas condições ambientais de laboratório com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $65 \pm 5\%$.

A interpretação dos resultados obtidos nos ensaios está centrada nas prescrições impostas pela ABNT, que classificam as argamassas utilizadas no Brasil, portanto, os resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas de substituição são comparados aos encontrados nas argamassas de referência e aos apresentados pelas especificações das normas (tabela 2.1).

3.2.2.1.1 - Teor de ar incorporado

A determinação do teor de ar incorporado, de acordo com a NBR 13278/1995, começa com a introdução da argamassa, preparada de acordo com a NBR 13276/1995, num recipiente cilíndrico de PVC, previamente calibrado e com volume interno de aproximadamente 400 mL (V_r) e de massa conhecida (M_v), formando três camadas, compactadas com 20 golpes cada, correspondendo a entrada e à saída da espátula na posição vertical, sendo a última camada complementada com 5 golpes de soquete. Finalmente é feito o rasamento do recipiente com auxílio de uma régua metálica. Após regularizar a superfície e limpar o lado exterior do molde, determina-se a massa do recipiente com argamassa (M_c). Calcula-se então a densidade de massa da argamassa no estado fresco (A), em g/cm^3 , por meio da seguinte expressão:

$$A = \frac{M_c - M_v}{V_r} \quad (1)$$



De posse deste resultado pode-se obter o teor de ar incorporado das argamassas (Al), utilizando para isso a seguinte expressão:

$$Al = 100x\left(1 - \frac{A}{B}\right) \quad (2)$$

Onde A é determinado pela equação (1) e o fator B corresponde à densidade de massa teórica da argamassa, isto é, a densidade de massa que esta teria se não houvesse vazios. Para argamassas dosadas e preparadas em obras (não-industrializadas), determina-se B com a seguinte expressão:

$$B = \frac{\sum Mi}{\sum \frac{Mi}{\gamma_i}} \quad (3)$$

Onde:

Mi = massa seca de cada componente da argamassa, mais a massa da água;

γ_i = massa específica de cada componente.

O gráfico da figura 3.18 mostra os resultados de teor de ar incorporado para os diferentes traços.

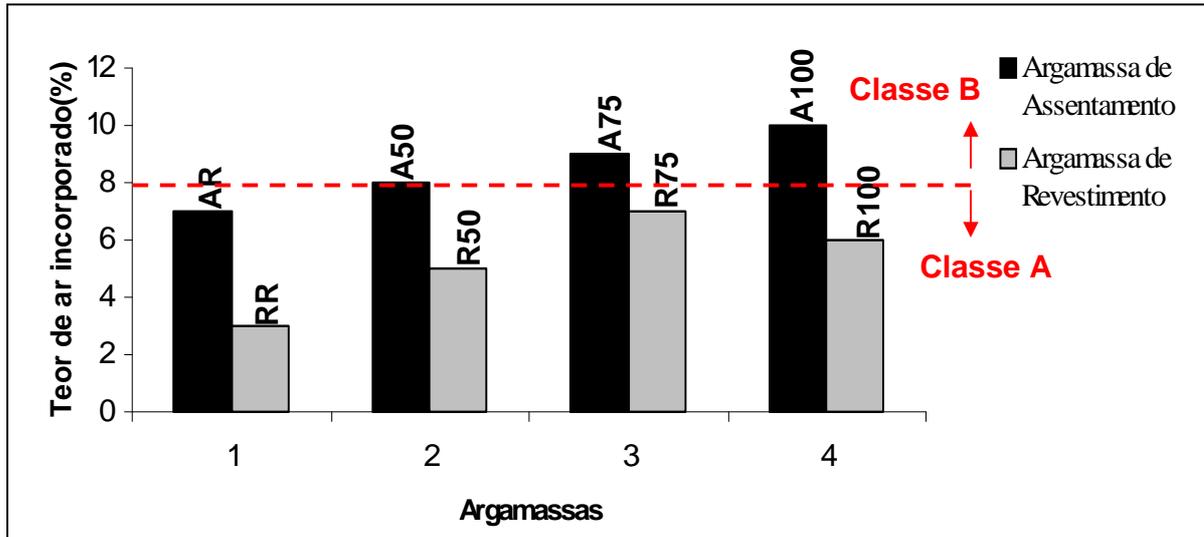


Fig. 3.18 - Capacidade de incorporação de ar das argamassas de referência e substituição

Para a argamassa de assentamento, independentemente do percentual de substituição, há um acréscimo da incorporação de ar, o que também pode ser observado para as argamassas de revestimento. Entretanto, mesmo com esse aumento, as argamassas de revestimento permanecem na classe “A”, mas as argamassas de assentamento passaram para a classe “B”.

3.2.2.1.2 - Retenção de água

A determinação da retenção de água segue as prescrições da NBR 13277/1995, começando pela introdução da argamassa, preparada de acordo com a NBR 13276/1995, num molde cilíndrico de aço, de dimensões preestabelecidas e com massa conhecida (Mm), por meio de dez incrementos, rasando o excesso com auxílio de uma espátula. Depois de regularizada a superfície, e da limpeza externa do molde, é determinada a massa do recipiente com argamassa (Mma).

Colocam-se sobre a superfície da argamassa duas telas de gaze, um conjunto de doze discos de papel-filtro e uma placa metálica rígida com diâmetro correspondente ao do molde. Em seguida, aplica-se um carregamento centralizado de 2Kg sobre a placa, durante dois minutos. Remove-se então o carregamento e a placa metálica, e

determina-se a massa do conjunto de papel-filtro (M_f). De posse destes dados, procede-se o cálculo da retenção de água. Primeiramente calcula-se o fator água/argamassa fresca (AF):

$$AF = \frac{M_w}{M + M_w} \quad (4)$$

Onde:

M = soma das massas anidras dos componentes da argamassa;

M_w = Massa de água utilizada na mistura.

A retenção de água (RA) pode ser então calculada com:

$$RA = \left[1 - \frac{(M_f - M_{se})}{AF \times (M_{ma} - M_m)} \right] \times 100 \quad (5)$$

Onde:

M_{se} = massa do conjunto de discos;

O gráfico da figura 3.19 mostra os resultados do ensaio de retenção de água.

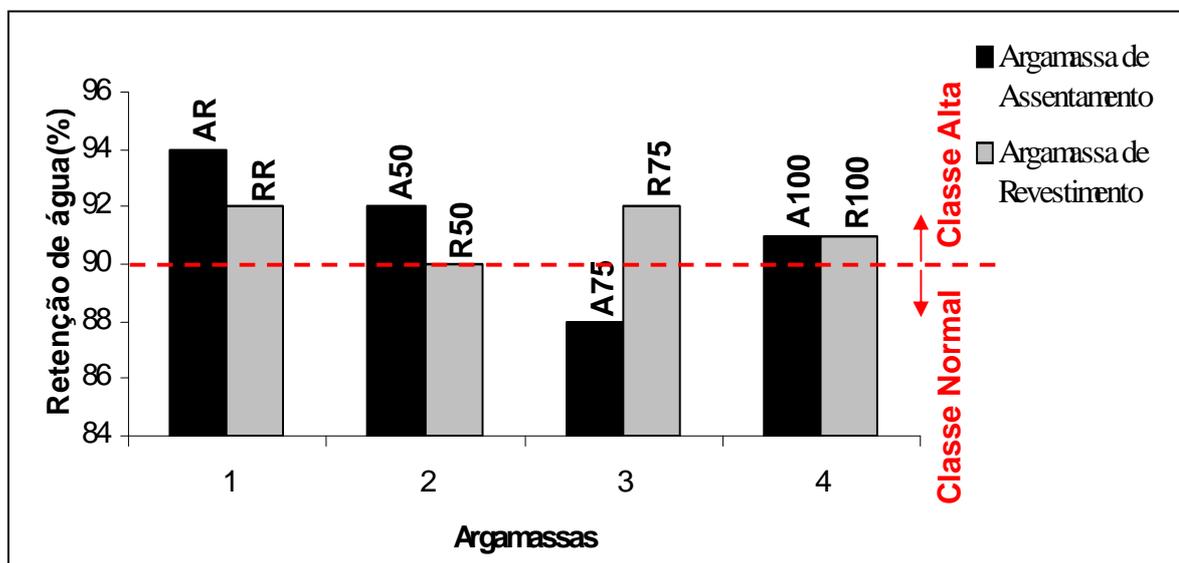


Fig. 3.19 - Capacidade de retenção de água das argamassas de referência e substituição



Para as argamassas de revestimento, os resultados mostram que o acréscimo de resíduo provoca pequenas oscilações na retenção de água em torno de um valor médio. Já para as argamassas de assentamento, demonstra uma ligeira tendência de queda. Mesmo assim, as argamassas ensaiadas, com exceção da A75, puderam ser enquadradas na classe “alta” de retenção de água.

3.2.2.1.3 - Resistência à compressão

Para realização do ensaio de resistência à compressão, de acordo com a NBR 13279/1995, a argamassa deve ser preparada com o teor de água para consistência padrão (NBR 13276/1995).

Foram moldados quatro corpos-de-prova (CPs) cilíndricos por idade de análise e para cada traço, com argamassa recém-preparada, em moldes de 5 cm x 10 cm. Cada molde foi preenchido por quatro camadas de argamassa, compactadas moderadamente com 30 golpes de soquete metálico.

Todos os CPs permaneceram 48h nos moldes, com proteção contra perda de umidade. Em seguida, foram desmoldados e curados em ambiente de laboratório até a idade de ensaio. Este tipo de cura foi adotado porque existem argamassas contendo cal que, de acordo com as recomendações da NBR 7215/1996, devem permanecer, após a moldagem, ao ar do laboratório até a idade de ensaio. Assim, todos os traços tiveram o mesmo tipo de cura, para manter o padrão para comparação.

Nas idades de ensaio (7 e 28 dias), os CPs foram capeados com enxofre. Foi determinado, com auxílio do paquímetro, o diâmetro de cada CP, e realizado a ruptura dos corpos-de-prova em máquina de ensaio à compressão (Versa Tester – 250 KN, figura 3.20), de acordo com as recomendações da norma (velocidade de carregamento = 0,5 KN/s), registrando as cargas de ruptura.

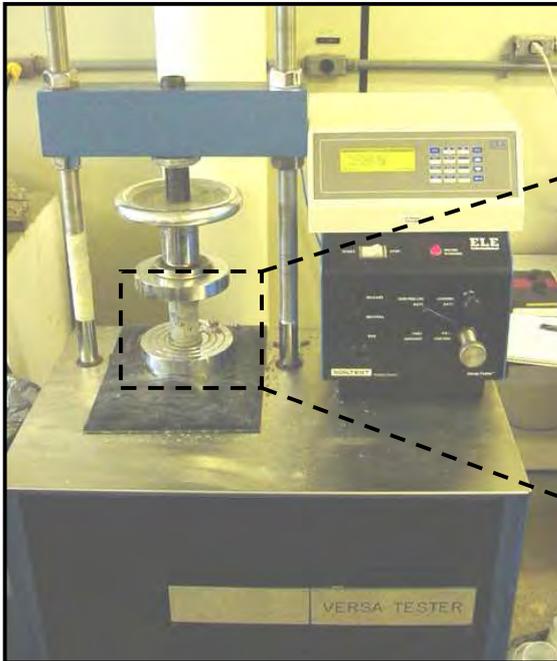


Fig. 3.20 - Prensa Versa Tester



Fig. 3.21 - Detalhe da ruptura dos CPs

O tratamento estatístico aplicado foi o desvio relativo máximo de 6% em relação à média, para que cada resultado individual pudesse ser considerado válido. Quando o desvio relativo máximo era superior a 6%, calculava-se uma nova média, desconsiderando-se o valor discrepante. Persistindo o fato, o ensaio era totalmente refeito.

Os valores de resistência à compressão das argamassas, aos 7 e 28 dias, são apresentados figuras 3.22 e 3.23, respectivamente.

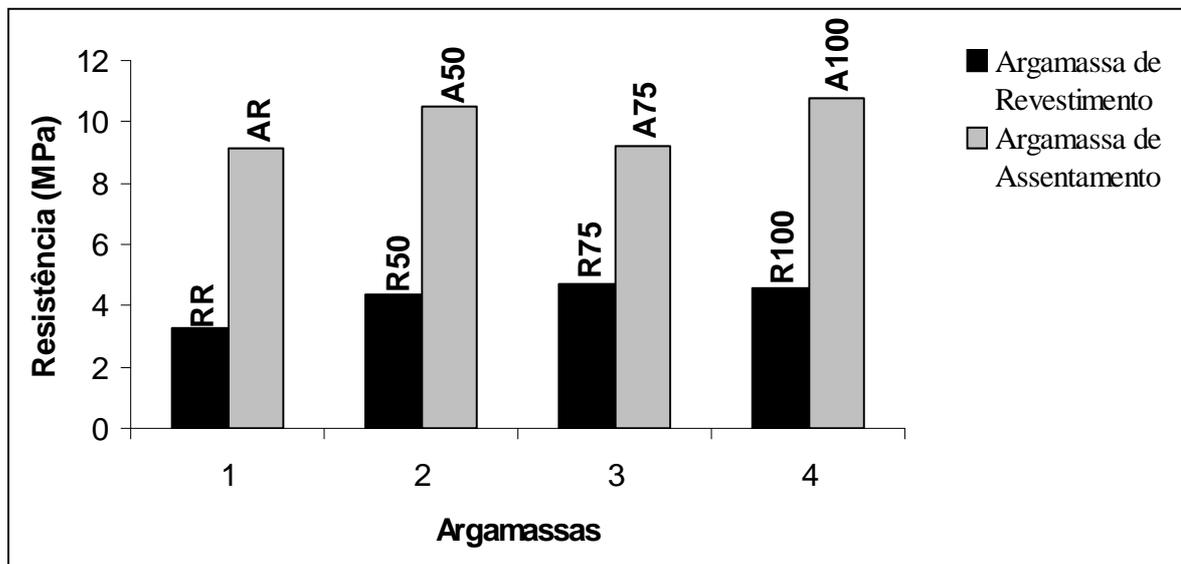


Fig. 3.22 - Resistência à compressão das argamassas ensaiadas aos 7 dias

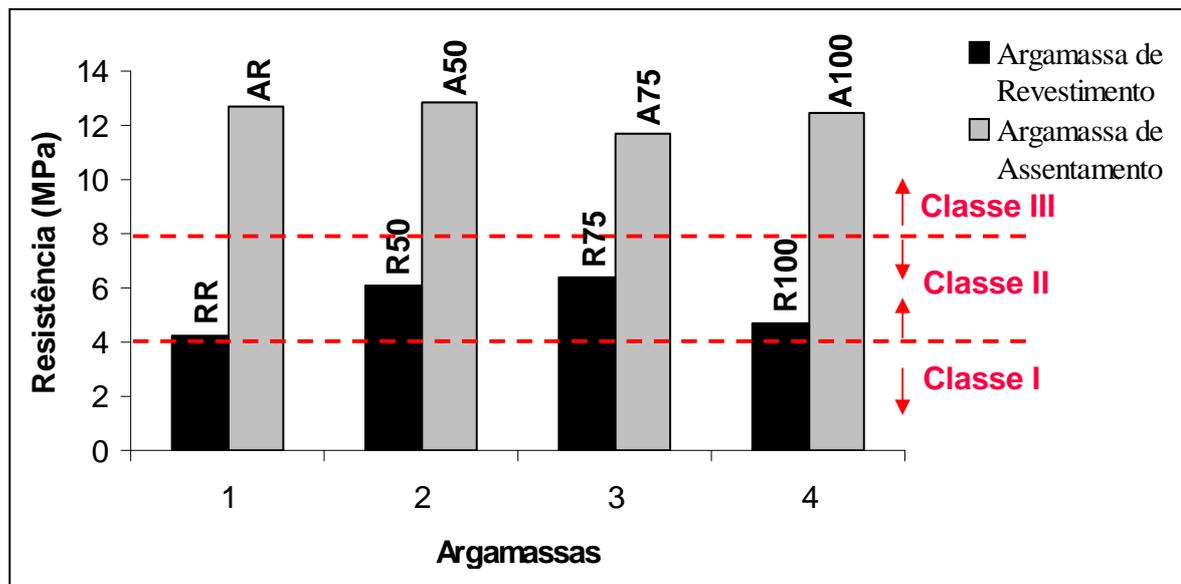


Fig. 3.23 - Resistência à compressão das argamassas ensaiadas aos 28 dias

Já nas primeiras idades os resultados indicam uma tendência de aumento na resistência à compressão tanto nas argamassas de assentamento quanto nas de revestimento; fato este comprovado pelos valores obtidos nos ensaios aos 28 dias. As



argamassas de assentamento são então classificadas na classe III de resistência, e as de revestimento na classe II, atendendo, portanto aos requisitos impostos pela norma.

3.2.2.2 - Ciclagem água-estufa

O ensaio de ciclagem teve o objetivo de avaliar o comportamento das argamassas quando submetidas a condições alternadas de molhagem e secagem ou, em outras palavras, umidade e temperatura. O ensaio, conforme realizado no PEC/COPPE/UFRJ, consistiu em efetuar ciclos onde a argamassa era imersa em água durante um período de 17 horas, a uma temperatura de 23°C, e na seqüência colocada em estufa, a uma temperatura de 70°C, durante 30 horas. Entre o período de permanência em estufa e imersão, os corpos de prova eram resfriados em temperatura ambiente durante 1 hora. As argamassas (4 CPs por ensaio) foram curadas no ambiente do laboratório (23°C e umidade relativa do ar de 65%) durante 14 dias e submetidas à ciclagem por 14, totalizando um período de 28 dias. Essa metodologia permitiu avaliar a influência da ciclagem nos seguintes parâmetros: variação dimensional, variação de massa e resistência à compressão após ciclagem.

3.2.2.2.1 - Variação dimensional

A variação dimensional é obtida com a medida das dimensões lineares do corpo de prova antes e depois do ensaio de ciclagem. A variação positiva indica a diminuição de dimensão após a realização do ensaio. Esta propriedade avalia a estabilidade dimensional das argamassas, muito importante no caso de argamassas de revestimento, que frente à contração ou expansão brusca podem sofrer fissuração e até deslocamento.

A figura 3.24 apresenta os resultados de variação dimensional para as argamassas estudadas.

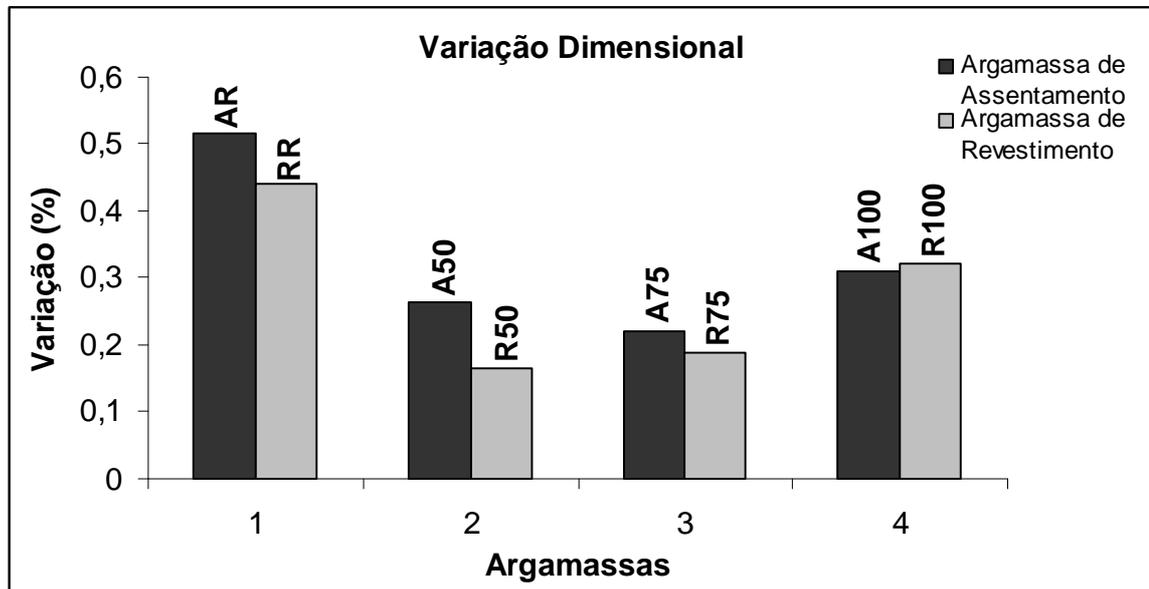


Fig. 3.24 - Variação dimensional das argamassas

Os resultados mostram claramente que as argamassas com substituição de cal pelo RCR, tanto as de revestimento quanto as de assentamento, tiveram variações dimensionais menores que as argamassas de referência. Até mesmo para as substituições de 75% e 100%, o desempenho da argamassa se mostrou melhor que o das argamassas com cal.

3.2.2.2.2 - Variação de massa

A variação de massa é medida por meio da diferença entre a massa dos corpos-de-prova antes e depois da ciclagem. A variação positiva indica a perda de massa depois de realizado o ensaio. No caso da ciclagem, esta propriedade demonstra a estabilidade de massa em condições de temperatura e umidade variáveis, como ocorre na prática, principalmente em argamassa de revestimento externo.

A figura 3.25 apresenta os valores de variação de massa para as argamassas ensaiadas.

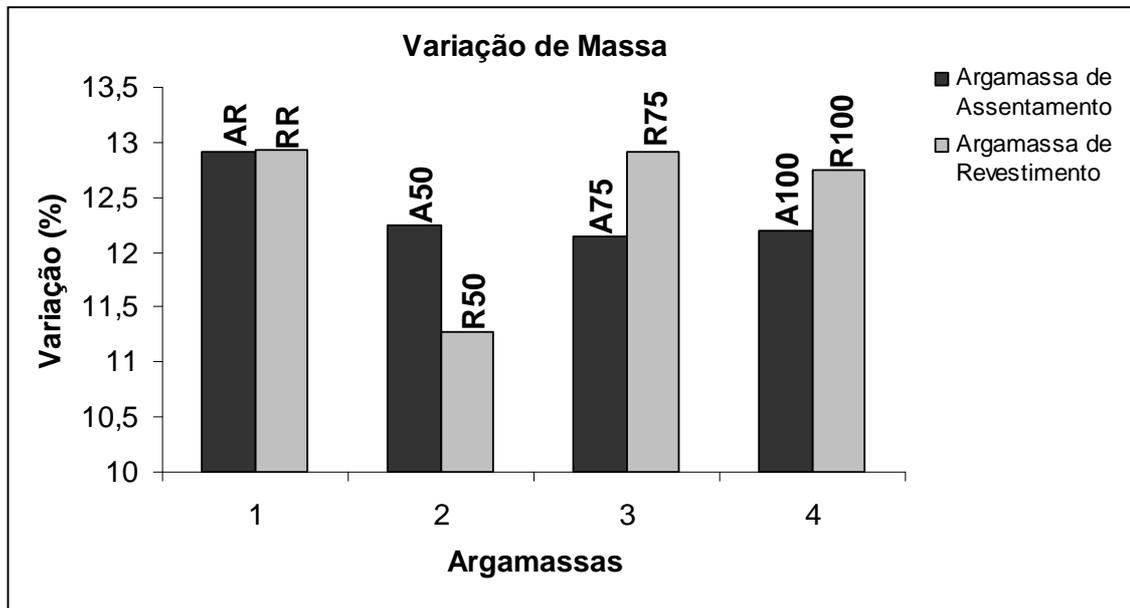


Fig. 3.25 - Variação de massa das argamassas

A substituição da cal pelo RCR não prejudicou o desempenho do produto final. Houve melhoria significativa em todas as substituições para as argamassas de assentamento e na substituição de 50% para a argamassa de revestimento. Para os demais casos, o comportamento praticamente não foi alterado.

3.2.2.2.3 - Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão foi realizada imediatamente após o último ciclo (28 dias de idade), com a finalidade de verificar a variação de resistência da argamassa em condições de exposição adversa. A metodologia de execução do ensaio já foi descrita no item 3.2.2.1.3, exceto no que se refere à cura. A figura 3.26 apresenta os valores de resistência após a ciclagem das argamassas de assentamento, tanto para cura normal (no ambiente de laboratório) quanto para cura com ciclagem.

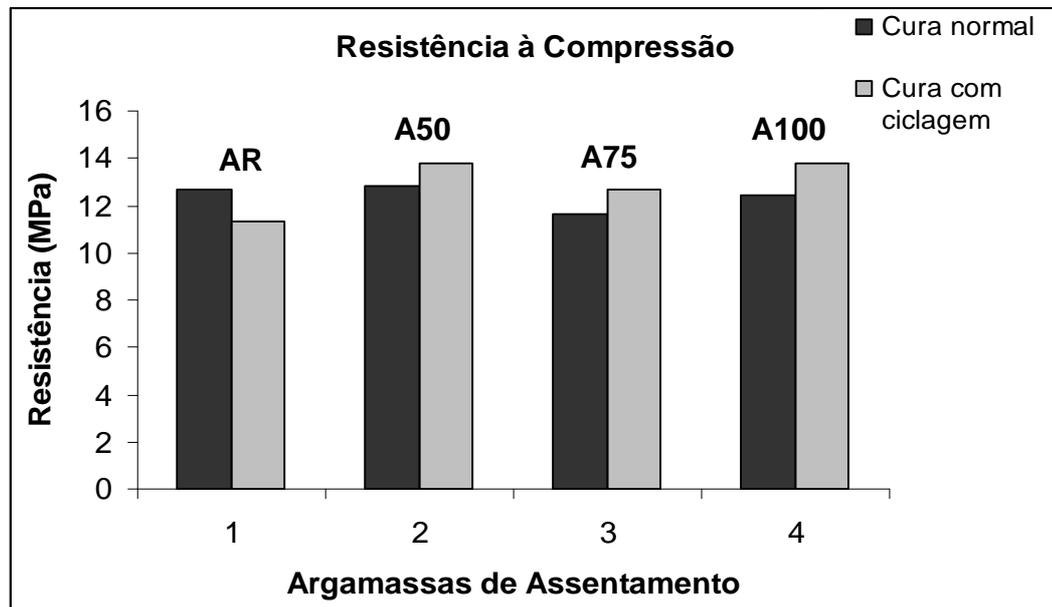


Fig. 3.26 - Resistência à compressão das argamassas de assentamento

A figura 3.27 mostra os resultados das argamassas de revestimento, também para os traços curados a condições ambientais e os submetidos à ciclagem.

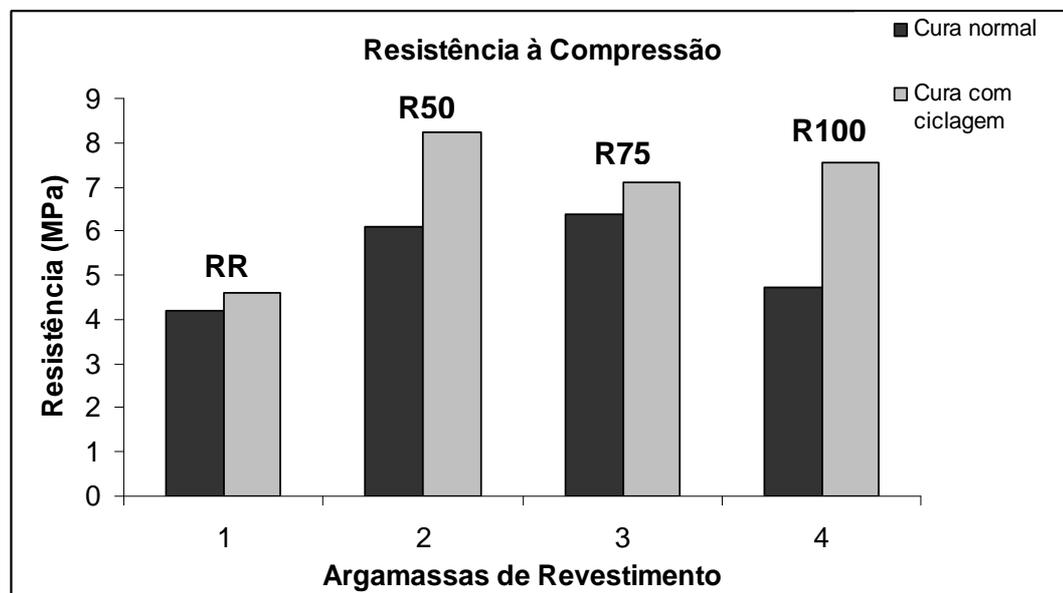


Fig. 3.27 - Resistência à compressão das argamassas de revestimento



Percebe-se ao analisar os resultados que todas as argamassas, exceto a de assentamento de referência, apresentaram ganho de resistência ao serem submetidas ao efeito de ciclagem. Possivelmente este fato se deve às condições de temperatura e umidade que podem ter constituído uma condição favorável à continuação das reações de endurecimento.

As argamassas de substituição mais uma vez apresentaram resultados mais satisfatórios que as de referência.

3.2.2.3 - Análise preliminar

De acordo com os resultados apresentados pode-se concluir que o resíduo da rocha pode substituir adequadamente a cal para os traços ensaiados.

Em se tratando dos ensaios físico-mecânicos, conforme os requisitos da norma NBR 13281/2001, já apresentados na tabela 5.1, os traços ensaiados permitiram classificar as argamassas de revestimento como **II – alta – a**, e as argamassas de assentamento como **III – alta – b**.

Este primeiro estudo com as argamassas com RCR possibilitou um melhor entendimento de algumas características e potencialidades desse material, permitindo tecer as seguintes conclusões:

- Baseado nos resultados apresentados e sabendo que as argamassas disponíveis no mercado da região pertencem, em geral, à **classe I** de resistência; a otimização do consumo de cimento, aumentando o percentual de resíduo de rocha na dosagem da argamassa, tornaria o produto mais competitivo, desde que atendesse às especificações da ABNT.
- Com aumento do percentual de resíduo e o conseqüente aumento do teor de finos, espera-se um aumento da retenção de água, o que melhoraria a plasticidade da argamassa.
- Estudos de melhoria de dosagem mais aprofundados com respeito à otimização da argamassa mostrariam as melhores possibilidades de incorporação do RCR.



- Levando-se em conta a praticidade e tendência de emprego de argamassas de múltiplo-uso, o estudo de dosagens para essas argamassas com a incorporação do resíduo é uma alternativa muito atrativa.

3.2.2.4 - Estudo de dosagem

Comprovada a viabilidade técnica do emprego de argamassas com resíduo de corte de rochas durante os testes preliminares executados, passa-se ao refinamento das dosagens. Para tanto, toma-se como base o traço de argamassa de múltiplo-uso mais empregados nos canteiros de obras da região: 1:2:6 (cimento:cal:areia). Este traço, convertido em massa e com a notação de referência, passa a ser citado com 1:1:7R.

O estudo de dosagem visava o acompanhamento do comportamento das argamassas à medida que variações empíricas nos teores de seus constituintes eram efetuadas. O objetivo final foi a seleção, dentre as inúmeras combinações possíveis de incorporação de RCR no traço de referência, das argamassas mais representativas para o aprofundamento do estudo de desempenho, com características distintas, de forma a possibilitar a análise de uma grupo mais abrangente de tipos de argamassas. Para tanto, foram ensaiados 4 CPs por traço, considerando os seguintes fatores: resistência à compressão, plasticidade, coesão e consumo de cimento.

As primeiras alterações no traço de referência corresponderam à substituição completa da cal pelo RCR e o incremento unitário na parcela de resíduo, traduzidas nas seguintes variações: 1:1:7, 1:2:7, 1:3:7, 1:4:7, 1:5:7, 1:6:7, 1:7:7 (cimento, RCR, areia). Todas as argamassas apresentaram ganho de resistência em relação à de referência, com exceção da última. A maior resistência foi da 1:4:7. Os últimos 3 traços se mostraram altamente coesivos, apresentando dificuldades durante o processo de moldagem dos corpos-de-prova. Como o aumento da coesividade está relacionado ao alto teor de finos na argamassa, foram feitas variações nestes traços (aumento do teor de areia), como tentativa de amenizar o efeito da elevada coesividade. Os novos traços

foram: 1:5:8, 1:6:10 e 1:7:12. Nestes novos traços a coesividade foi menor, conferindo à mistura uma boa plasticidade. Também foram feitas algumas variações do traço de maior resistência (1:4:7): a primeira, de forma a enriquecer a argamassa, aumentando em 50% o teor de cimento (1,5:4:7 = 1:2,6:6), o segundo, para diminuir um pouco a coesividade (1:4:9) e o último substituindo uma parte do resíduo pela cal (1:1:3:7 – cimento, cal, RCR e areia). Finalmente foram feitas variações no traço 1:5:8, que apesar de apresentar boa resistência, ainda estava bastante coesivo. E estas foram: 1:5:10, 1:5:12, 1:1:4:10, 1:1:4:12 e 1:1:5:10.

A figura 3.28 mostra os resultados de resistência à compressão a 7 dias de todos os traços ensaios, organizados em ordem crescente de teor de cimento na constituição da argamassa.

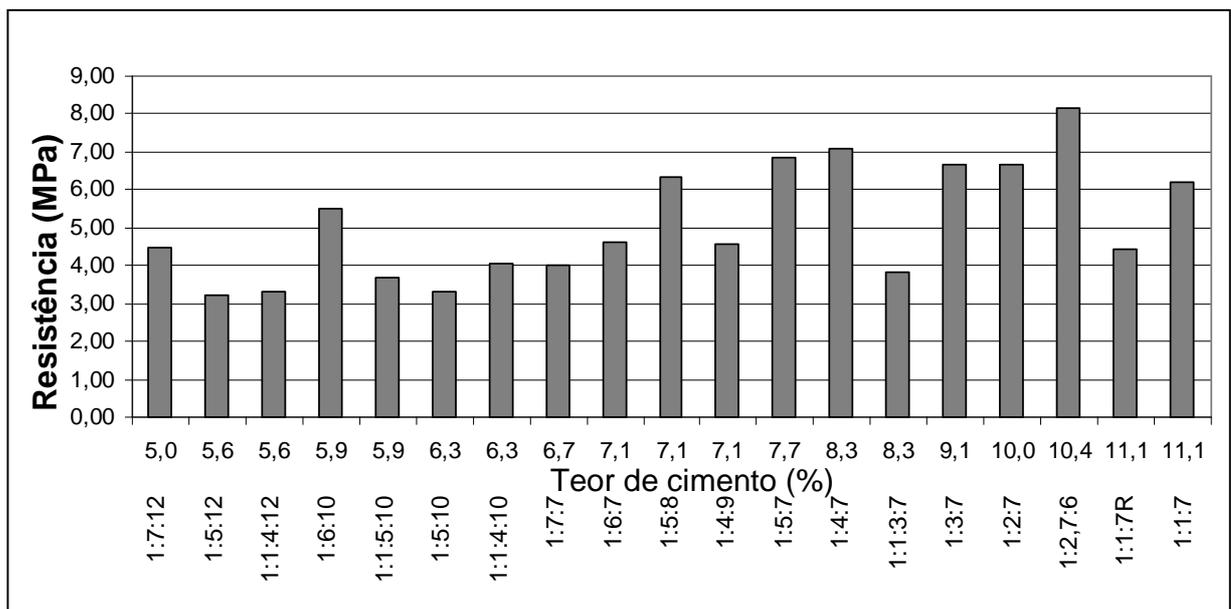


Fig. 3.28 - Resistência à compressão a 7 dias das argamassas, de acordo com o teor de cimento



3.2.2.4.1 - Definição dos traços finais

Para a continuação e aprofundamento do estudo do comportamento das novas argamassas (com RCR) foi necessária a concentração dos testes em um grupo definido de traços. Assim, tomando como base os dados obtidos no estudo de dosagem, foi feita a seleção de oitos traços (uma argamassa para referência e mais sete argamassas com RCR).

É importante frisar que, devido a restrição de mínima resistência, segundo as normas nacionais, corresponder a um valor relativamente baixo (0,1 MPa), em alguns casos, resistência muito elevada torna-se menos interessante para este estudo que outros parâmetros, como a plasticidade e teor de cimento.

Assim, a primeira argamassa selecionada para o estudo foi a argamassa de cimento e cal (1:1:7R), que será usada como referência na análise dos resultados. Para as demais, trabalhou-se com possibilidade de escolha de traços que pudessem representar grupos de interesse, principalmente no que se refere aos teores de resíduo e cimento, e à plasticidade. Selecionou-se a argamassa que tinha o menor teor de resíduo em relação ao de cimento, com uma razoável plasticidade (1:2:7). Também foi selecionada a argamassa com o maior teor de finos (1:7:7). Os próximos escolhidos foram os dois traços que combinavam cimento, cal e RCR (1:1:3:7 e 1:1:4:10). Outro traço selecionado foi o que tinha o menor teor de cimento dentre as estudadas (1:7:12). As últimas duas argamassas são traços boa plasticidade, e que podem ser representativas da maioria das argamassas com RCR (1:5:7 e 1:6:10).

3.3 - Desempenho de argamassas com resíduo de corte de rochas

O estudo do desempenho das argamassas selecionadas corresponde à terceira etapa do programa experimental. Para avaliação do desempenho, foram estudadas propriedades importantes das argamassas no seu estado fresco, endurecido e também aquelas referentes à durabilidade.

3.3.1 - Propriedades do estado fresco

No estado fresco, além das propriedades normalizadas pela ABNT (teor de ar incorporado e retenção de água), foram determinadas também a compactidade da argamassa, por meio da determinação de sua densidade de massa, e suas características de trabalhabilidade e aplicação.

3.3.1.1 - Índice de consistência padrão

Como em todos os ensaios anteriores com argamassas, as misturas foram preparadas com o teor de água necessário para atingir o índice de consistência padrão NBR 13276/1995. A figura 3.29 mostra os teores de água utilizados para os traços estudados.

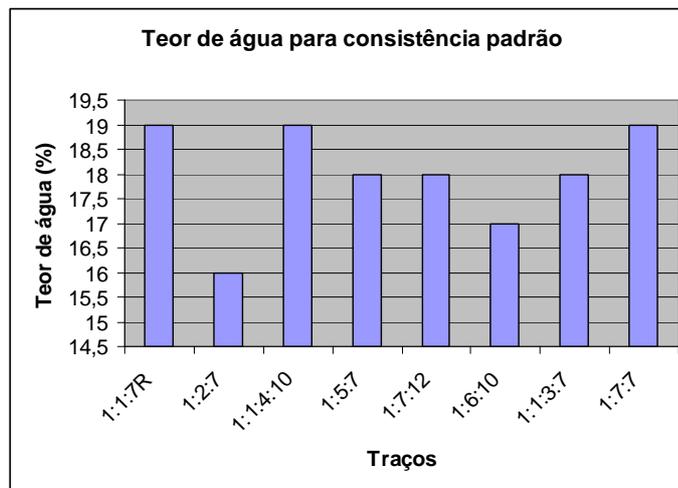


Fig. 3.29 - Teor de água para o índice de consistência padrão

A variação do teor de água foi bastante aleatória, tornando difícil a tentativa de relacioná-la ao teor de resíduo da mistura. Contudo, um aspecto importante merece ser ressaltado: a adição de RCR não aumentou a demanda de água e, na maioria dos casos (com exceção da 1:1:4:10 e 1:7:7) ocorreu o contrário.

3.3.1.2 - Teor de ar incorporado

O método de ensaio para a obtenção do teor de ar incorporado, segundo a NBR 13278/1995, já foi descrito no item 3.2.2.1.1. Abaixo, na figura 3.30, são apresentados os resultados para os traços analisados.

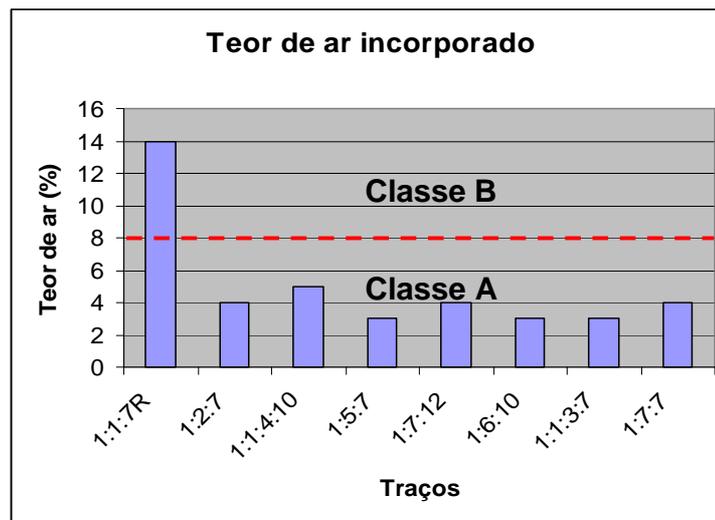


Fig. 3.30 - Teor de ar incorporado

Ao contrário do teor de água para a consistência padrão, o comportamento da variação do teor de ar incorporado, em relação à adição de RCR, foi bastante significativa. Todas as argamassas com RCR apresentaram teores de ar pelo menos três vezes menores que a de referência, passando da classe B para classe A, conforme separação indicada no gráfico. Isto comprova que a adição deste material realmente reduz a quantidade de vazios, aumentando a compacidade do material.

3.3.1.3 - Retenção de água

A metodologia para a obtenção da retenção de água foi a descrita no item 3.2.2.1.2. A figura 3.31 mostra os resultados obtidos.

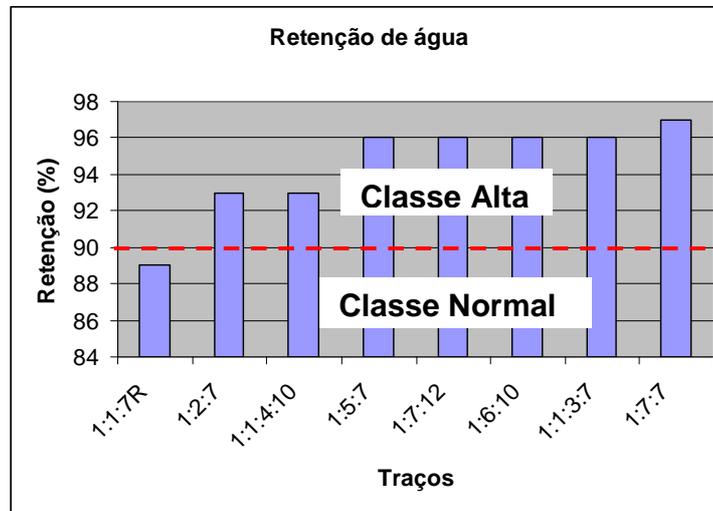


Fig. 3.31 - Retenção de água

Assim como o teor de ar incorporado, a variação da retenção de água se mostrou coerente ao que se espera quando se adicionam finos a uma matriz cimentícia. Todas as argamassas com RCR aumentaram seu poder de reter água quando comparadas à argamassa de referência, passando da classe de retenção Normal para Alta. Também foi bastante coerente o fato da argamassa 1:7:7 (maior teor de RCR) apresentar o valor mais alto de retenção.

3.3.1.4 - Densidade de massa

A densidade de massa, segundo a NBR 13278/1995, mede a massa específica da argamassa no estado fresco. A realização deste ensaio corresponde a uma parte do procedimento para a obtenção do teor de ar incorporado. Um recipiente cilíndrico de volume aproximado de 400 ml é preenchido com quatro camadas de argamassa, compactadas com o auxílio de uma espátula e soquete metálico. Após este procedimento, determina-se a massa contida no recipiente e obtém-se a densidade de massa, dividindo esta pelo volume de 400 ml.

Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.32.

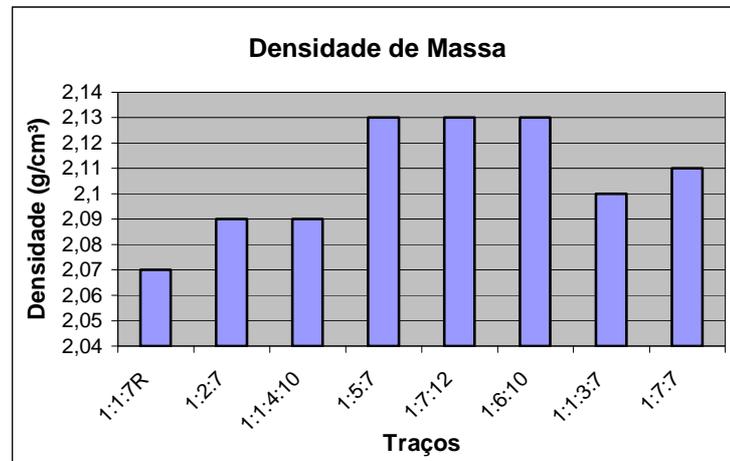


Fig. 3.32 - Densidade de massa

A tendência desta propriedade é de manter certa coerência com teor de ar incorporado, ou seja, argamassas com menos vazios têm maiores massas específicas. Assim, a variação da densidade nas argamassas com RCR está numa faixa esperada.

3.3.1.5 - Plasticidade, coesividade e aplicabilidade

O desenvolvimento de um produto com possibilidades comerciais não pode se privar da averiguação prática de seu desempenho durante a utilização. É importante que a argamassa seja de fácil manuseio e aplicação, dando maior versatilidade ao seu emprego, garantindo velocidade de prosseguimento da obra. Para a avaliação deste desempenho, contou-se com a colaboração de um profissional da construção civil, um pedreiro, que construiu uma parede usando as argamassas estudadas, uma de cada vez. Foram assentadas 7 fileiras de tijolos, cada uma com um traço diferente. Posteriormente, esta mesma parede foi revestida com as argamassas, totalizando oito painéis de 1 m² cada (figura 3.33 e 3.34).



Fig. 3.33 - Pedreiro aplicando revestimento em massa única.



Fig. 3.34 - Painéis de revestimento em argamassa (4 de cada lado da parede).

Durante todo o processo construtivo foi analisado o comportamento do produto, possibilitando tecer conclusões significativas acerca dos aspectos práticos das argamassas. Nos itens que se seguem são apresentadas as informações obtidas durante o assentamento e o revestimento. Os próximos itens se baseiam no relato de



um pedreiro com dez anos de experiência na área, que convidado a utilizar estas argamassas sem ser informado sobre sua composição.

3.3.1.5.1 - Assentamento de blocos cerâmicos

Inicialmente todos os traços foram dosados e misturados em laboratório, seguindo as recomendações da ABNT, inclusive quanto ao índice de consistência padrão. A única diferença foi o uso de uma betoneira no lugar da argamassadeira, em virtude do maior volume de produto misturado. Em seguida, as argamassas eram entregues ao pedreiro para que fosse feita a aplicação. A tabela 3.6 apresenta as observações extraídas do relato do pedreiro durante a utilização das argamassas.

TRAÇO	OBSERVAÇÕES
1:1:7R	Aparentemente áspero. Este traço não apresentou bom desempenho, dificultando de certa forma o trabalho de assentamento.
1:1:4:10	Apresentou boa plasticidade, contudo, perdia água com facilidade e no final da fileira de tijolos foi necessário adicionar um pouco mais de água para torná-la aplicável.
1:6:10	Já durante a mistura na betoneira apresentou dificuldade de homogeneização, sendo necessário adicionar mais água para facilitar a mistura. Depois da adição de água a argamassa ficou mais plástica e melhor que as anteriores. Aparentemente demonstrou maior resistência inicial que as demais.
1:7:12	Apresentou boa consistência e plasticidade, resultando numa boa aplicabilidade, o que possibilitou um desempenho bastante satisfatório durante o assentamento dos tijolos.
1:5:7	Ficou excessivamente coesiva, tornando-se quase impraticável. A solução foi adicionar mais água. Isto melhorou um pouco a argamassa, sendo então possível sua utilização.



1:2:7	Foi um dos mais trabalhosos. A argamassa ficou muito áspera, diminuindo em muito a aplicabilidade.
1:7:7	Ficou altamente coesiva, de certa forma até pegajosa, logo após a mistura. Isto tornou quase impossível o seu uso. Com a adição de água a coesividade diminuiu um pouco, facilitando a aplicação.

Tab. 3.6 - Observações extraídas durante o assentamento de tijolos

Contudo, de uma maneira geral todos os traços puderam ser usados. Alguns diretamente com a consistência padrão obtida em laboratório e outros depois de correções de quantidade de água e re-mistura.

3.3.1.5.2 - Revestimento de parede de blocos cerâmicos

Da mesma forma que para o assentamento de tijolos, as argamassas para o revestimento das paredes foram dosadas e misturadas em laboratório, conforme citado anteriormente. A tabela 3.7 apresenta as observações.

TRAÇO	OBSERVAÇÕES
1:1:7R	Mais uma vez se mostrou áspera, sendo necessária a adição de água para a melhoria das condições de aplicação.
1:1:4:10	Apresentou boa plasticidade e aplicabilidade, demonstrou uma razoável resistência aparente, aliada à boa aderência inicial, melhorando o desempenho do produto pela agilidade durante a regularização superficial.
1:6:10	Mais uma vez apresentou pouca plasticidade após a mistura, porém foi possível sua aplicação (um pouco mais demorada que o normal), mesmo sem a adição de água.
1:7:12	A argamassa estava com boa plasticidade e adesividade. A aplicação ocorreu sem maiores complicações, originando um revestimento com bom acabamento.



1:5:7	Apresentou mais uma vez alta coesividade, porém isto facilitou sua adesão inicial à parede, contudo, percebeu-se uma certa dificuldade em regularizar a superfície com a régua. Por isso, este revestimento foi o que mais demorou a ser finalizado.
1:2:7	Apesar de também ser um pouco áspera, teve um desempenho melhor que a argamassa de referência.
1:7:7	Como já era esperado, ficou altamente coesiva (pegajosa). Apesar da boa adesividade inicial, a argamassa ofereceu dificuldades de utilização, principalmente na regularização da superfície.
1:1:3:7	Demonstrou boa plasticidade, porém, não apresentou alta adesão inicial, aumentando um pouco o tempo da fase de regularização superficial.

Tab. 3.7 - Observações extraídas durante o revestimento da parede

3.3.2 - Propriedades do estado endurecido

No estado endurecido foram estudadas propriedades físico-mecânicas referentes à resistência (aderência, compressão e tração por compressão diametral) e outras ligadas ao comportamento das argamassas na presença de água (absorção por imersão e por capilaridade).

3.3.2.1 - Evolução da resistência à compressão

Um grupo de ensaios de resistência à compressão, de acordo com a NBR 13279/1995 (vide item 3.2.2.1.3) foi efetuado com o objetivo de acompanhar a evolução da resistência nos primeiros 28 dias de idade. Para tanto, os corpos-de-prova foram ensaiados com 7, 14 e 28 dias, possibilitando a montagem de curvas de evolução de resistência para cada traço.

A figura 3.35 apresenta estas curvas. As linhas horizontais pontilhadas representam os limites das faixas de resistência estabelecidos pela ABNT para classificação de argamassas.

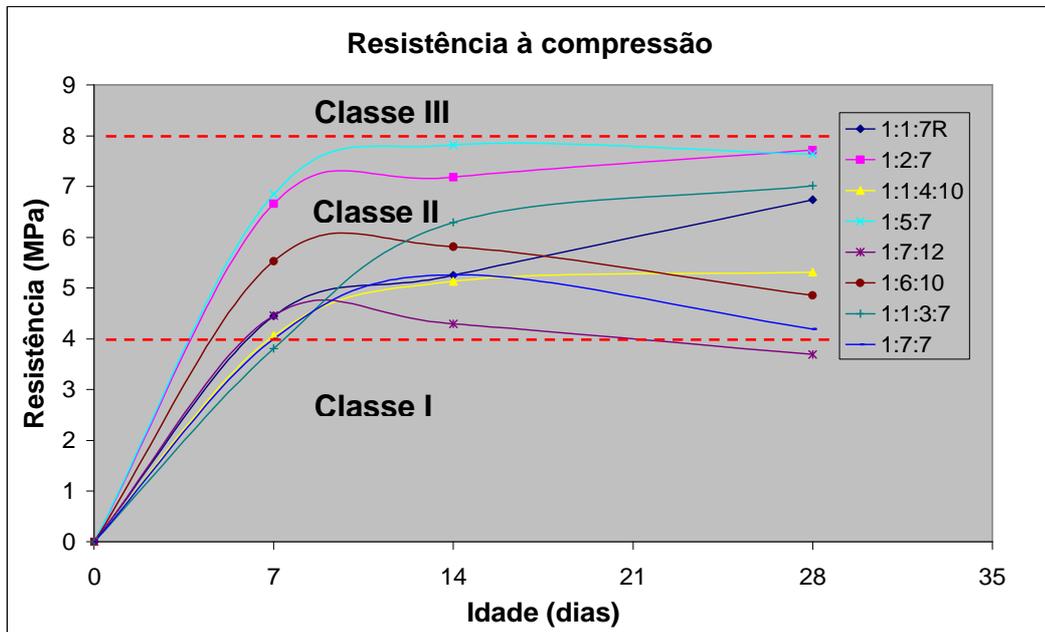


Fig. 3.35 - Evolução da resistência à compressão das argamassas

A maioria dos traços apresentou valores de resistência aos 28 dias dentro da faixa correspondente a classe II. Apenas a argamassa 1:7:12 apresentou valores para a classe I de resistência. Em relação à argamassa de referência, pode-se destacar o comportamento das argamassas 1:2:7, 1:5:7 e 1:1:3:7, todas com maiores valores de resistência. Três argamassas apresentaram perda de resistência com o tempo (1:7:12, 1:6:10 e 1:7:7), indicando um comportamento não esperado, associado provavelmente aos baixos teores de aglomerantes. Nestas condições, os valores de coesão interna, associada à água de amassamento, para baixos valores de resistência, têm significativa contribuição na resistência final das misturas. Com a secagem, há perda de umidade e uma possível diminuição de resistência pode ocorrer.

3.3.2.2 - Evolução da resistência de aderência

O estudo da resistência de aderência de revestimento de argamassas com RCR foi feito com a parede construída e revestida conforme descrito no item 3.3.1.5.2. A metodologia utilizada foi a proposta pela NBR13528/1995, que se refere à determinação da resistência de aderência à tração. De acordo com esta norma os

corpos-de-prova podem ser obtidos diretamente em revestimentos com parede acabada, forma em que, os valores obtidos, mais se aproximam da realidade. Para tanto, são extraídos no mínimo 6 CPs, distantes entre si em 50 mm. Os corpos-de-prova têm seção circular de 50 mm de diâmetro e são extraídos com auxílio de uma serra-copo. Para a execução do ensaio, pastilhas metálicas circulares são coladas aos CPs, por meio de adesivo epóxi, e estas são ligadas diretamente ao equipamento de tração. Neste caso específico, um conjunto de sete CPs foi ensaiado com o auxílio de um equipamento composto de uma célula de carga e uma unidade de processamento. A montagem para a execução do ensaio pode ser vista nas figuras 3.36 e 3.37.

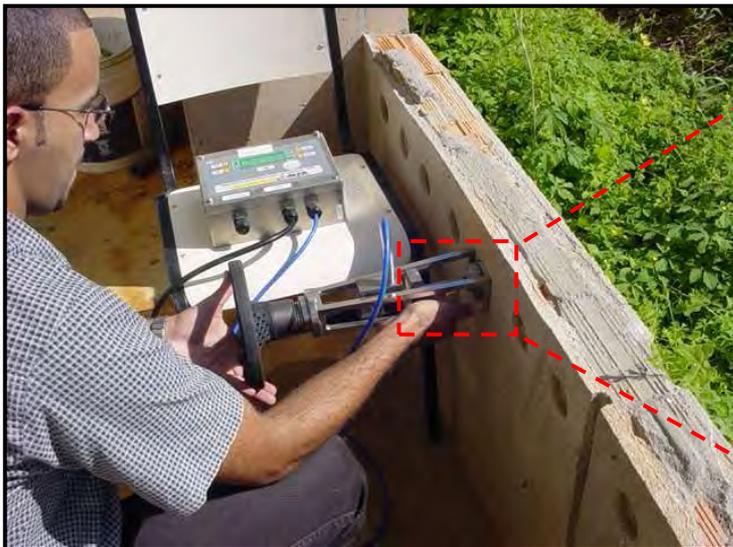


Fig. 3.36 - Realização do ensaio de resistência de aderência de revestimento em argamassa



Fig.3.37 - Detalhe do acoplamento do aparelho ao revestimento

Os ensaios foram feitos em três idades: 7, 14 e 28 dias. Os valores obtidos foram considerados válidos quando a ruptura ocorria na interface argamassa - substrato de base, pois seria a única situação em que se mediria puramente a aderência. Para cada traço foi obtido o valor médio das resistências, descartando aqueles valores com desvio relativo superior a 30%, de acordo com a norma de especificação de aderência de

revestimentos cerâmicos com argamassas colantes (NBR 14084/1998). A figura 3.38 apresenta as curvas de evolução de aderências para os traços estudados.

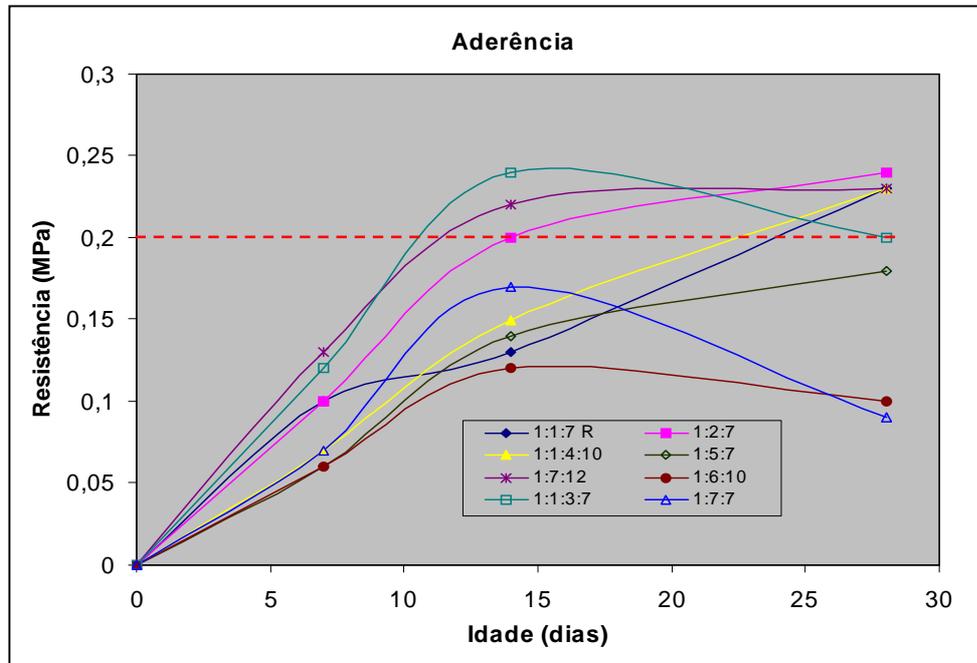


Fig. 3.38 - Evolução da resistência de aderência das argamassas

A linha pontilhada representa o limite inferior de resistência regulamentado pela ABNT. De acordo com a NBR 13749/1996 as argamassas que aos 28 dias de idade ficarem acima deste limite podem ser empregadas para revestimento de paredes internas quando preparadas para pintura e para revestimento de tetos.

As argamassas que apresentaram resistência de aderência abaixo do especificado foram aquelas com maiores teores de RCR. O maior teor de RCR significa um teor de aglomerante menor, ou seja, menos pasta para envolver todos os grãos e por conseguinte menos resistência. A argamassa 1:7:12, apesar do elevado teor de inertes, apresentou boa resistência de aderência. Este fato está provavelmente relacionado à aplicação das argamassas, já que a 1:7:12, diferentemente das demais argamassas com alto teor de RCR, apresentou ótimo desempenho na operação de aplicação do revestimento.

A perda de resistência de aderência entre 14 e 28 dias das argamassas 1:6:10 e 1:1:3:7 pode estar ligada a uma dispersão natural de resultados, devida, principalmente à não-homogeneidade da camada de revestimento e de base, entre outros fatores. Já a perda de aderência da argamassa 1:7:7, além do fato mencionado, está provavelmente relacionado à perda natural de água de amassamento do produto. Para um traço pobre em aglomerante, a participação da água na coesão interna é considerável.

3.3.2.3 - Resistência à tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração por compressão diametral seguiu as prescrições da NBR 7222/1983. Os corpos-de-prova são cilíndricos (5 x 10 cm), moldados conforme NBR 7215/1996 e deixados em cura ambiente durante 28 dias. O equipamento com o qual se realiza o ensaio é o mesmo utilizado para a execução dos ensaios de resistência à compressão de argamassas. Na montagem para o ensaio, o corpo-de-prova se apóia nos pratos da máquina somente ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas. Para tanto, são colocados, entre os pratos e os corpos-de-prova em ensaio, duas tiras de madeira regulares, visando a corrigir as possíveis irregularidades dos corpos-de-prova, distribuindo as tensões de maneira mais uniforme. Esta montagem pode ser vista nas figuras 3.39 e 3.40.

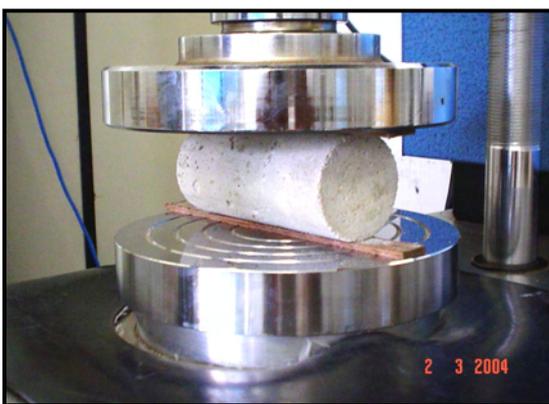


Fig. 3.39 - Montagem para o ensaio de resistência à tração por compressão



Fig. 3.40 - Forma típica de ruptura dos corpos-de-prova

A carga é aplicada continuamente e sem choque, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa por segundo, até a ruptura do corpo de prova. O valor da resistência à tração por compressão diametral é calculado pela expressão:

$$f_{t,D} = \frac{2 F}{\pi d l} \quad (6)$$

Onde:

$f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral, expresso em MPa, com aproximação de 0,05 MPa;

F = carga máxima obtida no ensaio;

d = diâmetro do corpo de prova;

l = altura do corpo de prova.

A figura 3.41 mostra os resultados médios de um grupo de quatro corpos-de-prova para cada traço analisado.

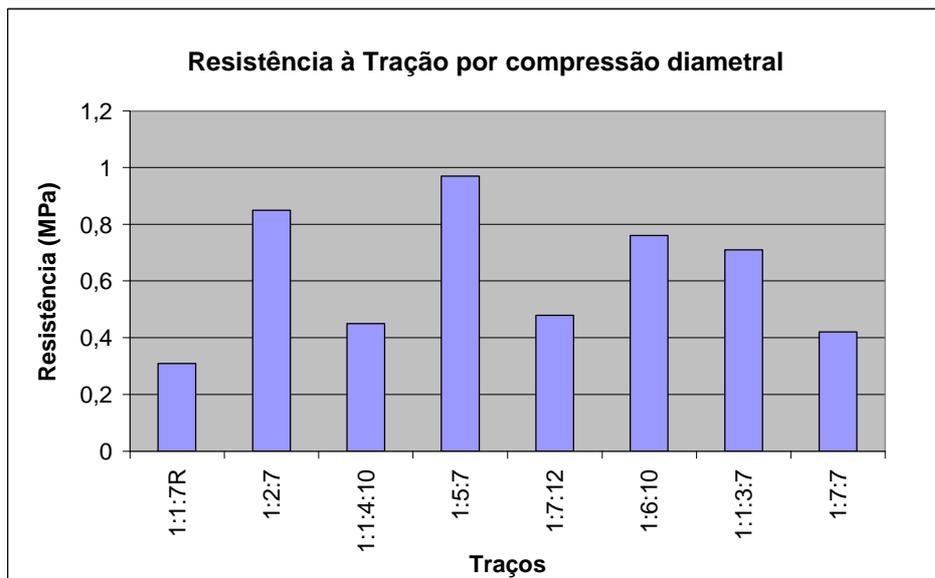


Fig. 3.41 - Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados mostram a tendência de melhoria das propriedades mecânicas com a adição de RCR, mesmo não sendo possível correlacionar diretamente aos teores de resíduo. Todas as argamassas com resíduo tiveram maiores resistências à tração que a de referência.

3.3.2.4 - Absorção de água por capilaridade

A obtenção da absorção de água por capilaridade seguiu as determinações da NBR 9779/1995. Os corpos-de-prova de argamassa são moldados de acordo com a NBR 7215/1996 com cura ambiente durante 28 dias, quando são determinadas as massas de cada um. Posteriormente, os mesmos são secos em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até que a diferença entre duas pesagens consecutivas do mesmo corpo-de-prova, entre períodos de 24h de permanência na estufa, não exceda 0,5% do menor valor obtido. Então os corpos-de-prova são parcialmente imersos em um recipiente a temperatura constante de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, de modo que o nível d'água permaneça constante a $5 \pm 1\text{mm}$ acima da sua face inferior, sem que esta toque o fundo do recipiente. Para tanto, foi desenvolvido um suporte flutuante que proporcionasse estas condições e as mantivesse constantes. A figura 3.42 mostra o esquema de montagem para o ensaio e a figura 3.43, a própria montagem.

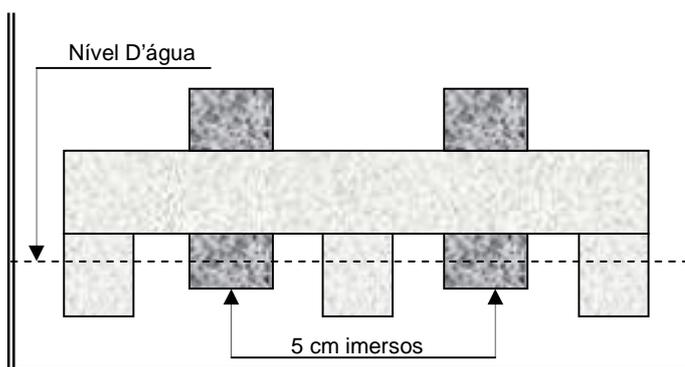


Fig. 3.42 - Esquema da montagem para o ensaio de absorção de água por capilaridade



Fig. 3.43 - Suporte flutuante com os corpos-de-prova



Durante o ensaio, determina-se a massa dos corpos-de-prova com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contadas a partir da colocação destes em contato com a água. Completada cada etapa, os corpos-de-prova retornam imediatamente ao recipiente de ensaio.

A absorção de água por capilaridade é expressa em g/cm^2 e calculada dividindo o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície do corpo-de-prova em contato com a água, para cada período de permanência, de acordo com a seguinte equação:

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (7)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade, em g/cm^2 ;

A = massa do corpo-de-prova em um período de tempo especificado, em g;

B = massa do corpo-de-prova seco em estufa;

S = área da seção transversal, em cm^2 .

Para este estudo foram utilizados 4 corpos-de-prova de cada traço, sendo considerado como resultado final, para cada propriedade analisada, o valor médio dos valores individuais. Vale a pena salientar que os valores obtidos foram bastante consistentes, mantendo-se na faixa de desvio relativo máximo inferior a 10%.

A figura a seguir apresenta a evolução da absorção de água por capilaridade para os traços em questão.

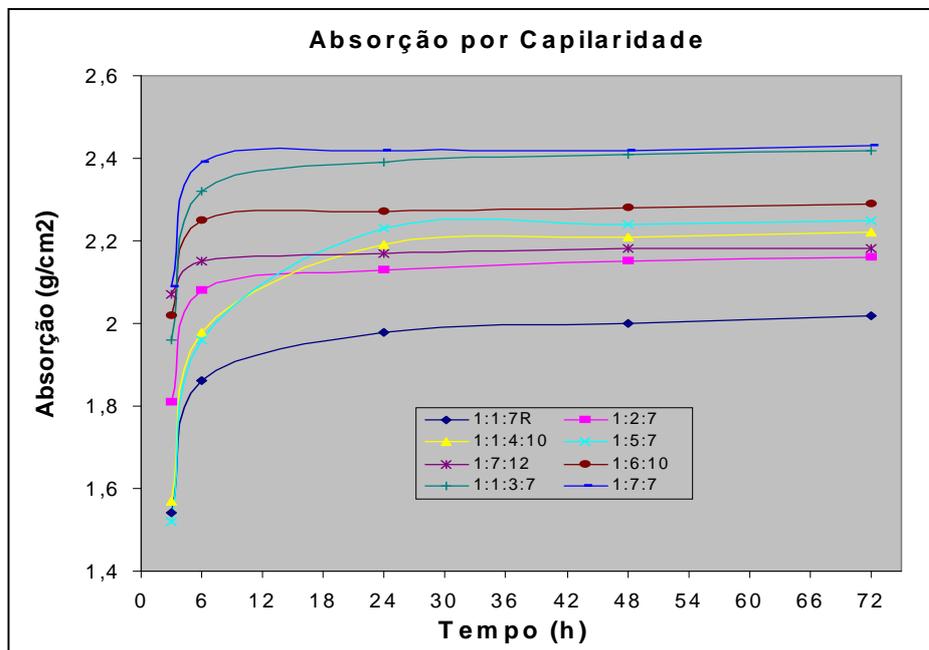


Fig. 3.44 - Evolução da absorção de água por capilaridade

Todas as argamassas com adição de RCR tiveram valores de absorção de água por capilaridade maiores em relação ao traço de referência. Contudo, isto é perfeitamente normal e esperado, visto que, ao passo que se adicionam finos na matriz cimentícia, há uma tendência de redução dos diâmetros dos poros, o que favorece o efeito da capilaridade, que é inversamente proporcional ao diâmetro dos capilares. Reafirmando a coerência com as forças de capilaridade, a argamassa com maior teor de RCR (1:7:7), possivelmente com menores dimensões de poros, apresentou a maior absorção. A taxa de absorção de água por imersão é maior nas primeiras horas, quando ocorre quase em sua totalidade, o que pode ser visto entre os tempos de 3 e 6h.

Também foi possível a determinação da perda total de massa das argamassas durante o período de secagem, precedente ao ensaio de absorção. Após 5 dias de permanência em estufa, os valores de perda de massa são os mostrados na figura 3.45.

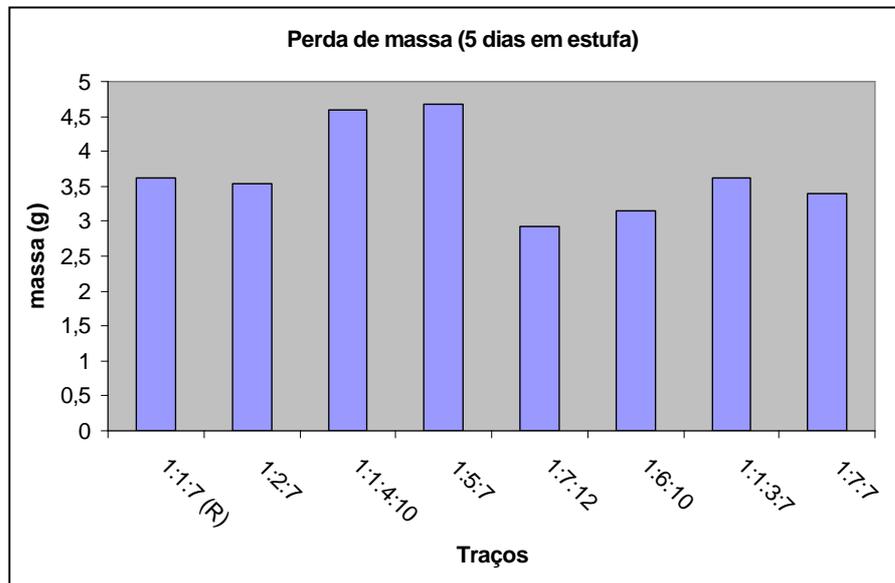


Fig. 3.45 - Perda de massa em estufa (5 dias)

Todas as argamassas tiveram perda de massa na faixa de 3 a 5g, ou seja, de 1 a 2% da massa total, o que não representa uma perda significativa, a ponto de prejudicar o desempenho das argamassas.

3.3.2.5 - Absorção de água por imersão

Para determinar a absorção de água por imersão foi seguida a NBR 9778/1987. As argamassas também são moldadas de acordo com a NBR 7215/1996. A execução do ensaio começa com a determinação da massa da amostra ao ar. Posteriormente a amostra é levada a estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, obtendo a massa após permanência de 24h, 48h e 72h. Completada a secagem em estufa e determinada a massa, procede-se à imersão da amostra em água à temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 72h. A amostra é mantida com 1/3 de seu volume imerso nas primeiras 4h e 2/3 nas 4h subsequentes, sendo completamente imersa nas 64h restantes. São determinadas as massas, decorridas 24h, 48h e 72h de imersão. Usando as massas determinadas ao

longo do procedimento, obtém-se a absorção de água por imersão, pela média das quatro amostras, para cada período de imersão, por meio da seguinte expressão:

$$A_i = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

A_i = absorção de água por imersão, em %;

M_{sat} = massa do corpo-de-prova saturado;

M_s = massa do corpo-de-prova seco em estufa.

Neste programa de ensaios também foram utilizados 4 corpos-de-prova de cada traço, considerando como resultado final, para cada propriedade analisada, o valor médio dos valores individuais. Os valores obtidos mantiveram-se na faixa de desvio relativo máximo inferior a 10%.

A figura 3.46 apresenta a evolução da absorção de água por imersão para os traços analisados.

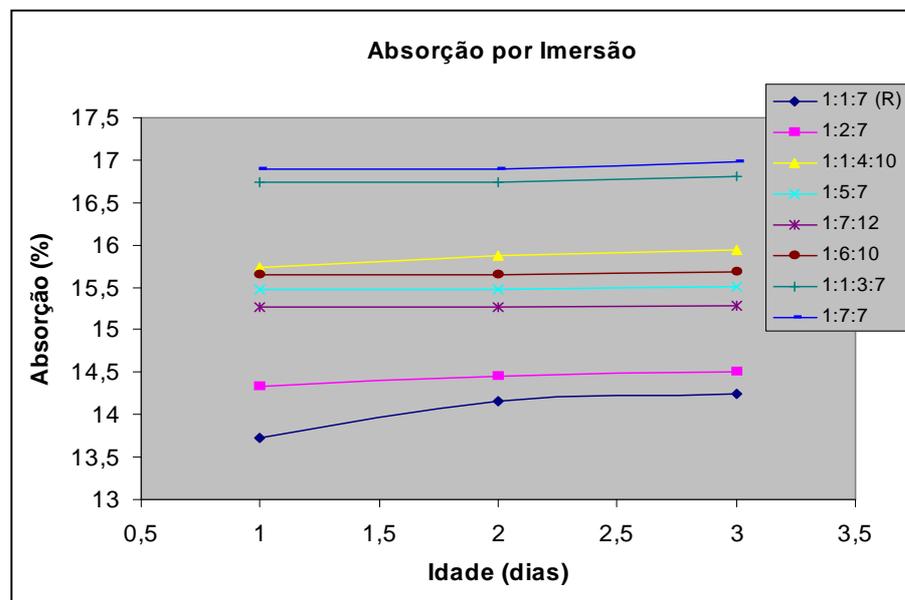


Fig. 3.46 - Evolução da absorção de água por imersão



A ordem de grandeza entre os valores de absorção de água por imersão das argamassas foi bastante similar à absorção de água por capilaridade. A argamassa de referência teve a menor absorção e a 1:7:7 a maior. Desta vez, porém, a justificativa das forças de capilaridade não mais se aplica. Os maiores valores de absorção para os traços com adição de RCR podem estar demonstrando que, apesar de menores, os poros capilares aumentaram em número. Como no caso da capilaridade, a absorção por imersão ocorre em quase a totalidade no primeiro dia de imersão.

3.3.2.6 - Diagramas tensão-deformação e módulo de deformação

Uma característica importante das argamassas diz respeito à sua deformabilidade, ou seja, seu comportamento elástico e plástico de deformação quando submetidas a solicitações mecânicas. Para avaliar esta característica foram ensaiados quatro corpos-de-prova de cada traço até a ruptura registrando para cada etapa do carregamento os pontos da curva tensão-deformação ($\sigma \times \delta$). De posse da curva completa, vários métodos podem ser utilizados para a determinação do módulo de elasticidade: método tangente, método secante e método da corda. Como o objetivo aqui é comparar o comportamento de argamassas com vários teores de resíduo, fez-se a opção do método secante para a determinação do módulo devida a sua simplicidade.

Os corpos-de-prova cilíndricos (5 x10cm) foram ensaiados à compressão aos 28 dias de idade. O equipamento utilizado foi uma prensa eletrônica Instron 5582 do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV/CCT/UENF), mostrado na figura 3.47. Os CPs foram submetidos a um carregamento contínuo e crescente, com velocidade aproximada de 0,5 KN/s.



Fig. 3.47 - Montagem para ensaio à compressão em prensa eletrônica Instron 5582

Segundo a NBR 8522/1984 o módulo de deformação secante pode ser obtido por meio da seguinte expressão:

$$E_{\text{sec},n} = \frac{\sigma_n - \sigma_{\text{inf}}}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \quad (8)$$

Onde:

$E_{\text{sec},n}$ = módulo de deformação secante correspondente à inclinação da reta unindo os pontos do diagrama tensão-deformação relativos às tensões $\sigma_{\text{inf}} = 0,5 \text{ MPa}$ e σ_n ;

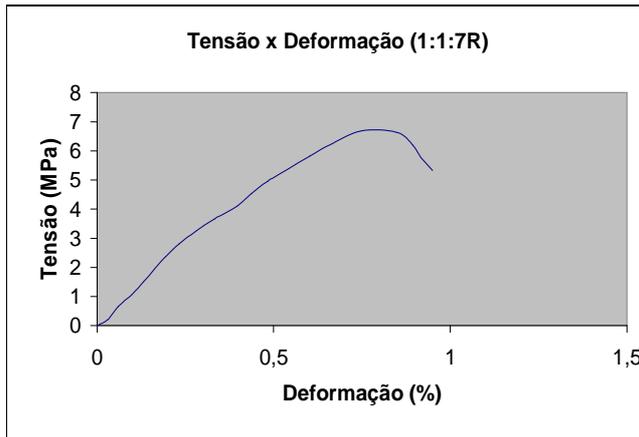
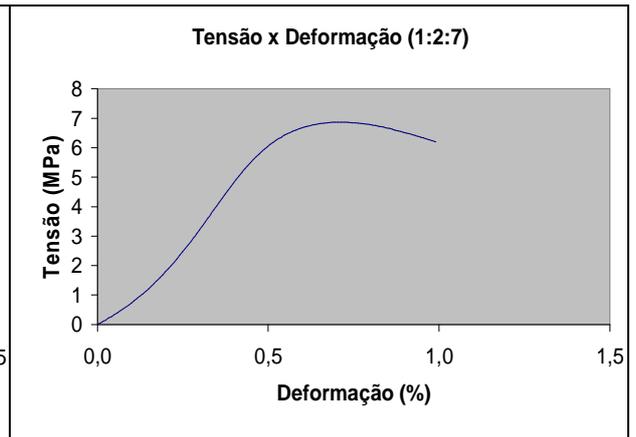
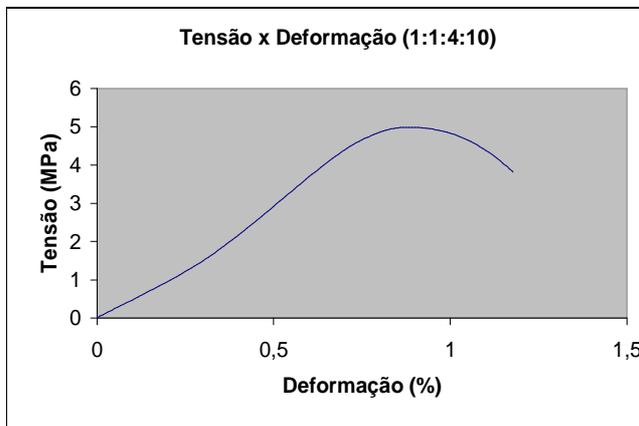
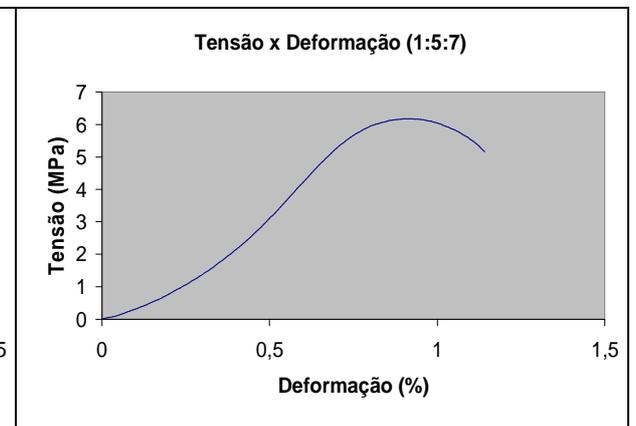
σ_n = tensão considerada para o cálculo do módulo secante. Neste caso específico, a tensão máxima;

ε_n = deformação específica correspondente à tensão σ_n ;

ε_0 = deformação específica correspondente à tensão σ_{inf} .

A seguir são apresentados os diagramas tensão-deformação das argamassas estudadas. Das quatro amostras ensaiadas por traço, foi selecionada uma curva

característica. As escalas verticais estão propositalmente diferentes de forma a oferecer maior possibilidade de visualização das formas das curvas.

Fig. 3.48 - Curva σ x δ do traço 1:1:7:RFig. 3.49 - Curva σ x δ do traço 1:2:7Fig. 3.50 - Curva σ x δ do traço 1:1:4:10Fig. 3.51 - Curva σ x δ do traço 1:5:7

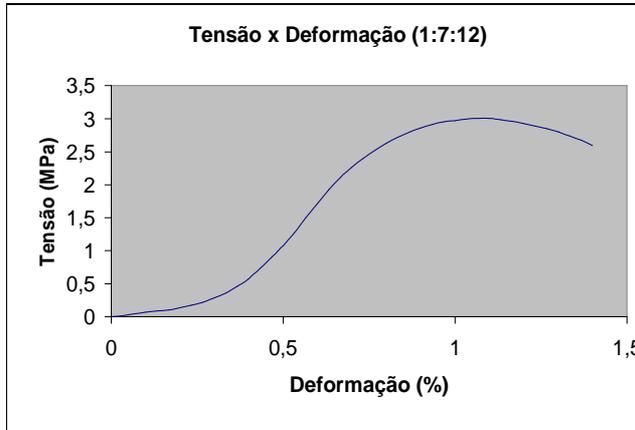


Fig. 3.52 - Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:7:12

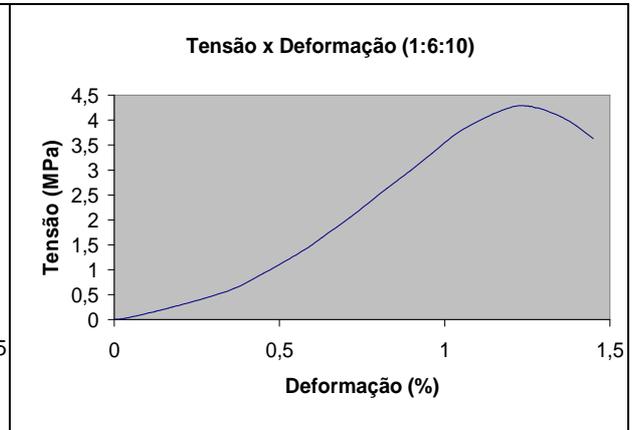


Fig. 3.53 - Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:6:10

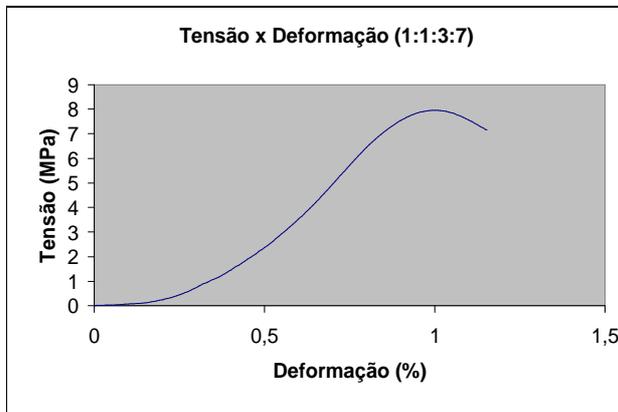


Fig. 3.54 - Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:1:3:7

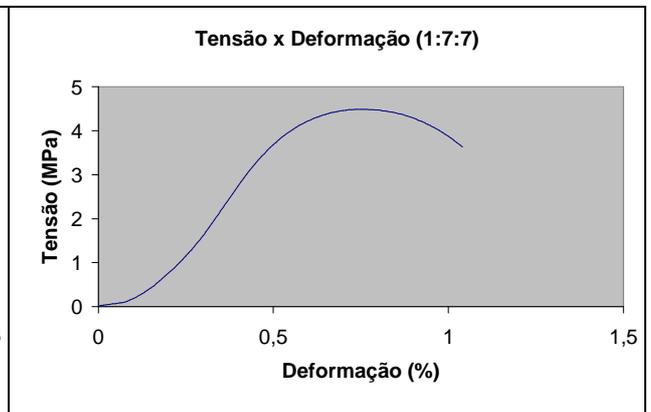


Fig. 3.55 - Curva $\sigma \times \delta$ do traço 1:7:7

Os módulos de deformação pelo método secante das argamassas são apresentados na tabela 3.8.

Argamassas	Módulos de deformação (GPa)
1:1:7R	0,9
1:2:7	1,0
1:1:4:10	0,6
1:5:7	0,7
1:7:12	0,4
1:6:10	0,4
1:1:3:7	1,0
1:7:7	0,7

Tab. 3.8 - Módulos de deformação secante das argamassas estudadas



Os resultados se mostraram coerentes quando são analisados os módulos de deformação em conjuntos com os teores de cimento de cada traço. De uma forma geral, as argamassas mais ricas têm maiores módulos. Contudo, a adição de RCR colaborou para maiores módulos das argamassas com teores medianos de cimento em relação à referência (o traço mais rico).

3.3.3 - Parâmetros de Durabilidade

A durabilidade de qualquer material é um aspecto fundamental para sua aceitação no mercado e influencia muito seu desempenho. Isto torna imprescindível a avaliação do comportamento das argamassas quando expostas a situações similares às que são submetidas na prática, oriundas do seu próprio papel estrutural, principalmente quanto a condições adversas de temperatura e umidade.

Assim, espera-se obter informações para a interpretação das respostas dessas argamassas quando, aplicadas como revestimento, sofrerem condições adversas de temperatura (exposição ao sol) e umidade (chuvas e afins). Para tanto, foi realizado um conjunto de ensaios, envolvendo ciclos de molhagem e secagem, para o estudo das seguintes características: estabilidade dimensional e de massa, variação de resistência e absorção de água por imersão.

3.3.3.1 - Ciclagem água-estufa

O ensaio de ciclagem tem o objetivo de avaliar o comportamento da argamassa submetida a condições alternadas de molhagem e secagem. Quanto aos ciclos, o procedimento foi o mesmo ao descrito no item 3.2.2.2. A diferença se refere ao tempo de cura das argamassas e a período de ciclagem. Ambos duraram 28 dias.

3.3.3.1.1 - Variação dimensional

A variação dimensional foi obtida conforme descrito no item 3.2.2.2.1, sendo a variação positiva uma indicação da diminuição de dimensão após ensaio. A figura 3.56 apresenta os resultados de variação dimensional para as argamassas estudadas.

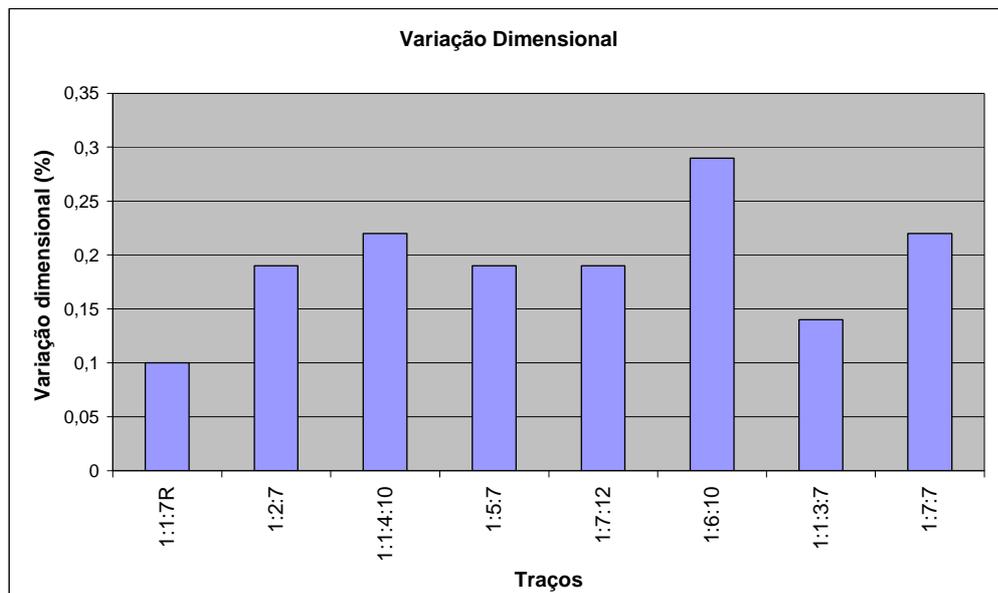


Fig. 3.56 - Variação dimensional das argamassas submetidas à ciclagem

De uma forma geral, os valores de variação dimensional das argamassas foram praticamente irrelevantes, todos inferiores a 0,3%. Mesmo assim, pode-se perceber que as argamassas com RCR têm maiores variações em relação ao traço de referência.

3.3.3.1.2 - Variação de massa

A variação de massa é medida por meio da diferença entre a massa dos corpos de prova antes e depois da ciclagem. A variação positiva indica a perda de massa depois de realizado o ensaio. A figura 3.57 apresenta os valores de variação de massa para as argamassas ensaiadas.

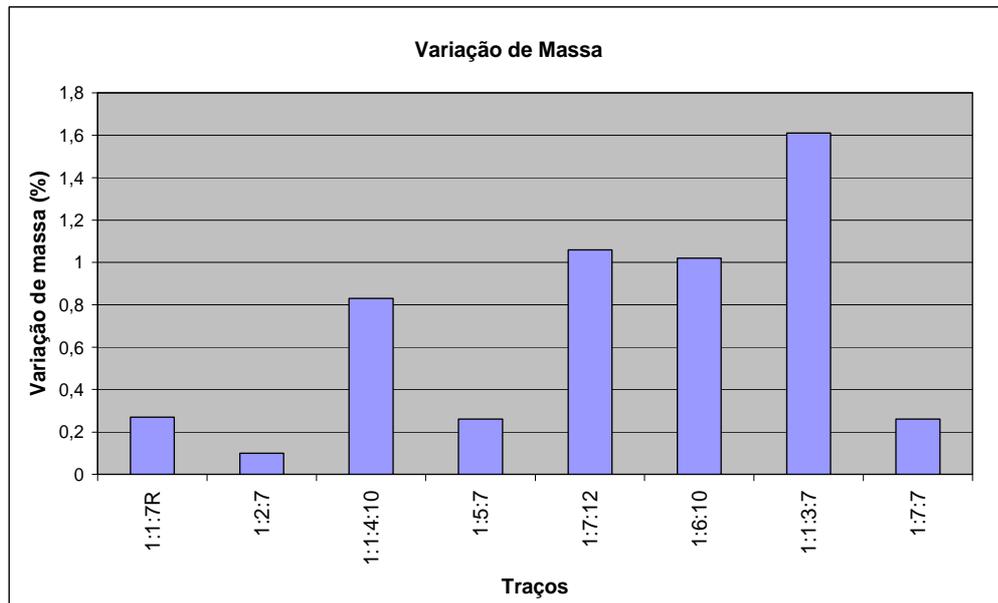


Fig. 3.57 - Variação de massa das argamassas submetidas à ciclagem

Após um período intenso de ciclagem, os valores de perda de massa não atingiram cotas muito elevadas. Contudo, algumas argamassas, principalmente a 1:1:3:7, tiveram valores maiores que a argamassa de referência. Mesmo assim, a tentativa de elaborar qualquer relação da perda de massa, que não passasse pelo teor de inertes, seria complicada devida à ordem de grandeza dos resultados.

3.3.3.1.3 - Absorção de água por imersão

Imediatamente após terem sido encerrados os ciclos de molhagem e secagem, foi realizado o ensaio de absorção de água por imersão com as argamassas, com o intuito de avaliar a alteração desta taxa, quando comparada esta situação com a absorção dos mesmos traços sem o efeito da ciclagem. O período de imersão correspondeu a 24 horas para ambos os casos. Os resultados podem ser vistos do diagrama comparativo da figura 3.58.

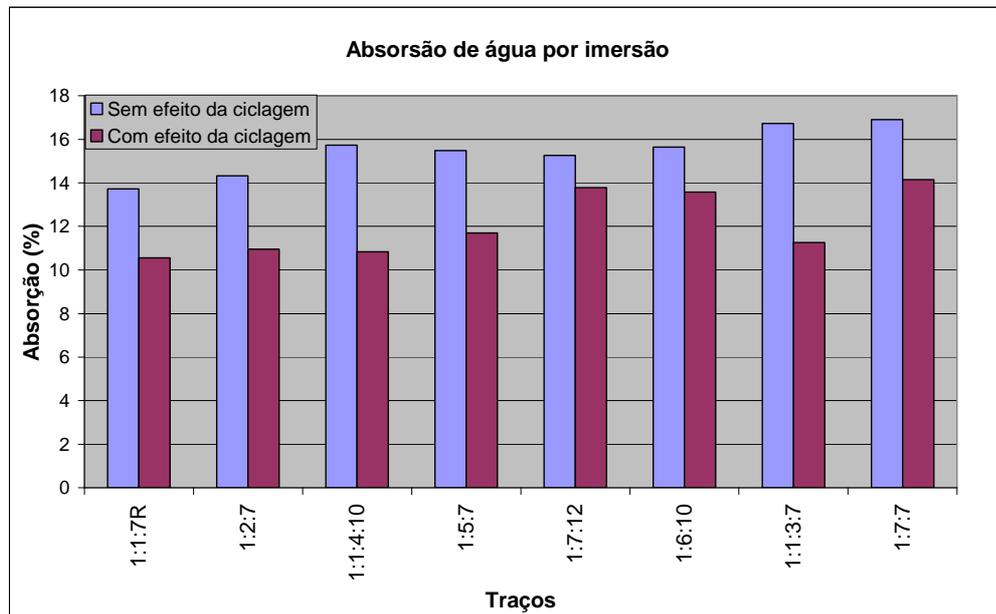


Fig. 3.58 - Comparação entre a absorção de água por imersão das argamassas submetidas à ciclagem e as sem este efeito.

Em todos os casos o efeito da ciclagem foi benéfico quanto à absorção de água por imersão. As argamassas apresentaram valores menores de absorção, provavelmente devidos a um processo provocado pelas condições de umidade e temperatura que, em algum estágio, pode ter contribuído para as reações internas, aumentando a densificação da matriz cimentícia.

3.3.3.1.4 - Resistência à compressão

Também após a ciclagem foi determinada a resistência à compressão das argamassas, com a finalidade de verificar a variação de resistência quando comparada com os mesmos traços sem o efeito dos ciclos. A figura 3.59 apresenta os valores de resistência das argamassas, tanto para cura normal quanto para cura com efeito da ciclagem.

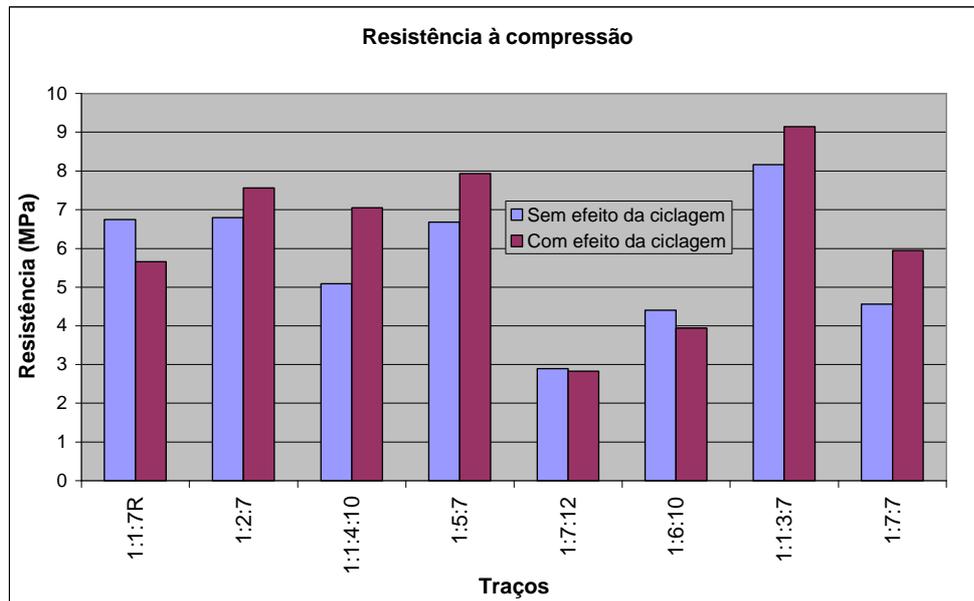


Fig. 3.59 - Comparação entre a resistência à compressão das argamassas submetidas à ciclagem e sem este efeito.

Analisando de uma maneira global, as argamassas com adição de RCR tiveram comportamento satisfatório de resistência mesmo após o período de ciclagem. A maioria dos traços apresentaram aumento de resistência final. Este bom desempenho é ainda mais evidenciado quando se compara com o comportamento da argamassa de referência, que teve uma queda significativa de resistência após a ciclagem.

3.3.4 - Análise Microestrutural

O objetivo da realização da análise microestrutural foi a verificação da densificação da matriz cimentícia da argamassa com adição de RCR.

Para tanto, foram tiradas fotografias em microscópio óptico de três dos traços com adição de RCR: argamassa com maior teor de RCR (1:7:7), a com menor teor de cimento (1:7:12) e uma com RCR e cal (1:1:4:10). Para efeito comparativo, também foi utilizada a argamassa de referência (1:1:7R).

As amostras foram moldadas em pequenos recipientes plásticos, de forma a oferecer um certo encapsulamento as argamassas, facilitando seu manuseio durante o procedimento de preparação superficial. Aos 28 dias de idade os fundos dos recipientes eram retirados, deixando exposta uma superfície já bastante regular, necessitando somente de um polimento fino antes de ser levada ao microscópio.

As fotografias foram obtidas em um microscópio óptico da Neophot, no setor de metalurgia física do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV/CCT/UENF). As fotos foram tiradas nas seguintes condições: aumento de 125 vezes e visualização em campo escuro. As figuras 3.60 a 3.63 apresentam estas fotos.

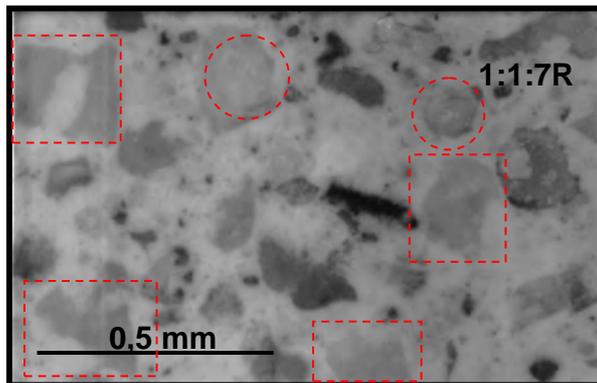


Fig. 3.60 - Micrografia óptica (125X)
argamassa 1:1:7R

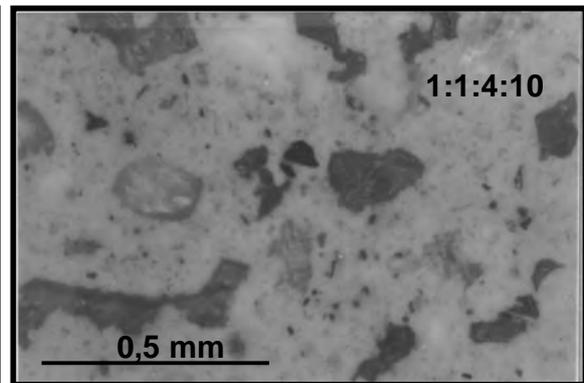


Fig. 3.61 - Micrografia óptica (125X)
argamassa 1:1:4:10

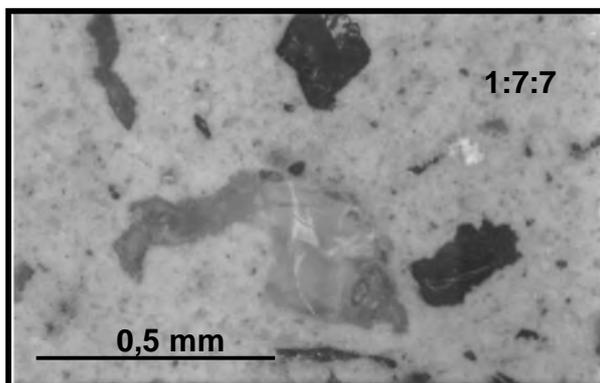


Fig. 3.62 - Micrografia óptica (125X)
argamassa 1:7:7

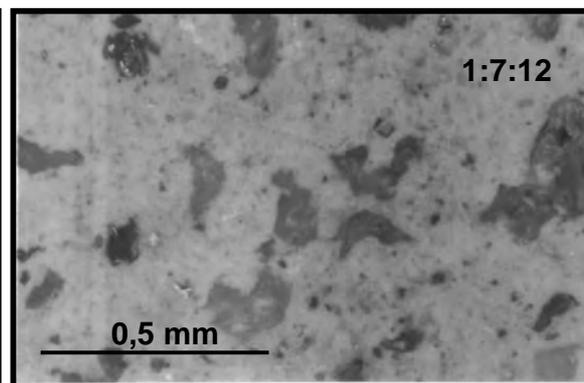


Fig. 3.63 - Micrografia óptica (125X)
argamassa 1:7:12



A interpretação aqui apresentada se baseia não somente nas fotografias, mas também na observação feita diretamente ao microscópio, que por oferecer um melhor campo de visão, favoreceu a identificação de algumas características.

Assim, na primeira fotografia (1:1:7R), percebe-se uma configuração de argamassa com muitos grãos de agregado em uma matriz não muito homogênea, com algumas irregularidades, selecionadas pelos retângulos pontilhados, e alguns vazios internos, círculos pontilhados. Já a argamassa com cal e RCR (1:1:4:10) apresenta uma textura mais suave, com uma matriz mais homogênea, sem excesso de grãos de agregado. A argamassa rica em RCR (1:7:7) apresenta uma matriz altamente densificada e homogênea, com pouca proporção de agregados e sem vazios aparentes. O traço pobre em aglomerante (1:7:12) também apresentou uma configuração rica em grãos de areia, como o traço de referência, contudo, a matriz se apresentou mais densa e homogênea.



4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Diante todos os dados extraídos e resultados obtidos durante a caracterização do resíduo de corte de rochas, o estudo de viabilidade técnica de seu emprego em argamassas e, finalmente, a análise do desempenho deste novo produto (argamassa com adição de RCR) perante diferentes condições, em laboratório, mas que se aproximam da realidade de emprego, busca-se neste capítulo sintetizar essas informações, tanto para o RCR quanto para cada traço, de forma a elaborar uma discussão individualizada e, com isso, mais específica e concisa.

4.1 - O resíduo de corte de rochas

De uma forma global, o resíduo de corte de rochas pode ser caracterizado como um material granular fino que, depois do destorroamento, apresenta superfície específica natural da mesma ordem de grandeza do cimento. Quimicamente, demonstrou ser composto basicamente de silício, alumínio, ferro e potássio, de acordo com a análise química e no “EDX”. A análise mineralógica por “XRD” possibilitou a identificação dos principais minerais constituintes das rochas que lhe dão origem: quartzo, feldspato, biotita e hornblenda.

A presença do ferro na constituição do RCR induziu a uma análise de potencial de oxidação. Porém, a observação visual de amostras antes e depois de ciclos de envelhecimento, não constatou-se qualquer pigmentação suspeita. Pela análise por “XRD” verificou-se a ausência de hidróxido de ferro no resíduo recém produzido e também a ausência de formas oxidadas de ferro após 4 meses de exposição ao meio ambiente. O ferro de origem está na constituição da biotita e da hornblenda.

Outro fato importante, quando se trata de resíduos, se refere ao risco oferecido. De acordo com a NBR 10004/1987, o RCR não apresenta características infectocontagiosas ou propriedades físicas e químicas perigosas, enquadrando-se



como material inerte, ou seja, classe III, não oferecendo risco à saúde de quem o manuseia e nem ao meio ambiente.

O estudo de granulometria e finura mostrou que é possível melhorar as características do RCR por meio de moagem. Em moinhos de bolas, a finura é fortemente influenciada até 600 ciclos. Acima deste número, a superfície específica continua aumentando, porém com valores não muito significativos, demonstrando que 600 ciclos é o valor ideal para o beneficiamento do resíduo.

As curvas granulométricas mostraram que a maior parte das partículas do RCR tem diâmetro equivalente inferior a 0,15 mm, correspondendo à peneira ABNT 100. A opção de peneiramento se dá, então, como forma de evitar a presença de algumas partículas maiores.

Todas as características apresentadas reforçaram a viabilidade do emprego do RCR como adição mineral inerte, fíler, em materiais cimentícios. A potencialidade foi comprovada, para emprego em argamassas, já nos estudos preliminares. A adição de resíduo pôde substituir completamente a cal em argamassas mistas, mantendo as propriedades necessárias para atender às prescrições normativas. Com as variações de traços, durante os estudos de dosagem, foi demonstrada a possibilidade de obtenção de argamassas com baixos teores de cimento, ainda assim com boas resistência mecânica e consistência.

4.2 - Argamassa 1:1:7R

A argamassa de referência, oriunda do traço 1:2:6, em volume, é de uso bastante comum e abrangente na região. Contudo, não obteve bom desempenho para algumas características, principalmente quanto ao estado fresco. O teor de ar incorporado foi bastante elevado (14%) e retenção de água mais baixa (89%) em relação às demais. Quanto à aplicabilidade, a argamassa não se mostrou de fácil



utilização. Muito áspera, necessitou de adição de água para possibilitar sua aplicação em revestimento.

Em contra partida, seu desempenho foi bastante satisfatório quanto à absorção de água por capilaridade e imersão, apresentando valores menores que as argamassas com RCR.

Com relação aos parâmetros de durabilidade, o produto não apresentou valores significativos de perda de massa nem de variação dimensional após a ciclagem água-estufa. Porém, houve uma considerável perda de resistência de 16% (de 6,74 MPa para 5,66 MPa). A absorção foi menor que nas demais argamassas ensaiadas.

A resistência à tração por compressão diametral foi baixa, entretanto as resistências à compressão e de aderência tiveram valores atendendo aos limites da ABNT, o que possibilita enquadrar esta argamassa na classe *II-Normal-B*, podendo ser empregada como revestimento de parede interna com acabamento em pintura.

4.3 - Argamassa 1:2:7

Este traço apresentou o menor teor de resíduo em sua constituição, estando, portanto, mais próximo da argamassa de referência. Tanto é que, durante sua aplicação em assentamento de tijolos e posterior revestimento, apresentou-se também áspero, com dificuldades de manuseio. Contudo, para as outras propriedades no estado fresco, já mostrou melhor desempenho. Graças à adição de RCR, a mistura ficou mais densa, com baixo teor de ar incorporado (4%) e alta retenção de água (93%).

Todavia, a adição de resíduo traz complicações em relação à absorção de água. Na capilaridade o efeito é natural, pois quando diminuem-se os diâmetros dos capilares as forças capilares são maiores. Já quanto à absorção por imersão, o aumento de absorção ocorrido não é de fácil interpretação, provavelmente a adição de RCR colaborou de alguma forma para interligação dos poros, aumentando a penetração da água. Assim como nas demais argamassas, a perda de massa em estufa se manteve na faixa de 3 a 5%.



Sob o efeito de ciclagem, o produto teve boas respostas, com baixos valores de variação dimensional e perda de massa, e uma queda de resistência quase desprezível (de 7,72 para 7,56 MPa).

As propriedades mecânicas foram notadamente apreciáveis, com resistência à compressão de 7,72 MPa, maior valor dentre as argamassas estudadas, resistência de aderência de 0,24 MPa e resistência à tração por compressão diametral de 1,33 MPa.

Diante dos resultados, a argamassa se enquadra na classe *II-Alta-A*, podendo também ser empregada como revestimento de parede interna com acabamento em pintura.

4.4 - Argamassa 1:1:4:10

Um dos traços que combinam o uso de cal e RCR, apresentou boa plasticidade inicial, que, porém, não se manteve com o tempo, o que fez necessária a correção de água para facilitar a finalização dos trabalhos de assentamento e revestimento. Manteve-se a tendência de melhoria das propriedades no estado fresco com a adição do RCR, com alta retenção de água e baixo teor de ar incorporado.

Também seguindo a tendência, os valores de absorção de água por imersão e capilaridade continuaram maiores que o traço de referência.

A durabilidade da argamassa, sob o ponto de vista da ciclagem, foi satisfatório: baixa variação dimensional, com perda de massa um pouco maior que as primeiras, mas ainda irrelevante. A resistência à compressão foi aumentada (5,31 – 7,05 MPa). Isto se deve, talvez, a uma possível combinação de condições de temperatura que colaboram para aceleração das reações de endurecimento da cal (carbonatação).

Mecanicamente, a mistura se mostrou eficiente quanto às resistências à compressão e de aderência (0,23 MPa). Já a resistência à tração por compressão diametral não foi tão alta como a anterior.



Esta argamassa, de acordo como a ABNT, é de classe *II-Alta-A*, com possibilidade de uso como revestimento em parede interna com acabamento em pintura.

4.5 - Argamassa 1:5:7

Argamassa com alto teor de resíduo relativo aos demais constituintes tornando-se, assim, bastante coesiva. A coesividade excessiva quase tornou impraticável o uso no assentamento dos tijolos, entretanto, facilitou a adesão inicial à parede durante a aplicação como revestimento, mas não refletiu positivamente na regularização superficial. As propriedades de retenção de água e teor de ar incorporado continuaram boas. As absorções de água também se mantiveram altas.

Com este traço a argamassa voltou a apresentar baixa variação de massa conjuntamente com a variação dimensional. O valor de resistência à compressão teve um pequeno aumento após a ciclagem (7,64 – 7,93 MPa).

A resistência à compressão foi alta e a resistência à tração por compressão diametral voltou a subir (1,53 MPa). Todavia, a aderência não foi tão boa (0,18 MPa), ficando abaixo do valor mínimo regulamentado pela ABNT, impossibilitando o emprego deste traço para revestimento. A argamassa fica somente inserida na classe *II-Alta-A*.

4.6 - Argamassa 1:7:12

Corresponde ao traço mais pobre, isto é, como menor teor de cimento, somente 5% em massa. Mesmo com o grande percentual de material inerte, a argamassa apresentou excelentes resultados de retenção de água e teor de ar incorporado. Outra característica no estado fresco, a aplicabilidade, se mostrou bastante satisfatória. A argamassa apresentou boa consistência e plasticidade, resultando em facilidade no manuseio durante o assentamento dos blocos cerâmicos e em um revestimento com



excelente acabamento superficial. Com alto teor de RCR, apresentou valores altos de absorção de água.

Posteriormente aos ciclos de molhagem e secagem houve uma baixa variação dimensional. A perda de massa foi maior que as anteriores, porém de pequena ordem de grandeza. Considerável foi a perda de resistência à compressão (3,69 – 2,83 MPa), devida principalmente a pouca coesão interna do produto, por causa do baixo teor de cimento.

Com tão alta relação de inertes, já eram esperadas respostas mecânicas não muito satisfatórias, como ocorreu com a resistência à compressão e à tração por compressão diametral. No entanto, a resistência de aderência não apresentou queda. Este fato está relacionado não a aderência química, devida ao aglomerante, mas a física, devida ao contato entre a argamassa e o substrato, que neste caso ficou bem homogênea, por causa da facilidade de aplicação do revestimento e de regularização.

Assim, este traço pode ser empregado em revestimento de paredes internas com acabamento em pintura, sendo pertencente à classe *I-Alta-A*.

4.7 - Argamassa 1:6:10

Esta argamassa também tem alto teor de inertes, porém, diferencia-se da anterior por ter uma maior quantidade relativa de finos, o que fez com que apresentasse maior plasticidade. Demonstrou alguma dificuldade de homogeneização durante a mistura, porém não houve maiores problemas quanto à aplicação. Ainda em estado fresco, garantiu ótimas respostas em relação ao teor de ar incorporado e retenção de água. Os valores de absorção de água continuaram maiores que a referência.

Seu desempenho quanto à durabilidade foi satisfatório em relação à estabilidade dimensional, porém, ocorreu apreciável perda de resistência à compressão após a ciclagem (4,86 – 3,94 MPa). Esta perda, mais uma vez, pode estar relacionada ao baixo teor de aglomerante do produto.



O valor de resistência à compressão foi razoável, contudo, o mesmo não ocorreu com a aderência. Por ser um traço pobre e não ter conseguido um desempenho tão expressivo durante a aplicação do revestimento, não colaborando também com a aderência física, apresentou valor de resistência que impossibilita seu emprego como argamassa para revestimento. Já a resistência à tração por compressão diametral teve um valor razoável (1,19 MPa).

Esta argamassa fica então classificada como *II-Alta-A*.

4.8 - Argamassa 1:1:3:7

Segundo traço que combina cal e RCR, esta argamassa possui um maior teor de finos que a primeira. Esta diferença se refletiu na maior dificuldade de regularização superficial do revestimento. Outra diferença foi a menor adesão inicial. De uma forma geral, as propriedades em estado fresco foram razoáveis, combinando boa plasticidade, com alta retenção de água e baixo teor de ar incorporado. A absorção de água se manteve na tendência de ser maior que a argamassa de referência.

Com relação à ciclagem água-estufa, esta argamassa apresentou boa estabilidade dimensional, mas mostrou a maior perda de massa entre os traços estudados, mesmo sendo a ordem de grandeza irrelevante. A resistência à compressão teve um grande aumento após os ciclos (7,02 – 9,14 MPa), o que vem a reforçar a teoria de que as condições a que ficaram expostas as argamassas dentro da estufa contribuíram para o aumento da taxa de endurecimento da cal, aumentando assim os valores de resistência.

As propriedades mecânicas tiveram resultados satisfatórios, com elevada resistência à compressão, valor de aderência no limite aceito pela ABNT e resistência à tração acima de 1 MPa.

Nessas condições, a argamassa pode ser empregada para execução de revestimentos de paredes internas com acabamento em pintura, tendo sua classificação como *II-Alta-A*.



4.9 – Argamassa 1:7:7

A última das argamassas estudadas tem o maior teor de resíduo de corte de rochas na constituição, influenciando diretamente sua coesividade, que de tão elevada deixou a argamassa pegajosa. Com tal característica o seu manuseio foi excessivamente trabalhoso, sendo necessária adição de água para a realização da aplicação, tanto no assentamento como no revestimento. Foi o traço mais problemático durante a atividade de regularização superficial.

Devido ao elevado teor de RCR, apresentou os maiores valores de absorção de água, tanto na imersão quanto por capilaridade. Como era de se esperar, o teor de ar incorporado foi baixo e a retenção de água foi alta.

Os parâmetros considerados no tratamento da durabilidade se mantiveram satisfatórios, até mesmo com um surpreendente aumento da resistência à compressão após a ciclagem (4,20 – 5,94).

A resistência à compressão foi razoável, porém o mesmo não ocorreu com as resistências à tração e de aderência. Com relação a esta última, o valor foi o mais baixo entre as demais, devido tanto a baixa adesividade química quanto a aderência física, que foi bastante afetada pela dificuldade de aplicação deste produto.

Esta argamassa não pode ser utilizada para revestimento e tem classificação ABNT de *II-Alta-A*.



5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 - Conclusões

Os resultados obtidos durante a elaboração deste trabalho dão mostra da potencialidade do setor de construção civil em colaborar com a sustentabilidade do meio ambiente que, neste caso específico, está centrada em propostas que visam o aproveitamento de certos resíduos como materiais para construção. Neste aspecto, o resíduo de corte de rochas demonstrou grande viabilidade quanto a seu emprego como parte constituinte de argamassas de múltiplo-uso, principalmente de assentamento e revestimento.

O efeito de fíler, proporcionado pelo RCR à matriz cimentícia de argamassas é um dos principais fatores que contribuíram para um bom desempenho dos produtos finais. Outro ponto importante diz respeito ao efeito plastificante do resíduo, que fez com que as argamassas apresentassem uma consistência mais plástica, com maior trabalhabilidade, para mesmos teores de água.

Quanto ao processamento do resíduo para seu emprego nas argamassas foi possível verificar que o material já é bastante fino naturalmente, de mesma ordem de grandeza que o cimento. No entanto, como é geralmente coletado úmido, depois do processo de secagem é necessária uma etapa de destorroamento, que se realizada em moinhos de bolas, apresentou melhor custo-benefício para um tempo de permanência de aproximadamente 20 minutos. O material resultante é de finura ainda mais elevada, justificando um peneiramento final apenas para retirar alguma partícula grosseira.

O resíduo pode ser empregado em argamassas sem ressalvas quanto à possibilidade de oxidação ou oferecimento de risco à saúde de quem o manuseia e também ao meio ambiente, conforme demonstrado pelas análises e disposições da ABNT sobre o assunto.

No que se refere à viabilidade econômica do emprego do RCR em argamassas, não restaram dúvidas de que as adições podem substituir adequadamente a cal, parcial



ou totalmente, para os traços de argamassas mistas e ainda possibilitar a redução dos teores de cimento, diminuindo significativamente o custo final do produto, sem deixar de atender aos requisitos das normas nacionais.

Sob o ponto de vista tecno-científico, o estudo de dosagem, desempenho e durabilidade das argamassas com adição de RCR possibilitou o levantamento de importantes informações e conclusões, dentre as quais se destacam as seguintes:

- A adição de RCR aumentou a densidade das argamassas, diminuindo o teor de ar incorporado e aumentando a retenção de água.
- Os traços com resíduo demonstraram melhores desempenhos quanto ao manuseio e aplicação, porém, teores muito elevados de RCR tornaram a argamassa pegajosa, quase que impossibilitando sua utilização.
- Em relação à resistência mecânica, as variações de dosagem possibilitaram a obtenção de traços com desempenho condizente às especificações da ABNT para uso como revestimento e assentamento. Excetuam-se deste grupo as argamassas 1:5:7, 1:6:10 e 1:7:7, que só podem ser aplicadas em assentamento. Destaque especial deve ser dado ao traço 1:7:12 que, mesmo com apenas 5% de aglomerante, atendeu plenamente às normas regulamentadoras.
- Mesmo depois da ciclagem água-estufa as argamassas com RCR continuaram a demonstrar boa resistência mecânica. Os valores de resistência à compressão não foram muito afetados, chegando a haver aumento, fato que deve ser creditado à temperatura utilizada na ciclagem. Com respeito à perda de massa e estabilidade dimensional pós-ciclagem, os percentuais foram muito baixos, não tendo muita significância a comparação entre argamassas com e sem resíduo.
- Já quanto à absorção de água, os resultados apontam para se ter cautela no emprego de resíduo de corte de rocha em argamassa. Como já citado, a adição deste resíduo densifica o produto final, diminuindo o tamanho dos poros, e isto



contribui para o aumento da absorção por capilaridade, como esperado, porém, o aumento da absorção também por imersão é um fato preocupante, estando possivelmente ligado ao aumento do teor de material inerte, faltando adesão interna suficiente para o fechamento dos poros.

De uma forma geral, as argamassas com adição de RCR apresentaram desempenho igual ou melhor que a argamassa de cimento e cal usada como referência. O único ponto significativo desfavorável foi o aumento absorção de água, que mesmo assim não passou de 20%.

Neste âmbito, um traço em particular teve destaque em seu desempenho. A argamassa 1:7:12 que, apesar do baixíssimo teor de aglomerante (5% de cimento) e da significativa incorporação de RCR (35%), atendeu plenamente as prescrições normativas tanto para uso em assentamento como para revestimento, apresentado ótimas propriedades no estado fresco, que se traduziram em melhor trabalhabilidade e facilidade de manuseio.

Diante de todo o exposto, os resultados obtidos neste trabalho delineiam o procedimento para correta e racional utilização do RCR na produção de uma nova argamassa, ecologicamente correta, durável, com bom desempenho mecânico e ainda com menor custo de produção, abrindo caminho para uma redução efetiva e contínua dos impactos ambientais causados pelo beneficiamento das rochas ornamentais.

5.2 - Sugestões para trabalhos futuros

Como o estudo de dosagem realizado neste trabalho visava à obtenção de traços que pudessem ser uma amostragem representativa das possibilidades de misturas com RCR, fica a sugestão para futuros estudos de dosagens científicas que possam determinar as misturas que otimizem o desempenho deste novo modelo de argamassas.

A influência da adição de resíduo de corte de rochas nos mecanismos de retração e possíveis processos de fissuração originados também devem ser analisados.



A análise microestrutural do RCR na forma de pó seria bastante interessante e contribuiria para um estudo mais apurado de dosagens científicas centrado no efeito plastificante do resíduo.

A perda de resistência de aderência com o tempo e a diminuição da absorção de água por imersão após ciclagem de alguns traços, bem como o aumento de resistência à compressão das argamassas com RCR, também após os ciclos de molhagem e secagem, são propriedades que merecem um tratamento mais minucioso.

Torna-se necessário o aprofundamento no estudo dos mecanismos de absorção de água dessas argamassas com RCR, de forma a se determinar alternativas de controle, para que se possa então ter a possibilidade de uso irrestrito deste material. Ensaio em microscópio eletrônico de varredura e em porosímetro de mercúrio podem contribuir para compreensão dos mecanismos de absorção.

Por fim, a realização de uma análise de custos envolvendo todo o processo de produção desta nova concepção de argamassa indicaria os percentuais de economia em relação aos traços convencionais.

ANEXO – Resumo dos resultados

Argamassas	PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO			
	Teor água para consistência padrão (%)	Retenção de água (%)	Teor de ar incorporado (%)	Densidade de massa (g/cm ³)
1:1:7R	19	89	14	2,07
1:2:7	16	93	4	2,09
1:1:4:10	19	93	5	2,09
1:5:7	18	96	3	2,13
1:7:12	18	96	4	2,13
1:6:10	17	96	3	2,13
1:1:3:7	18	96	3	2,10
1:7:7	19	97	4	2,13

Tab. A.1 - Propriedades de estado fresco das argamassas estudadas

Argamassas	PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO						
	Absorção de água por Capilaridade		Absorção de água por imersão		Resistência à compressão 28 dias (MPa)	Resistência de aderência 28 dias (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral 28 dias (MPa)
	Absorção de água (g/cm ²)	Perda de massa após 5 dias em estufa (%)	Absorção de água (%)	Perda de massa após 3 dias em estufa (%)			
1:1:7R	2,02	3,61	14,25	3,61	6,74	0,23	0,49
1:2:7	2,16	3,53	14,5	3,87	7,72	0,24	1,33
1:1:4:10	2,22	4,59	15,94	4,07	5,31	0,23	0,70
1:5:7	2,25	4,68	15,51	4,49	7,64	0,18	1,53
1:7:12	2,18	2,92	15,29	3,03	3,69	0,23	0,76
1:6:10	2,29	3,16	15,68	3,22	4,86	0,10	1,19
1:1:3:7	2,42	3,61	16,8	3,8	7,02	0,20	1,11
1:7:7	2,43	3,39	16,98	3,48	4,20	0,09	0,65

Tab. A.2 - Propriedades de estado endurecido das argamassas estudadas



Argamassas	PARÂMETROS DE DURABILIDADE			
	Ciclagem água-estufa			
	Varição dimensional (%)	Varição de massa (%)	Absorção por imersão após ciclagem (%)	Resistência à compressão após ciclagem (%)
1:1:7R	0,1	0,27	10,56	5,66
1:2:7	0,19	0,1	10,95	7,56
1:1:4:10	0,22	0,83	10,83	7,05
1:5:7	0,19	0,26	11,7	7,93
1:7:12	0,19	1,06	13,79	2,83
1:6:10	0,29	1,02	13,57	3,94
1:1:3:7	0,14	1,61	11,26	9,14
1:7:7	0,22	0,26	14,14	5,94

Tab. A.3 - Parâmetros de durabilidade das argamassas estudadas



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A construção e o meio ambiente - meio ambiente: um grande problema;
<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm> em 01/2004.
- A Utilização do entulho como agregado para o concreto;
<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm> em 01/2004. Por Zordan, S. E., Paulon, V. A.
- Al-Dzuneid, I. (1994) The increasing of quality of cement composition with addition of slimes. Camapa. *apud* Karimov (1996).
- Almeida, S. L. M. (2001) Aproveitamento de rejeitos de pedreiras de Santo Antônio de Pádua - RJ para produção de brita e areia. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM. Rio de Janeiro.
- American society of testing and materials - ASTM. 1994. Fly ash and natural pozzolans: C618 1994. West Conshohocken. PA. *apud* Neville (1997).
- Ângulo, S. C., Zordan, S. E., John, V. M. (2001) Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. Ibracon. IV Seminário de desenvolvimento sustentável na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1982. Agregado em estado solto - determinação da massa unitária: NBR 7251. Rio de Janeiro.



Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1983. Agregado para concreto. Rio de Janeiro: NBR 7211. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1983. Argamassa e concretos - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 7222. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1984. Cimento portland e outros materiais em pó determinação da massa específica: NBR 6474. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1984. Concreto - determinação do módulo de deformação estática e diagrama - tensão-deformação: NBR 8522. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1984. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica: NBR 6508. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1984. Solo - análise granulométrica: NBR 7181 MB 32. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica: NBR 9778. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. Resíduos sólidos: NBR 10004. Rio de Janeiro.



Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade: NBR 9779. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da retenção de água: NBR 13277. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão: NBR 13276. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação do teor de incorporado: NBR 13278. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos - determinação da resistência à compressão: NBR 13279. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - determinação da resistência de aderência à tração: NBR 13528. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1996. Cimento Portland - determinação da resistência à compressão: NBR 7215. Rio de Janeiro.



Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1996. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - especificação: NBR 13749. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1998. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas de cerâmica - determinação da resistência de aderência: NBR 14084. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1998. Cimento portland - determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine): NBR NM 76. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1998. Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - procedimento: NBR 7200. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2001. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - requisitos: NBR 13281. Rio de Janeiro.

Berry, E. E., Malhotra, V. M. (1980) Fly Ash for use in Concrete - A critical Review. *ACI Materials Journal*. USA. Nº 02, V. 77. Proceedings. *apud* Gonçalves (2000).

Bilodeau, A., Malhotra, V. A. (2000) High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development. *ACI Materials Journal*. USA, Nº 1, V. 97. *apud* Gonçalves (2000).

Bilodeau, A., Malhotra, V. M. (1994) High-Performance Concrete Incorporating Large Volume of ASTM Class F Fly Ash. Proceedings of the ACI International Conference.



- Singapore. Ed. Malhotra, V. M. American Concrete Institute. Detroit. *apud* Karimov (1996).
- Bittar, O. Y (1999) Desafio a Sustentabilidade Ambiental da Mineração e Uso de Agregados Naturais em Áreas Urbanas. II Seminário: Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto. Comitê Técnico CT 206 - Meio Ambiente. São Paulo. *apud* Oliveira (2001).
- Branco, P. M. (1979) *Dicionário de Mineralogia*. Rio de Janeiro: Edição P. M. Branco e CPRM.
- Brito Filho, J. A. (1999) Cidades versus entulho. II Seminário - Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção Civil. Anais. IBRACON - Comitê 206. São Paulo. *apud* Miranda, L. F. R. (2000) *Estudos de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado*. Dissertação (engenharia civil) - São Paulo - SP; Universidade de São Paulo.
- Calaes, A. D. (1999) Estudo setorial de rochas ornamentais do Estado do Rio de Janeiro. CONDET/FIRJAN. v. 2. Rio de Janeiro. *apud* Almeida (2001).
- Caniné, J.M. (1992) Pedra Miracema, a rocha ornamental de Santo Antônio de Pádua. Departamento de Recursos Minerais. Niterói - RJ. *apud* Almeida (2001).
- Carette, G. G., Bilodeau, A., Chevrier, R. L., Malhotra, V. M. (1993) Mechanical Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash from Sources in the U.S. *ACI Materials Journal*, Vol. 90, Nº. 6. *apud* Karimov (1996).



- Catarino, L., Souza, J., Martins, I. M., Vieira, M. T., Oliveira, M. M. (2003) Ceramic products obtained from rock wastes. *Journal of Materials Processing Technology*. Estados Unidos.
- Cincotto, M.A. (1988) Utilização de sub-produtos e resíduos na indústria da Construção Civil. II Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil. Florianópolis. *apud* Gonçalves (2000).
- Cordeiro, G. C., Vaillant, J. M. M., Désir, J. M. (2001) Resíduo cerâmico como aditivo mineral em concreto. Ibracon. IV Seminário de desenvolvimento sustentável na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo.
- D'agostino, L. Z., Soares, L. (2001) Preparo de argamassas com emprego de finos de pedra. Ibracon. IV Seminário de desenvolvimento sustentável na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo.
- Dana, J. D., Hurlbut, C. S. (1976) *Manual de mineralogia*. 2ª edição. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora S.A.
- Danilovich, I. I., Skanavi, N. A. (1988) Application of fuel slags and ashes for manufacture of building materials. *apud* Karimov (1996).
- Falcão, P. I., Stellin Júnior, A. (2001) Utilização de finos de serrarias do Espírito Santo nas indústrias de construção civil. Jornadas IBERMAC Materiais de Construção. Madri - Espanha.
- Ferreira, G. S. (2002) *Estudo de estabilidade e processo de lavra na extração de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua - RJ*. Projeto de dissertação



(Mestrado em engenharia civil) - Campos dos Goytacazes - RJ; Universidade estadual do norte fluminense.

Ferreira, G. S. (2004) *Estudo de estabilidade e processo de lavra na extração de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua - RJ*. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Campos dos Goytacazes - RJ; Universidade estadual do norte fluminense.

Fiorito, A. J. S. I. (1994) *Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução*. São Paulo: Editora PINI.

Gonçalves, J. P. (2000) *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos*. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Porto Alegre - RS; Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

JOHN, V. M. (1995) *Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio*. Tese (Doutorado) - São Paulo - SP; Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. *apud* Ângulo, S. C., Ulsen, C., Kahn, H., John, V. M. (2002) desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. EPUSP. São Paulo.

John, V. M. (1996) Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. Workshop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de construção. São Paulo. PCC-USP. *apud* Gonçalves (2000).

John, V. M. (2000) *Reciclagem de resíduos na construção civil - contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. Tese (livre docência) - São Paulo - SP; Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. *apud* John, V. M., Ângulo, S. C.,



Agopyan, V. (2003) sobre a necessidade de metodologia de pesquisa e desenvolvimento para reciclagem. EPUSP. São Paulo.

John, V. M. A construção e o meio ambiente. <http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm> em 01/2004.

Kaprielov, S. S (1995) General laws of formation of cement stone and concrete structure with the additive of ultra dispersible materials. Nº 6. *apud* Karimov (1996).

Karimov, I. (1996) The effect on fine fillers on the strength and other properties of concrete (the review of literature). Department of theoretical and applied mechanics. Russia.

Krasnii, I. M. (1987). About the mechanism of increase of concrete strengths at introduction of microfillers. Nº 5. *apud* Karimov (1996).

Larbi, J. A., Bijen, J. M. (1990) Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems. V20. Nº 5. *apud* Karimov (1996).

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (1994) *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 1ª ed., São Paulo: Editora PINI.

Mothé, L. P. (2004) *Análise da atividade pozolânica da metacaulinita produzida com matéria-prima das jazidas do município de Campos dos Goytacazes*. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Campos dos Goytacazes - RJ; Universidade estadual do norte fluminense.



- Naik, T. R., Singh, S. S., Hossain, M. M. (1994) Abrasion Resistance of Concrete as Influenced by Inclusion of Fly Ash. *Cement and Concrete Research*. V. 24, Nº 2. *apud* Karimov (1996).
- Navega, M. A. G., Costa, N. M. A., Carvalho, J. M. F. (1998) Incorporação de Lamas, da Indústria Transformadora de Rochas Ornamentais, na Indústria dos cimentos. *Cimento e betão*. Portugal.
- Neville, A. M. (1997) *Propriedades do concreto*. Trad. Giammusso, S. E. 2ª ed., São Paulo: Editora PINI.
- Olginskii, A. G. (1990). The fine mineral additives to cement concretes. Nº 3. *apud* Karimov (1996).
- Oliveira, M. J. E., Mattos, J. T., Assis, C. S. (2001) Resíduos de concreto: classe III versus classe II. Ibracon. IV Seminário de desenvolvimento sustentável na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo.
- Oliveira, T. M. A. (1998) *Avaliação técnica e econômica da extração de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua-RJ*. Dissertação (Mestrado) - Rio de Janeiro - RJ; Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. *apud* Almeida (2001).
- Penttalla, V. (1997). Concrete and Sustainable Development. *ACI Materials Journal*. Estados Unidos, Nº 5, V.94. *apud* Gonçalves (2000).
- Petrucchi, E. G. R. (1993) Concreto de cimento Portland. 12ªed. São Paulo: Ed. Globo. *apud* Gonçalves (2000).



- Pinto, T. P. P. (1986) *Utilização de resíduo de construção. Estudo do uso em argamassas*. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - São Carlos - SP; Universidade de São Paulo. *apud* Miranda (2000).
- Pissato, E., Soares, L. (2001) Adição de finos de pedra em misturas de solocimento. Ibracon. IV Seminário de desenvolvimento sustentável na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo.
- Ramachandran, V. S., Feldman, R. F., Collepardi M.,(1988) *The concrete admixtures: Manual*. *apud* Karimov (1996).
- RETECMIN. Fábrica de argamassas de Santo Antonio de Pádua/Projetos. <http://www.cetem.gov.br/html/Retecmin/comeco.htm> em 01/2004.
- Rocha, J. C., Cheriaf , M. (2003) *Aproveitamento de resíduos na construção*. In: Rocha, J. C., John, V. M., *Utilização de resíduos na construção habitacional*. ANTAC. Porto Alegre: Coletânea HABITARE, vol 4, Cap. 3.
- Sabbatini, F. H. (1991) Tecnologia de execução de revestimento de argamassas. 13º simpósio de aplicação da tecnologia do concreto. São Paulo.
- Selmo, S. M. S., Nakakura, E. H., Miranda, L. F. R., Medeiros, M. H. F., Silva, C. O. (2002) *Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso*. EPUSP. São Paulo.
- Silva, P. A. D., Pastore, E. L. (2001) *Valorização do rejeito da pedra municipal de Pirenópolis (GO) como proposta de recuperação ambiental*. Ibracon. IV Seminário



de desenvolvimento sustentável na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo.

Silva, R. E. C. (1999) *Estudo geológico-teórico-ambiental de uma pedreira de rocha ornamental no município de Santo Antônio de Pádua-RJ*. Dissertação (Mestrado) - Rio de Janeiro - RJ; Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. *apud* Almeida (2001).

Teixeira, W., Toledo, M. C. M., Fairchild, T. R., Taioli, F. (2001) *Decifrando a terra*. São Paulo: Oficina de texto - Universidade de São Paulo.

Vazquez, E. (2001) Aplicación de nuevos materiales reciclados en la construcción civil. Ibracon. IV Seminário de desenvolvimento sustentável na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo.

Visockii, S. A. (1994) The mineral additives for concrete. Nº 2. *apud* Karimov (1996).

Vlasov, V. K. (1988) The mechanism of increase of concrete strength at introduction of microfíler. Nº 10. *apud* Karimov (1996).

Wallevik, O. H., Saasen, A., Gjorv, O. E. (1995) Effect of Filler Materials on the Rheological Properties of Fresh Concrete. *ACI Materials Journal*. USA. Nº 05, V. 92. Proceedings. *apud* Gonçalves (2000).

Xavier, G. C. (2001) *Utilização de resíduos da serragem do mármore e granito na confecção de peças cerâmicas vermelhas*. Dissertação (Mestrado em ciências da engenharia) - Campos dos Goytacazes - RJ; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.



Zordan, S. E., PAULON, V. A. (1997) A utilização do entulho como agregado para concreto; <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm> em 01/2004.

Zotkin, A. G. (1994) Microfilling effect of the mineral additives in concrete. Nº 3. *apud* Karimov (1996).