



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE DOUTORADO EM  
ENGENHARIA DE PROCESSOS

TESE DE DOUTORADO

ESTUDO DA DURABILIDADE DE ARGAMASSAS ALTERNATIVAS  
PRODUZIDAS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E GRANITO

João de Farias Filho

CAMPINA GRANDE-PB

2007

JOÃO DE FARIAS FILHO

**ESTUDO DA DURABILIDADE DE ARGAMASSAS ALTERNATIVAS  
PRODUZIDAS DE RESÍDUOS DE CONTRUÇÃO E GRANITO**

Tese apresentada ao Programa de  
Doutorado em Engenharia de Processos  
da Universidade Federal de Campina  
Grande, em cumprimento às exigências  
para obtenção do grau de DOUTOR EM  
ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Área de Concentração: **Desenvolvimento de Processos**

Orientadores **Prof. Dr. GELMIRES DE ARAÚJO NEVES**  
**Prof. Dr. HEBER CARLOS FERREIRA**

Campina Grande – Paraíba  
2007

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

F224e  
2007

Farias Filho, João.

Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito/ João de Farias Filho.— Campina Grande: 2007.

118f.: il.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientadores : Dr. Gelmires de Araújo Neves e Dr. Heber Carlos Ferreira.

1. Resíduo. 2. Reciclagem. 3. Durabilidade. 4. Atividade Pazolânica. 5. Resistência à Compressão. I. Título.

CDU 628.4.036

João de Farias Filho

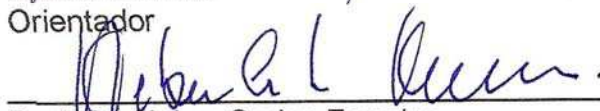
**Estudo da Durabilidade de Argamassas Alternativas Produzidas de Resíduos de Construção e Granito**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de DOUTOR EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves  
UAEMA/UFCG


Orientador

  
Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira  
UAEMA/UFCG

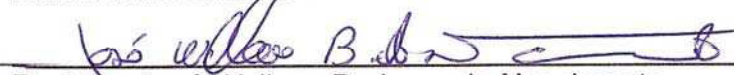
Orientador

  
Prof. Dra. Djane de Fátima Oliveira  
DQ/UEPB

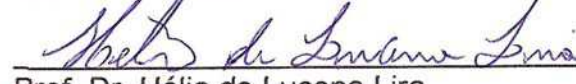
Examinador Externo

  
Profa. Dra. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena  
CNPQ

Examinador Externo –

  
Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento  
UAEAG/UFCG

Examinador Interno

  
Prof. Dr. Hélio de Lucena Lira  
UAEMA/UFCG

Examinador Interno

  
Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra  
CEFET-PB

Examinador Externo

Campina Grande – PB  
2007

*“Dedico este trabalho à toda minha família, em especial, aos meus pais João e Maria da Paz, à minha esposa Netinha, às nossas filhas Tiê, Talina e Tatielly e aqueles que estiveram ao meu lado nesta difícil caminhada”. DEDICO.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado coragem, entusiasmo e determinação.

Aos meus pais João Farias e Maria da Paz por terem me dado o existir, e aos meus irmãos pelo apoio e incentivo.

Aos meus excelentes orientadores e amigos professores Dr. Heber Carlos Ferreira e Dr. Gelmires de Araújo Neves que sempre me incentivaram e indicaram onde buscar as fontes de pesquisas para a busca dos conhecimentos que serviram de fundamentos, desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos professores Dra. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena, Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento, Dr. Antonio Farias Leal e Dra. Djane de Fátima Oliveira pela fundamental colaboração durante toda realização do trabalho disponibilizando parte de seus valiosos tempos para sugestões, discussões e delineamento de caminhos a serem seguidos para otimização dos resultados a serem obtidos.

Ao companheiro Juàres José Gomes que sempre me ajudou e que sempre estivemos juntos nesta batalha, estabelecendo-se um verdadeiro sentimento de parceria e companheirismo.

Ao meu cunhado Roberval Dias Correia pela colaboração e ajuda em diversos momentos que estive realizando este Curso.

Aos meus amigos pelo incentivo e encorajamento, principalmente nos momentos difíceis e no compartilhamento das alegrias também.

A todos os funcionários do Laboratórios de Engenharia dos Materiais que direta ou indiretamente colaboraram para execução deste trabalho.

Ao Sr. Nilson e aos demais funcionários do Laboratório de Construções Rurais - LaCRA que de alguma forma colaboraram para execução desta pesquisa.

A ATECEL na pessoa do Prof. Dr. Francisco Barbosa de Lucena pelo apoio técnico e financeiro durante o período de realização deste trabalho.

Aos laboratoristas: Lelé, Mano e Eugenio, funcionários da ATECEL, que auxiliaram na realização de ensaios naquele laboratório.

Aos amigos do doutorado, em especial a Heber Junior e Romualdo Menezes, pela grande colaboração na realização dos ensaios de difratometria de raios X.

A coordenação do Programa de Doutorado em Engenharia de Processos, nas pessoas das professoras Dra. Odelsia Leonor Sanches de Alsina e Dra. Laura Hecker de Carvalho pelo apoio e colaboração durante o Curso.

A CAPES pelo apoio financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

O interesse pela preservação dos recursos naturais e a busca pelo desenvolvimento sustentável tem despertado interesse de um grande número de pesquisadores visando obter conhecimento de materiais não convencionais. Entre esses materiais, destaca-se a reciclagem dos resíduos produzidos pela construção civil e pela indústria de beneficiamento de granito, as quais são geradoras de um volume considerável de resíduos, causando grandes impactos ambientais. O principal obstáculo para o uso generalizado desses materiais está relacionado ao seu comportamento ao longo do tempo. Para que haja confiabilidade nas características tecnológicas de um novo material e sua indicação como nova tecnologia a ser disponibilizada no mercado é fundamental o conhecimento de suas condições de uso e sua durabilidade. Este trabalho tem como objetivo principal estudar a durabilidade das argamassas alternativas incorporadas com resíduos de construção civil e das indústrias beneficiadoras de granitos. Para quantificar a durabilidade dos materiais estudados, foram realizados ensaios de envelhecimento natural e ensaios de envelhecimento acelerado através de ciclos de molhagem e secagem. Assim estes materiais foram expostos a condições que simulam sua utilização, para avaliar a degradação. As propriedades físico-mineralógicas das matérias-primas foram analisadas através dos ensaios de análise granulométrica por difração a laser, área específica pelo método do permeômetro de Blaine, análise química, análise termodiferencial, análise termogravimétrica e difração de raios X. Verificou-se também a atividade pozolânica desses resíduos através das normas da ABNT. Após o conhecimento das propriedades estudou-se a durabilidade das argamassas para assentamento, utilizando-se percentagens de substituição, em peso, da cal por resíduo reciclado, que variou de 30% a 50%. Determinou-se a influência desses teores de substituição nas resistências à compressão simples. Os corpos de prova confeccionados foram submetidos ao envelhecimento natural e acelerado após 28 dias de cura em água. No envelhecimento natural os corpos de prova foram submetidos aos 60 dias, 90 dias, 120 dias e 180 dias. Para o envelhecimento acelerado através de ciclos de molhagem e secagem, os corpos de prova foram submetidos a 20 ciclos, 30 ciclos, 45 ciclos, 60 ciclos e 90 ciclos. Os resultados evidenciaram que as argamassas incorporadas com resíduos possuem atividade pozolânica. Para o envelhecimento natural evidenciou-se o comprometimento da durabilidade do material após 60 dias com redução no comportamento mecânico, sendo os melhores resultados para os corpos de prova com 30% e 50% de resíduos de construção. No envelhecimento acelerado para os tratamentos adotados, os resultados evidenciaram ação da formação de silicoaluminatos de cálcio e potássio que favoreceram um aumento no comportamento mecânico, e além disso, não foi observado o comprometimento da durabilidade do material.

Palavras-chave: resíduos, reciclagem, durabilidade, atividade pozolânica, resistência à compressão.



## ABSTRACT

The preservation of natural resources and search for sustainable development are increase in interest by the researchers with the aim to obtain knowledge of non conventional materials. Among these materials stand out the recycling of residues from civil construction and from granite industry, which are producers of large amount of residues and causing great environmental impacts. The main impediment for the general use of these materials is related to their behavior with the time. To have a confidence in the technological characteristics of a new material and to indicate as a new technology to be used is necessary to know the use conditions and its durability. The aim of this work is to study the durability of the alternative mortar incorporated with residues from civil construction and from granite industry. To quantify the durability of the studied materials, it was made test of natural and accelerated weathering through wetting and drying cycles. The materials were submitted to conditions that simulated their use to evaluate their degradation. The physical and mineralogical properties of the raw materials were analyzed by granulometric size by laser diffraction, specific surface area, Blaine air permeability, chemical analyzes, differential thermo analyzes, thermogravimetric analyzes and X-ray diffraction. Also it was measured the pozolanic activity of the residues according to the Brazilian norms. After it was studied the durability of the mortar by using percentages of substitutions, w/w%, of lime by recycling residue. The amount changed from 30 to 50%. It was measured the influence of these amounts in the simple compression strength. The samples were submitted to natural and accelerated weathering after 28 days of cure in water. In the natural weathering the samples were submitted to 60, 90, 120 and 180 days. To the accelerated weathering, the samples were submitted the 20, 30, 45, 60 and 90 cycles of wetting and drying. The results that the mortars incorporated with residues have pozolanic activity. The natural weathering cause a compromise in the durability of the material after 60 days with a decrease in the mechanical behavior and the best results occur to the sample with 30% and 50% of residue. In the accelerated weathering, the results show indicate the formation of calcium and potassium aluminosilicates that can give an increase in the mechanical behavior, however, it was not observed a compromise in the durability of the material.

Keywords: residues, recycling, durability, pozolanic activity, compressive strength.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Materiais presente nos entulhos .....	21
FIGURA 2.2	Composição gravimétrica dos resíduos (%) por tipo de obra ...	22
FIGURA 2.3	Resíduos de construção (a) e (b); resíduos de demolição (c) e (d) .....	22
FIGURA 2.4	Impacto ambiental causado pelos resíduos de construção e demolição .....	24
FIGURA 2.5	Extração dos blocos de granitos .....	26
FIGURA 2.6	Lagoa de deposição de resíduo (lama).....	26
FIGURA 2.7	Lama gerada no beneficiamento do granito (ainda na industria) .....	37
FIGURA 2.8	Desperdício causado no corte de chapas do granito .....	35
FIGURA 2.9	Pó resultante do beneficiamento do granito .....	35
FIGURA 2.10	Fluxograma básico para estudo da durabilidade de concreto a partir de resíduos de construção civil reciclados.....	43
FIGURA 3.1	Etapas para execução do trabalho .....	50
FIGURA 3.2	Resíduo RC-01.....	52
FIGURA 3.3	Resíduo RC-02.....	52
FIGURA 3.4	Resíduo RC-03.....	52
FIGURA 3.5	Resíduos RC-01(a); RC-02 (b) e RC-03 (c).....	53
FIGURA 3.6	Argamasseira (a) e moldes cilíndricos 5 cm x 10 cm (b).....	59
FIGURA 3.7	Ciclo de molhagem e secagem .....	60
FIGURA 3.8	Corpos-de-prova durante secagem em estufa.....	60
FIGURA 4.1	Distribuição granulométrica acumulada da cal Carbomil.....	61
FIGURA 4.2	Distribuição granulométrica acumulada da cal P.A.....	61
FIGURA 4.3	Distribuição granulométrica acumulada do resíduo RC-01 .....	62
FIGURA 4.4	Distribuição granulométrica acumulada do resíduo RC-02 .....	63
FIGURA 4.5	Distribuição granulométrica acumulada do resíduo RC-03.....	63
FIGURA 4.6	Distribuição granulométrica acumulada do resíduo de granito..	64
FIGURA 4.7	Difração de raios X da cais utilizadas nesta pesquisa .....	67
FIGURA 4.8	Difração de raios X dos resíduos utilizados nesta pesquisa.....	68
FIGURA 4.9	Análises térmicas diferencial dos resíduos estudados nesta pesquisa.....	69
FIGURA 4.10	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova incorporados com 25% de resíduos.....	71
FIGURA 4.11	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova incorporados com 35% de resíduos.....	72
FIGURA 4.12	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova incorporados com 50% de resíduos.....	73
FIGURA 4.13	Difração de raios X dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com 30% de resíduo e tempo de envelhecimento de 28 dias e 180 dias.....	75
FIGURA 4.14	Difração de raios X dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporadas com 40% de resíduo e tempo de envelhecimento de 28 dias e 180 dias.....	77

FIGURA 4.15	Difração de raios X dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporadas com 50% dos resíduos e períodos de envelhecimento de 28 dias e 180 dias.....	78
FIGURA 4.16	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos com 30% de resíduo, submetido ao envelhecimento natural .....	79
FIGURA 4.17	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com 40% de resíduo, submetido ao envelhecimento natural.....	81
FIGURA 4.18	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos com incorporação de 50% de resíduo, submetido ao envelhecimento natural.....	82
FIGURA 4.19	Visão geral da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com 30%, 40% e 50% de resíduo, submetido ao envelhecimento natural.	84
FIGURA 4.20	Difração de raios X dos corpos-de-prova convencionais e alternativos, incorporados 30% de resíduo, aos 28 dias de cura e aos 90 ciclos de molhagem e secagem.....	87
FIGURA 4.21	Difração de raios X dos corpos-de-prova convencional e alternativos, incorporados 40% de resíduo, aos 28 dias de cura e aos 90 ciclos de molhagem e secagem.....	89
FIGURA 4.22	Difração de raios X dos corpos-de-prova convencional e alternativos, incorporados 50% de resíduo, aos 28 dias de cura e aos 90 ciclos de molhagem e secagem.....	90
FIGURA 4.23	Resistência à compressão simples dos corpos-de-provas convencional e alternativos com 30% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C1.....	91
FIGURA 4.24	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencional e alternativas com 40% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C1.....	92
FIGURA 4.25	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencional e alternativas com 50% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C1.....	93
FIGURA 4.26	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencional e alternativos incorporados com resíduos, submetidos ao envelhecimento acelerado – C1.....	95
FIGURA 4.27	Resistência à compressão simples das amostras convencional e alternativas com 30% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C2.....	96
FIGURA 4.28	Resistência à compressão simples das amostras convencional e alternativas com 40% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C2.....	97
FIGURA 4.29	Resistência à compressão simples das amostras convencional e alternativas com 50% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C2.....	99
FIGURA 4.30	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencional e alternativos, incorporados com resíduos de construção, demolição e granito, submetidos ao envelhecimento acelerado – C2.....	100

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Volume dos resíduos sólidos de construção em municípios brasileiros. Média mensal segundo estimativas oficiais.....	20
TABELA 2.2	Média da geração de resíduo das diferentes fases das construções.....	20
TABELA 2.3	Análise qualitativa da fração material dos resíduos produzidos.....	21
TABELA 3.1	Propriedades químicas do cimento Portland CP II-F-32.	54
TABELA 3.2	Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP II-F-32.....	54
TABELA 3.3	Traços para determinação do índice de atividade pozolânica...	57
TABELA 3.4	Traços para estudo da durabilidade natural e durabilidade acelerada.....	58
TABELA 4.1	Massa específica real e área específica dos resíduos.....	65
TABELA 4.2	Composição química das cais estudadas.....	66
TABELA 4.3	Composição química dos resíduos estudados.....	66
TABELA 4.4	Índice de atividade pozolânica.....	70

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.2.1 Objetivo geral .....	15
1.2.2 Objetivos específicos .....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
2.1 RESÍDUOS .....	17
2.2 VOLUME E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) .....	19
2.3 IMPACTO AMBIENTAL .....	23
2.4 RECICLAGEM DE RCD .....	27
2.4.1 Reciclagem de RCD para uso como matérias-primas alternativas .....	31
2.5 RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE GRANITO PARA USO COMO MATÉRIAS-PRIMAS ALTERNATIVAS .....	33
2.6 ATIVIDADE POZOLÂNICA .....	38
2.7 DURABILIDADE .....	42
2.7.1 Avaliação da durabilidade .....	44
2.7.2 Estudos recentes sobre a durabilidade de concretos alternativos .....	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	50
3.1 MATERIAIS .....	51
3.1.1 Resíduos de Construção – RC .....	51
3.1.2 Resíduo de granito – Gr .....	53
3.1.3 Cimento Portland .....	53
3.1.4 Areia .....	54
3.1.5 Cais .....	54
3.2 MÉTODOS .....	55
3.2.1 Ensaio de caracterização .....	55
3.2.1.1 Caracterização física .....	55
3.2.1.2 Caracterização mineralógica .....	56
3.2.2 Ensaio tecnológico .....	57
3.2.2.1 Atividade pozolânica .....	57
3.2.3 Confecção das argamassas para estudo da durabilidade .....	58
3.2.4 Resistência à compressão simples (RCS) .....	58
3.2.5 Durabilidade .....	59
3.2.5.1 Envelhecimento natural .....	59
3.2.6.2 Durabilidade acelerada .....	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	61
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MINERALÓGICA .....	61
4.2 MASSA ESPECÍFICA REAL e ÁREA ESPECÍFICA .....	65
4.3 ATIVIDADE POZOLÂNICA .....	69
4.4 ENVELHECIMENTO NATURAL .....	74
4.4.1 Difração de raios X .....	74
4.4.2 Resistência à compressão simples (RCS) .....	79

4.5 ENVELHECIMENTO ACELERADO .....	85
4.5.1 Difração de raios X .....	85
4.5.2 Resistência à compressão simples .....	91
5 CONCLUSÕES .....	103
5.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E FÍSICA .....	103
5.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA .....	103
5.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS AO ENVELHECIMENTO NATURAL E ACELERADO .....	103
5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS AO ENVELHECIMENTO NATURAL .....	104
5.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS AO ENVELHECIMENTO ACELERADO .....	104
6 POSSÍVEIS LINHAS DE PESQUISAS .....	106
REFERÊNCIAS .....	107
ANEXOS .....	117

## 1 INTRODUÇÃO

Há uma preocupação mundial com o grande volume de resíduos sólidos gerados nos grandes centros urbanos. Grande parte destes resíduos é oriundo das obras de construção, reforma, demolição e beneficiamento de matérias-primas. Nas últimas décadas inúmeros pesquisadores têm desenvolvido pesquisas visando descobrir técnicas de reaproveitamento destes resíduos. Estes estudos têm apontado no sentido de que os resíduos das obras da construção civil quando reciclados apresentam propriedades equivalentes às matérias-primas convencionais extraídas das reservas minerais naturais. Com a utilização dos resíduos das construções civis reciclados, têm diversos benefícios sido observados: redução na ocupação de áreas para deposição de resíduos, conservação dos recursos naturais, redução no custo das obras, contribuição para obtenção do desenvolvimento sustentável, etc. Outra constatação de relevada importância é que a reciclagem de resíduos da construção civil é bastante promissora para diversas aplicações principalmente na produção de argamassas alternativas, como também na preservação ambiental e na melhoria da qualidade de vida da população em geral.

Os entulhos de construção e/ou demolição são materiais geralmente compostos de fragmentos ou restos de tijolos, argamassas, concretos, aços, madeiras, gessos, etc. Estes resíduos, quando reciclados, podem ser utilizados como agregados na produção de argamassas alternativas com propriedades compatíveis e até superiores àquelas apresentadas pelas argamassas convencionais. Contudo, quando moído o resíduo se transforma em um material pulverulento, capaz de reagir com a cal e, desta forma, obter aglomerante hidráulico alternativo, nobre, também chamado de cal pozolânica. A cal pozolânica foi utilizada pelas civilizações romana e grega, antes da descoberta do cimento Portland (CINCOTTO, 1983; PINTO, 1997; AMORIM et al, 1999).

No Brasil, existe uma grande quantidade de indústrias de beneficiamento de granito, responsáveis pela liberação de centenas de toneladas de resíduo por ano no meio ambiente. Este quadro de descaso é agravado ainda mais pelos indicativos de crescimento da produção, despertando a preocupação de ambientalistas e da comunidade em geral, em vista de um cenário ainda mais perigoso e danoso ao meio ambiente e à saúde da população.

O resíduo do beneficiamento do granito, também conhecido como lama, geralmente é constituído de pó de rochas, que corresponde a cerca de 20% a 25% do bloco beneficiado, além de outros constituintes como granalha metálica, cal e água (MONTEIRO et al, 2004). A lama, quando seca, torna-se um resíduo sólido não biodegradável. Quando este resíduo não é descartado de forma correta pode alcançar rios, lagoas, córregos, provocando problemas de assoreamento causando danos ao meio ambiente. Além do mais, a poeira da lama seca pode provocar danos à saúde humana, principalmente, relacionados à silicose. Ainda, quando dispostos em depósitos a céu aberto estes resíduos afetam esteticamente a paisagem.

Os resíduos de serragem de rochas ornamentais, aparentemente sem valor industrial, podem ser usados como componente importante na construção civil principalmente na fabricação de argamassas para alvenarias. As razões para isto estão relacionadas aos seguintes aspectos principais: a) composição físico-mineralógica do resíduo, b) substituição do agregado miúdo e c) não ocorrência de poluição durante a fabricação e uso dos novos produtos (NEVES, 2002)

Embora a construção civil seja responsável pela utilização de grande parte dos resíduos reciclados, muitos estudos ainda precisam ser desenvolvidos visando obtenção de informações sobre o comportamento e as propriedades destes materiais ao longo do tempo. Este entendimento estabelece uma estreita relação entre a durabilidade de materiais e a ecologia. A conservação de recursos naturais através da produção de materiais mais duráveis é, além de tudo, um passo ecológico na busca do desenvolvimento sustentável.

Os materiais utilizados na construção civil sofrem ação de inúmeros agentes que provocam o seu envelhecimento. O envelhecimento pode ser genericamente definido como qualquer processo degradativo produzido pela interação entre o material e o ambiente, alterando sua estrutura e suas propriedades dimensionais, mecânicas, elétricas, químicas ou térmicas. Esse processo de constantes mudanças nas condições a que os materiais são submetidos (umidade, temperatura, etc.) faz com que se desconheça a velocidade de deterioração, favorecendo o surgimento de patologias prematuras e necessidade de recuperações antecipadas. Estes fatores estão associados ao desconhecimento da durabilidade do material.

No estudo da durabilidade dos materiais vários parâmetros podem ser avaliados, principalmente, as propriedades mecânicas através da resistência à compressão simples.



As pesquisas sobre durabilidade de materiais alternativos são incipientes, podendo se destacar os resíduos da construção civil na forma de agregados para uso em concretos, argamassas e compósitos com fibras vegetais, etc. Nestes estudos foram avaliados diferentes tratamentos e condições de exposição. Entretanto, devemos salientar que não existe um modelo ou metodologia padrão para realização de estudo da durabilidade. Os resultados dos trabalhos desenvolvidos, até o momento, tendem a apontar diretrizes a serem seguidas e metas a serem alcançadas (FARIAS FILHO, 1999; OLIVEIRA, 2004).

A dificuldade na avaliação da durabilidade dos materiais alternativos, produzidos com resíduos reciclados, está associada à complexidade dos constituintes desses resíduos, que dependem diretamente do ambiente onde foram originados, fase ou estágio da obra quando este foi gerado, tipo ou tratamento a que o material que lhe deu origem foi processado, como também sua interação com os agentes ou mecanismos de degradação ambiental aos quais serão submetidos para avaliação dos indicadores da durabilidade.

Com base nos aspectos acima citados, as motivações para desenvolvimento deste trabalho foram impulsionadas por dois fatores: o primeiro fator foi a necessidade de novas pesquisas sobre a reciclagem, que objetivem soluções alternativas para os problemas dos resíduos gerados pelas empresas de construção civil, como também pelas indústrias de rochas ornamentais. O segundo fator foi a necessidade de realização de trabalhos relacionados à durabilidade de argamassas incorporadas com esses tipos de resíduos quando submetidos aos processos degradativos produzidos pelas interações entre o material e o meio-ambiente.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a durabilidade de argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduos de construção civil e da serragem de granito, utilizando os processos de envelhecimento natural e acelerado.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para se obter resultados que possibilitem a avaliação da durabilidade, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) caracterizar físico-mineralogicamente as matérias-primas convencionais e alternativas (resíduos);
- 2) avaliar a atividade pozolânica dos resíduos de acordo com as normas da ABNT; e
- 3) estudar a durabilidade através de ensaios de envelhecimento natural e envelhecimento acelerado das argamassas com a técnica de ciclos de molhagem e secagem.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA

### 2.1 RESÍDUOS

Algumas atividades industriais são, por sua natureza, grandes geradoras de resíduos. Independente do tipo gerado devem ser adotadas medidas gerenciais corretas visando à minimização de custos e redução do potencial de geração de impactos ambientais.

Têm-se lançado mão dos recursos naturais disponíveis com o objetivo de atender às necessidades de melhoria na qualidade de vida e conforto da população. Assim, são consumidos parte das reservas materiais naturais e, é importante ressaltar que, em alguns casos, esses recursos não são renováveis.

Atualmente, o modelo de “desenvolvimento econômico” adotado baseia-se no lucro e no consumismo. Desta maneira, os recursos naturais são usados como matéria-prima e procura-se lucrar em uma escala de produção cada vez maior. Com esta forma de “desenvolvimento” degrada-se o meio ambiente e perde-se qualidade de vida (DIAS, 2004).

Essa forma de exploração tem causado algumas transformações no ecossistema e, embora, alguns fatores não possam ser numericamente quantificados com exatidão, entre outras conseqüências, pode-se destacar:

- o aumento no “consumo de energia”: é um dos principais motivos para o aquecimento global (IEA, 1999), também conhecido como “efeito estufa”, que tem como principais conseqüências a dissolução da calota polar, que elevará o nível dos oceanos e o aumento das velocidades dos ventos (HAYASHI, 2000);
- a destruição da camada de ozônio na atmosfera, que ocorre pela emissão de gases denominados genericamente de carbono-halogenados, contendo carbono, cloro e flúor e que provocam o aumento da radiação UV-B, provocando câncer de pele nas pessoas;
- o uso incontrolado de fertilizantes à base de nitrogênio, fósforo e potássio e queimas: têm inúmeros efeitos, a começar pelo rompimento do equilíbrio do ecossistema. O nitrogênio está associado à chuva ácida e contribui para a

geração do ozônio de baixa altitude, um dos principais problemas ambientais nas grandes cidades (UNEP, 2000; LAPPIATTI, 1998);

- o consumo de matérias-primas cresce na medida do crescimento da economia mundial e da população. As reservas naturais já começam a ficar escassas. Essa atividade extrativista dos recursos naturais destrói a paisagem e prejudica a flora e a fauna; e
- a geração de resíduos é um grande problema, certamente, o mais visível é o resíduo sólido urbano. A quantidade de resíduos gerados nas cidades brasileiras é muito significativa e pode servir como indicador do desperdício de materiais. Estima-se que a construção civil seja responsável por até 50% do uso dos recursos naturais em nossa sociedade.

São várias as definições apresentadas sobre o termo resíduo, todavia, fica evidenciado que todas as atividades desenvolvidas na construção civil (construção, recuperação, restauração, reparos) e no beneficiamento do granito e mármore são fontes geradoras de resíduo sólido.

A norma da ABNT NBR 10004 (2004) define resíduos como aqueles nos estados sólido e semi-sólido que “resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Resíduos sólidos podem ser entendidos, como materiais resultantes de processos de produção, transformação, utilização ou consumo, oriundos de atividades humanas, de animais ou resultantes de fenômenos naturais, cuja destinação deverá ser ambiental e sanitariamente adequada.

O resíduo de concreto gerado nas obras é considerado como entulho e, assim, aceito internacionalmente a partir da definição apresentada pela norma japonesa BCSJ (1977): “Entulho proveniente de demolição de estruturas de concreto, assim como de concreto fresco e endurecido e rejeitado, proveniente de centrais dosadoras, ou até mesmo produzido na própria obra”.

Resíduo da construção civil pode ser definido como sendo um conjunto de restos de materiais, tais como: tijolos, argamassas, concretos, aços, madeiras, gesso, etc., provenientes do desperdício na construção, reforma, demolição ou restauração de construção civil e do corte de granito e mármore (ÂNGULO, 2000; HENDRIKS, 2000). É, talvez, o mais heterogêneo dentre os resíduos industriais. Esse pode ser gerado, muitas vezes, por deficiências no processo de construção ou produção. Praticamente todas as atividades desenvolvidas no setor da construção civil são geradoras de resíduos.

Resíduos provenientes de alvenaria são aqueles fragmentos de materiais minerais, gerados na construção ou demolição. Estes materiais podem ou não estar contaminados com tinta, gesso ou outras substâncias em diferentes teores. Normalmente sua resistência à compressão será inferior a dos agregados naturais e, poderão, ou não, conforme sua qualidade e sua granulometria desenvolver reação pozolânica (LEVY, 1997).

## 2.2 VOLUME E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Segundo Ajdukiewicz e Kliszczewicz (1996), durante a década de 90, o volume de resíduo de concreto total produzido no mundo já era superior a 1000 milhões de t/ano. Comparando-se este valor com os dados de 2000 e 2001 da Europa e alguns municípios brasileiros, observa-se que gerenciar os resíduos de construção não é só um ato de cidadania, mas poderá trazer benefícios sociais e ecológicos.

Estima-se que mais de 50% do RCD gerado no Brasil seja originário da construção informal e canteiros de obras (SINDUSCON, 2005). As informações sobre a produção de resíduos no Brasil não distinguem a contribuição das obras de demolições ou reformas, já na Europa, mais de 50% do RCD produzido é originário de demolições (LAURITZEN, 1994; PERA, 1996).

No Brasil, um dos maiores problemas que os gestores municipais enfrentam consiste no fato de que o resíduo produzido nas obras é, ao final de uma determinada etapa ou conclusão da obra, transportado juntamente com outros resíduos gerados por outras atividades. A Tabela 2.1, apresenta o volume da construção civil em alguns municípios brasileiros.

TABELA 2.1: Volume dos resíduos sólidos de construção em municípios brasileiros. Média mensal segundo estimativas oficiais.

Município	Massa de resíduos de construção coletados (t/dia)	Ano de observação
Salvador	746	2001
Uberlândia	958	2000
Belo Horizonte	1.500	1993
Ribeirão Preto	1.043	1995
São José dos Campos	733	1995
São Paulo	2.050	2001
Guarulhos	1.308	2001
Diadema	458	2001
Santo André	1.013	1997
Vinhedo	28	2001

FONTE: LEVY (2001)

Estudos realizados no município de Campina Grande, PB, quantificaram a geração de resíduos da construção civil no município de acordo com o estágio da obra. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.2.

TABELA 2.2: Média da geração de resíduo das diferentes fases das construções.

Fase da construção	Média de geração de resíduo (ton/mês)
Concretagem + alvenaria	5,1
Alvenaria + revestimento	33,1
Revestimento	36,2

Fonte: NOBREGA (2002)

Pinto (1999) estima que a geração média per capita de RCD nas cidades brasileiras é aproximadamente de 500 kg/hab.ano. Na Europa, essa média é superior a 480 kg/hab.ano. A construção civil, atualmente, utiliza grande parte dos resíduos provenientes de outras indústrias. A Figura 2.1 apresenta uma composição dos materiais constituintes dos entulhos provenientes da construção civil.

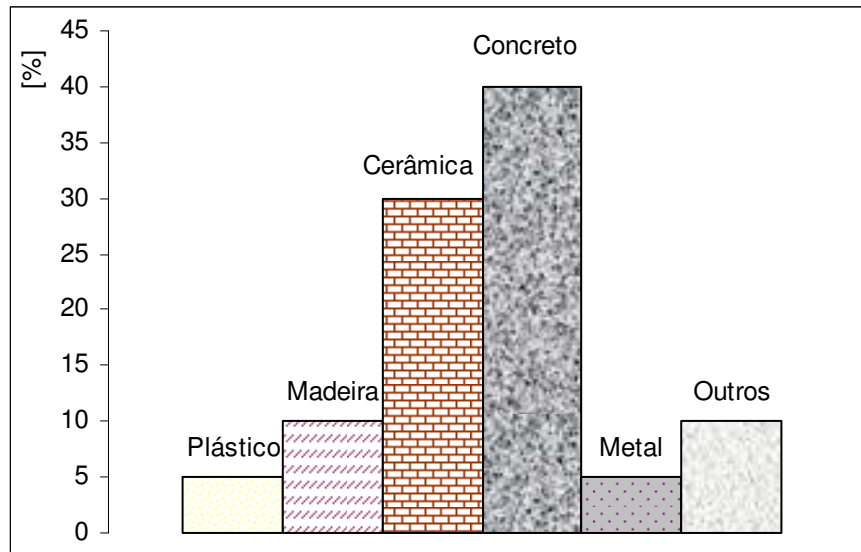


FIGURA 2.1: Materiais presente nos entulhos.  
Fonte: Nik (2005)

Na Tabela 2.3, apresentam-se resultados da qualificação de resíduos coletados nas cidades de São Carlos e Ribeirão Preto, no Estado de São Paulo.

TABELA 2.3: Análise qualitativa da fração material dos resíduos produzidos.

Composição média da fração material do resíduo [%]		
Material	São Carlos <sup>1</sup>	Ribeirão Preto <sup>2</sup>
Argamassa	64,4	37,6
Concreto	4,8	21,2
Material Cerâmico	29,4	23,4
Pedras	1,4	17,8

Fonte: <sup>1</sup>Pinto (1997); <sup>2</sup>Zordan (1997).

Estudos avaliaram a composição gravimétrica dos resíduos de construção de Campina Grande por tipo de obra. Foi observado que os resíduos de tijolo, argamassa e areia são os mais gerados independente do tipo de obra. Nas reformas, os tijolos apresentaram uma maior participação. Os resíduos provenientes das reformas apresentaram uma maior diversidade de materiais como plásticos e vidros. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 2.2. (LUCENA et al, 2005).

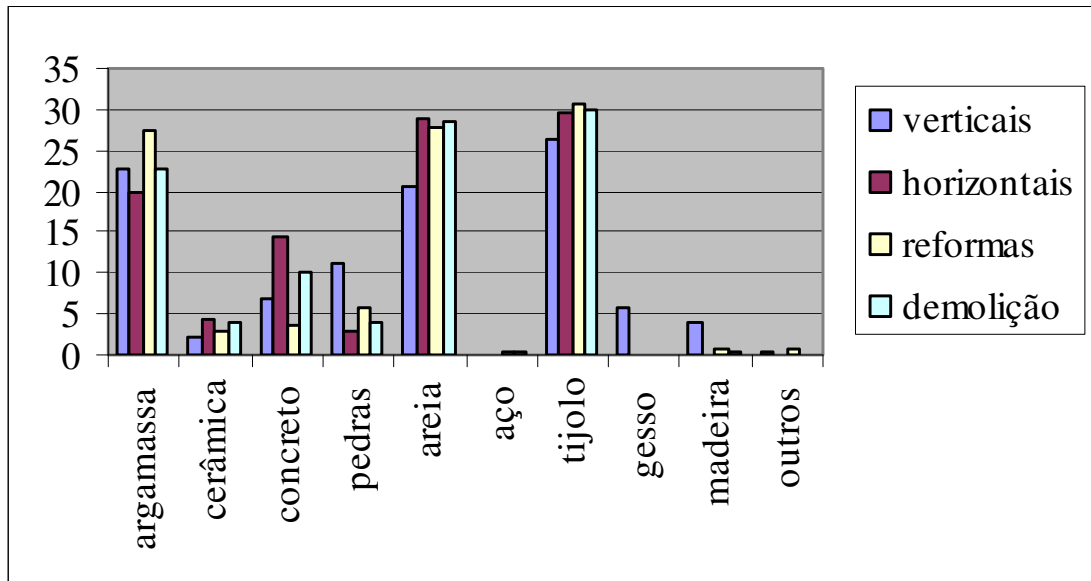


FIGURA 2.2: Composição gravimétrica dos resíduos (%) por tipo de obra  
Fonte: LUCENA et al, (2005)

A Figura 2.3 apresenta os resíduos oriundos de construção e demolição coletados no município de Campina Grande-PB, durante a fase de coleta dos resíduos utilizados neste trabalho. Analisando esta figura verifica-se que os resíduos apresentam heterogeneidade na sua composição.



FIGURA 2.3: Resíduos de construção (a) e (b); resíduos de demolição (c) e (d)



## 2.3 IMPACTO AMBIENTAL

Impacto ambiental pode ser definido como sendo uma alteração da qualidade ambiental resultante da modificação de processos naturais ou sociais provocada pela ação humana (NEVES, 2002).

Campos et al (2002) desenvolveram um trabalho sobre a gestão e aplicação do resíduo urbano e concluíram que a solução da questão dos resíduos sólidos passa tanto pela melhor administração do problema, por procedimentos e tecnologias modernas, como pela educação ambiental e cultural que, em última análise, implicam em novos modos de vida.

Problemas de possíveis esgotamentos das reservas naturais e agressões ao meio-ambiente advindos do desenvolvimento não são privilégios de países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. Todos os países do planeta enfrentam os problemas causados ao meio ambiente, principalmente, nas regiões urbanas e industrializadas.

A grande massa de resíduos sólidos produzidos nas grandes cidades contribui para a ocupação de grandes áreas destinadas a aterros para deposição destes resíduos (Zordan, 1997; Galivan e Bernold, 1994; Symonds, 2002; EC, 2002), o que constitui um grande problema devido a escassez de áreas para utilização com esta finalidade. Faz-se, então, necessário aperfeiçoar a gestão dos resíduos perigosos à saúde humana. Muitos países já investem no gerenciamento do resíduos sólidos, tais como Países Baixos (Hendriks, 2000) e Reino Unido (HOBBS and HURLEY, 2003).

Nos EUA, no final da década de 1960, já existia uma política para resíduos, chamada de "*Resource Conservation and Recovering Act*" (RCRA). No Brasil, ainda está em discussão uma legislação mais abrangente sobre resíduos.

As médias e grandes cidades brasileiras não estão estruturadas para gerenciar o volume expressivo de resíduos e não podem mais adiar a busca de solução para os problemas acarretados (PINTO, 2000).

Com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável a médio e longo prazo, a Agenda 21 (ONU, 1992) constitui um plano de ação com objetivos, atividades, instrumentos e necessidades de recursos humanos e institucionais. Foram eleitos quatro grandes temas para encaminhamento de iniciativas voltadas à obtenção de melhores condições ambientais e de vida:

- a questão do desenvolvimento, com suas dimensões econômicas e sociais;
- os desafios ambientais que tratam da conservação e do gerenciamento de recursos para o desenvolvimento;
- o papel dos grupos sociais na organização e fortalecimento da sociedade humana; e
- os meios de implementação das iniciativas e projetos para a sua efetivação.

Os desperdícios gerados nas obras de construção juntamente com os resíduos domiciliares constituem verdadeiras jazidas de matérias primas que não são aproveitadas e causam grandes danos à vida humana, meio-ambiente e prejuízos econômicos, além de criar uma imagem negativa para as administrações públicas. A Figura 2.4 apresenta um exemplo de formas de danos causados ao meio ambiente provocados pela deposição inadequada de RCD.



FIGURA 2.4: Impacto ambiental causado pelos resíduos de construção e demolição

A classificação dos resíduos é feita através das Normas da ABNT NBR 10004 (2004), NBR 10005 (2004), NBR 10006 (2004) e NBR 10007 (2004).

A NBR 10004 (2004), define periculosidade de um resíduo, como sendo a “característica apresentada por um resíduo, que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar:

- risco à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças; e
- risco ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada”.

A triagem dos resíduos coletados é interessante visto que reduz os custos na deposição e facilita a reciclagem, já que alguns tipos de materiais presentes no RCD podem ser reutilizados. A Resolução nº 307 do CONAMA (2002), classifica o RCD em:

Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis, com agregados compostos por diversos materiais de origem mineral, materiais estes a base de: cimento (blocos, concretos, argamassas); e cerâmicos (tijolos, telhas, etc.); rochas e solos entre outros.

Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, asfaltos e outros.

Classe C: resíduos sem tecnologia de reciclagem no Brasil, como o gesso.

Classe D: resíduos considerados perigosos, como: tintas, solventes, óleos entre outros.

A construção civil utiliza os recursos minerais como a principal matéria-prima e a Agenda 21 não é explícita quanto a estes recursos, mas dedica na Seção II, um capítulo aos recursos naturais. A Agenda 21 foi avaliada em evento realizado na ONU em 1997, portanto cinco anos após a conferência realizada no Rio de Janeiro. Esta avaliação ficou conhecida como Conferência Rio+5. Nesta Conferência o governo brasileiro apresentou documento em que contempla as ações executadas em todas as esferas do Governo (Federal, Estadual e Municipal) desde 1992 e reconhece que os avanços em relação ao planejamento e gestão dos recursos terrestres estão aquém das necessidades do País e foram avaliados como precários.

Em estudos realizados por Caiado e Mendonça (1995) avaliando o impacto ambiental causados pelas indústrias de mineração e beneficiamento de mármore e granito sobre as águas das bacias hidrográficas no Estado do Espírito Santo, esses pesquisadores concluíram que essas indústrias causaram alterações significativas na qualidade dos recursos hídricos regionais, com o incremento nas concentrações de todos os parâmetros analisados, com exceção do magnésio e ferro.

As Figura 2.5 e 2.6 apresentam amostras do impacto ambiental causado no processo de extração dos blocos de granitos e na deposição do resíduo produzido pela indústria no beneficiamento do granito.



FIGURA 2.5: Extração dos blocos de granitos.  
Fonte: BARRETO-NETO, 2007



FIGURA 2.6: Lagoa de deposição de resíduo (lama).  
Fonte: BARRETO-NETO, 2007

Os resíduos provenientes do beneficiamento (corte, polimento e acabamento) de granito e mármore pelas serrarias, em cerca de 200.000 t/ano, necessita de local adequado para armazenamento para evitar-se assim maiores agressões ao meio-ambiente (MOTHÉ FILHO et al, 2001).

Ficou evidenciada a necessidade da adoção de uma política que incentive o reaproveitamento dos bens minerais descartados pelas construções civis e pelas indústrias de beneficiamento do granito para poder reduzir a quantidade de minerais extraídos das jazidas e, assim, reduzir o impacto ambiental através da reutilização e reciclagem dos resíduos minerais.

Para se obter o desenvolvimento sustentável é fundamental observar-se alguns princípios, tais como: proteção do solo e da água, a limitação da produção de entulho e a sua reutilização.

## 2.4 RECICLAGEM DE RCD

Os resíduos sólidos, em função de sua natureza, podem gerar impactos à atmosfera, ao solo, ao lençol freático e ao ecossistema. Um adequado sistema de gestão de resíduos, para atender plenamente às diretrizes atuais de proteção ambiental e responsabilidade social, deve ter por objetivo, em ordem decrescente de prioridade, a eliminação, minimização, reuso ou reciclagem dos resíduos. A seguir são apresentadas algumas definições para que se entenda o significado e classificação da reciclagem.

A reciclagem é o processo de transformação de resíduos da construção civil que envolve a alteração das suas propriedades físicas ou físico-químicas, tornando-os insumos destinados aos processos produtivos.

John (2001) classifica a reciclagem como: reciclagem primária e reciclagem secundária.

- Reciclagem primária - é definida como a reciclagem do resíduo dentro do próprio processo que o originou, como, por exemplo, a reciclagem do vidro, do aço e das latas de alumínio.
- Reciclagem secundária - é definida como a reciclagem de um resíduo em outro processo, diverso daquele que o originou. Este tipo é bastante verificado na indústria de produção do cimento que utiliza uma gama considerável de resíduos gerados em outras atividades.

Resíduos reciclados originários de construção ou demolição, devem ser considerados todos os materiais granulares obtidos por processos mecânicos de desintegração (britagem) e utilizáveis em matrizes a base de cimentos para



produção de concreto ou argamassa. Dependendo de sua granulometria são classificados em agregados graúdos ( $D_{\text{máx.}} > 4,8 \text{ mm}$ ) ou miúdos ( $4,80 \text{ mm} < D_{\text{máx.}} < 0,75 \text{ }\mu\text{m}$ ) e são provenientes de resíduos de concreto e/ou de alvenaria, respectivamente.

Os resíduos reciclados provenientes de resíduos de concreto são obtidos da britagem de materiais minerais, originários da demolição de estruturas de concreto, endurecidos e rejeitados. Dependendo do caso, estes poderão estar contaminados por agentes agressivos tais como: cloretos e/ou sulfatos, dependendo da origem destes fragmentos, estes resíduos poderão também estar contaminados com resíduos de tintas. Geralmente sua resistência à compressão dependerá da resistência à compressão dos agregados naturais utilizados na produção do concreto original.

A redução e reciclagem dos resíduos, aperfeiçoamento dos projetos, substituição dos materiais tradicionais por outros mais eficientes são objetivos a serem perseguidos para atingir-se o desenvolvimento sustentável (BROWN et al, 1999). Por isso, cada vez mais pesquisadores têm voltado seus estudos à procura de caminhos para solucionar os problemas advindos da poluição ambiental causada pelo desenvolvimento da humanidade. No entanto, as pesquisas relacionadas ao reaproveitamento de materiais de construção, de acordo com Cincotto (1983), evidenciaram-se a partir de 1968.

No final da década de 20 iniciavam-se a busca e o desenvolvimento de técnicas para melhorar o aproveitamento dos resíduos, todavia as primeiras aplicações significativas do RCD reciclado foram evidenciadas após a Segunda Guerra Mundial, na reconstrução das cidades européias, quando foram britados os materiais dos edifícios demolidos e escombros ou entulhos resultantes das destruições da Guerra, sendo o material reutilizado como agregado para atender a demanda na época (WEDLER e HUMMEL, 1946 apud LEVI, 1997).

Registros de fatos que evidenciaram a reutilização de resíduos minerais da construção civil na produção de novas edificações nas antigas cidades do Império Romano foram encontrados por SCHULZ e HENDRICKS (1992).

Assim, de acordo com as pesquisas desenvolvidas sobre a reciclagem e reutilização de resíduos para fabricação de materiais alternativos para a construção civil, estes resíduos têm se destacado como de fundamental importância para redução de degradação do meio-ambiente, causada pela geração de resíduos das

diferentes atividades industriais e na viabilidade de produção de novos materiais com possibilidade de substituição total ou parcial dos materiais convencionais.

No Brasil, apenas alguns municípios possuem políticas para os resíduos de construção e demolição e praticam sua reciclagem, empregando-os como base de pavimentação. Outros países já utilizam agregados de RCD reciclados também em aplicações mais nobres do que em bases de pavimentação como, por exemplo, em concretos. Dentre os países destacam-se o Japão, a Inglaterra e os Países Baixos. Esses países têm buscado a consolidação do seu processo de reciclagem diversificando suas aplicações em componentes, tanto pela substituição parcial quanto pela substituição total dos agregados naturais pelos obtidos na reciclagem de RCD (LIMA, 1999; HANSEN, 1992).

No Brasil, o assunto começou ser tema de pesquisas em meados dos anos 80, com os trabalhos de Pinto (1986), que prossegue com estudos sobre o assunto. Levy e Helene (1995) e Hamassaki, Netoi e Florindo (1996) apresentaram trabalhos sobre a reciclagem de entulho, em que analisam seu uso na confecção de argamassas.

Os resíduos gerados na construção civil são compostos basicamente de 64% de argamassa, 30% de componentes de vedação (tijolos maciços, tijolos furados e blocos) e 6% de outros materiais, como concreto, pedra, areia, metais e plásticos. Quando reciclados podem gerar produtos com propriedades adequadas e custos inferiores ao preço médio dos produtos das argamassas convencionais (CAMARGO, 1995).

A partir das definições sobre os materiais descartados pelas construções<sup>1</sup>, esses materiais passaram a ser amplamente utilizados nos serviços de aterros de recuperação de áreas degradadas como as margens de cursos d'água, aterros para implantação de novos edifícios, pavimentação de vias públicas e emprego em sub-bases de rodovias.

A utilização dos resíduos de construção reciclados é limitada ao concreto sem função estrutural e argamassa para assentamento e revestimento por falta de conhecimento sobre sua durabilidade, seu comportamento ao longo do tempo sob a ação das cargas e da ação de agentes agressivos. Os resíduos originários da construção civil têm ultimamente despertado grande interesse na realização de

---

<sup>1</sup> nas quais se considerava que todos os materiais rejeitados pelas obras não reagem quimicamente em presença de outros ou não apresentam reação imediata em contato com a água.

estudos quanto à sua reutilização como agregado para concretos, em blocos não estruturais, ou como sub-base de vias públicas. Cidades como São Paulo, Santo André e Belo Horizonte já tiveram iniciativas nesse sentido (HAMASSAKI et al, 1996).

John (1996) apresenta um esboço de metodologia para pesquisa e desenvolvimento de reciclagem de resíduos com materiais de construção civil. Resumidamente, a reciclagem de resíduos como material de construção envolve:

- a caracterização física, química e da microestrutura do resíduo, incluindo o seu risco ambiental;
- busca de possíveis aplicações dentro da construção civil, considerando as características do resíduo;
- o desenvolvimento de diferentes aplicações, incluindo seu processo de produção;
- análise de desempenho frente as diferentes necessidades dos usuários para cada aplicação específica; e
- análise do impacto ambiental do novo produto que necessariamente deve envolver avaliação de riscos à saúde dos trabalhadores e usuários.

A seleção do resíduo de concreto, alvenaria e misto (originários das demolições), melhora a qualidade do RCD mineral utilizado como agregado reciclado em concretos (RILEM RECOMMENDATION, 1994; HENDRIKS, 2000; FREIRE e BRITO, 2001).

Na Europa, a fração mineral do RCD é classificada como resíduo de concreto, de alvenaria e misto de concreto e alvenaria (RILEM RECOMMENDATION, 1994; HENDRIKS, 2000). Segundo Müller e Linsz (2004), na Alemanha, os resíduos de alvenaria são divididos em três classes:

- resíduos de tijolos: compostos por tijolos e telhas, podendo ser de natureza cimentícia ou cerâmica;
- resíduos com altos teores de tijolos: compostos de 80% de resíduos de tijolos e o restante de argamassas de assentamento ou revestimento (provenientes de demolições); e
- resíduos de alvenaria mistos: compostos por tijolos, argamassas, concretos leves, etc. provenientes de demolições de alvenarias.



Mesmo sendo a construção civil o maior gerador de resíduos em toda a sociedade, é importante observar que, no processo construtivo, o elevado índice de perdas é a principal causa da geração de resíduo, mesmo que parte deste seja reutilizado na própria obra. Já nas reformas, a falta de cultura de reciclagem do resíduo é o principal fator que favorece o aumento da massa gerada.

A reciclagem dos entulhos de construção civil pode ser uma alternativa interessante para os gestores municipais que enfrentam tantas dificuldades no gerenciamento dos rejeitos de construção civil (BRITO FILHO, 1999).

#### **2.4.1 Reciclagem de RCD para uso como matérias-primas alternativas**

O aproveitamento do RCD requer uma avaliação tanto do ponto de vista econômico como tecnológico, visto que alguns apresentam propriedades que possibilitam sua aplicação na substituição parcial ou total da matéria prima convencional usada como aglomerante ou agregado.

Alguns resíduos reciclados possibilitam sua utilização na produção de novos materiais que podem ser usados em substituição parcial ou total dos materiais convencionais.

Zordan (1997) realizou um estudo com o objetivo de analisar a reciclagem da parte mineral do entulho utilizando como agregado na confecção do concreto. Ele utilizou resíduo proveniente de uma usina de reciclagem de entulho, fez análise granulométrica e química, de modo a ser classificado como um agregado. Com esse material, produziram-se concretos com diferentes traços. Os resultados do trabalho permitiram concluir que o entulho pode ser utilizado como agregado na confecção de concreto não estrutural destinado à infra-estrutura urbana.

É recomendável que os agregados reciclados utilizados na produção de concretos sejam selecionados dependendo de sua origem, alvenaria ou concreto, evitando-se a mistura, devido a diferença das características que eles apresentam. Esse controle é um fator decisivo para obtenção de concretos duráveis.

Estudo realizado por Collins (2000) constatou que a utilização de 75% de agregados reciclados de RCD na produção de blocos é possível. Estes resíduos apresentaram bom desempenho. O RCD reciclado, composto principalmente de argamassas endurecidas e materiais cerâmicos, quando moído e transformado em material pulverulento, torna-se capaz de reagir com cal na presença da água e,

assim, dá origem a um novo aglomerante hidráulico com propriedades semelhantes as das cais pozolânicas.

Ângulo e John (2002a) realizaram trabalho onde estudaram uma metodologia para determinação dos teores de concreto e argamassa presentes na composição dos agregados graúdos de RCD reciclados. Empregaram um sistema de equações para a determinação desses teores, adotando-se valores médios de absorção de água e massa específica definidos por levantamento bibliográfico, determinando-se valores de suas propriedades para as fases do concreto e argamassa conjuntas experimentalmente em laboratório e compararam com a composição desses agregados, cuja separação dos grãos foi realizada manualmente, por inspeção visual e pesagem das fases (concreto, argamassa, cerâmica, rochas e outros). Pelos resultados experimentais, concluíram que as composições estimadas apresentaram erros da ordem de 10%, sendo considerados toleráveis.

Ângulo e John (2002b) avaliaram a adequação às condições brasileiras das especificações internacionais e das especificações de um pesquisador brasileiro (Lima, 1999) para agregados graúdos produzidos da reciclagem de RCD para uso em concreto e, concluíram que é necessário realizar melhorias no processo de produção de agregados de forma a permitir uma reciclagem massiva seja em concretos estruturais ou não estruturais.

Pesquisa com objetivo de caracterizar a variabilidade de agregados graúdos de RCD reciclados quanto à composição de fases e as decorrentes desta variabilidade em algumas propriedades físicas foi realizada por Ângulo e John (2004). Os resultados indicaram grande variabilidade na composição dos agregados reciclados e, conseqüentemente, nas propriedades físicas e concluíram que as aplicações desses agregados em concretos irão depender de alterações no processo de reciclagem e de métodos de caracterização mais rápidos e eficazes.

Henao e López (2004) realizaram estudos sobre a evolução das propriedades físicas e mecânicas de argamassas produzidas com agregado reciclado e os resultados mostraram um comportamento favorável à utilização dos agregados reciclados como argamassa.

Elwan e Hassan (1998) estudaram o potencial do resíduo de alto forno pra uso na fabricação de tijolos cerâmicos e concluíram que a adição de escória de alto forno é adequada para fabricação de blocos cerâmicos.

Vicenzi e Bergmann (1999) estudaram a utilização de escória de aciaria, proveniente da indústria siderúrgica, com a sua incorporação em composições de argamassas cerâmicas para revestimento. Os estudos mostraram que essa argamassa efetivamente diminuiu a porosidade aparente e a absorção de água e aumentou a resistência mecânica e a retração linear, considerando temperaturas de queima superiores a 950°C.

## 2.5 RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE GRANITO PARA USO COMO MATÉRIAS-PRIMAS ALTERNATIVAS

Os granitos ornamentais e de revestimentos, também chamado de pedras naturais, rochas lapídeas, rochas dimensionais e materiais de cantaria, podem ser definidos como rochas não calcárias capazes de receber polimento e de serem usadas como material de revestimento. Esse conceito abrange rochas de composições distintas e que satisfazem as condições necessárias para utilização na construção civil (NITES, 1994).

Segundo Filho e Rodrigues (1999), cerca de 80% da exploração mundial é transformada em chapas e ladrilhos para revestimento, 15% em peças para arte funerária e 5% para outras aplicações.

No beneficiamento dos blocos para a produção de chapas, são geradas quantidades significativas de rejeitos em forma de “lama”, proveniente da polpa utilizada nos teares, cujos objetivos são lubrificar e resfriar as lâminas, evitar sua oxidação impedindo o aparecimento de manchas nas chapas, servir de veículo para abrasivo (granalha) e limpar os canais entre as chapas. Essa “lama” é geralmente constituída de água, granalha e cal moída. Utiliza-se como substituição à cal o calcário moído, a escória de alto forno, etc. (CALMON et al, 1997). Na Figura 2.7 apresenta a lama produzida no beneficiamento do granito, ainda na indústria.



FIGURA 2.7: Lama gerada no beneficiamento do granito (ainda na indústria).  
Fonte: BARRETO-NETO, 2007

A quantidade crescente dos resíduos em forma da polpa abrasiva, chamada de “lama” resultante da ação dos teares tem preocupado os proprietários de serrarias, ambientalistas e governantes devido às agressões ambientais oriundas do descarte desse resíduo. Córregos, ravinas, lagos naturais e artificiais e até rios têm sido utilizados como repositórios para esses resíduos. Também não é rara a utilização de faixas de domínio das rodovias como local para descarte, colocando em risco os motoristas e passageiros que possam vir a sofrer acidentes nesses locais, pois essas áreas são transformadas em verdadeiros lagos movediços de “lama” (NEVES, 2002).

Estima-se que o desperdício no processo de mineração das pedras ornamentais chegue a 40% (monólitos fora das dimensões padronizadas, lascas e pó de pedra). Na serragem, as perdas podem chegar a 30% na forma de lama abrasiva. Outras perdas costumam ocorrer por quebra de placas, falhas de empilhamento, defeito no corte, uso de polpa abrasiva de composição inadequada, etc. Durante a manufatura dos ladrilhos as perdas podem chegar a 10%. Já na aplicação das pedras ornamentais na construção civil, as perdas podem chegar a 30% (NITES, 1994). A Figura 2.8 apresenta uma amostra das perdas ocorridas no corte das chapas.



FIGURA 2.8: Desperdício causado no corte de chapas do granito  
Fonte: BARRETO-NETO, 2007

No Brasil, as perdas nas indústrias pelo beneficiamento do granito atingem patamares entre 20% e 25% de sua massa, quando da serragem dos blocos, essa massa dá origem lama ou polpa abrasiva resultante do processo que é transformada em pó (FREIRE e MOTTA, 1995; SILVA, 1998). A Figura 2.9 apresenta a forma aparente da “lama” após a evaporação do excesso de água usada no beneficiamento, constituindo-se a partir de então um pó rico em silicose.



FIGURA 2.9: Pó resultante do beneficiamento do granito  
Fonte: BARRETO-NETO, 2007

Estudo sobre o aproveitamento do resíduo de serragem do granito para a produção de argamassa de assentamento destinada às alvenarias foram realizados por Calmon et al, (1997) e Silva (1998). Os resultados obtidos revelaram que esses

resíduos apresentaram um bom potencial para serem utilizadas em argamassas industrializadas. Os autores acima citados também estudaram e comprovaram o potencial desse resíduo na produção de tijolos solo-cimento.

A utilização de resíduo de mármore e granito para composição de massas cerâmicas contribui para um maior aproveitamento dos recursos naturais, como também promove melhoria no progresso da sociedade (BARROTE, 2000).

Neves et al, (1999) estudaram a possibilidade de utilização de resíduos de serragem de granitos como matéria-prima cerâmica. Os resultados demonstraram a probabilidade de uso desses resíduos na produção de elementos construtivos cerâmicos (tijolos e blocos). Outro trabalho realizado em 1999 visou o aproveitamento de resíduos de serragem de granito para utilização como insumo na produção de argamassas de assentamento e revestimento de alvenarias em geral, na manufatura de tijolos e blocos estruturais não cerâmicos, de pedras ornamentais sintéticas, tijolos cerâmicos, de ladrilhos cerâmicos rústicos e grés sanitários.

Neves et al (1999, 2000 e 2001) pesquisaram a utilização de resíduos da serragem de granitos provenientes de duas indústrias de Campina Grande-PB para a confecção de tijolos cerâmicos. Os resultados indicaram que esses resíduos podem ser utilizados como matéria-prima em composições cerâmicas para a produção de tijolos maciços destinados à alvenaria. Nos últimos anos, as indústrias de mineração, principalmente aquelas de beneficiamento de rochas ornamentais, têm se colocado dentre as maiores fontes de poluição e/ou contaminação do meio-ambiente devido a grande quantidade de resíduos gerados e lançados diretamente em locais impróprios e sem prévio tratamento que elimine ou reduza os constituintes presentes, provocando assim graves danos ao ecossistema. Desta forma uma das maiores preocupações para os empresários reside na forma de melhor aproveitamento de tais resíduos.

D'Agostino e Soares (2003) estudaram as características tecnológicas de dois tipos de material arenoso e avaliaram o comportamento de argamassas preparadas com estas areias tomando como parâmetro a resistência à compressão simples. As areias, de origens distintas: i) natural - do leito de rio; ii) resultante da britagem de rocha gnaisse-granítica. A argamassa preparada com areia da britagem, após 90 dias, mostrou maior resistência à compressão simples, superando o dobro do resultado obtido com a argamassa preparada com areia natural. A partir da caracterização tecnológica, os resultados obtidos apontaram no sentido de que a

areia da britagem se torne alvo de mercado para a preparação de argamassas de qualidade, como as utilizadas atualmente na construção civil.

Feitosa (2004) desenvolveu um trabalho de pesquisa visando a utilização do resíduo da serragem do granito para uso em blocos de concreto. Ele utilizou o resíduo como substituição parcial da areia em relação ao seu volume total, adotando os percentuais de 5%, 10%, 15% e 20%. Para avaliar o comportamento ele tomou como parâmetro a resistência à compressão simples e a absorção de água por imersão. Os resultados por ele obtidos mostraram que o resíduo da serragem do granito é viável, visto que os blocos produzidos com a incorporação desse resíduo apresentaram valores da resistência à compressão simples superiores aos produzidos com o traço convencional.

O aproveitamento do resíduo, hoje, é visto como atividade complementar que pode vir a contribuir para a diversificação dos produtos e redução nos custos finais. Assim, é fundamental a realização de pesquisas visando aproveitamento desses resíduos como material alternativo em substituição às matérias-primas convencionais.

Menezes et al (2005) estudaram as características e a possibilidade do uso de resíduos da serragem de granito produzidos pelas indústrias de beneficiamento de pedras graníticas no estado da Paraíba, como material alternativo na produção de tijolos cerâmicos e azulejos. Os resultados mostraram que esses resíduos têm características físicas e mineralógicas semelhantes ao material cerâmico convencional. Os corpos de prova produzidos com as composições cerâmicas estudadas, material não convencional, apresentaram características tecnológicas de acordo com as especificações brasileiras para tijolos cerâmicos e azulejos.

Ângulo (2005) estudou as características dos agregados de RCD reciclados que exerciam influência no comportamento mecânico dos concretos. Ele analisou os seguintes pontos: i) caracterização química e mineralógica das frações granulométricas das amostras; ii) propriedades físicas dos agregados graúdos separados por densidade; e iii) influência das características dos agregados graúdos separados por densidade no comportamento mecânico dos concretos. Ele realizou análise granulométrica e química por FRX, granulométrica por DRX, determinação da fração solúvel por ataque com solução de HCl 33% e análise termogravimétrica, separação por densidade utilizando equipamento "*Sink and Float*" (dissipador e flutuador). Os resultados permitiram concluir que a porosidade dos agregados de

RCD reciclados controla o comportamento mecânico dos concretos produzidos com relação água / cimento constante. As propriedades mecânicas dos concretos puderam ser controladas através da determinação dos teores dos aglomerantes e da fase cerâmica vermelha. Por serem materiais presentes nos agregados e mais porosos que as rochas, estes resíduos, quando forem inferiores a 20% são adequados ao uso em concretos estruturais convencionais.

## 2.6 ATIVIDADE POZOLÂNICA

Com o objetivo de construir obras mais duráveis e resistentes, os gregos utilizavam um tufo vulcânico, encontrado na Ilha de Thera, enquanto os romanos se valiam de outros materiais também de origem piroclástica, encontrados nas vizinhanças da Bacia de Nápoles. Como os materiais de melhor qualidade eram obtidos ao redor do monte “Pozzuoli”, nas proximidades do Vesúvio, esses materiais receberam a designação de pozolanas. Quando não dispunham de materiais vulcânicos, os romanos empregavam telhas cerâmicas moídas que, segundo registros históricos da época, produziam efeito similar (ZAMPIERI, 1989).

Segundo Petrucci (1993), pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos, sem ou com pouco valor como aglomerante, mas que finamente divididos, em presença da umidade, reagem com hidróxido de cálcio e formam compostos com propriedades aglomerantes.

Além da ação química, as pozolâneas possuem ação física, uma vez que eles atuam nos concretos/argamassas como material de enchimento (filler). Isso é particularmente importante na zona de transição onde elas produzem um arranjo mais eficiente na interface, partículas de agregado-pasta de cimento, reduzindo a segregação e aumentando a densidade e homogeneidade dessa zona (BARONIO e BINDA, 1997).

A aptidão dos materiais pozolânicos de reagirem com a cal em condições normais de temperatura e pressão e formarem compostos de propriedades aglomerantes reside no fato de que o silício e alumínio presentes na sua composição se encontram em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente.

Vários estudos e publicações têm divulgado sugestões para aproveitamento dos RCD reciclados, utilizando-os como materiais aglomerantes pozolânicos ou como agregados na produção de concretos. A utilização de RCD reciclado



evidenciou melhoras no comportamento mecânico de argamassas mistas, com redução no consumo de cimentos (30%), da cal (100%) e da areia (15% a 30%), dependendo do traço utilizado (LEVY, 1997).

A reação pozolânica pode ocorrer na mistura cimento Portland-pozolana porque a cal é produzida como consequência da hidratação do silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e do silicato bicálcico ( $C_2S$ ) presentes no cimento. Portanto, resíduos de construção, demolição ou reforma moídos e pulverizados podem apresentar atividades pozolânicas e serem utilizados com a cal ou como substitutos parciais do cimento Portland na produção de argamassa e concreto (ZAMPIERI, 1989; BARONIO e BINDA, 1997).

As propriedades de uma pozolana variam consideravelmente dependendo de sua origem, isto porque varia na proporção dos materiais ativos, mineralogia e características físicas. A capacidade que as pozolanas têm de reagir com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e em misturas com cal e água é chamada de atividade pozolânica, atividade esta que depende da percentagem de sílica e da alumina. A sílica confere resistência mecânica às pozolanas, sendo desejável que elas tenham no mínimo 40% de  $SiO_2$  e até 30% de  $Al_2O_3$  e teores mínimos de  $CaO$  e  $MgO$ . A atividade pozolânica de um material pode ser determinada de várias maneiras, através da avaliação da resistência mecânica, visto que a análise química não é suficiente para tal fim, embora seja útil no controle qualitativo das pozolanas.

O RCD reciclado, composto principalmente de argamassas endurecidas e materiais cerâmicos, quando moído e transformado em material pulverulento, torna-se capaz de reagir com cal na presença da água e, assim, dá origem a um novo aglomerante hidráulico com propriedades semelhante as das cais pozolânicas.

Um produto obtido com a reciclagem de resíduos cerâmicos gerados nas edificações, apresentou-se como material com potencial para aglomerante pozolânico e para agregado em argamassas, podendo reduzir o custo de produção destes (PINTO, 1994 e ARAUJO et al, 1998).

Os materiais pozolânicos são classificados como naturais ou artificiais. As pozolanas naturais são formadas por processo natural e, em geral, necessitam apenas de moagem dispensando qualquer tratamento para revelar seu potencial pozolânico para uso. Como pozolanas naturais podem ser incluídas as cinzas vulcânicas e as terras diatomáceas. As pozolanas artificiais são obtidas através do beneficiamento industrial ou originário de um subproduto industrial, que passaram

por processos de modificações químicas e mineralógicas que acentuaram o potencial pozolânico. Alguns subprodutos industriais têm grande potencialidade, como a escória, microssílica e a cinza da casca de arroz. Existem também materiais com sílica amorfa obtidos por processamento. Um deles é a metacaulinita, obtido pela calcinação de argila caulínica (caulim), pura ou refinada, a temperaturas entre 650 °C e 850 °C, e que, quando moída até a finura de 700 m<sup>2</sup>/kg ou 900 m<sup>2</sup>/kg, resulta em um material de grande pozolanicidade.

Leite e Molin (2002) avaliaram a atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado do RCD. Foi determinado o índice de atividade pozolânica do material cerâmico com a cal e o cimento de acordo com as normas brasileiras. Os resultados obtidos da resistência apontaram que há atividade pozolânica do material cerâmico tanto com o cimento quanto com a cal.

Cara et al (2006) avaliaram o potencial pozolânico da argila caulínica crua e calcinada às temperaturas de 530°C, 630°C e 800°C. Foram monitoradas as reações que aconteceram nos sistemas metacaulinita-cal-água, usando análise termogravimétrica, análise térmica diferencial e análise de difração de raios-X. Os resultados foram encorajadores no sentido de uso desses materiais como elementos aditivos pozolânicos na confecção de argamassas para restauração.

Wang e Hsieh (2004) estudaram a reação pozolânica nos resíduos sólidos urbanos incinerados, utilizando a cinza da escória em substituição parcial do cimento. O estudo mostrou que a atividade pozolânica dos materiais estudados foi superior a 100%. A resistência à compressão aumentou após 60 e 90 dias de cura. A difração de raios X mostrou que as pastas exibiram reação pozolânica até mesmo nas primeiras idades de cura. O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) foi formado nas idades posteriores devido ao consumo do Ca(OH)<sub>2</sub>. Também observaram que a hidratação foi lenta nas primeiras idades de cura, aumentando com o decorrer do tempo. Os resultados sugerem que a reação pozolânica é altamente ativa nas cinzas utilizadas nas argamassas produzidas com substituição do cimento por escória.

Souza e Dal Molin (2002) estudaram a viabilidade técnica do uso de argila, na forma de metacaulinita de alta reatividade como pozolana para o concreto. Eles utilizaram uma argila caulínica usada na indústria de papel, fizeram a caracterização técnica e mineralógica e determinaram atividade pozolânica com cimento Portland e cal. Os resultados evidenciaram um baixo desempenho da argila

caulinítica e um excelente desempenho do rejeito industrial. Eles observaram que o mau desempenho da argila caulinítica deveu-se à falta de homogeneidade no processo de calcinação bem como a pouca eficiência dos processos de moagem empregados.

Reschkea et al (2005) avaliaram a utilização da escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto, através da avaliação da resistência à compressão uniaxial, absorção de água por sucção capilar e penetração de íons cloreto. Para avaliação dos concretos com EGF moldaram corpos-de-prova com diferentes teores de EGF (0%, 10%, 30% e 50%), em volume, e relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70). Os resultados mostraram que para o mesmo valor de resistência à compressão ocorria economia significativa de consumo de cimento e diminuição da taxa de absorção e da penetração de íons cloreto.

Farias Filho et al (2005) avaliaram a evolução da atividade pozolânica em resíduo do corte de granito. Foi feita caracterização mineralógica do material através de análise química e difração de raios X. Foram produzidas argamassas com substituição parcial da cal por resíduo granítico nos percentuais de 20%, 35% e 50% e fator água/cimento de 0,48. Os corpos de prova foram curados e ensaiados aos 7 dias, 28 dias e 60 dias. A atividade pozolânica foi analisada tomando-se como referência a resistência à compressão simples (RCS). Os resultados obtidos indicaram que as argamassas com substituição parcial da cal por resíduo de granito aumentaram o comportamento mecânico entre 13 e 64%. Os resultados indicaram também que a adição de resíduo de granito acelerou a velocidade de reação do hidróxido de cálcio com sílica e água, demonstrando a presença da atividade pozolânica.

Sensale (2006) estudou a resistência a compressão até 91 dias de concretos com cinza de casca de arroz (RHA) produzido por uma indústria paraguaia e queimado nos Estados Unidos. Ele usou dois índices de substituição percentual do cimento por RHA, 10% e 20%, e três diferentes relações água/cimento 0,50, 0,40 e 0,32. Os resultados obtidos foram comparados com os do concreto sem RHA. Concluiu que os concretos com substituição do cimento por RHA prejudicou o comportamento quanto à resistência à compressão nas primeiras idades, mas que esse comportamento reverteu-se ao longo do tempo tornando-se mais significativo.

Em geral, a determinação da atividade pozolânica de um material é bastante difícil devido a inexistência de um critério absoluto fazendo-se necessário efetuar ensaios baseados em diferentes aspectos, como: i) manifestação da resistência mecânica (resistência a compressão uniaxial e/ou resistência à tração por compressão diametral); e, ii) atividade química (fixação do hidróxido de cálcio, na forma de compostos hidratados, que contribuem para as resistências mecânicas).

Uma das maneiras de utilização do RCD é através da reciclagem e utilização como material de construção, visto que este, quando moído e pulverizado até uma finura equivalente a do cimento, apresenta-se com grande potencial pozolânico. Após a caracterização dos materiais a serem estudados e confirmando-se suas propriedades que aponte no sentido de que estes podem ser utilizados como substituição parcial do material aglomerante, essa aplicação vem contribuir com os seguintes pontos: i) redução no consumo de energia de produção; ii) redução dos custos de produção e construção; iii) utilização de materiais com qualidades técnicas iguais ou superiores aos materiais convencionais; iv) contribuição no aproveitamento de resíduos sólidos gerados pela construção civil, evitando assim ocupação de áreas para deposição destes e adoção de política correta para alcançar o desenvolvimento sustentável.

## 2.7 DURABILIDADE

A durabilidade é um dos fatores mais importantes para o conhecimento dos novos materiais em desenvolvimento. Para que se haja confiabilidade nas características tecnológicas de um novo material e indicação deste como nova tecnologia a ser disponibilizada no mercado é fundamental o conhecimento de suas condições de uso e de sua vida útil.

A durabilidade é a capacidade que o material ou produto possui de manter, em níveis aceitáveis, suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, para o qual foi projetado e construído durante determinado período de tempo. A durabilidade do produto pode ser avaliada pela sua resistência a agentes que afetam seu desempenho ao longo do tempo de vida ou em anos de utilização.

No estudo da durabilidade é fundamental o conhecimento do significado dos seguintes termos:

- degradação: processo através do qual o material sofre transformações irreversíveis que provocam perda de qualidade ou valor;
- agentes ou fatores de degradação: agentes químicos ou biológicos e ações físicas que provocam a degradação do material;
- mecanismo de degradação: formas pelas quais os agentes provocarão perdas nas propriedades previamente esperadas ou existentes do material;
- e
- indicadores de degradação: parâmetros utilizados para quantificar os mecanismos de degradação. São propriedades mensuráveis, as quais expressam a variação nas propriedades ou desempenho do produto durante sua utilização ou avaliação. A manutenção das propriedades é indispensável para justificar o desempenho do material ao longo de sua vida útil.

A Figura 2.10 apresenta um fluxograma de etapas fundamentais a serem alcançadas objetivando sucesso no estudo da durabilidade do resíduo de construção.

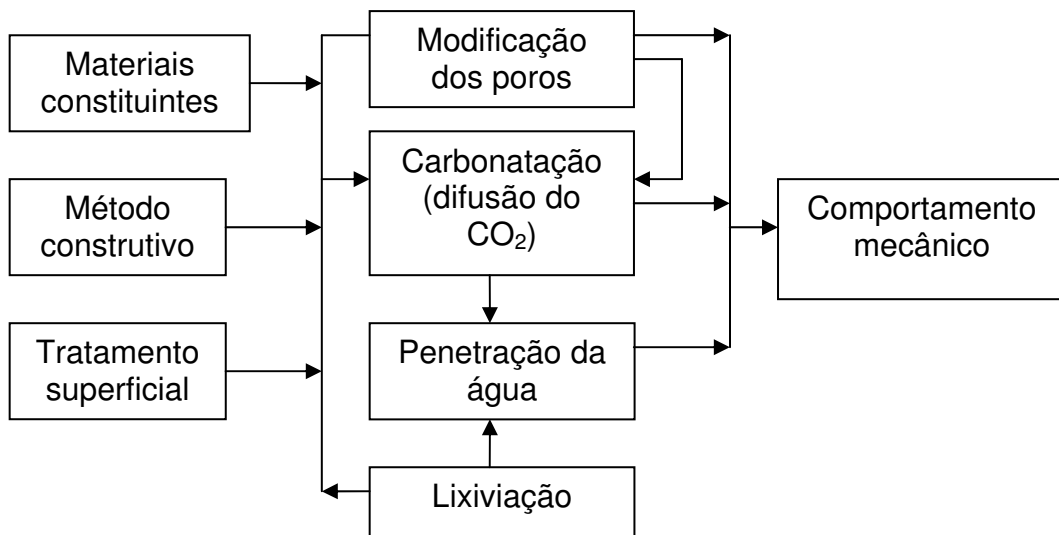


FIGURA 2.10: Fluxograma básico para estudo da durabilidade de concreto a partir de resíduos de construção civil reciclados.

A carbonatação é uma reação química entre os hidróxidos de sódio, potássio e cálcio com gás carbônico, tendo como produto final um carbonato e a conseqüente redução do pH da solução nos poros do cimento. Embora a carbonatação por si só

não constitua uma forma de degradação do concreto nem de sua deterioração, ela pode reduzir a vida útil da estrutura e, conseqüentemente, sua durabilidade.

No estudo da durabilidade a resistência à compressão é uma das propriedades que podem servir como parâmetro para quantificação e observação de possíveis variações quando se observa a vida útil de um material inserida em determinado meio ambiente.

Uma das grandes vantagens quando se trabalha com a resistência à compressão aos 28 dias, determinada através de um ensaio padrão (compressão axial), é que hoje em dia é um parâmetro aceito universalmente como índice de referência de um concreto. Assim, justifica-se o estudo da resistência à compressão no desenvolvimento de um trabalho sobre durabilidade de concreto e argamassas, uma vez que existe relação direta entre a variação da resistência e durabilidade.

### **2.7.1 Avaliação da durabilidade**

Para quantificar a durabilidade são empregados métodos que expõem o material à condições que simulam sua utilização na vida útil e, assim, se pode avaliar a degradação do material. Os métodos mais conhecidos são: i) ensaio de durabilidade natural; ii) ensaios de durabilidade em uso; e, iii) ensaio durabilidade acelerada.

- Ensaio de durabilidade natural - neste tipo de ensaio os materiais são expostos à condições que serão submetidos durante o uso. Tem como vantagem a proximidade das condições de uso do material. Porém, por ser um ensaio lento, necessita de longo tempo de exposição aos fatores de degradação para que os agentes possam agir sobre o material.
- Ensaio de durabilidade em uso - este ensaio é o mais eficiente na avaliação da durabilidade do material, visto que além de submeter o material às condições de exposição real. A vantagem de utilizar esse tipo de ensaio consiste na utilização do material com a conformação e detalhes característicos do seu emprego, tais como: a fixação, a interação com outros sistemas, etc. Assim como os ensaios de envelhecimento natural, requer longo tempo obtenção de respostas. Ao contrário dos ensaios naturais, quando empregados em material de construção, esse ensaio

utiliza o componente interagindo com outros sistemas construtivos, permitindo a avaliação sistemática do material no desempenho de sua função.

- Ensaio de Durabilidade Acelerado - a durabilidade acelerada consiste em simular condições de exposição o mais próximo possível do uso, provocando uma variação de temperatura e umidade relativa no ambiente, reproduzindo um ambiente favorável ao transporte através dos poros dos corpos de prova, dos sulfatos e materiais cimentantes. Tem como principal vantagem a rapidez, possibilitando a obtenção de resposta em curto espaço de tempo sobre o comportamento do material. Esse tipo de ensaio baseia-se na simulação de condições de exposição do material com elevada intensidade aos agentes de degradação. Apesar de rapidez nas respostas, podem fornecer respostas imprecisas, em função de mecanismos paralelos ocorridos. A simulação da degradação de materiais de construção convencionais ou não convencionais pode ser realizada através da carbonatação acelerada do material e do uso de ciclos de molhagem e secagem do material.

### **2.7.2 Estudos recentes sobre a durabilidade de concretos alternativos**

Diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de avaliar-se a durabilidade dos materiais alternativos sob diferentes formas de avaliação e utilização. Os resíduos da construção civil e o resíduo de granito reciclado têm sido estudados como argamassas, agregados ou aglomerantes alternativos e na produção de materiais compósitos. No estudo da durabilidade, esses materiais foram submetidos a diferentes tratamentos e avaliados com relação a diversas condições de exposição. Como não existe um modelo ou metodologia padrão para realização de estudo da durabilidade, os resultados dos trabalhos desenvolvidos até o momento tendem a apontar diretrizes a serem seguidas e metas a serem alcançadas, por isso justifica-se as diferentes técnicas para avaliação da durabilidade adotada, bem como os resultados obtidos pelos pesquisadores.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) é importante no estudo da durabilidade do concreto observar-se o comportamento deste em relação à água, visto que a água é um agente primário que tem capacidade de criar mecanismos para degradar

materiais da natureza. A água funciona como veículo de transporte dos íons agressivos, isto é, ela funcionará como causa de muitos processos físicos de degradação ou como fonte de processos químicos. Portanto, pode e deve ser considerado como fator importante para a maioria dos problemas de durabilidade do concreto.

Farias Filho (1999) estudou o efeito da adição de metacaulinita e tijolo moído queimado na durabilidade de compósitos argamassa-fibra de sisal. Para avaliar a durabilidade ele utilizou ciclo de molhagem e secagem com a finalidade de provocar o envelhecimento acelerado do material e comparar os resultados obtidos com aqueles de amostras submetidas ao envelhecimento natural em tempo real.

A utilização como agregado reciclado na produção de concreto favorece a reutilização de maior volume do resíduo e constitui-se como a forma mais fácil de atingir o fechamento do ciclo de vida deste material (BARRA, 1996).

Neves et al (2000) estudaram a reciclagem de entulhos para uso como agregados em argamassas. Os resultados obtidos mostraram que as argamassas alternativas com entulho apresentaram desempenho superior às argamassas convencionais tomadas como padrão.

Levy (2001) estudou a durabilidade de concretos produzidos com resíduos de alvenaria e de concreto endurecido. Ele utilizou-se de três diferentes teores de cada agregado 20%; 50%; 100% em substituição aos agregados naturais. Com a substituição de 50% dos agregados miúdos naturais por reciclados de alvenaria miúdos, observou que algumas das propriedades analisadas apresentaram valor ótimo, todavia, quando foram substituídos agregados naturais por outros agregados reciclados, constatou-se uma tendência crescente ou decrescente da propriedade analisada. Ele observou que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram comportamento equivalente ou superior ao do concreto de referência nos ensaios de carbonatação.

Jalali (2001) realizou estudos para avaliação da durabilidade do concreto. Ele baseou-se na avaliação de seis ensaios diferentes: a resistência à compressão, a resistividade elétrica, a permeabilidade ao oxigênio, o ensaio de migração do íon de cloro "*CTH Rapid Method*" (método rápido CTH), a absorção capilar e a permeabilidade ao oxigênio. Os resultados mostraram que o comportamento mecânico do concreto melhorou de acordo como evolução da cura.



Levy (2001) estudou a durabilidade do concreto fabricado em laboratório com agregado reciclado e concreto produzido com agregado reciclado de bloco cerâmico com função estrutural. A durabilidade dos novos concretos é analisada à penetração de íons cloro e na medida em que se aumenta o teor de agregados reciclados miúdos. Os resultados encontrados indicam um crescimento do teor de  $Cl^-$ , detectado na camada de 0 cm a 1 cm. Todavia, quando são substituídos os agregados graúdos naturais por reciclados de alvenaria e concreto, o comportamento é distinto, passando por um máximo quando a substituição é de 50%. Quando são substituídos 20% dos agregados naturais, independentemente da fração granulométrica do agregado, não são constatadas alterações significativas em relação ao concreto de referência.

Silva (2002) estudou a durabilidade de um compósito reforçado com fibra de celulose. O estudo avaliou o comportamento dos compósitos produzidos com cimento de escória de alto-forno reforçado com celulose utilizando a metodologia do envelhecimento acelerado que combinou ciclos de molhagem e secagem à carbonatação, simulando os principais agentes e mecanismos de degradação atuantes no material estudado. Ele usou ciclos com 6 h de imersão em água potável a 70°C, em seguida, secagem em estufa com circulação de ar na mesma temperatura. Foram realizados ensaios com 10, 20 e 40 ciclos. Os resultados mostraram que a quantidade de ciclos foi suficiente para simular a exposição natural de 9 meses de envelhecimento natural. Os resultados dos ensaios com ciclos de molhagem e secagem foram bastante semelhantes ao envelhecimento natural.

Vieira et al (2004) desenvolveram pesquisa com a finalidade de avaliar experimentalmente concretos produzidos com agregados reciclados avaliando a resistência à compressão axial e durabilidade quando submetidos a ciclos de imersão em solução agressiva de cloreto de sódio e secagem. Foram utilizados agregados reciclados na sua fração miúda e graúda, em percentuais de substituição em 0%, 50% e 100%. As relações água/cimento variaram de 0,40, 0,60 e 0,80. Foi analisada a velocidade de corrosão das armaduras nas barras de aço dos concretos reciclados. Foram realizados ensaios de potencial de corrosão e resistência de polarização para quantificar o grau de propagação da intensidade de corrosão e monitorar o processo de despassivação da armadura. Eles concluíram que o uso do agregado reciclado no concreto, em proporções convenientemente dosadas, não afeta a resistência à compressão e a durabilidade do concreto frente à corrosão das

armaduras. No entanto, ficou evidenciada a necessidade e importância no tratamento dos resíduos, desde o beneficiamento, caracterização, até a fase de utilização dos agregados no concreto. Deste modo e sobre essas condições de ensaio, o material utilizado fica com suas propriedades conhecidas e a sua utilização não fica limitada.

Oliveira (2004) avaliou a durabilidade de blocos de concreto produzidos com entulho da construção civil. Para avaliação da durabilidade ela adotou a metodologia do envelhecimento acelerado (ciclos de molhagem / secagem). Os resultados obtidos indicaram que o aumento no teor de entulho aumentou a relação água / cimento, devido a presença de materiais de alta absorção. Na avaliação da durabilidade, a comparação do traço convencional adotado (1:8) e do traço com 30% de entulho substituindo o agregado natural, leva a conclusão que este último favoreceu à redução dos efeitos de degradação devido aos ciclos de molhagem e secagem. Esse comportamento evidenciou-se devido, provavelmente, ao efeito pozolânico, originário do material cerâmico presente no entulho estudado.

Owsiak (2004) desenvolveu pesquisa sobre a influência dos álcalis do cimento de Portland em agregado de granito. Ele observou que a deformação da estrutura do concreto ocorreu após 18 meses. Ele utilizou microscópio eletrônico de varredura para observar o aparecimento de microfissuras nas amostras estudadas, visto que o equipamento possibilita observar fissuras típicas da reação alcali-silica. Através da microscopia e radiografia ele confirmou a presença do gel de alcali-silica e etringita secundária nas rochas.

Os processos de reciclagem e reutilização de resíduos das obras de construções civis são fundamentais por diversos aspectos, dentre os quais podem se destacar: i) economia de energia na produção; ii) redução na ocupação de áreas como depósito de resíduos; iii) reciclagem destes resíduos para aproveitamento como material alternativo na construção civil; iv) contribuição para alcançar o desenvolvimento sustentável; etc. Este processo faz parte da linha de pesquisa que tem como objetivo o desenvolvimento e produção de novos materiais.

Embora grande número de pesquisadores tenham demonstrado interesse e pesquisado sobre a reutilização dos resíduos da construção civil, muitas informações ainda se fazem necessárias para sua recomendação técnica com segurança e eficiência. A durabilidade é uma indicação o que evidencia o grau de confiabilidade e sugere a indicação quanto à aplicação do novo material estudado.

Assim, observando-se que alguns destes materiais podem apresentar propriedades que possibilitem sua utilização como material aglomerante, faz-se necessária a realização do estudo da durabilidade para conhecimento das alterações nas propriedades (decorrentes de reações químicas), comportamento mecânico, eficiência na utilização e recomendação destes com tal finalidade, visto que algumas destas informações podem modificar-se ao longo do tempo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para se atingir os objetivos propostos para este trabalho, o procedimento experimental foi dividido em diversas etapas conforme apresenta o fluxograma apresentado na Figura 3.1.

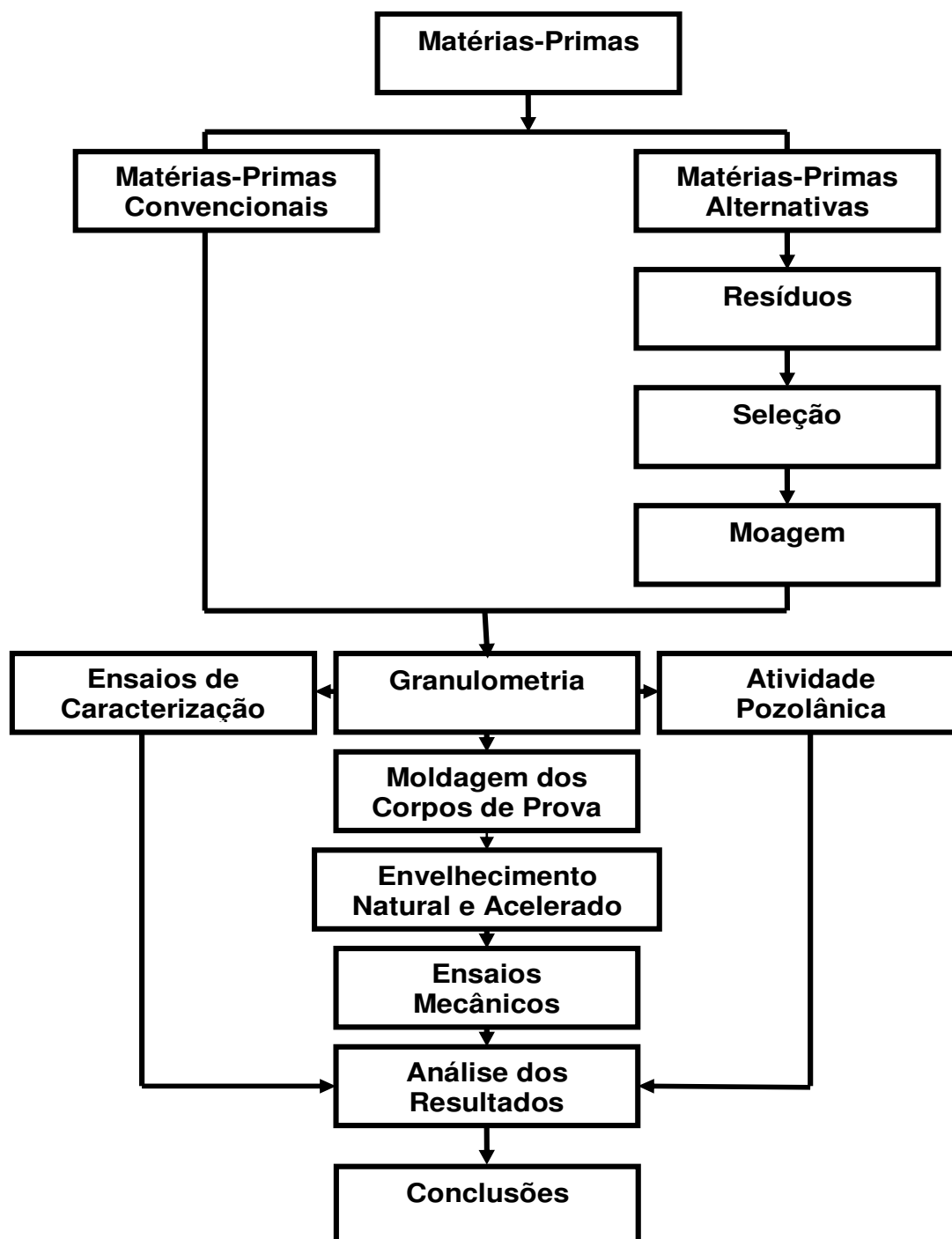


FIGURA 3.1: Etapas para execução do trabalho

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Resíduos de Construção - RC

Os resíduos de construção RC-01, RC-02 e RC-03, utilizados neste trabalho, foram gerados através das construções de edifícios na cidade de Campina Grande-PB, e, coletados segundo a norma da ABNT NBR 10007/04. Após a coleta, os resíduos passaram por processo de separação de materiais indesejáveis para este estudo, tais como: madeira, ferro, plástico, gesso, etc. Essas amostras, depois de selecionadas e separadas, foram armazenadas em sacos plásticos para evitar o contato direto com a umidade relativa do ar, perda de material devido às chuvas e ao vento, ou contaminação por outros materiais. Em seguida, os resíduos foram triturados através de um britador de mandíbulas e posteriormente, moídos em moinho de galga e passado na peneira ABNT N° 200 (0,074 mm). Os resíduos coletados receberam as seguintes denominações:

RC-01 – amostra de resíduo originado nas fases de alvenaria e revestimento, com grande percentagem de resíduos cerâmicos, tijolos e argamassas;

RC-02 – amostra de resíduo originado na fase de revestimento, composta por grande percentagem de resíduos cerâmicos (tijolos e cerâmica) e argamassa (em menor quantidade), predominando a aparência avermelhada; e

RC-03 – amostra composta por grande percentagem de resíduo gerado na fase de revestimento, com predominância de argamassa, apresentando aparência cinza escura.

Nas Figuras 3.2; 3.3 e 3.4 estão apresentadas as composições, em massa, dos resíduos de construção após a coleta.

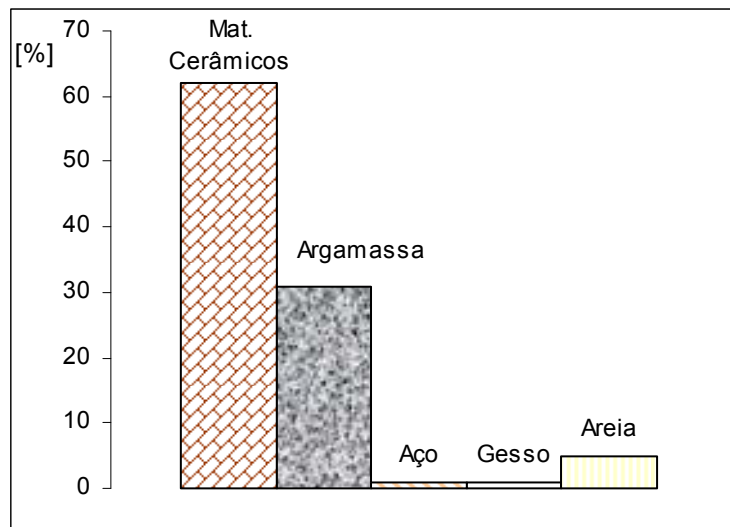


FIGURA 3.2: Resíduo RC-01.

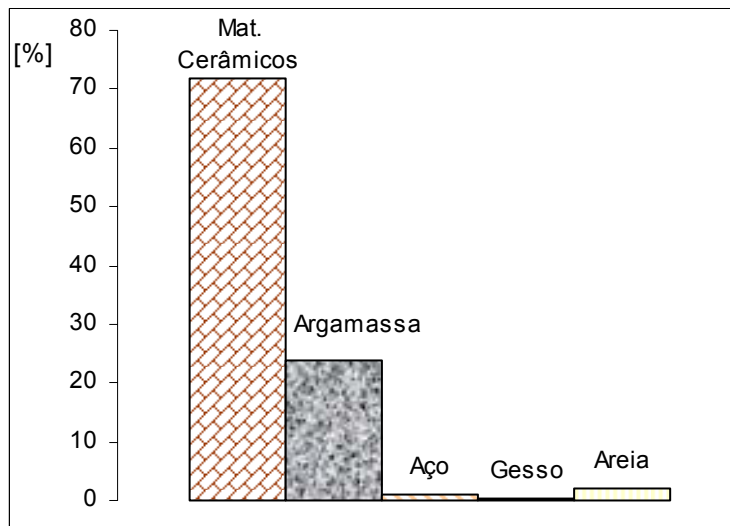


FIGURA 3.3: Resíduo RC-02.

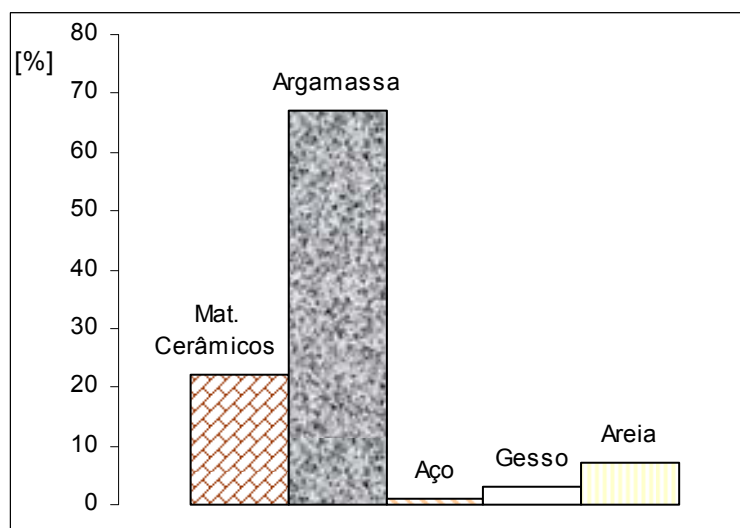


FIGURA 3.4: Resíduo RC-03.

Na Figura 3.5 estão apresentados os resíduos de construção, após processo de moagem e peneiramento na peneira ABNT N° 200 (0,074 mm).



FIGURA 3.5 Resíduos RC-01(a); RC-02 (b) e RC-03 (c).

### 3.1.2 Resíduo de granito – Gr

O resíduo de granito – Gr utilizado nesta pesquisa foi produzido pela companhia Poligran S.A. localizada no Distrito Industrial da cidade de Campina Grande-PB.

Esse resíduo originário dos teares apresenta-se em forma de polpa, de coloração cinza e de fácil desagregação após o processo de secagem. Os granitos ornamentais utilizados pela indústria Poligran S/A são, geralmente, provenientes dos municípios de Sumé, Picuí, Serra Banca e Pocinhos, no estado da Paraíba.

### 3.1.3 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland comercial, marca Zebu, composto com filler, CP II-F-32. As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam as características químicas, físicas e mecânicas do cimento CP II-F-32, produzidos e comercializados pela CIMPOR – Cimentos Portugal Brasil. Também consta um comparativo com os limites admitidos pelas Normas Brasileiras.

TABELA 3.1: Propriedades químicas do cimento Portland CP II-F-32.

Composto	Método de ensaio	Limites da NBR 11578 [%]	Resultados [%]
Perda ao fogo	NBR 5743/89	≤ 6,5	5,28
SiO <sub>2</sub>	NBR 9203/85	-	18,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 9203/85	-	4,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 9203/85	-	2,04
CaO	NBR 9203/85	-	60,07
MgO	NBR 9203/85	≤ 6,5	5,79
SO <sub>3</sub>	NBR 5745/89	≤ 4,0	2,75
Na <sub>2</sub> O	NBR 5747/89	-	0,10
K <sub>2</sub> O	NBR 5747/89	-	0,80
CO <sub>2</sub>	NBR 11583/90	≤ 5,0	4,23
CaO Livre	NBR7227/90	-	1,51
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O		-	0,63
Resíduo insolúvel	NBR 5744/89	≤ 2,5	1,66

Fonte: CIMPOR

TABELA 3.2: Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP II-F-32.

Propriedades Físicas			
Ensaio físico	Métodos de ensaio	Limites da NBR 11578	Resultados
Finura malha 200 [ % ]	NBR 11579/91	≤ 12,0	2,60
Massa específica [g/cm <sup>3</sup> ]	NBR NM 23/98	-	3,05
Área específica [Blaine] [cm <sup>2</sup> /g]	NBR NM 76/98	≥ 2600	3610
Tempo de pega [h:min] início	NBR 11581/91	≥ 1:0	2:10
final		≤ 10:00	3:00
Expansibilidade a quente	NBR 11582/91	≥ 5,0	0,00
Ensaio mecânicos			
Resistência 3 dias [MPa]	NBR 7215/96	≥ 10	24,0
Resistência 7 dias [MPa]	NBR 7215/96	≥ 20	31,2
Resistência 28 dias [MPa]	NBR 7215/96	≥ 32	38,7

Fonte: CIMPOR

### 3.1.4 Areia

O agregado miúdo (areia) utilizado, neste trabalho, foi proveniente do Rio Paraíba, coletado no município de Barra de Santana-PB.

### 3.1.5 Cais

**Cal PA** - O hidróxido de cálcio P.A. Ca(OH)<sub>2</sub>, com 95% de teor de pureza, foi produzido por Labsynth Produtos para Laboratórios Ltda.



**Cal Carbomil** – A cal hidratada utilizada, nesta pesquisa, foi fabricada pela indústria de Limoeiro do Norte.

## **3.2 MÉTODOS**

### **3.2.1 Ensaios de caracterização**

#### **3.2.1.1 Caracterização física**

A caracterização física das amostras estudadas, neste trabalho, foram: i) densidade real; ii) área específica pelo método de Blaine; e, iii) granulometria por difração a laser.

- **Massa específica real**

A determinação da massa específica real das amostras foi realizada segundo o método da ABNT NBR 6474 (1984).

- **Área específica**

Parâmetro Blaine – as áreas específicas foram determinadas segundo o método MB-348 da ABNT (1966), usando-se como padrão, amostra de cimento fornecido pela associação brasileira de cimento Portland de área específica igual a  $0,342 \text{ m}^2/\text{g}$  e massa específica  $3,42 \text{ g/cm}^3$ .

- **Análise granulométrica por difração a laser**

A análise granulométrica por difração a laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associada com um processo de medida óptica. Neste método, é combinada a relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho de partículas.

Para a realização desse ensaio as amostras foram beneficiadas em peneira ABNT N° 200 (0,074 mm), dispersas em  $250 \text{ cm}^3$  de água destilada em agitador a velocidade de 17000 rpm por 10 min. Em seguida a dispersão foi colocada em um

equipamento Modelo 1064 da CILAS, em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do CCT/UFCG.

### 3.2.1.2 Caracterização mineralógica

- **Análise química**

Com o objetivo de conhecer os principais componentes presentes nas matérias-primas foram determinadas através da análise química os seguintes óxidos:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , perda ao fogo (Pr) e resíduo insolúvel (Ri). As técnicas clássicas e instrumentais-complexiométricas seguiram as normas do Laboratório de Análises Mineraias do CCT/UFCG (1987).

- **Análises térmicas**

Com o objetivo de conhecer as faixas de temperaturas em que ocorrem as transformações endo e exotérmicas, foram realizadas análises termodiferenciais (ATD) utilizando o aparelho de Análises Térmicas Modelo RB – 300 da BP Engenharia, com razão de aquecimento de  $12\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ . A temperatura máxima para ATD. O padrão utilizado na ATD foi o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) calcinado.

Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Materiais, da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do CCT/UFCG, segundo metodologia proposta por SANTOS (1992).

- **Difração de raios X**

As amostras foram acondicionadas em porta amostra de alumínio para análise por difração de raios X, em equipamento XRD 6000 da Shimadzu. A radiação utilizada foi a  $\text{K}\alpha$  do Cu ( $40,0\text{ kV}/30,0\text{ mA}$ ). A velocidade do goniômetro foi de  $0,02^\circ$  para  $2\theta$  por passo, com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões no PDF 02 (ICDD,2003).

Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Materiais, da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do CCT/UFCG.

### 3.2.2 Ensaio tecnológicos

#### 3.2.2.1 Atividade pozolânica

Na primeira etapa deste trabalho foram avaliadas as atividades pozolânicas dos resíduos de construção e resíduos de granito. As argamassas convencionais e alternativas foram preparadas no traço 1:3 (cal:areia) e com fator água aglomerante de 0,48 com base no trabalho efetuado por Nuran Ay (2000). Nas argamassas alternativas foram incorporados resíduos com teores de 25%, 35% e 50%, em massa, em substituição da cal. Os teores de substituições mínimos e máximos utilizados neste trabalho foram aqui adotados como variação daquele proposto pelo autor supracitado. Os corpos-de-prova foram moldados em formato cilíndrico com dimensões de 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram mantidos nos respectivos moldes por um período de 24 h e, em seguida, foram colocados em câmara úmida com 100% de umidade relativa por períodos de cura de 7, 14, 28 e 60 dias. A Tabela 3.3 apresenta os traços utilizados para confecção das argamassas para determinação do índice de atividade pozolânica dos resíduos.

TABELA 3.3: Traços para determinação do índice de atividade pozolânica.

Amostra	Teor de substituição, em massa, da cal pelo resíduo [%]	Composição da traço (cal : areia) (cal – resíduo: areia)
Convencional	0	1 : 3
Alternativas	25	0,75 – 0,25 : 3
	35	0,65 – 0,35 : 3
	50	0,50 – 0,50 : 3

Para o ensaio para determinação da atividade pozolânica com cal, seguiu a metodologia utilizada por Nuran Ay (2000). Para avaliação da evolução desta característica tomou-se como parâmetro os resultados da resistência à compressão simples (RCS).

### 3.2.3 Confeção das argamassas para estudo da durabilidade

As argamassas convencionais e alternativas utilizadas para estudo da durabilidade foram preparadas no traço 1:4:28 (cimento, cal, areia), em massa, e fator água/aglomerante variando entre 2,30 a 2,69 de acordo com o índice de utilização do resíduo proposto por Mota (1994) seguindo a norma da ABNT NBR 7215/91. Nas argamassas alternativas foram incorporados os teores de resíduos de construção e resíduo de granito na proporção de 30%, 40% e 50% de substituição, em massa, a cal. Após pesagem dos materiais em balança de precisão, de acordo com a dosagem estabelecida, estes foram colocados em misturador do tipo betoneira de eixo excêntrico com movimento planetário, permanecendo em movimento até a homogeneização do material. A Tabela 3.4 apresenta os traços utilizados para confecção das argamassas para estudo da durabilidade natural e durabilidade acelerada

TABELA 3.4: Traços para estudo da durabilidade natural e durabilidade acelerada.

Amostra	Teor de substituição, em peso, da cal pelo resíduo [%]	Composição da traço (cimento : cal : areia) (cimento : cal – resíduo: areia)
Convencional	0	1 : 4 : 28
	30	1 : 0,70 – 0,70 : 28
Alternativas	50	1 : 0,60 – 0,40 : 28
	50	1 : 0,50 – 0,50 : 28

### 3.2.4 Resistência à compressão simples (RCS)

Após o período de cura de 28 dias, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de RCS segundo a norma da ABNT NBR-7215/91, que foram realizados no Laboratório da ATECEL – Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior, Campina Grande, PB. A Figura 3.6 apresenta a argamasseira e moldes cilíndricos utilizados para a confecção dos corpos-de-prova.



FIGURA 3.6: Argamasseira (a) e moldes cilíndricos 5 cm x 10 cm (b).

### 3.2.5 Durabilidade

#### 3.2.5.1 Envelhecimento natural

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram mantidos nos respectivos moldes por um período de 24 h. Foram curados em imersão por 28 dias e, em seguida, determinando a sua RCS. Os corpos-de-prova foram expostos às condições climáticas ambientais por 28, 60, 90, 120, 180 dias e, após cada período, foi avaliada a RCS dos corpos-de-prova. Os ensaios foram realizados no Laboratório da ATECEL – Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior, Campina Grande, PB.

#### 3.2.6.2 Durabilidade acelerada

No ensaio de durabilidade acelerada, os corpos-de-prova foram submetidos aos ciclos de molhagem e secagem, sendo cada ciclo com duração de 24 horas de acordo com o programa apresentado na Figura 3.7. A definição do ciclo utilizado no trabalho foi baseado nos planejamentos utilizados por Farias Filho (1999) e Oliveira (2004). Foram criados dois tratamentos diferentes para simular o envelhecimento acelerado dos corpos-de-prova, variando-se a temperatura de secagem conforme descrito abaixo:

Tratamento – C1 – Estufa à temperatura controlada de  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ; e  
Tratamento – C2 – Estufa à temperatura controlada de  $45^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

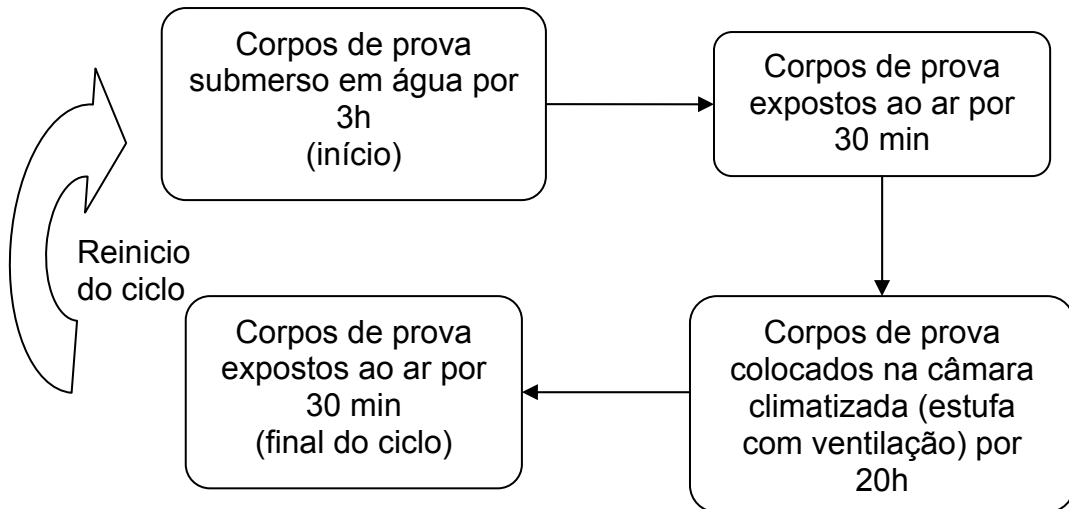


FIGURA 3.7: Ciclo de molhagem e secagem.

Após o período de cura em imersão por 28 dias iniciou-se o processo de envelhecimento acelerado dos corpos-de-prova, submetendo-os a ciclos alternados de molhagem e secagem. Os corpos-de-prova foram avaliados aos 20, 30, 45, 60 e 90 ciclos, de acordo com o planejamento experimental. A Figura 3.8 apresenta os corpos-de-prova quando submetidos à secagem na câmara climatizada (estufa).



FIGURA 3.8: Corpos-de-prova durante secagem em estufa.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MINERALÓGICA

Nas Figuras 4.1 e 4.2 estão apresentadas as curvas de distribuição granulométrica acumulada das cais utilizadas nesta pesquisa.

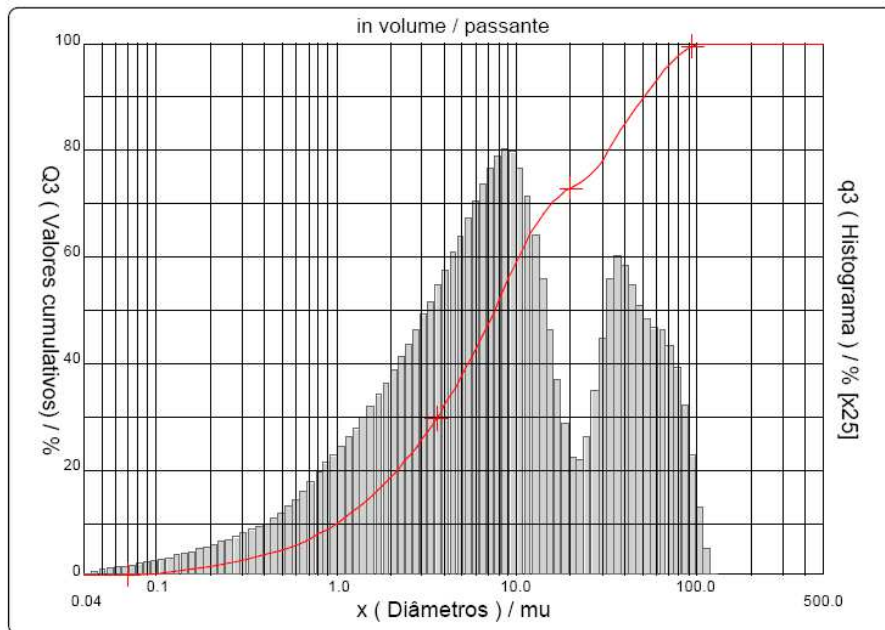


FIGURA 4.1: Distribuição granulométrica acumulada da cal Carbomil.

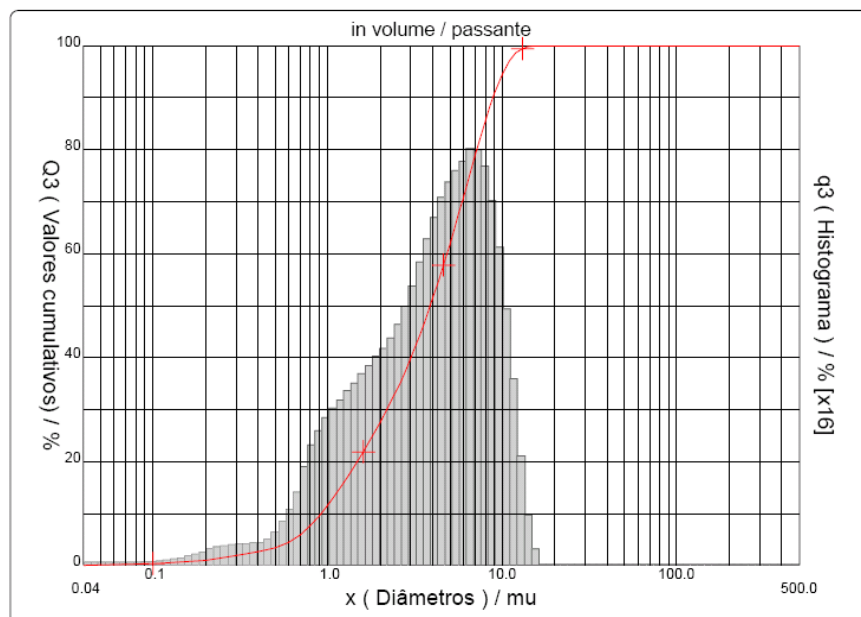


FIGURA 4.2: Distribuição granulométrica acumulada da cal P.A.

Analisando as curvas de distribuição de tamanho de partículas das cais utilizadas neste trabalho (Figuras 4.1 e 4.2), verifica-se que a cal Carbomil apresentou curva com comportamento bimodal com picos em 9  $\mu\text{m}$  e 40  $\mu\text{m}$  e larga distribuição de tamanho de partículas, com  $D_{10}$  de 1,00  $\mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  de 7,54  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  de 50  $\mu\text{m}$  e diâmetro médio de 17,08  $\mu\text{m}$ . A cal PA apresentou curva com comportamento mono modal com pico em 8,00  $\mu\text{m}$  e pequena faixa de distribuição de partículas, com  $D_{10}$  de 0,92  $\mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  de 3,87  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  de 8,86  $\mu\text{m}$  e diâmetro médio 4,43  $\mu\text{m}$ . Comparando com a norma da ABNT, a cal Carbomil apresentou valores de massa acumulada de 18,53% ( $< 2 \mu\text{m}$ ) equivalente a fração argila; 54,94% ( $2 \mu\text{m} < X < 60 \mu\text{m}$ ) equivalente a fração silte e 26,53% ( $60 \mu\text{m} < X < 2000 \mu\text{m}$ ) equivalente a fração areia. Para a cal PA, os valores de massa acumulada foram de 27,57% ( $< 2 \mu\text{m}$ ) equivalente a fração argila e 72,43% ( $2 \mu\text{m} < X < 60 \mu\text{m}$ ) equivalente a fração silte.

Nas Figuras 4.3 a 4.6 estão apresentadas as curvas de distribuição granulométrica acumulada dos resíduos utilizados nesta pesquisa.

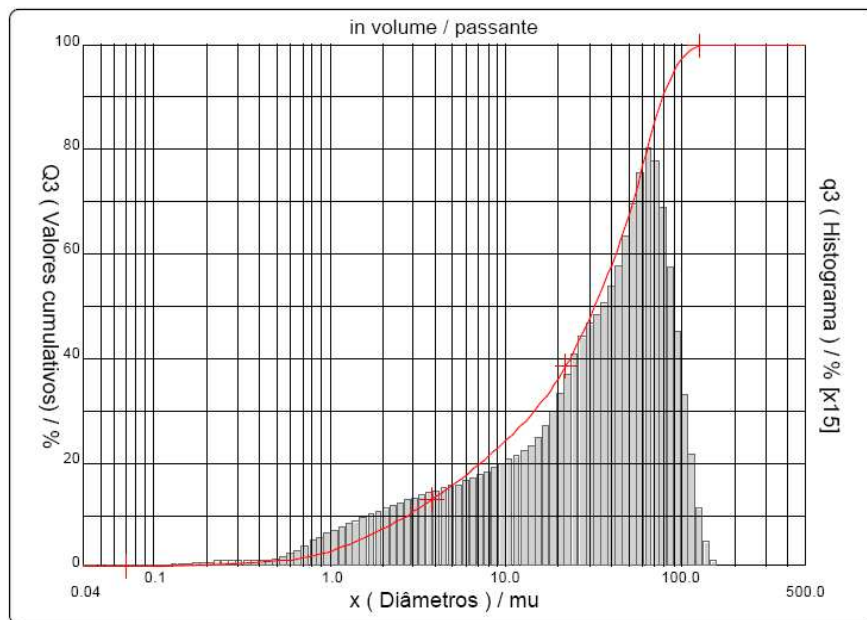


FIGURA 4.3: Distribuição granulométrica acumulada do resíduo RC-01.



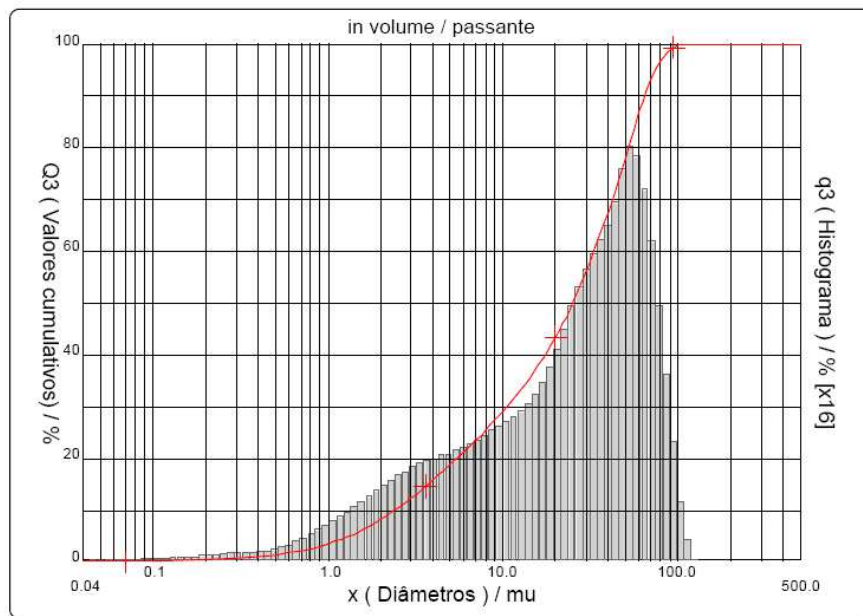


FIGURA 4.4: Distribuição granulométrica acumulada do resíduo RC-02.

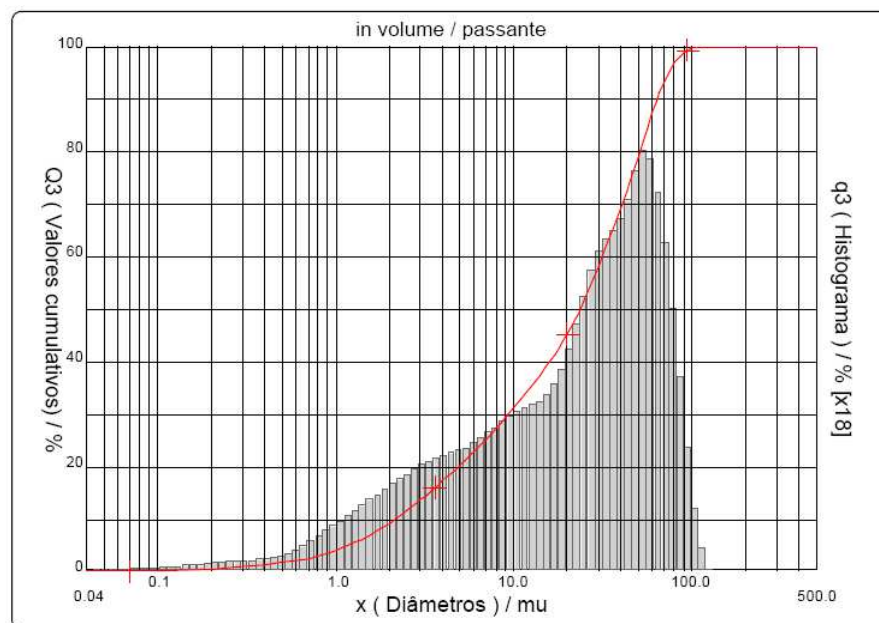


FIGURA 4.5: Distribuição granulométrica acumulada do resíduo RC-03.

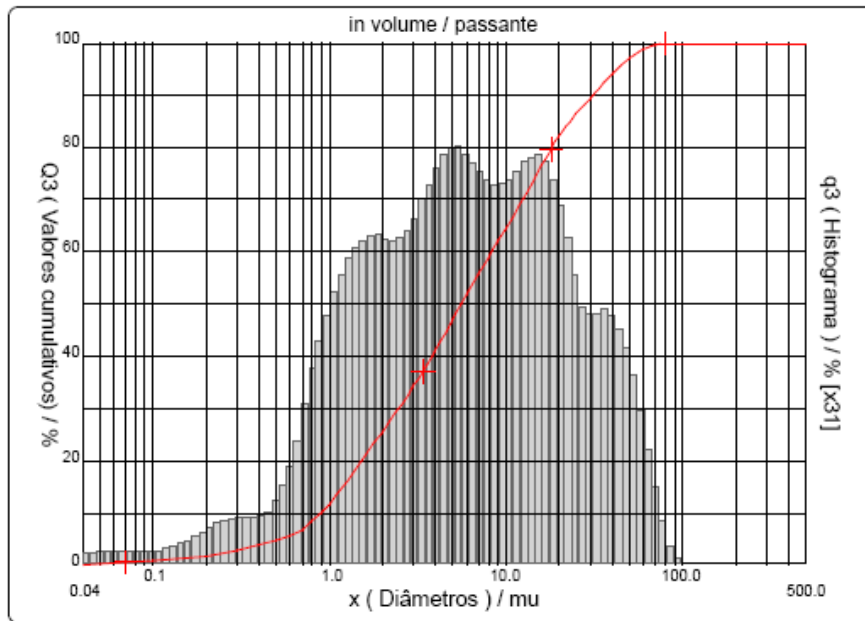


FIGURA 4.6: Distribuição granulométrica acumulada do resíduo de granito.

Analisando as curvas de distribuição de tamanho de partículas dos resíduos utilizados nesta pesquisa (Figuras 4.3 a 4.6), verifica-se que o RC-01 apresentou curva com comportamento mono modal com pico em  $80 \mu\text{m}$  e média distribuição de tamanho de partículas, com  $D_{10}$  de  $2,77 \mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  de  $32,00 \mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  de  $78,01 \mu\text{m}$  e diâmetro médio de  $36,94 \mu\text{m}$ . O RC-02 apresentou curva com comportamento modal com pico em  $80 \mu\text{m}$  e média distribuição de tamanho de partículas, com  $D_{10}$  de  $2,42 \mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  de  $25,03 \mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  de  $64,39 \mu\text{m}$  e diâmetro médio  $29,62 \mu\text{m}$ . O RC-03 apresentou curva com comportamento modal, que caracteriza maior uniformidade na distribuição granulométrica, com pico em  $80 \mu\text{m}$  e média distribuição de tamanho de partículas, com  $D_{10}$  de  $2,25 \mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  de  $23,56 \mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  de  $63,63 \mu\text{m}$  e diâmetro médio  $28,57 \mu\text{m}$ . O resíduo de granito Gr apresentou curva com comportamento modal com pico em  $7,00 \mu\text{m}$  e larga distribuição de tamanho de partículas, com  $D_{10}$  de  $0,89 \mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  de  $5,58 \mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  de  $31,31 \mu\text{m}$  e diâmetro médio  $11,30 \mu\text{m}$ . Comparando com as normas da ABNT os resíduos RC-01, RC-02 e RC-03 apresentaram valores de massa acumulada de 9% ( $< 2 \mu\text{m}$ ) equivalentes a fração argila; 68% ( $2 \mu\text{m} < X < 60 \mu\text{m}$ ) equivalente a fração silte e 23% ( $60 \mu\text{m} < X < 2000 \mu\text{m}$ ) equivalentes a fração areia. Para o resíduo de granito Gr os valores de massa acumulada foram de 25,68% ( $< 2 \mu\text{m}$ ) equivalente a fração argila; 54,31% ( $2 \mu\text{m} < X < 60 \mu\text{m}$ ) equivalente a fração silte e 21,15% ( $60 \mu\text{m} < X < 2000 \mu\text{m}$ ) equivalente a fração areia.

## 4.2 MASSA ESPECÍFICA REAL e ÁREA ESPECÍFICA

Os valores obtidos para massa específica real e área específica dos resíduos utilizados estão contidos na Tabela 4.1.

TABELA 4.1: Massa específica real e área específica dos resíduos.

Material	Massa específica real [g/cm <sup>3</sup> ]	Área específica [cm <sup>2</sup> /g]
RC-01	2,43	4.800
RC-02	2,52	3.400
RC-03	2,69	3.700
Gr	2,79	11.800

Analisando os resultados contidos na Tabela 4.1, verifica-se que o resíduo de granito apresentou maior valor da massa específica real (2,79 g/cm<sup>3</sup>) em relação aos outros resíduos de construção. Isto pode ser justificado pelo fato do resíduo de granito (Gr) possuir em sua composição com teor de ferro superior a 5% (Tabela 4.3) proveniente principalmente da granalha presente em sua composição.

Em relação a área específica, verifica-se que os resíduos apresentaram uma variação de 0,34 cm<sup>2</sup>/g a 1,18 cm<sup>2</sup>/g, sendo o resíduo de granito o que obteve maior finura em relação aos outros resíduos. Estes valores confirmam os resultados da composição granulométrica (Figuras 4.3 a 4.6). Os resultados obtidos para as áreas específicas, comprovam que esta propriedade física influencia diretamente na superfície de contato e poderá permitir um aumento na atividade pozolânica e, conseqüentemente, no comportamento mecânico das argamassas produzidas. Este comportamento foi observado por Amorim (1999).

Na Tabela 4.2 estão apresentadas as composições químicas das cais utilizadas nesta pesquisa. Analisando os resultados, verifica-se que elas apresentaram teores de óxido de cálcio superiores a 65,00%, teores de magnésio inferiores a 3,0%, sendo classificadas como cais calcínicas segundo a norma da ABNT NBR 7181(1984).

De acordo com os resultados da composição química dos resíduos RC-01, RC-02 e RC-03, verifica-se que estes resíduos apresentaram cerca de 84% de óxidos de silício, alumínio e ferro, superando o valor mínimo de 70% exigido pela ASTM C618 (1998) para que um material seja considerado com atividade pozolânica. O percentual de MgO também satisfaz o valor máximo de 5% exigido, atendendo as especificações químicas exigidas pela ASTM C618(1998). O resíduo Gr apresentou

teores de sílica, alumina e ferrita superiores a 77%, superando o valor mínimo de 70%. A presença de óxido de cálcio e óxido de ferro ( $\text{CaO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), encontrados na amostra de granito é oriunda principalmente da granalha e da cal utilizada como abrasivo e lubrificante no processo de beneficiamento de granito, respectivamente. Os óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de cálcio( $\text{CaO}$ ), de sódio( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e de potássio( $\text{K}_2\text{O}$ ) presentes são oriundos do feldspato e da mica do granito.

TABELA 4.2: Composição química das cais estudadas.

Determinações [%]	Cal (PA)	Carbomil
PR	28,37	27,27
RI	0,13	0,16
$\text{SiO}_2$	Traços	0,69
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Traços	traços
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,10	0,16
$\text{CaO}$	69,00	68,60
$\text{MgO}$	1,90	2,42
$\text{Na}_2\text{O}$	0,14	0,64
$\text{K}_2\text{O}$	0,07	0,06
$\text{PbO}$	0,03	traços

Na Tabela 4.3 estão apresentadas às composições químicas dos resíduos estudados.

TABELA 4.3: Composição química dos resíduos estudados.

Determinações (%)	RC-01	RC-02	RC-03	Gr
PR	4,06	3,77	5,32	4,44
RI	3,72	3,24	5,04	7,39
$\text{SiO}_2$	66,04	66,04	64,84	59,61
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13,01	12,90	8,13	11,77
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4,79	5,00	3,67	5,98
$\text{CaO}$	2,80	2,52	3,36	4,48
$\text{MgO}$	4,00	1,80	4,63	traços
$\text{Na}_2\text{O}$	0,65	0,68	0,82	2,70
$\text{K}_2\text{O}$	1,18	1,46	1,26	3,63

Em relação à perda ao fogo, verifica-se que os resíduos Gr e RC-03 apresentaram maiores valores devido, provavelmente, a presença de carbonato. Estes resultados confirmam os valores obtidos por Ângulo (2005).

Na Figura 4.7 estão apresentados os difratogramas das cais utilizadas nesta pesquisa. Observando-se os difratogramas, verifica-se que a cal PA, apresentou uma única fase de hidróxido de cálcio, caracterizada pelas distâncias interplanares

de 4,75 Å e 2,62 Å. Para a cal Carbomil, observa-se as seguintes fases: hidróxido de cálcio, caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,75 Å e 2,62 Å, calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) caracterizado por 2,69 Å, pequenas quantidades de hidróxido e carbonato de magnésio caracterizado pelas distâncias interplanares de 3,10 Å e 2,09 Å. Analisando os valores pode-se concluir que eles são típicos de cais calcíficas e confirmam os resultados obtidos na Tabela 4.2.

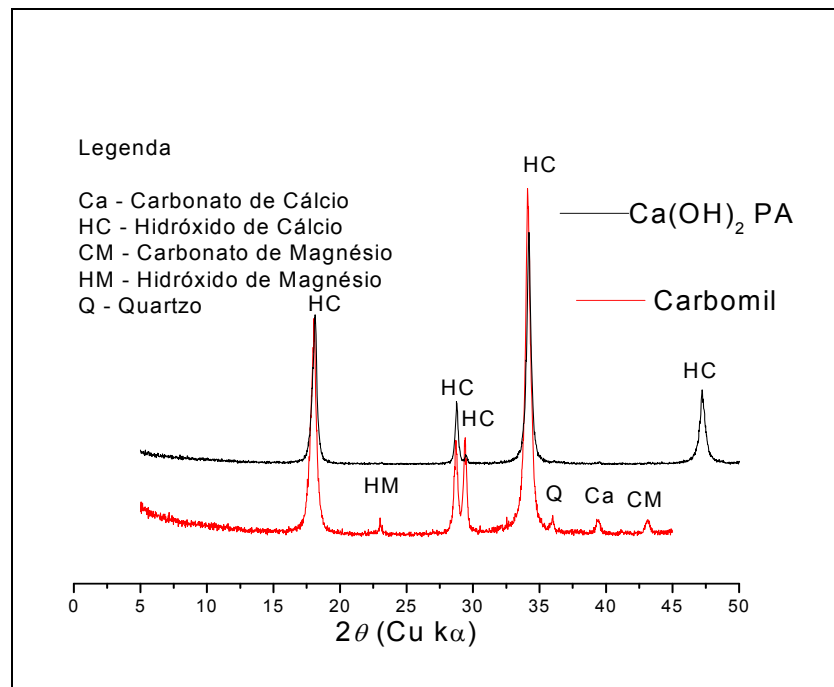


FIGURA 4.7: Difração de raios X da cais utilizadas nesta pesquisa.

Na Figura 4.8 estão apresentados os difratogramas dos resíduos Gr, RC-01, RC-02 e RC-03 utilizados nesta pesquisa. Observando-se o difratograma do resíduo Gr, verifica-se a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizado pela distância interplanar de 3,34 Å; feldspato potássico- $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ , caracterizado por 4,24 Å e 3,20 Å; feldspato sódico- $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ , caracterizado por 4,03 Å e 3,19 Å e menor quantidade de mica moscovita, caracterizado por 10,04 Å e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), caracterizado por 3,03 Å e 2,13 Å. Para os resíduos RC-01, RC-02 e RC-03 verifica-se a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,24 Å e 3,34 Å; feldspato potássico- $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ , caracterizado por 4,24 Å e 3,20 Å; feldspato sódico- $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ , caracterizado por 4,03 Å e 3,19 Å; mica moscovita caracterizada por 10,04 Å e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), caracterizado por 3,03 Å e 2,13 Å. Comparando estes resultados com aqueles obtidos por Amorim (1999) e Neves (2002) verifica-se que são similares.

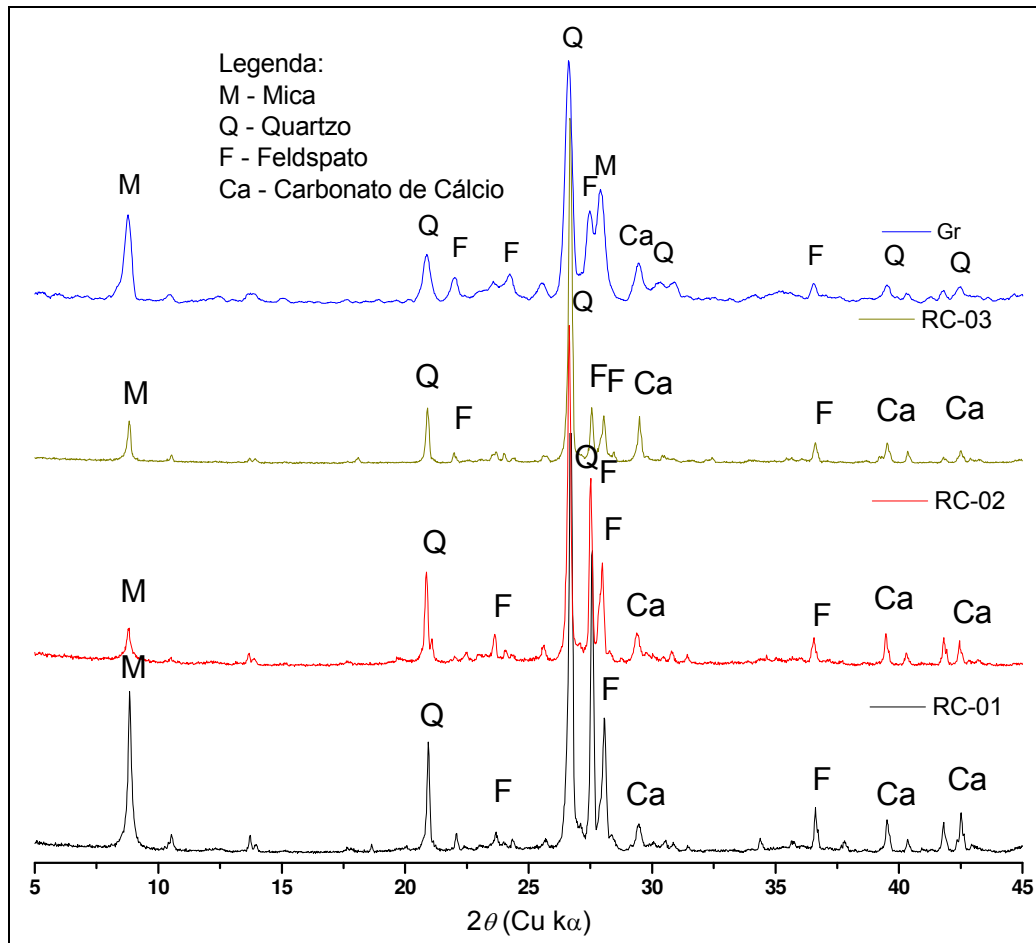


FIGURA 4.8: Difração de raios X dos resíduos utilizados nesta pesquisa.

Na Figura 4.9 estão apresentadas as curvas das análises térmicas diferenciais dos resíduos estudados nesta pesquisa. Analisando os termogramas, verifica-se que os resíduos estudados apresentaram as prováveis composições mineralógicas: o resíduo RC-01 apresentou pico endotérmico a 120°C, caracterizando a presença de água livre e adsorvida; pico endotérmico de pequena intensidade a 580°C característico da transformação do quartzo  $\alpha$  em  $\beta$  e pico endotérmico a 840°C característico da presença de carbonato de cálcio; o resíduo RC-02 apresentou pico endotérmico a 120°C, caracterizando a presença de água livre e adsorvida; pico endotérmico de pequena intensidade a 580°C característico da transformação do quartzo  $\alpha$  em  $\beta$  e um pico endotérmico de pequena intensidade a 840°C característico da presença de carbonato de cálcio; o resíduo RC-03 apresentou pico endotérmico a 120°C, caracterizando a presença de água livre e adsorvida; pico endotérmico de pequena intensidade a 580°C característico da transformação do quartzo  $\alpha$  em  $\beta$  e pico endotérmico de grande intensidade a 840°C característico da presença de carbonato de cálcio. Comparando estes resultados com aqueles

obtidos por Amorim et al. (1999), verifica-se que são similares para os resíduos de construção. O resíduo de granito apresentou pico endotérmico de pequena intensidade a 110°C, o que caracteriza a presença de água livre; pico endotérmico de pequena intensidade a 556°C, correspondente à transformação de quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ ; pico endotérmico de pequena intensidade correspondente à perda de hidroxilas da mica a 740°C; pico endotérmico de pequena intensidade correspondente a recristalização da mica a 780°C e pico endotérmico de pequena intensidade correspondente a decomposição do carbonato de cálcio à 820°C.

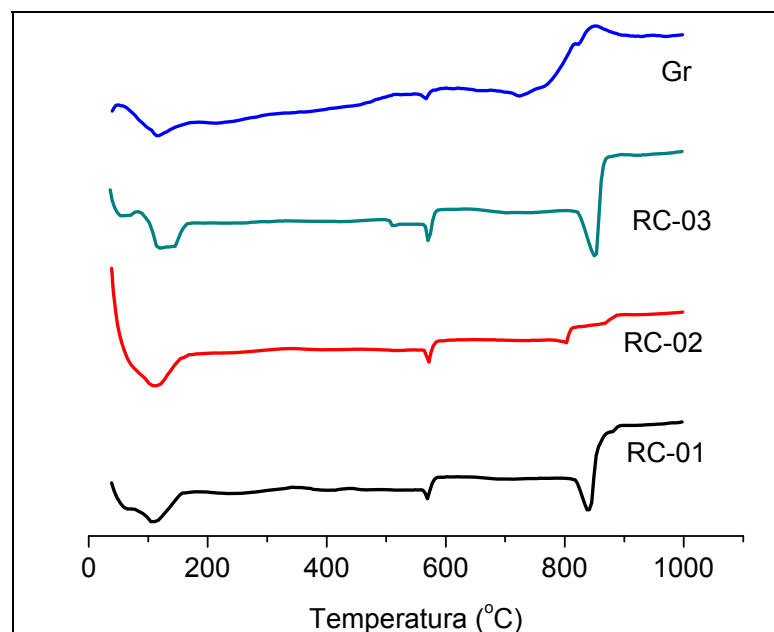


FIGURA 4.9: Análises térmicas diferencial dos resíduos estudados nesta pesquisa.

### 4.3 ATIVIDADE POZOLÂNICA

Os valores do índice de atividade pozolânica com cal das argamassas alternativas incorporadas com 25%, 35% e 50% de resíduos e curados por período de 28 dias e 60 dias estão apresentados na Tabela 4.4. Os resultados da RCS obtidos para a argamassa convencional foram de 4,34 MPa e 4,86 MPa aos 28 dias e 60 dias respectivamente. Analisando os resultados verifica-se que as argamassas com incorporação de 50% de resíduo de construção apresentaram maiores graus de pozolanicidade em relação ao resíduo de granito. As argamassas incorporadas com os resíduos Gr e RC-03 para todas as percentagens demonstraram baixa atividade pozolânica. Segundo a Norma da ABNT NBR-5751 (1992) um material pode ser

considerado pozolânico quando sua resistência à compressão simples for superior a 5,5 MPa. Deve-se salientar que os cálculos da atividade pozolânica, utilizados neste trabalho, foram realizados pela diferença de resistência entre as argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduos, seguindo a metodologia proposta por Nuran Ay (2000). As argamassas incorporadas com RC-01 e RC-02 com teores de 35% e 50% de resíduos de construções atenderam às especificações, como também podem ser classificados com materiais pozolânicos, com propriedades aglomerantes. Estes valores elevados de atividade pozolânica presentes nos resíduos RC-01 e RC-02 foram provenientes da sílica e alumina amorfas presentes nos materiais cerâmicos contidos na composição dos resíduos.

TABELA 4.4: Índice de atividade pozolânica.

Resíduos	Índice de Atividade Pozolânica [MPa]					
	25%		35%		50%	
	28 d	60 d	28 d	60 d	28 d	60 d
RC-01	1,43	7,12	5,38	9,95	13,52	16,23
RC-02	*	0,76	1,14	3,93	2,69	7,41
RC-03	*	0,05	0,63	0,72	1,40	1,68
Gr	*	0,02	*	1,43	0,05	1,60

\* valores inferiores aos da argamassa convencional

Na Figura 4.10 estão apresentados os valores da RCS obtidos com os corpos-de-prova incorporados com 25% de resíduos para período de cura de 7, 14, 28 e 60 dias. Verificou-se que os corpos-de-prova incorporadas com RC-01 para todos os períodos de cura obtiveram valores superiores aos convencionais, sendo o valor máximo de 11,98 MPa para 60 dias de cura. Em relação ao resíduo de Gr verificou-se que os valores de RCS foram inferiores às argamassas convencionais e as argamassas alternativas incorporadas com os resíduos de construção. Isto pode ser atribuído à baixa atividade pozolânica (Tabela 4.4). Comparando os resultados de RCS obtidos das argamassas aos 28 dias de cura, com as especificações da ABNT NBR – 13281 (1995) estas podem ser classificadas como argamassas do Tipo I por atenderem ao limite de resistência superior a 0,1 MPa.



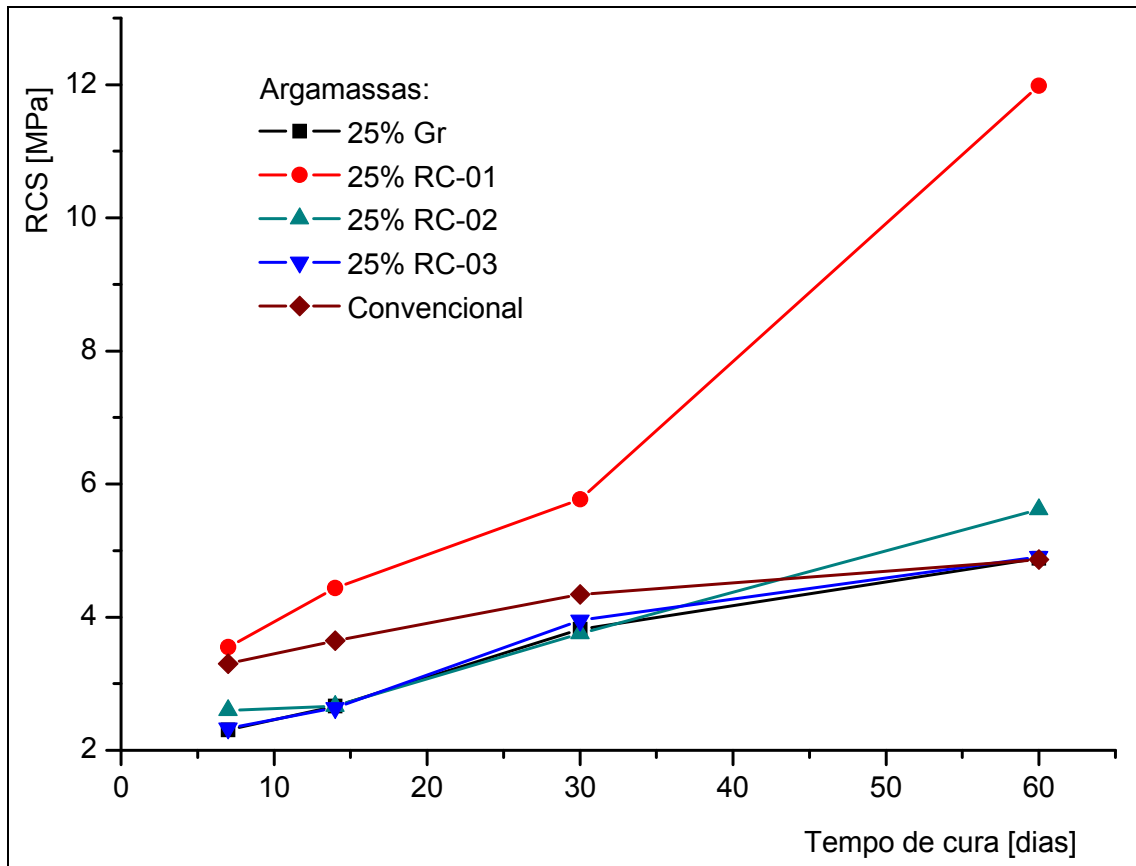


FIGURA 4.10: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova incorporados com 25% de resíduos.

Na Figura 4.11 estão apresentados os valores da resistência à compressão simples obtidas com os corpos-de-prova incorporados com 35% de resíduos para período de cura de 7, 14, 28 e 60 dias. Verificou-se que os valores dos corpos-de-prova incorporados com os resíduos RC-01 e RC-02 foram superiores ao convencional e alternativos incorporados com resíduos RC-03 e Gr, sendo os valores máximos de 14,81 MPa (RC-01) e 7,8 MPa (RC-02) para tempos de cura de 60 dias. Os valores de RCS dos resíduos Gr e RC-03 foram inferiores ao RC-01 e RC-02. Isto pode ser justificado pelo fato de que os resíduos RC-03 e Gr apresentarem, na sua composição uma elevada heterogeneidade principalmente de materiais não reativos como os inertes, que não participam das reações originárias dos compostos com poder aglomerante. Comparando os resultados de RCS obtidos para argamassas estudadas aos 28 dias de cura, com as especificações da ABNT NBR – 13281 (1995) estas podem ser classificadas como argamassas do Tipo I por atenderem a limites de resistência superior a 0,1 MPa.

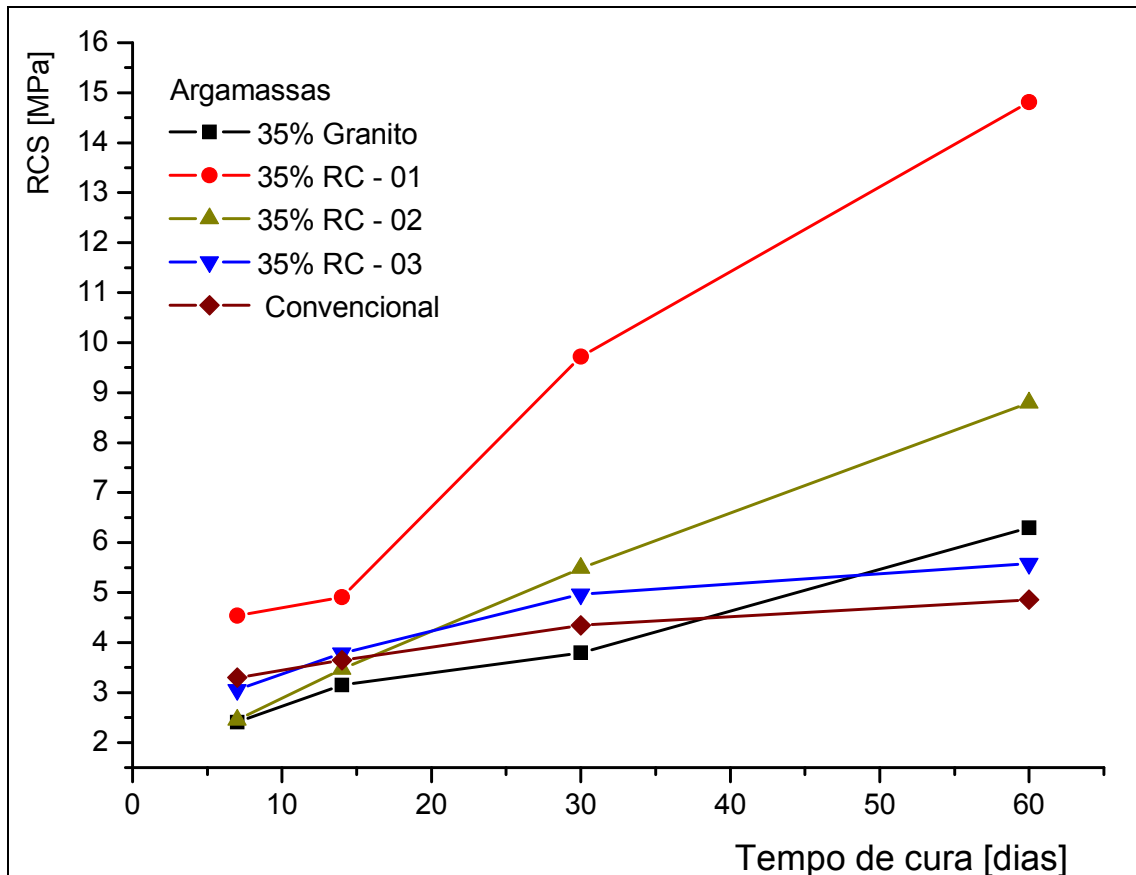


FIGURA 4.11: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova incorporados com 35% de resíduos.

Na Figura 4.12 estão apresentados os valores da resistência à compressão simples obtidas com as argamassas incorporadas com 50% de resíduos para período de cura de 7, 14, 28 e 60 dias. Verificou-se que os valores de RCS dos corpos-de-prova incorporadas com os resíduos Gr, RC-01, RC-02 e RC-03 foram superiores aos das argamassas convencionais, sendo os valores máximos de 21,81 MPa (RC-01) e 12,1 MPa (RC-02) para tempos de cura de 60 dias. Isto vem confirmar que quanto maior o tempo de cura maior a atividade pozolânica. Comparando os resultados de RCS obtidos para argamassas estudadas aos 28 dias de cura, com as especificações da ABNT NBR – 13281 (1995) estas podem ser classificadas como argamassas do Tipo I por atenderem aos limites de resistência superior a 0,1 MPa. Amorim (1999), em estudo sobre reciclagem de rejeitos de construção, também observou comportamento semelhante quanto a atividade pozolânica nos resíduos estudados para níveis superiores a 30% de incorporação.

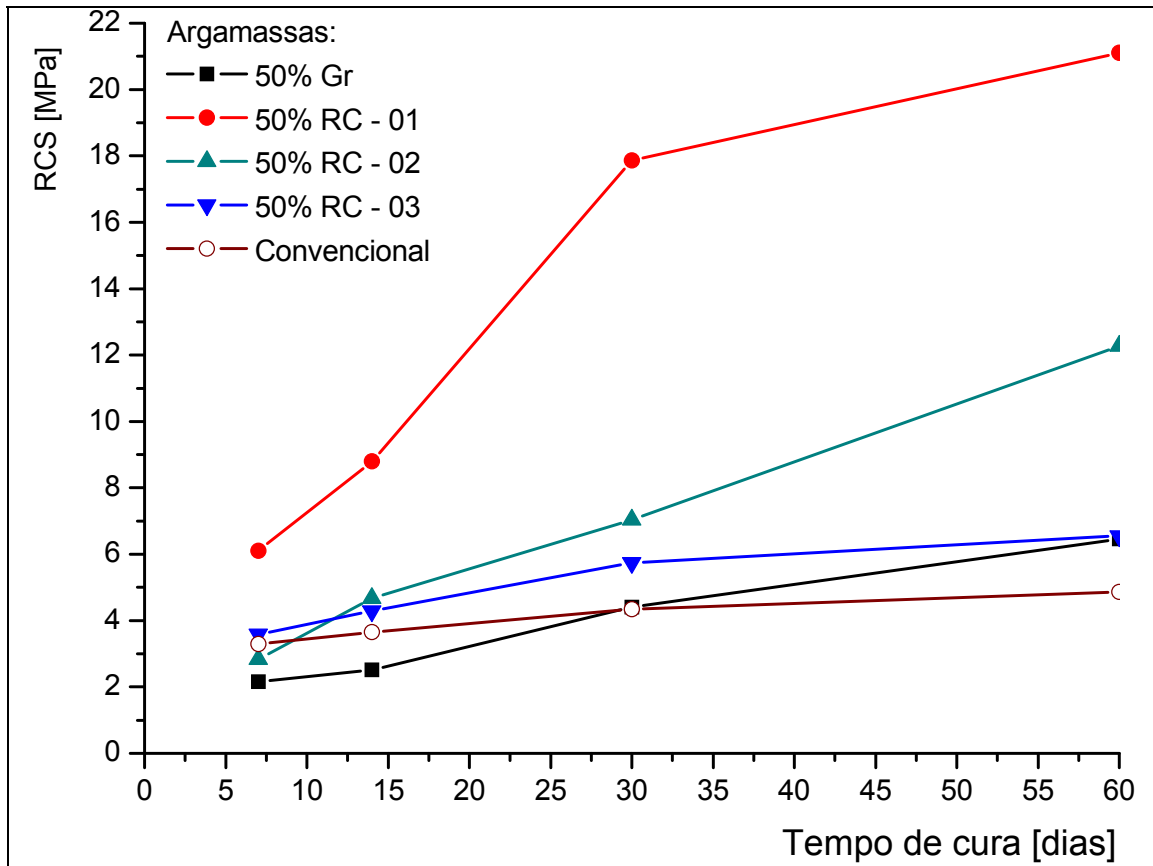


FIGURA 4.12: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova incorporados com 50% de resíduos.

Os resíduos de construção RC-01 e RC-02 que apresentaram em sua composição maior percentagem de materiais cerâmicos, sugerem que, estes componentes, tenham contribuído para elevada atividade pozolânica com propriedades mecânicas superiores às da argamassas convencionais. Estes resultados são decorrentes do tratamento térmico ocorrido nas argilas no processo de produção dos materiais cerâmicos, tornando-os com elevados potencial pozolânico, visto que o tratamento térmico destrói a estrutura cristalina dos argilominerais presentes na argila, formando sílica e alumina amorfas ou estruturas de silicoaluminatos desordenadas. Para os resíduos RC-03 e Gr de granito, verificou-se baixa atividade pozolânica em relação aos outros. Isto, provavelmente, poderá ser atribuído ao baixo teor de sílica amorfa e o elevado teor de sílica cristalina presente no resíduo. Estes resultados são similares aos obtidos por Erdogan (1997) e Nuran Ay (2000).

#### 4.4 ENVELHECIMENTO NATURAL

As amostras foram expostas as condições edafológicas e climáticas no Centro de Ciências e Tecnologia II da UFCG, Campina Grande – PB, no período de junho a novembro de 2006. Durante o período em que os corpos-de-prova foram expostos ao ambiente natural, as temperaturas médias variaram de 18,7°C a 30,9°C. As temperaturas mínimas ocorreram nos meses de julho e agosto. As máximas foram observadas nos meses de outubro e novembro. A umidade relativa do ar variou de 83% a 69%. O mês de outubro foi quando observou a umidade relativa do ar mais baixa do período de envelhecimento. A velocidade média do vento foi de 3,7 m/s. No mesmo período as maiores precipitações mensais foram observadas nos meses de junho e junho. A menor precipitação acumulada verificou-se em outubro. Os meses de outubro e novembro foram os que ocorreram as maiores evaporações e os maiores período de insolação.

##### 4.4.1 Difração de raios X

Nas Figuras 4.13 a 4.15 estão apresentados os difratogramas de raios X dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com 30%, 40%, e 50% de resíduos e curados por períodos de 28 dias e 180 dias.

Observando-se as curvas da Figura 4.13, com 30% de resíduo, verificou-se que os corpos-de-prova apresentaram as seguintes fases: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizado pela distância interplanar de 3,34 Å, portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$ , caracterizado pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å, calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) caracterizado pelas distâncias interplanares 3,03 Å e 2,13 Å, em menor quantidade silicato de cálcio ( $\text{CaSi}_2$ ) caracterizado por 3,36 e 3,19Å, silicoaluminatos de cálcio e potássico ( $\text{Na}_2.8\text{KO}.6\text{CaO}.2\text{Al}_3.8\text{Si}_4.2\text{O}_{16}$ ), caracterizado por 3,24 Å e 2,29 Å e mica moscovita, caracterizado por 10,04 Å. Observou-se, também, nos difratogramas dos corpos-de-prova com 28 dias de cura: a portlandita. Analisando-se a evolução do envelhecimento, verificou-se que há uma diminuição da fase portlandita e surgimento da calcita como fase decorrente das reações ocorridas da cal com  $\text{CO}_2$  do ar ambiente, favorecendo a carbonatação. Mudanças de fases semelhantes foram observadas por Ding, Fu e Beaudoin (1996) e Katz (2003).

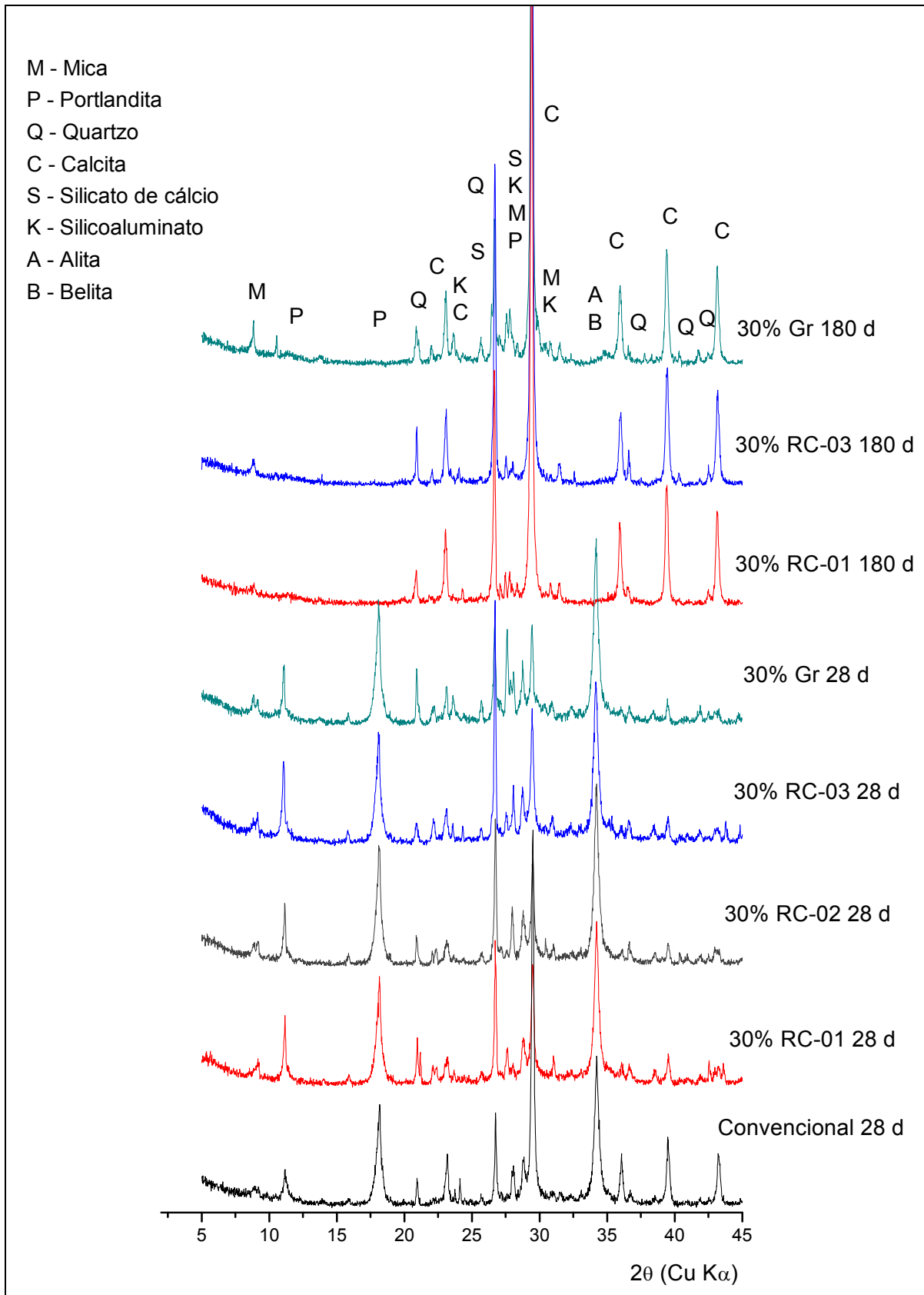


FIGURA 4.13: Difração de raios X dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com 30% de resíduo e tempo de envelhecimento de 28 dias e 180 dias.

Observando-se as curvas da Figura 4.14, com 40% de resíduo, verificou-se que nos corpos-de-prova convencionais e alternativos com tempo de envelhecimento de 28 dias e 180 dias, foram identificadas as seguintes fases: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizado pela distância interplanar de 3,34 Å, portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$ , caracterizado pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å, calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) caracterizada pelas distâncias interplanares 3,03 Å e 2,13 Å e, em menor quantidade, silicato de cálcio ( $\text{CaSi}_2$ ) caracterizada por 3,36 Å e 3,19 Å, silicoaluminatos de cálcio e potássico ( $\text{Na}_2.8\text{KO}.6\text{CaO}.2\text{Al}_3.8\text{Si}_4.2\text{O}_{16}$ ), caracterizada por 3,24 Å e 2,29 Å e mica moscovita, caracterizado por 10,04 Å. Observou-se nos difratogramas dos corpos-de-prova com 28 dias a presença de picos de média intensidade da portlandita, tendo esses picos desaparecido com a evolução do tempo de envelhecimento. Analisando-se a evolução do tempo de envelhecimento, verificou-se a diminuição da portlandita e formação de nova fase com destaque para a presença da calcita decorrente das reações ocorridas entre  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CO}_2$  do ar ambiente, favorecendo a carbonatação. Mudanças de fases semelhantes foram observadas por Wang e Hsieh (2004).

Observando-se as curvas da Figura 4.15, verificou-se que para os períodos de envelhecimento de 28 dias a 180 dias com 50% de incorporação de resíduos, apresentaram-se as seguintes fases: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizada pela distância interplanar de 3,34 Å, portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$ , caracterizada pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å, calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) caracterizada pelas distâncias interplanares 3,03 Å e 2,13 Å e, em menor quantidade, silicato de cálcio ( $\text{CaSi}_2$ ) caracterizado por 3,36 Å e 3,19 Å, silicoaluminatos de cálcio e potássico ( $\text{Na}_2.8\text{KO}.6\text{CaO}.2\text{Al}_3.8\text{Si}_4.2\text{O}_{16}$ ), caracterizado por 3,24 Å e 2,29 Å e mica moscovita, caracterizado por 10,04 Å. Observou-se, também, nos difratogramas dos corpos-de-prova por período de 28 dias a presença da portlandita, tendo estes picos praticamente desaparecidos com a evolução do tempo de envelhecimento. Verificou-se, também, com a evolução do tempo, uma forte presença da calcita, em decorrência das reações ocorridas entre a cal e o  $\text{CO}_2$  do ar ambiente que favorece a carbonatação. Mudanças de fases semelhantes foram observadas por Le Saout et al (2006).

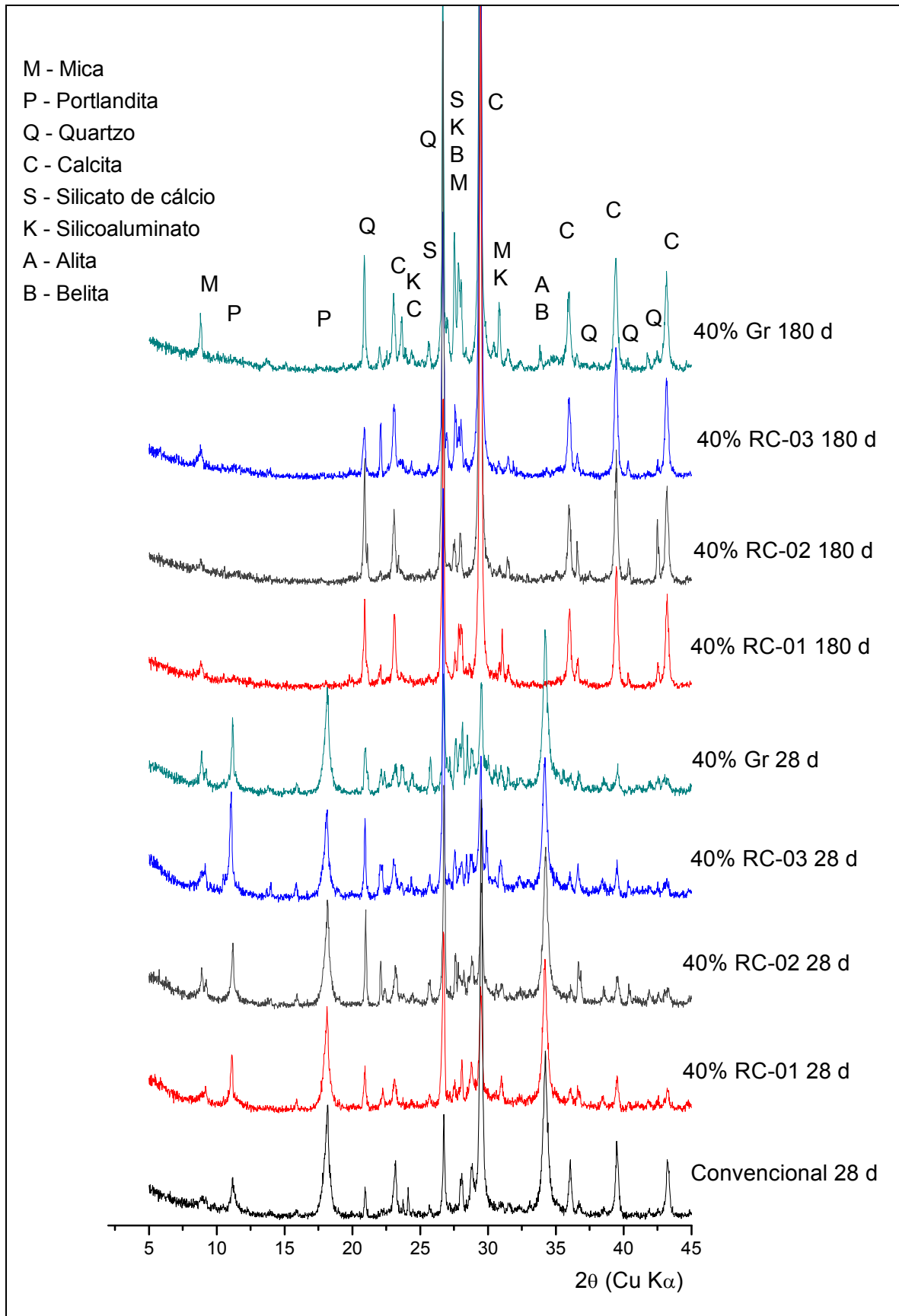


FIGURA 4.14: Difração de raios X dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporadas com 40% de resíduo e tempo de envelhecimento de 28 dias e 180 dias.

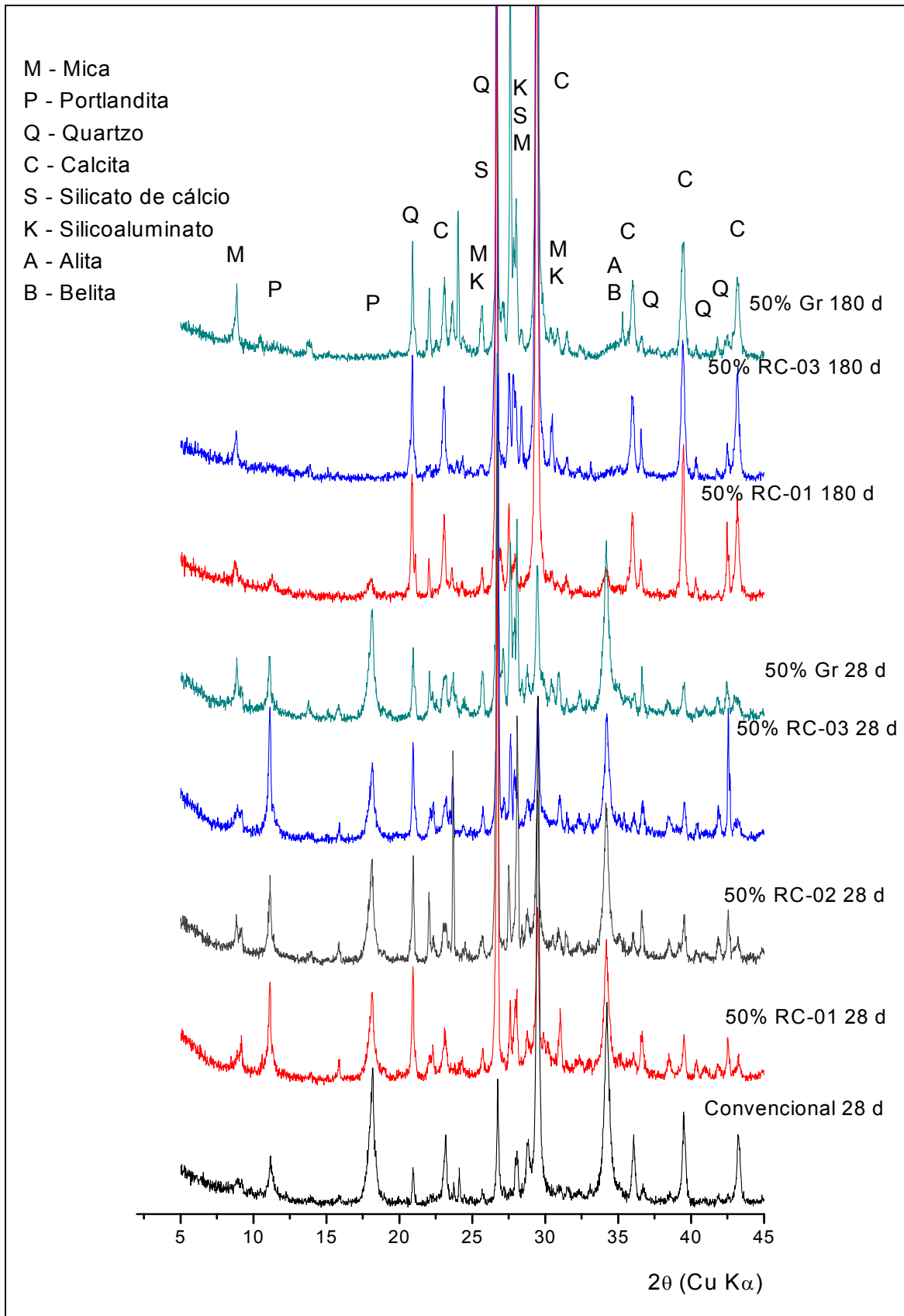


FIGURA 4.15: Difração de raios X dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporadas com 50% dos resíduos e períodos de envelhecimento de 28 dias e 180 dias.



#### 4.4.2 Resistência à compressão simples (RCS)

Na Figura 4.16 estão apresentadas as curvas de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova moldados com 30% de resíduo, submetidos ao envelhecimento natural.

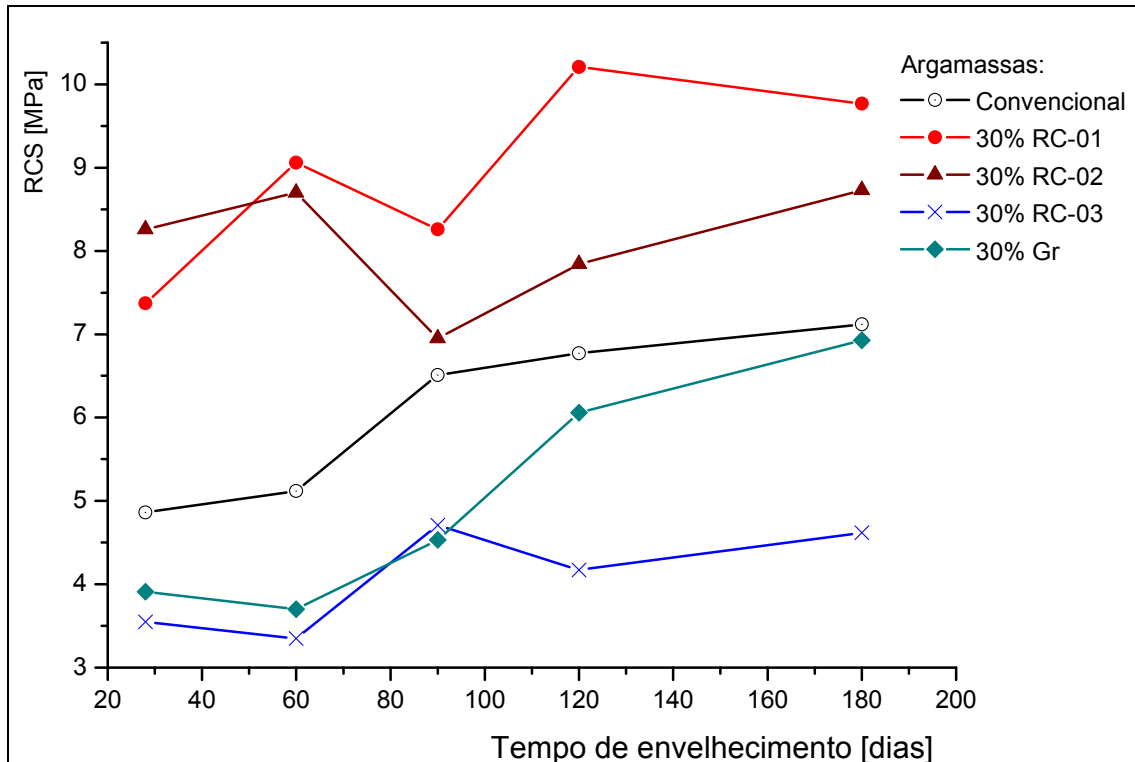


FIGURA 4.16: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos com 30% de resíduo, submetido ao envelhecimento natural.

Analisando os resultados verificou-se que, para os corpos-de-prova incorporados com 30% de RC-01, o tempo de envelhecimento foi completado, até um valor máximo de 10,21 MPa aos 120 dias, sendo o aumento da RCS na ordem de 38,53%, o que corresponde a 2,84 MPa, em relação a RCS obtida aos 28 dias de cura. Para a argamassa com 30% de RC-02, o aumento da RCS atingiu o valor máximo de 8,73 MPa, aos 180 dias, resultando em um crescimento da ordem de 5,69%, o que corresponde a 0,47 MPa, em relação a RCS obtida aos 28 dias. Para os corpos-de-prova com 30% de RC-03 o envelhecimento não foi completado, até um valor máximo de 4,71 MPa, aos 90 dias, resultando um crescimento da ordem de 38,53%, o que corresponde a 2,84 MPa, em relação a RCS obtido aos 28 dias. Para os corpos-de-prova com 30% de Gr, o processo de envelhecimento continuou até um valor máximo de 6,93 MPa, aos 180 dias, resultando em um crescimento na

ordem de 77,23%, o que corresponde a 3,02 MPa, em relação à RCS obtida aos 28 dias.

Comparando-se este resultado com aqueles obtidos dos corpos-de-prova convencionais aos 28 dias e 180 dias, observou-se para os corpos-de-prova RC-01 um crescimento de 110,05% e 63,58%, o que corresponde a 5,37 MPa e 3,09 MPa, respectivamente. Para o RC-02 observou-se um crescimento de 18,45% e 22,61%, o que corresponde a 1,36 MPa e 1,61 MPa, respectivamente. Para RC-03 observou-se uma queda de 3,08% e 33,84%, o que corresponde a 0,15 MPa e 2,41 MPa, respectivamente. Comparando-se com os resultados obtidos por Reinhardt e Stegmaier (2005) verificou-se que o comportamento é semelhante.

Em relação ao tempo de envelhecimento verificou-se que os valores de RCS dos corpos-de-prova RC-01, RC-02 começaram a decrescer, atingindo no final do período, uma queda de 4,99% e 1,91% respectivamente, afetando assim a durabilidade do material. Este decréscimo, de acordo com a Figura 4.13, pode ser atribuído a diminuição da portlandita e a forte presença da calcita resultante da reação entre a cal e CO<sub>2</sub> do ar ambiente que favorece a carbonatação, quando as argamassas estão submetidas a esse tempo de envelhecimento. Estes resultados confirmam estudos realizados por Nisher (1984) e Barra (1996) sobre a influência da carbonatação no comportamento mecânico, conseqüentemente, na durabilidade dos corpos-de-prova, quando submetidos ao envelhecimento natural.

Na Figura 4.17 estão apresentadas às curvas de resistência à compressão dos corpos-de-prova incorporados com 40% de resíduos, submetidos ao envelhecimento natural. Analisando os resultados, verificou-se que os valores de RCS dos corpos-de-prova incorporados com 40% de RC-01 começaram a decrescer a partir dos 60 dias. Com a continuação do processo ocorreu uma queda acentuada no valor de RCS atingindo no final do período uma perda de 49,42%. Para os corpos-de-prova incorporados com RC-02 os valores RCS foram afetados a partir do 90 dias. Com a continuação do processo ocorreu uma queda no valor de RCS atingindo no final do período uma perda de 10,42%. Para os corpos-de-prova incorporados com RC-03, os valores de RCS apresentaram comportamento semelhante ao RC-02, sendo observado no período uma perda na ordem de 19,38%. Para os corpos-de-prova incorporados com Gr, observou-se o início da redução dos valores de RCS após 28 dias e, no final do período, esta representou uma perda na ordem de 19,38%.

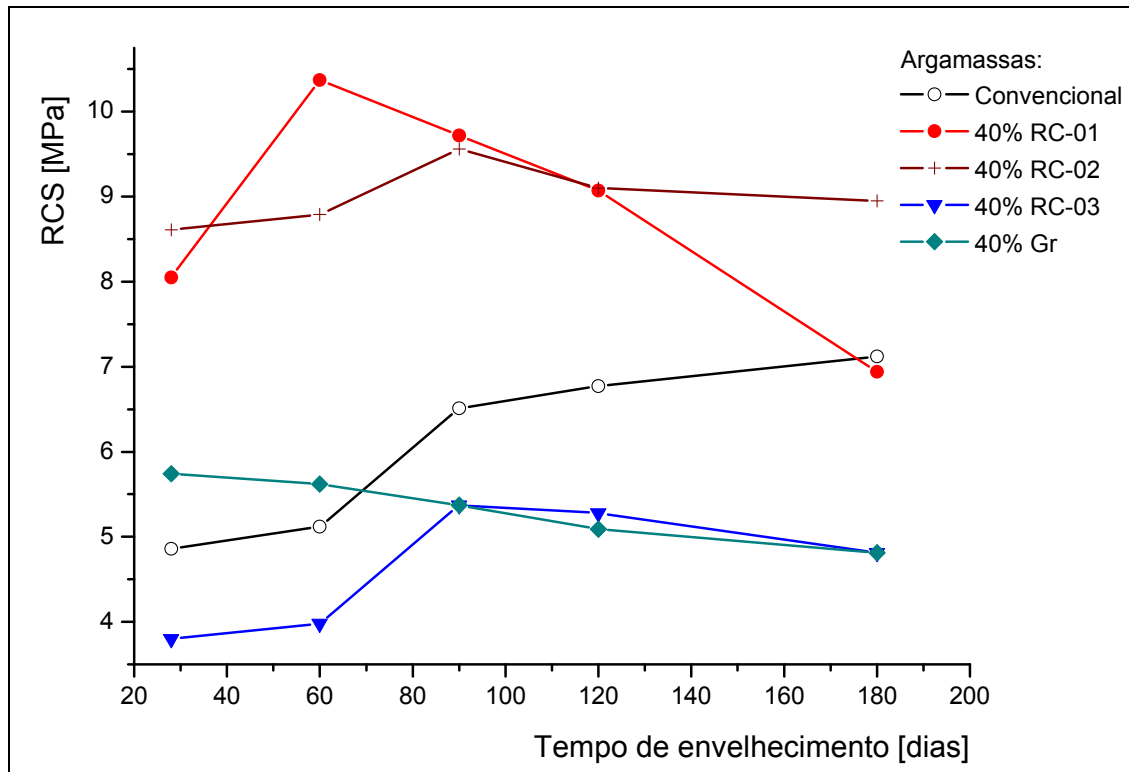


FIGURA 4.17: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com 40% de resíduo, submetido ao envelhecimento natural.

Comparando-se os resultados obtidos com os corpos-de-prova incorporados com 40% de resíduos RC-01, RC-02, RC-03 e Gr com os convencionais aos 28 e 180 dias, observou-se um crescimento da RCS na ordem de 113,37% e 45,64%, o que corresponde a 5,51 MPa e 3,25 MPa respectivamente, para os corpos-de-prova incorporados com RC-01. Nos corpos-de-prova incorporados com RC-02, o acréscimo da RCS observado foi de cerca de 96,71% e 34,29%, o que corresponde a 4,70 MPa e 2,44 MPa respectivamente. Para os corpos-de-prova com RC-03, verificou-se um acréscimo da RCS de 10,49% e uma queda de 24,58%, o que corresponde a 0,51 MPa e 1,75 MPa, respectivamente. Para os corpos-de-prova incorporados com Gr, verifica-se um aumento da RCS de 18,10% e diminuição na ordem de 19,38%, o que corresponde a 0,88 MPa e 1,38 MPa, respectivamente. Comportamento semelhante na evolução da RCS foi observado por Oliveira et al (2004).

Em relação à durabilidade, verificou-se que os valores da RCS dos corpos-de-prova RC-01, RC-02 começaram a decrescer após os 60 dias e 90 dias, atingindo no final do período uma queda de 4,99% e 1,91% respectivamente, afetando assim a durabilidade do material. Estes decréscimos nos valores de RCS podem sugerir que

a diminuição da fase portlandita (Figura 4.14) e a forte presença da calcita resultante da reação entre a cal e  $\text{CO}_2$  do ar ambiente que favorece a carbonatação tenham sido os mecanismos responsáveis pela alteração no comportamento mecânico desses corpos-de-prova quando submetidos a esse tempo de envelhecimento natural. Estes resultados confirmam estudos realizados por Nisher (1984) e Barra (1996) sobre a influência da carbonatação no comportamento mecânico quando submetido ao envelhecimento natural.

Na Figura 4.18 são apresentadas as curvas de resistência à compressão dos corpos-de-prova incorporados com 50% de resíduo, submetidos ao envelhecimento natural.

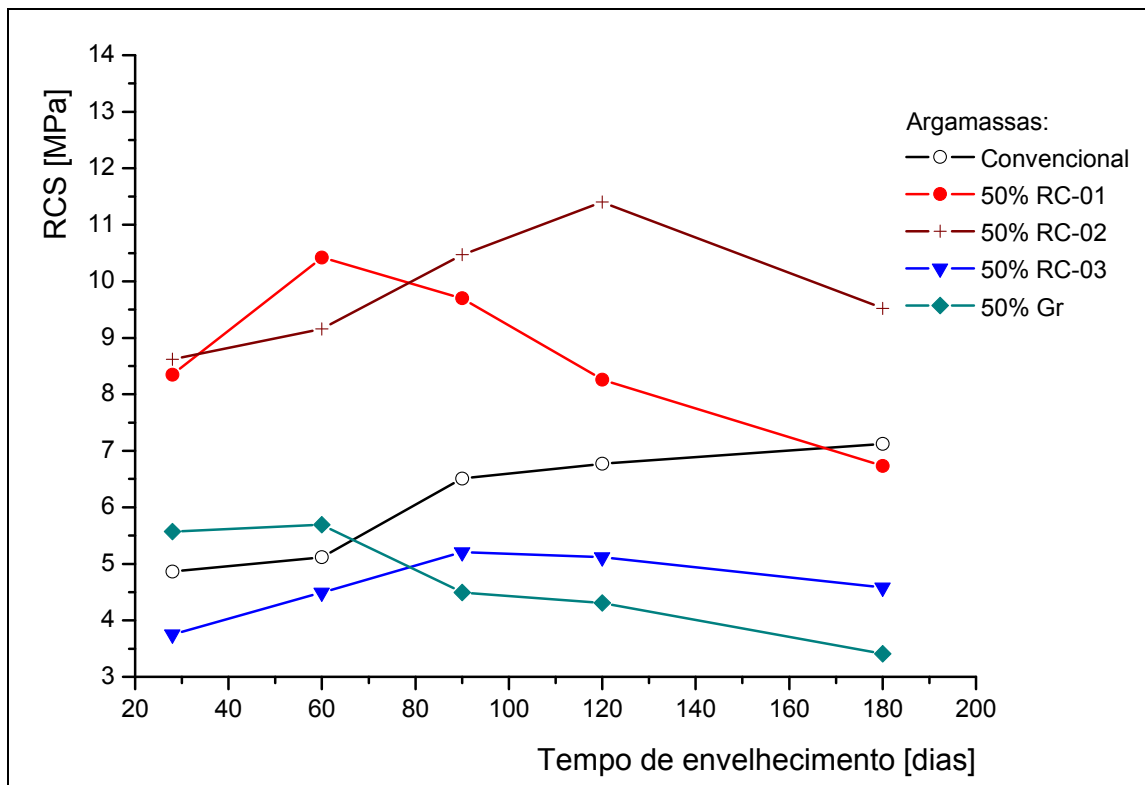


FIGURA 4.18: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos com incorporação de 50% de resíduo, submetido ao envelhecimento natural.

Analisando os resultados, verificou-se que os valores da RCS dos corpos-de-prova incorporados com 50% de RC-01 começaram a decrescer a partir dos 60 dias. No final do período a perda de RCS foi de 33,07%. Para os corpos-de-prova incorporados com 50% RC-02 os valores de RCS apresentaram comportamento semelhante ao RC-01 a partir do 120 dias, com a continuação do processo e até o final do período analisado o valor de RCS foi reduzida em 10,42%. Os corpos-de-

prova incorporados com 50% de RC-03 começaram a mostrar redução no comportamento da RCS a partir do 90 dias e ao final essa perda foi de 12,09%. Os resultados da RCS para os corpos-de-prova incorporados com 50% de Gr começaram a decrescer a partir dos 60 dias. No final do período a perda da RCS foi de 40,07%.

Comparando-se os resultados dos corpos-de-prova incorporados com 50% de resíduos com os convencionais aos 28 dias e 180 dias, verifica-se um crescimento de 71,81% e uma redução de 5,47%, o que corresponde a 3,49 MPa e 0,39 MPa, respectivamente para os corpos-de-prova incorporados com RC-01. Para os corpos-de-prova incorporados com 50% de RC-02, observou-se um crescimento de 77,36% e 33,70%, o que corresponde a 3,76 MPa e 2,40 MPa respectivamente. Para os corpos-de-prova incorporados com 50% RC-03, observou-se uma redução de 22,83% e 35,67%, o que corresponde a 1,11 MPa e 2,54 MPa, respectivamente. Para os corpos-de-prova incorporados com 50% de Gr, verificou-se um aumento de 14,60% e uma redução na ordem de 52,10%, o que corresponde a 0,71 MPa e 3,71 MPa, respectivamente.

Em relação ao tempo de envelhecimento verifica-se que os valores de RCS dos corpos-de-prova RC-01, RC-02 começaram a decrescer após os 60 dias e 120 dias, atingindo no final do período uma queda de 35,41% e 29,32%, respectivamente, caracterizando que a durabilidade do material foi afetada. Comparando-se esses resultados com aqueles obtidos por Farias Filho (1999), verifica-se que os valores apresentaram comportamento semelhante. Para os corpos-de-prova com os resíduos RC-03 e Gr, decréscimos nos valores de RCS foram observados a partir dos 90 dias e 60 dias, atingindo ao final do período de cura uma redução de 12,09% e 40,07% respectivamente. Este decréscimo na RCS pode ser atribuído ao desaparecimento da fase portlandita (Figura 4.15) que ocorreu com evolução do tempo de envelhecimento e o aparecimento da calcita em decorrência das reações ocorridas entre a cal e o  $\text{CO}_2$  do ar ambiente que favorece a carbonatação.

Embora a carbonatação por si só não constitua uma forma de degradação da argamassa nem de sua deterioração, impedirá a reação pozolânica, reduzindo a durabilidade do material. Estes resultados confirmam estudos realizados por Hamada (1969), Nisher (1984) e Barra (1996) sobre a influência da carbonatação no comportamento mecânico quando submetido ao ensaio de durabilidade.

Uma análise direta das Figuras 4.16; 4.17 e 4.18 verifica-se que o aumento no teor de resíduo compromete o comportamento mecânico da argamassa. Quanto menor o teor de resíduo melhor o comportamento mecânico da argamassa. Observa-se também que o índice de 30% de utilização de resíduo favoreceu a atividade pozolânica e reduziu a carbonatação.

Na Figura 4.19 está apresentado um comparativo geral entre todos os corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com resíduos submetidos ao envelhecimento natural.

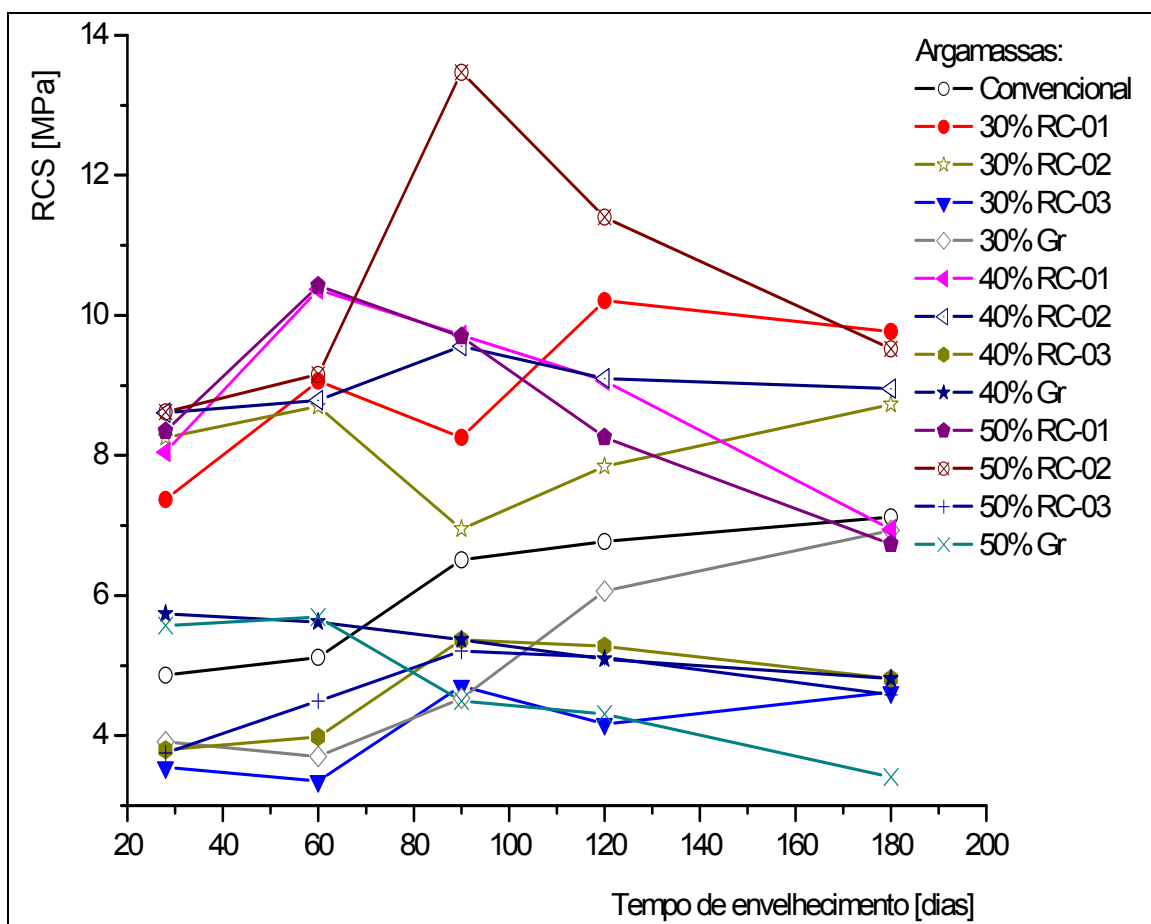


FIGURA 4.19: Visão geral da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com 30%, 40% e 50% de resíduo, submetido ao envelhecimento natural.

Analisando conjuntamente os resultados da Figura 4.19, verificou-se que valores de RCS da maioria dos corpos-de-prova incorporados com resíduos começaram a degradar após os 60 dias. Isto foi comprovado através da difração de raios X, devido a reação entre a cal e o  $\text{CO}_2$  do ar ambiente que favorece a carbonatação à reação de carbonatação entre  $\text{Ca(OH)}_2$  e a umidade natural. A

carbonatação pode ter sido o fator que mais contribuiu para a degradação do material, visto que essa reação impediu a penetração do ar e do  $\text{CO}_2$ , não permitindo a continuidade da reação pozolânica. O hidróxido de cálcio restante reagiu com os silicatos formando silicoaluminatos de cálcio e potássio em menor quantidade.

Observou-se também que os corpos-de-prova com 50% de RC-02 e 30% RC-01 apresentaram melhor comportamento mecânico em relação ao tempo de envelhecimento. Em relação as normas da ABNT, todas as argamassas estudadas apresentam resultados dentro das especificações para uso em construção civil.

Será impossível realizar uma comparação pura e simples de vários resultados obtidos por inúmeros pesquisadores nacionais e estrangeiros sobre o assunto, uma vez que tais estudos e resultados foram obtidos em condições experimentais diferentes. Entretanto, esses trabalhos trouxeram informações relevantes que, de alguma forma, puderam agregar valor ao conhecimento técnico atual.

Comparando-se os resultados obtidos, neste trabalho, principalmente para os resíduos RC-01 e RC-02, verifica-se que são similares aos obtidos por Levy (2001). Estes resultados confirmam estudos realizados por Hamada (1969), Nisher (1984) e Barra (1996) sobre a influência da carbonatação no comportamento mecânico quando submetido ao ensaio de durabilidade.

## 4.5 ENVELHECIMENTO ACELERADO

### 4.5.1 Difração de raios X

Nas Figuras 4.20; 4.21 e 4.22 são apresentados os difratogramas dos corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado, através de ciclos alternativos de molhagem e secagem.

Observando-se as curvas da Figura 4.20, com 30% de resíduo, verifica-se nos corpos-de-prova convencionais e alternativos aos 28 dias e após 90 ciclos, a presença das seguintes fases: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizada pela distância interplanar de 3,34 Å, portlandita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , caracterizada pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å, calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) caracterizada pelas distâncias interplanares 3,03 Å e 2,13 Å e, em menor quantidade, silicato de cálcio ( $\text{CaSi}_2$ ) caracterizado por 3,36 Å e 3,19Å, silicoaluminatos de cálcio e potássico

( $\text{Na}_2.8\text{KO}.6\text{CaO}.2\text{Al}_3.8\text{Si}_4.2\text{O}_{16}$ ), caracterizada por 3,24 Å e 2,29 Å e mica moscovita, caracterizada por 10,04 Å. Nos difratogramas dos corpos-de-prova com 28 dias de cura observa-se a presença de picos de média intensidade da portlandita, sendo esses picos reduzidos a sua intensidade com o envelhecimento provocado pelos ciclos de molhagem e secagem a que foram submetidos. Verifica-se que inversamente à diminuição da portlandita, há formação de nova fase com destaque para presença da calcita decorrente das reações ocorridas entre  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e  $\text{CO}_2$  do ar ambiente, favorecendo a carbonatação. Comparando-se estes resultados com os obtidos para o mesmo percentual de utilização de resíduos quando submetidos ao envelhecimento natural, observou-se uma maior presença dos silicoaluminatos de cálcio e alumínio nos corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado.

No processo de envelhecimento acelerado através de ciclos de molhagem e secagem, após 90 ciclos, para os corpos-de-prova com 30% de resíduo, verificou-se a presença da portlandita e calcita, atribuídas à aceleração da atividade pozolânica favorecida pela ação da temperatura a que foram submetidos no processo de secagem. Devido a menor ação da carbonatação observou-se maior presença dos silicoaluminatos de cálcio e potássio.

Analisando-se as curvas de difração de raios X (Figura 4.21) com evolução das idades, para os corpos-de-prova convencional e alternativos com 40% de resíduo, observa-se as fases: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizada pela distância interplanar de 3,34 Å, a portlandita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , caracterizada pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å, calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) caracterizada pelas distâncias interplanares 3,03 Å e 2,13 Å, em menor quantidade silicato de cálcio ( $\text{CaSi}_2$ ) caracterizado por 3,36 Å e 3,19Å, silicoaluminatos de cálcio e potássio ( $\text{Na}_2.8\text{KO}.6\text{CaO}.2\text{Al}_3.8\text{Si}_4.2\text{O}_{16}$ ), caracterizada por 3,24 Å e 2,29 Å e mica moscovita, caracterizada por 10,04 Å. Observa-se nos corpos-de-prova convencional aos 28 dias que a portlandita e a calcita destacam-se como fase de forte presença. Nos corpos-de-prova alternativos a esta idade, a calcita aparece em menor intensidade só apresentado-se com maior intensidade aos 90 ciclos. Com o processo de envelhecimento acelerado, observa-se a presença da portlandita e calcita e dos silicoaluminatos presentes, atribuída a aceleração da atividade pozolânica favorecida pela ação da temperatura a que foram submetidos no processo de secagem.



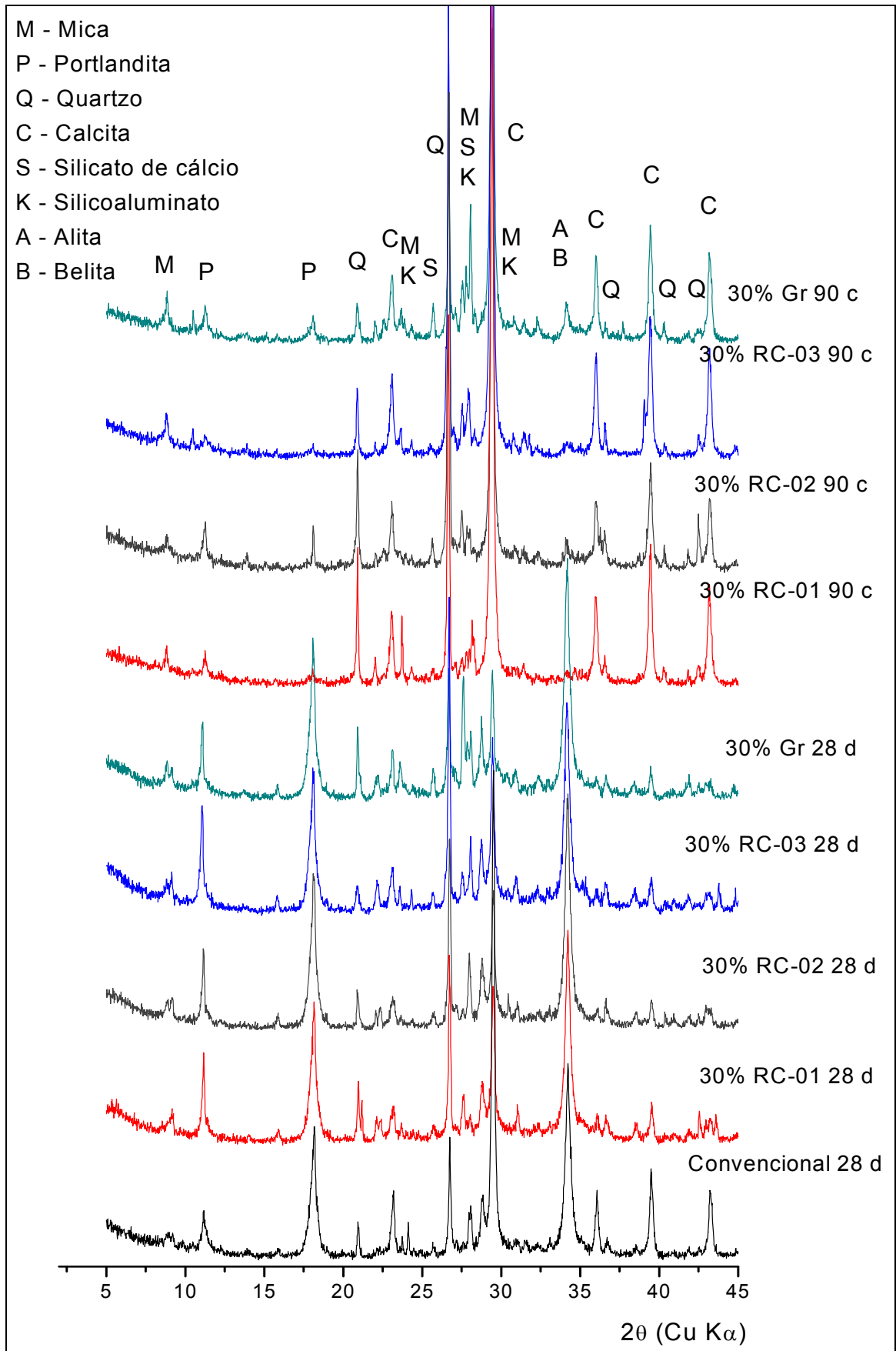


FIGURA 4.20: Difração de raios X dos corpos-de-prova convencionais e alternativos, incorporados 30% de resíduo, aos 28 dias de cura e aos 90 ciclos de molhagem e secagem.

Observa-se na Figura 4.22, com 50% de resíduo, que nos corpos-de-prova convencional, aos 28 dias, a portlandita e a calcita destacam-se como fase de forte presença. Observa-se para os corpos-de-prova convencional e alternativos a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizada pela distância interplanar de 3,34 Å, a portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$ , caracterizada pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å, calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) caracterizada pelas distâncias interplanares 3,03 Å e 2,13 Å, em menor quantidade silicato de cálcio ( $\text{CaSi}_2$ ) caracterizado por 3,36 Å e 3,19Å, silicoaluminatos de cálcio e potássico ( $\text{Na}_2.8\text{KO}.6\text{CaO}.2\text{Al}_3.8\text{Si}_4.2\text{O}_{16}$ ), caracterizada por 3,24 Å e 2,29 Å e mica moscovita, caracterizada por 10,04 Å. À medida que o processo de envelhecimento acontece, verifica-se que há evolução de maior destaque dos silicatos presentes e a presença da calcita em decorrência das reações ocorridas entre  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CO}_2$  do ar.

No processo de envelhecimento acelerado através de ciclos de molhagem e secagem, verifica-se que após 90 ciclos, os corpos-de-prova com 50% de resíduo ainda demonstram uma presença da portlandita em menor intensidade, e calcita, principalmente as argamassas produzidas com os resíduos Gr e RC-01 e RC-03. Isto é atribuído à aceleração da atividade pozolânica favorecida pela ação da temperatura a que foram submetidos no processo de secagem.

No processo de envelhecimento acelerado há uma rápida reação pozolânica e uma rápida reação de carbonatação do hidróxido de cálcio. Os subprodutos desta reação são carbonato de cálcio e os silicoaluminatos de cálcio e potássio de baixa permeabilidade ao ar e conseqüentemente  $\text{CO}_2$  fazendo com que nas partes centrais dos corpos-de-prova permaneçam o hidróxido de cálcio favorecendo a reação pozolânica ou sem reação de carbonatação. Isto pode ser observado analisando-se paralelamente as curvas de difração de raios X para os corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento natural (Figuras 4.13; 4.14 e 4.15) e aqueles submetidos ao envelhecimento acelerado (Figuras 4.20; 4.21 e 4.22).

As fases minerais identificados nas curvas difração de raios X dos resíduos de construção e do granito resultaram da distinta variedade de silicatos e carbonatos presentes nos resíduos estudados. Estes resultados confirmam aqueles obtidos por Ulsen et al (2004).

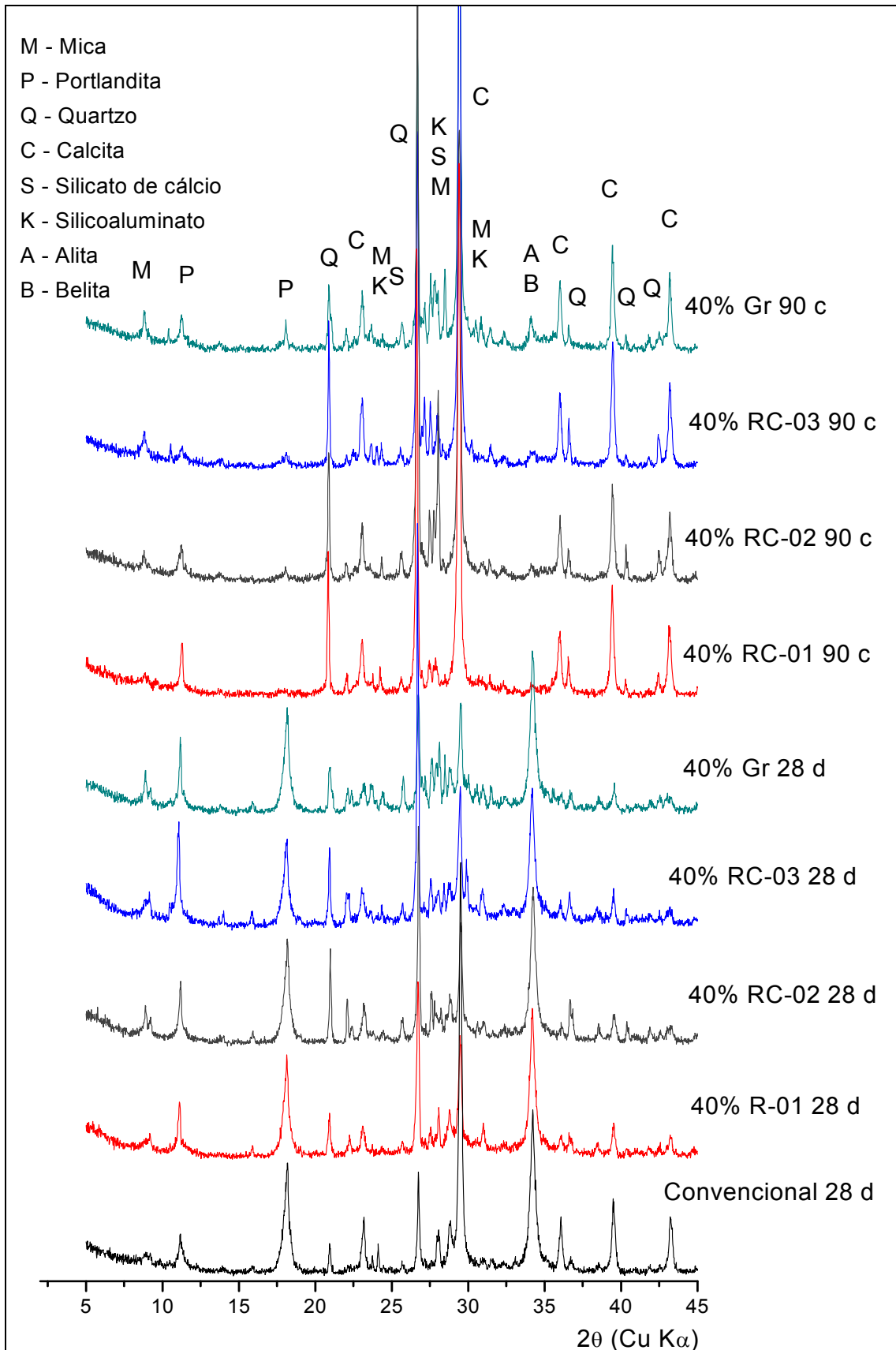


FIGURA 4.21: Difração de raios X dos corpos-de-prova convencional e alternativos, incorporados 40% de resíduo, aos 28 dias de cura e aos 90 ciclos de molhagem e secagem.

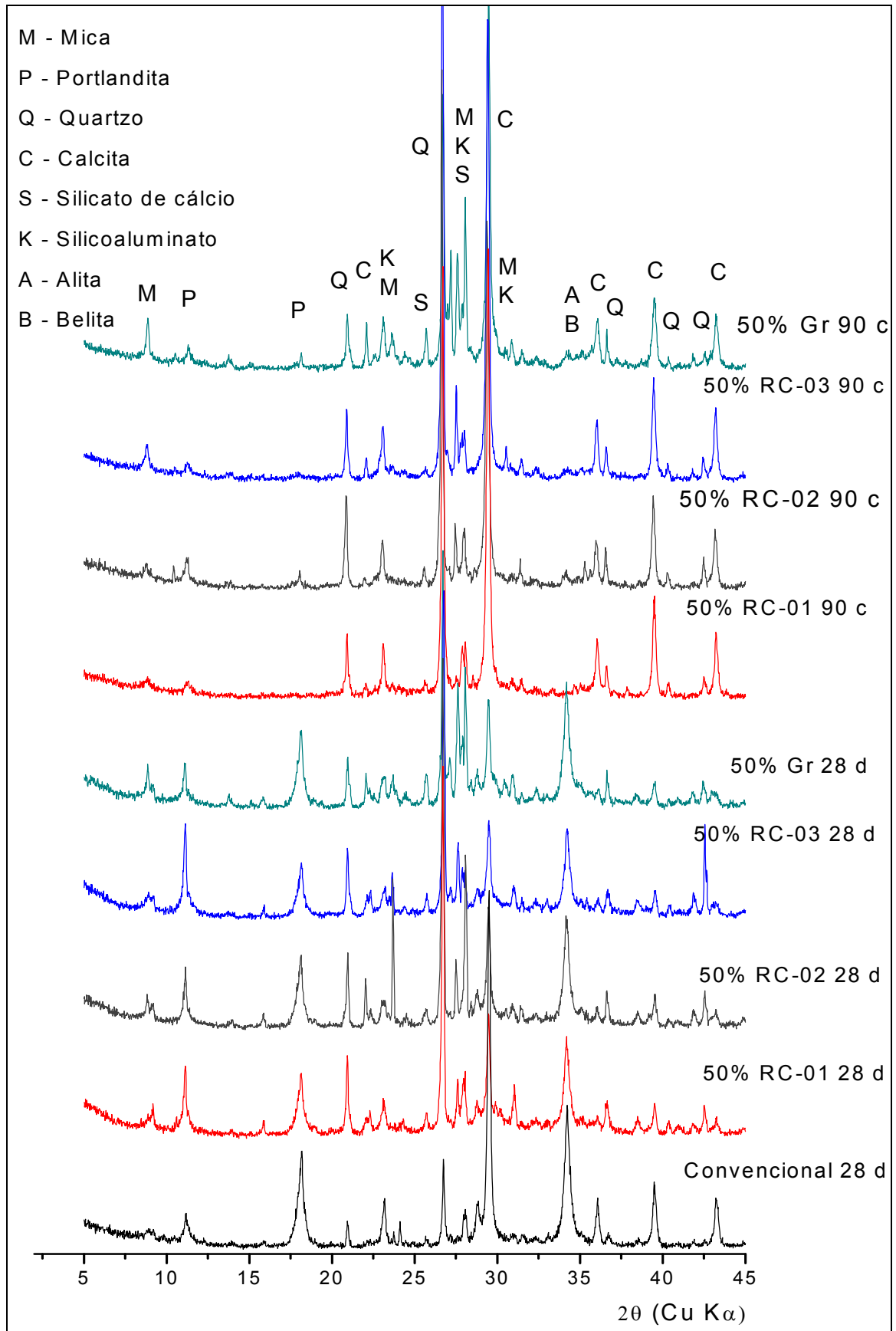


FIGURA 4.22: Difração de raios X dos corpos-de-prova convencional e alternativos, incorporados 50% de resíduo, aos 28 dias de cura e aos 90 ciclos de molhagem e secagem.

#### 4.5.2 Resistência à compressão simples

- Estufa à Temperatura Controlada de  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  - Tratamento C1

Na Figura 4.23 estão apresentadas as RCS dos corpos-de-prova com 30% de resíduo, submetidos ao envelhecimento acelerado, utilizando-se a técnica do ciclo de molhagem e secagem, com estufa regulada  $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

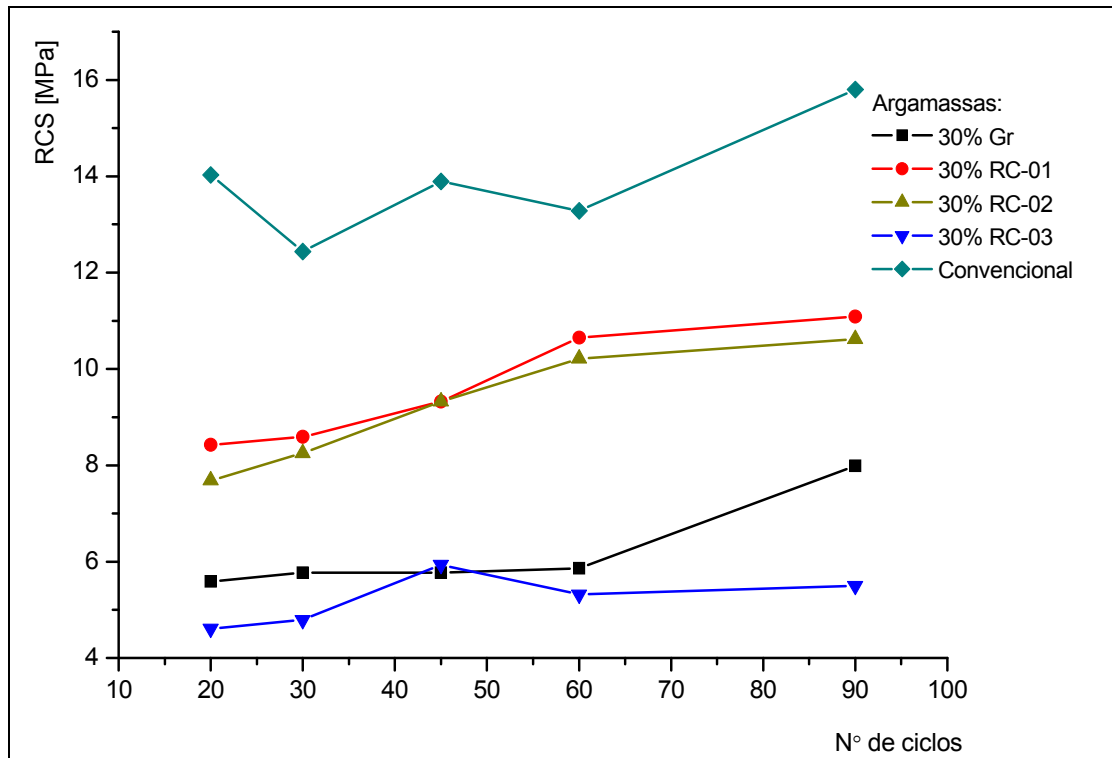


FIGURA 4.23: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencional e alternativos com 30% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C1.

Analisando os resultados da Figura 4.23, verificou-se que nos corpos-de-prova incorporados com 30% dos resíduos da construção civil e resíduos de granito apresentaram comportamento mecânico inferior ao da argamassa convencional em todas as idades avaliadas, embora os resultados obtidos para as argamassas alternativas tenham demonstrado que os corpos-de-prova não apresentaram nenhuma evidência do envelhecimento do material. Isto pode ser observado nas curvas por meio da tendência de crescimento do início do envelhecimento até o final do processo aos 90 ciclos.

Este comportamento observado para a RCS pode ser atribuído à presença da portlandita e da calcita (Figura 4.20) que favorecem a aceleração da reação pozolânica e a presença dos silicoaluminatos de cálcio e potássio, em virtude da

temperatura a que foram submetidos no processo de envelhecimento. Neste percentual de utilização de resíduos e nestas condições a que os corpos-de-prova foram submetidos ao processo de envelhecimento acelerado não ficou evidenciado o comprometimento da durabilidade do material.

Na Figura 4.24 estão apresentadas as curvas de RCS dos corpos-de-prova convencional e alternativo com 40% de resíduos, submetidos ao envelhecimento acelerado, tratamento C1.

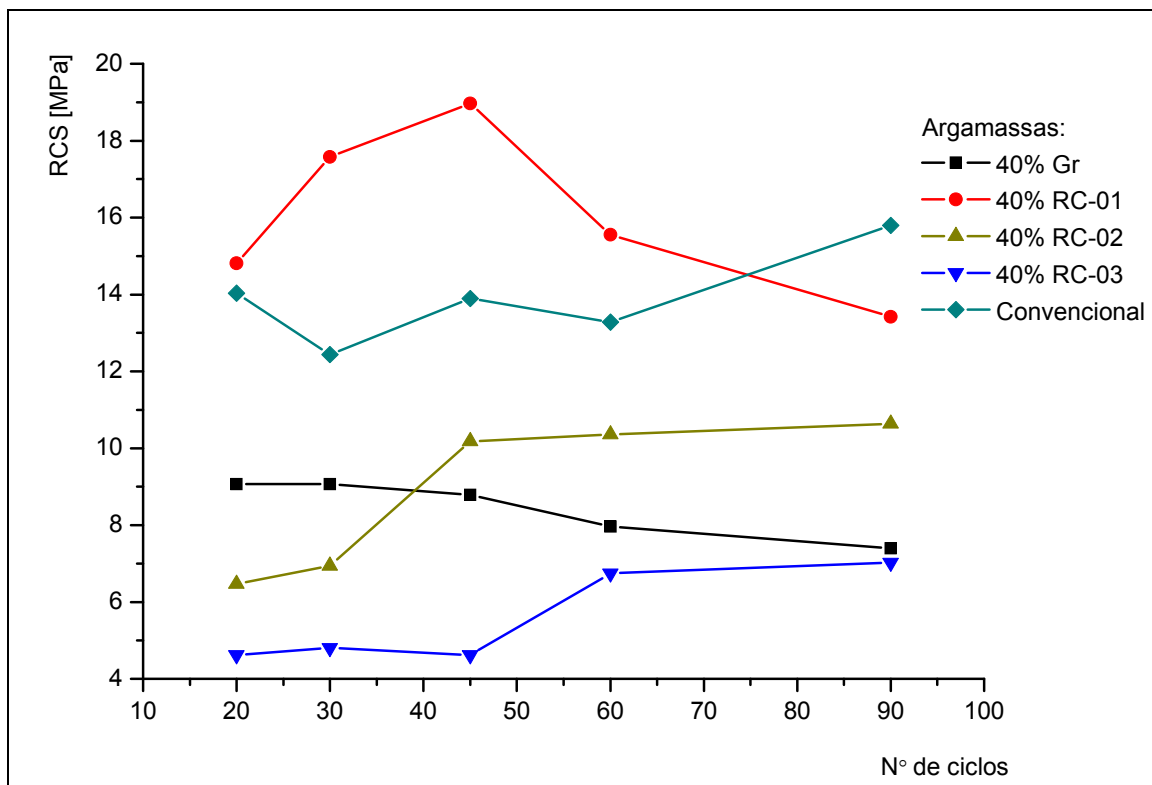


FIGURA 4.24: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencional e alternativas com 40% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C1.

Observou-se que os corpos-de-prova com 40% do resíduo de construção RC-01 apresentaram inicialmente RCS superior ao convencional. Entretanto, ao final do período de envelhecimento, esta propriedade foi reduzida em 2,38 MPa, representando cerca de 15,06%. Para os corpos-de-prova com os resíduos RC-02 e RC-03 embora tenham apresentado resultados da RCS inferiores aos obtidos com os convencionais, não ficou caracterizado redução no comportamento mecânico e a reação pozolânica não foi totalmente concluída, visto que a RCS continuou evoluindo até conclusão do período de envelhecimento em que foram avaliados.

Em relação ao resíduo Gr com este percentual de utilização, demonstrou-se que o processo de envelhecimento iniciou-se após 20 ciclos de molhagem e secagem comprometendo a durabilidade do material.

Este comportamento observado para a RCS pode ser atribuído a presença da portlandita (Figura 4.21). A portlandita favorece a aceleração da reação pozolânica, resultando na presença dos silicoaluminatos de cálcio e potássio, favorecidos pela temperatura a que foram submetidos no processo de envelhecimento acelerado, o que sugere o sistema adotado para provocar a aceleração do envelhecimento não afetou a durabilidade dos corpos-de-prova e sim contribuiu para melhora no comportamento mecânico decorrente provavelmente do favorecimento da reação pozolânica.

Na Figura 4.25 estão apresentadas as resistências a compressão dos corpos-de-prova convencional e com 50% dos resíduos de construção e de granito submetidos ao envelhecimento acelerado, tratamento C1.

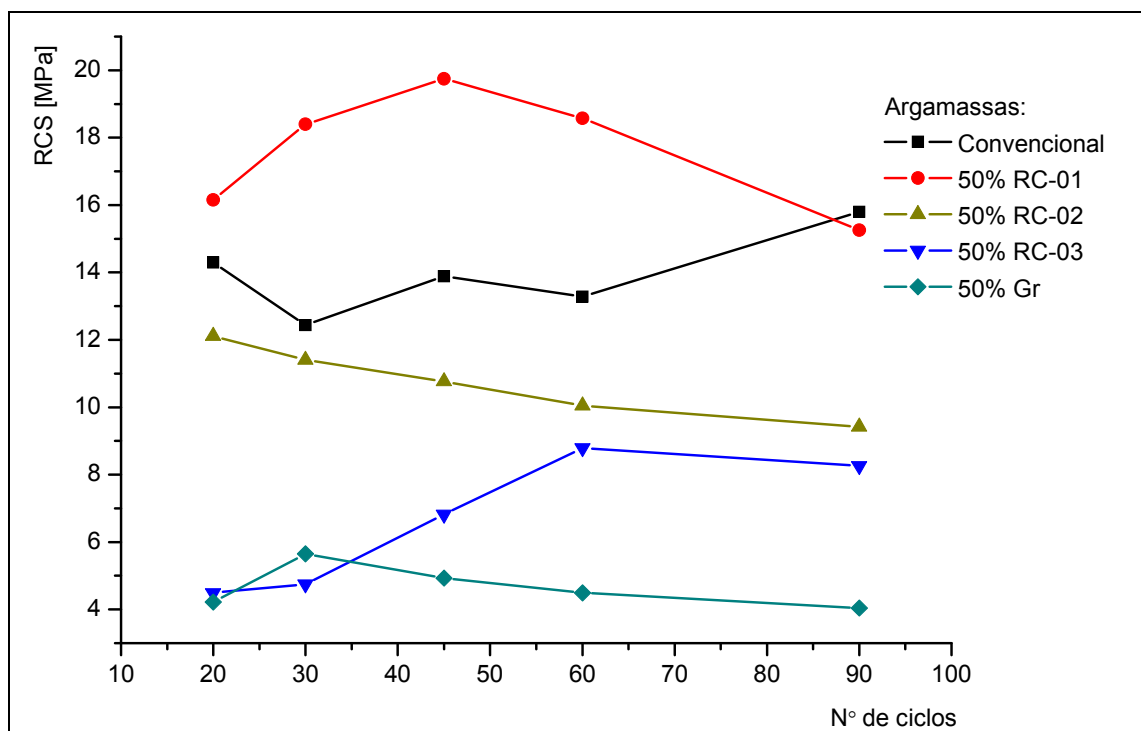


FIGURA 4.25: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencional e alternativas com 50% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C1.

Analisando-se os resultados para os corpos-de-prova com 50% do resíduo de construção RC-01, verificou-se que este apresentou inicialmente RCS superior ao convencional, mantendo esse comportamento durante praticamente todo período de avaliação. Apenas aos 90 ciclos houve uma redução na RCS de 0,54 MPa, o que

representa cerca de 3,41%. Em relação ao resíduo RC-02, observou-se que o processo de envelhecimento iniciou-se após o período de cura de 20 ciclos.

Para os corpos-de-prova com o resíduo RC-03 o envelhecimento não ocorreu visto que a RCS continuou evoluindo até final do período de avaliação. Os resultados da RCS durante todo o processo mantiveram-se inferiores aos obtidos para os convencionais sugerindo que o material não foi afetado pelo processo de envelhecimento acelerado a que foi submetido. Para o resíduo Gr o envelhecimento iniciou em 30 ciclos, quando o comportamento da RCS começa a apresentar valores inferiores ao máximo obtido de 5,69 MPa. Ao final do período de observação a redução na resistência à compressão simples foi de 1,61 MPa representando cerca de 28,29%. Em relação aos convencionais verificou-se que a RCS dos corpos-de-prova incorporados com resíduos foram inferiores.

O comportamento observado para a RCS pode ser atribuído a presença da portlandita, observado na difração de raios X (Figura 4.22), que pode ter contribuído para a aceleração da reação pozolânica, combinado com a presença dos silicoaluminatos de cálcio e potássio. Isto pode ser atribuído às condições de envelhecimento acelerado a que os corpos-de-prova foram submetidos.

Na Figura 4.26, apresenta-se uma exposição geral do comportamento da resistência a compressão dos corpos-de-prova alternativos e convencional submetidos ao envelhecimento acelerado (tratamento C1).

Analisando-se conjuntamente os resultados contidos na Figura 4.26, verifica-se que os corpos-de-prova com 40% e 50% do resíduo de construção RC-01, apresentaram menor variação no comportamento mecânico ao longo do período de avaliação, tendo demonstrado ao final dos ciclos de molhagem e secagem, resultados bem próximos aos obtidos para os convencionais. Ficou caracterizado que a presença da portlandita em todos os percentuais estudados após 90 ciclos de molhagem e secagem, observada nos difratogramas de raios X, para os corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado, (Figuras 4.20 a 4.22), em todos os percentuais de utilização dos resíduos, contribuiu para que se processasse a reação pozolânica e a formação em maior quantidade dos silicoaluminatos de cálcio e potássio, em decorrência da temperatura a que os corpos-de-prova foram submetidos no processo de secagem e, como conseqüência, alteração no comportamento da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova.



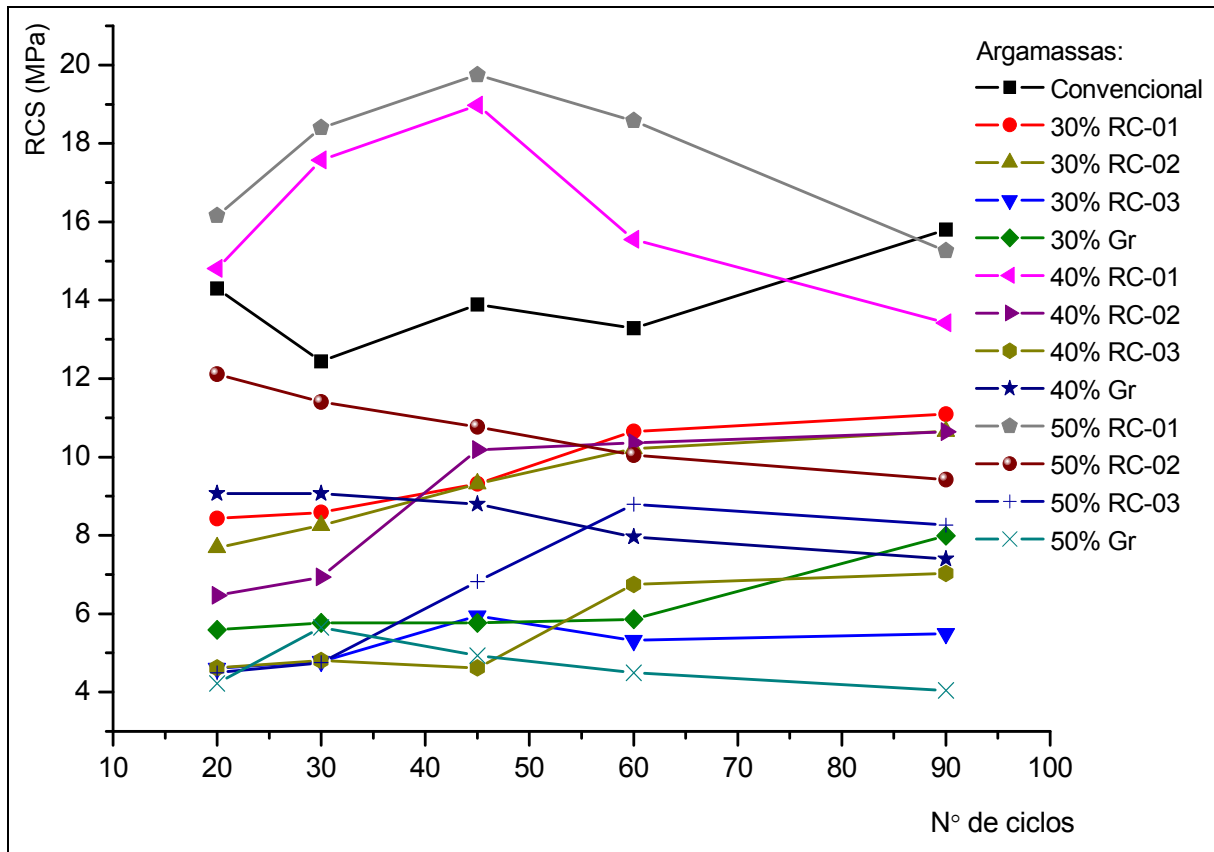


FIGURA 4.26: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencional e alternativos incorporados com resíduos, submetidos ao envelhecimento acelerado – C1.

- Estufa à Temperatura Controlada de  $45^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  - Tratamento C2

Na Figura 4.27, estão apresentadas a resistência à compressão dos corpos-de-prova convencional e alternativos com 30% de resíduos de construção e resíduo de granito, submetidos ao envelhecimento acelerado, utilizando-se a técnica de ciclo de molhagem e secagem, com estufa regulada a  $45^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Analisando os resultados verificou-se que para os corpos-de-prova incorporados com resíduos de construção, com 30% de RC-01 o envelhecimento não foi comprometido, obtendo-se um valor máximo de 11,24 MPa aos 90 ciclos, sendo o aumento da RCS da ordem de 24,19%, o que corresponde a 2,19 MPa, em relação a RCS obtida aos 20 ciclos. Para os corpos-de-prova com 30% de RC-02, o aumento da RCS atingiu o valor máximo de 20,06 MPa, aos 90 ciclos, resultando um crescimento na ordem de 63,35%, o que corresponde a 8,37 MPa, em relação a RCS obtida aos 20 ciclos de envelhecimento. Para os corpos-de-prova com 30% de RC-03, não foi afetada a durabilidade até um valor máximo de 13,76 MPa, aos 90

ciclos, resultando em um crescimento na ordem de 52,04%, o que corresponde a 4,71 MPa em relação a RCS obtida aos 20 ciclos. Para os corpos-de-prova com 30% de resíduo de granito (Gr), a RCS continuou a evoluir até um valor máximo de 9,94 MPa, aos 90 ciclos, resultando um crescimento na ordem de 27,27%, representando 2,13 MPa, em relação a RCS obtida aos 20 ciclos.

Comparando-se estes resultados com aqueles obtidos dos corpos-de-prova convencionais aos 20 e 90 ciclos, observa-se para os corpos-de-prova RC-02 uma redução de 14,39% e um crescimento de 26,96%, o que corresponde a 2,02 MPa e 4,26 MPa respectivamente. Os demais corpos-de-prova apresentaram RCS inferiores ao convencional em todas as idades, embora tenha sido caracterizado que a durabilidade do material não foi comprometida.

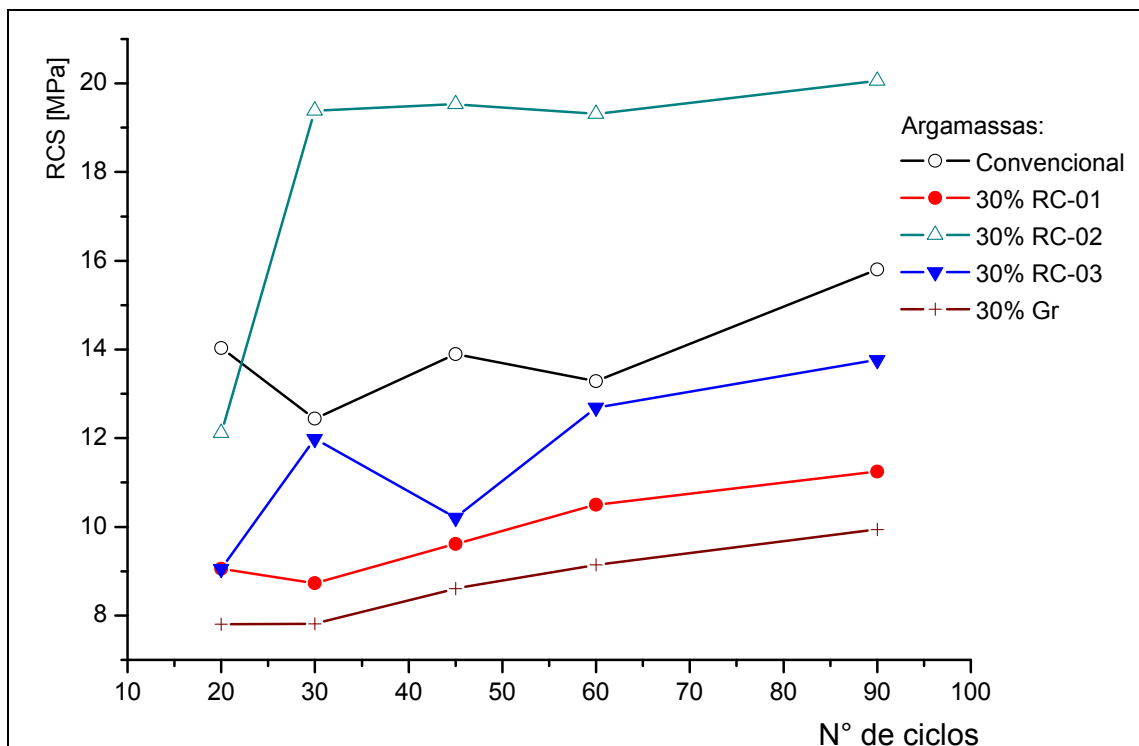


FIGURA 4.27: Resistência à compressão simples das amostras convencional e alternativas com 30% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C2.

Ficou caracterizado que a presença da portlandita e dos silicoaluminatos em todos os percentuais estudados após 90 ciclos de molhagem e secagem, observados nos difratogramas de raios X (Figura 4.20) contribuíram para aceleração da reação pozolânica em decorrência da temperatura a que os corpos-de-prova foram submetidos no processo de secagem e, como consequência, alteração na durabilidade dos corpos-de-prova.

Na Figura 4.28, estão apresentadas as resistências à compressão dos corpos-de-prova convencionais e alternativos com 40% de resíduos de construção e de granito, submetidos ao envelhecimento acelerado, utilizando-se a técnica de ciclo de molhagem e secagem, tratamento C2.

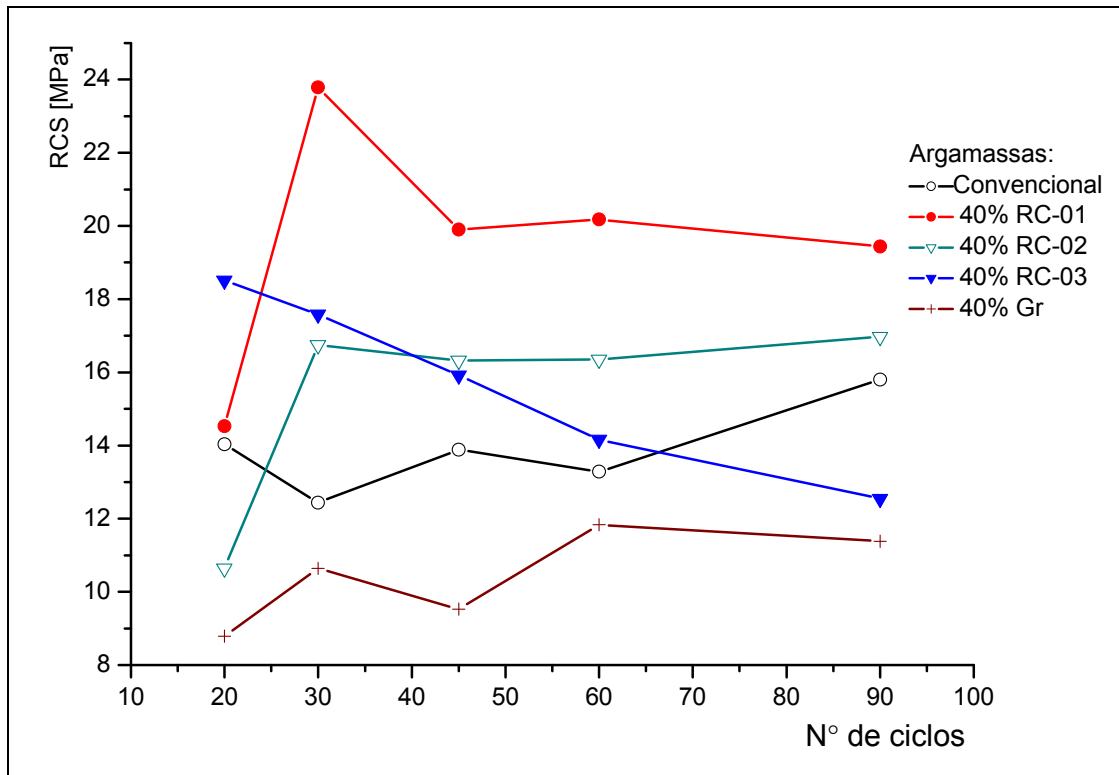


FIGURA 4.28: Resistência à compressão simples das amostras convencional e alternativas com 40% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C2.

Analisando os resultados verificou-se que para os corpos-de-prova incorporados com resíduos de construção com 40% de RC-01 a RCS aumentou, até um valor máximo de 23,78 MPa aos 30 ciclos, sendo este aumento da RCS na ordem de 63,66%, o que corresponde a 9,25 MPa, em relação a RCS obtida aos 20 ciclos. Para os corpos-de-prova com 40% de RC-02, o aumento da RCS atingiu o valor máximo de 16,97 MPa, aos 90 ciclos, resultando em um crescimento na ordem de 59,39%, o que corresponde a 6,32 MPa, em relação a RCS obtida aos 20 ciclos. Para os corpos-de-prova com 40% de RC-03, após a cura aos 20 ciclos, o comportamento da RCS começou a ser comprometida, apresentando ao final uma redução de 5,97 MPa, o que representa cerca de 32,25% em relação a RCS obtida aos 20 ciclos.

Para os corpos-de-prova com 40% de resíduo de granito (Gr), observou-se um aumento da RCS até 60 ciclos, sendo o valor máximo de 11,84 MPa. Ao final do

processo de envelhecimento apresentou uma redução na RCS de 0,48 MPa, o que corresponde a 3,88% em relação ao valor máximo observado aos 60 ciclos.

Comparando-se este resultado com aqueles obtidos dos corpos-de-prova convencionais aos 90 ciclos, observa-se para os corpos-de-prova com RC-01 e RC-02 um acréscimo de 22,97% e 7,34%, o que corresponde a 3,63 MPa e 1,16 MPa respectivamente. Os demais corpos-de-prova apresentaram a RCS inferiores ao convencional ao final do período de envelhecimento acelerado tratamento C2.

A presença da portlandita após 90 ciclos de molhagem e secagem, observado nos difratogramas de raios X para os corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado (Figuras 4.21) e um menor efeito da carbonatação, podem ter contribuído para a aceleração da reação pozolânica e para a presença dos silicoaluminatos de cálcio e potássio, em decorrência da temperatura a que os corpos-de-prova foram submetidos no processo de secagem e como consequência alteração na durabilidade dos corpos-de-prova. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Farias Filho (1999), no estudo de durabilidade argamassas com substituição de cimento por resíduo de tijolos.

Na Figura 4.29, estão apresentadas as resistências à compressão dos corpos-de-prova convencionais e alternativos com 50% de resíduos de construção e de granito, submetidos ao envelhecimento acelerado, utilizando-se a técnica do ciclo de molhagem e secagem, tratamento C2.

Analisando os resultados verificou-se que para os corpos-de-prova incorporados com resíduos de construção com 50% de RC-01, a cura não foi concluída até um valor máximo de 21,81 MPa aos 30 ciclos, sendo o aumento da RCS na ordem de 97,55%, o que corresponde a 10,77 MPa, em relação a RCS obtida aos 20 ciclos. Para os corpos-de-prova com 50% de RC-02, o aumento da RCS atingiu o valor máximo de 18,55 MPa, aos 30 ciclos, resultando em um crescimento na ordem de 63,27%, o que corresponde a 7,19 MPa, em relação a RCS obtida aos 20 ciclos. Com 50% de RC-03, após a cura aos 20 ciclos, começou-se a apresentar redução na resistência à compressão simples. Ao final do período de envelhecimento acelerado em que foram analisados verificou-se uma redução na RCS de 2,73 MPa, o que corresponde a cerca de 20,28%, em relação a obtida aos 20 ciclos.

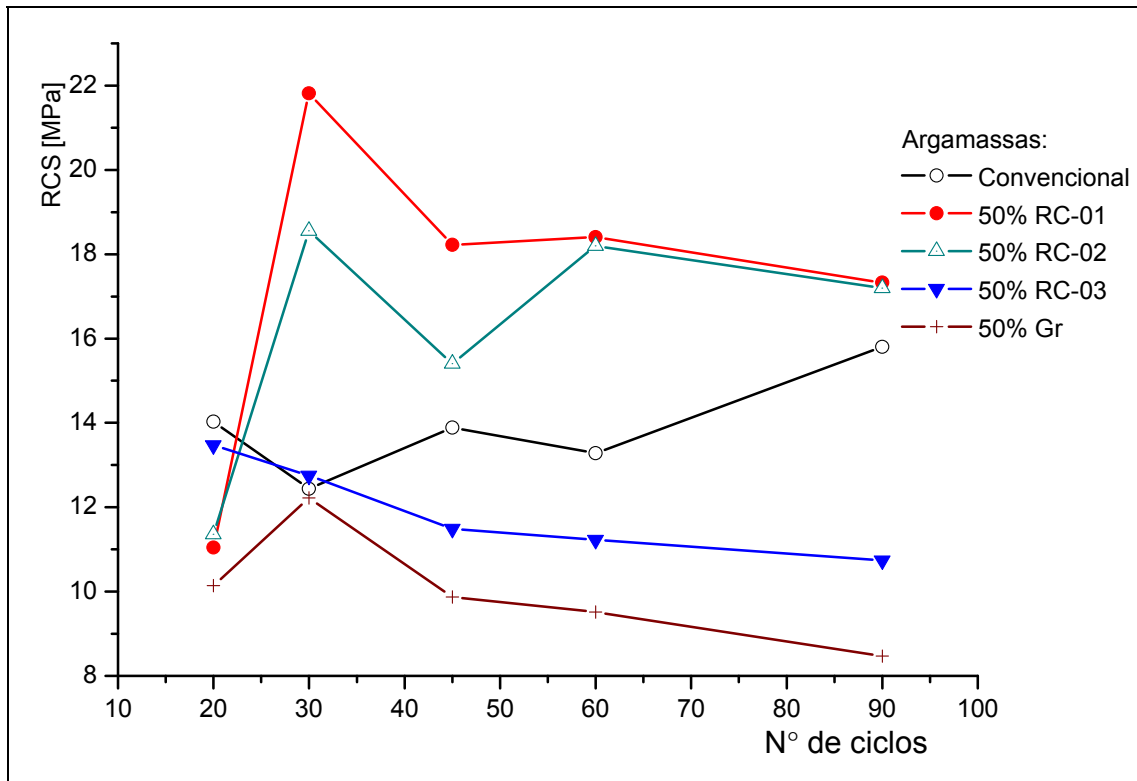


FIGURA 4.29: Resistência à compressão simples das amostras convencional e alternativas com 50% de resíduo, submetidas ao envelhecimento acelerado – C2.

Para os corpos-de-prova com 50% de resíduo de granito (Gr), verificou-se um aumento da RCS até um valor máximo de 12,22 MPa aos 30 ciclos, resultando em um crescimento na ordem de 19,88%, o que corresponde a 2,08 MPa, em relação a RCS obtida aos 20 ciclos.

Comparando-se este resultado com aqueles obtidos dos corpos-de-prova convencionais aos 20 ciclos e 90 ciclos, observou-se que os corpos-de-prova RC-01 e RC-02 apresentaram comportamento mecânico (RCS) superior em todos os ciclos analisados. Os demais corpos-de-prova apresentaram RCS inferiores ao convencional em todas as idades estudadas. Esta redução no comportamento mecânico poderá ser atribuída às condições de envelhecimento acelerado a que os corpos-de-prova foram submetidos.

Ficou caracterizado que a presença da portlandita, observada nos difratogramas de raios X para os corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado (Figuras 4.22), contribuiu para a aceleração da reação pozolânica em decorrência da temperatura a que os corpos-de-prova foram submetidos no processo de secagem e, como consequência, alteração na durabilidade dos corpos-de-prova.

Na Figura 4.30 está apresentado um esboço geral para todos os corpos-de-prova convencional e alternativos estudados, submetidos ao envelhecimento acelerado, tratamento C2.

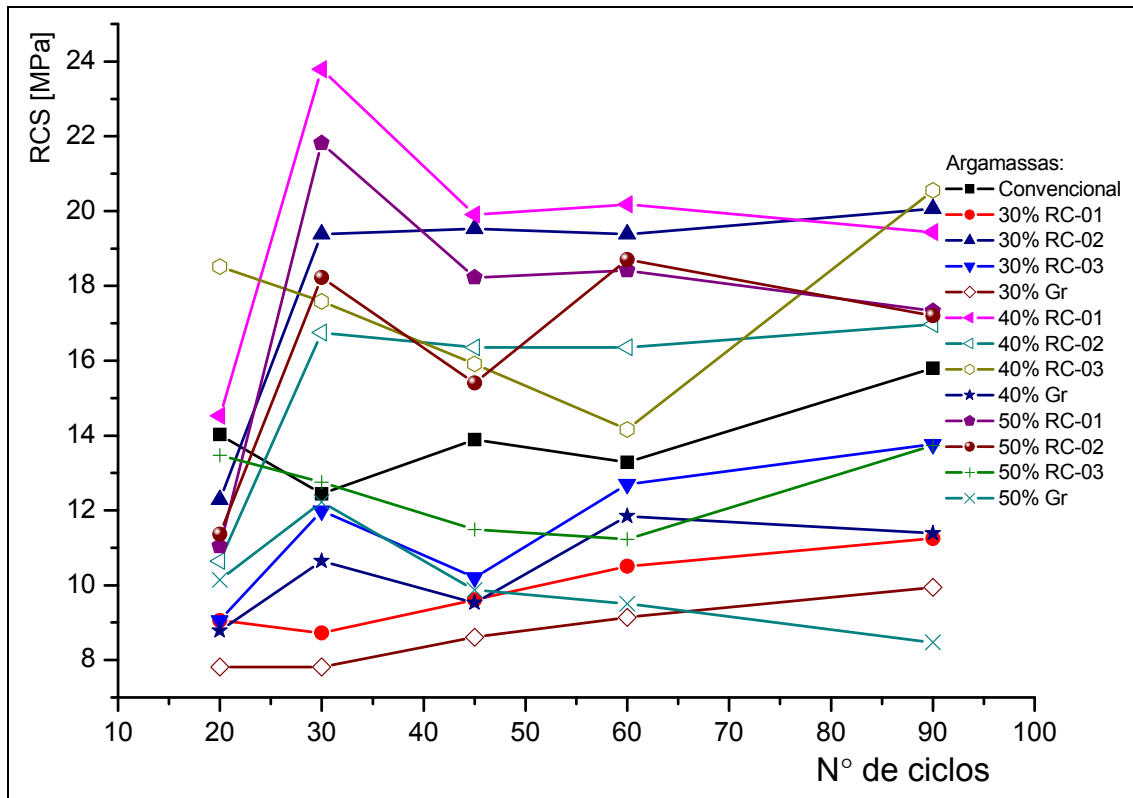


FIGURA 4.30: Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencional e alternativos, incorporados com resíduos de construção, demolição e granito, submetidos ao envelhecimento acelerado – C2.

Analisando conjuntamente os resultados da Figura 4.30, observou-se que os corpos-de-prova com 40% RC-01 e 50% de RC-02 apresentaram melhor comportamento mecânico em relação ao envelhecimento acelerado. Verificou-se que os valores da RCS da maioria dos corpos-de-prova incorporados com resíduos começaram a apresentar comprometimento na durabilidade após os 30 ciclos de molhagem e secagem. Isto pode ser atribuído a presença da portlandita e dos silicoaluminatos de cálcio e potássio observados nos difratogramas de raios X para os corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado (Figuras 4.20 a 4.22), contribuindo para aceleração da reação pozolânica em decorrência da temperatura a que os corpos-de-prova foram submetidos no processo de secagem e, como consequência, alteração na durabilidade dos corpos-de-prova.

Alterações no comportamento mecânico e na durabilidade dos materiais convencionais e alternativos, através de envelhecimento acelerado utilizando ciclos de molhagem secagem foram observados por Oliveira (2004), quando estudou o comportamento desta propriedade mecânica para blocos de vedação confeccionados com resíduos da construção civil.

Comparando-se os tratamentos utilizados para envelhecimento acelerado, C1 e C2, através da resistência à compressão simples, observou-se que os corpos-de-prova do tratamento C2 apresentaram comportamentos superiores ao tratamento C1, isto sugere que a temperatura utilizada no tratamento C1 pode ter produzido maior permeabilidade ao ar, induzido a criação de micro-fissuras nos corpos-de-prova e, conseqüentemente, pode ter afetado a durabilidade do material, visto que as demais variáveis utilizadas não foram alteradas entre os tratamentos.

Comparando-se os tratamentos utilizados para envelhecimento acelerado e envelhecimento natural, através das curvas de difração de raios X, Figuras 4.13 a 4.15 e Figuras 4.20 a 4.22, observou-se que nos corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento natural, após 180 dias de tratamento, não apresentou a portlandita como fase constituinte e apresentou a calcita com fase predominante, sugerindo que no processo de envelhecimento natural os corpos-de-prova foram afetados pela carbonatação, que impediu a conclusão da reação pozolânica.

Para os corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado, após 90 ciclos, em todos as percentagens de incorporação de resíduos utilizados, observou-se a presença da portlandita. Isto sugere que o processo de envelhecimento acelerado através da técnica do ciclo de molhagem e secagem, nas condições adotadas neste trabalho, possibilitou que a reação pozolânica tenha sido realizada, visto que o método utilizado inibiu que a ação da carbonatação tivesse maior influência sobre o comportamento mecânico, o que foi causado pela formação dos silicoaluminatos de cálcio e potássio.

Comparando-se os tratamentos utilizados para envelhecimento natural e acelerados, através da resistência à compressão simples, observou-se que os corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado, tratamento C1 e C2, apresentaram comportamentos mecânicos superiores ao envelhecimento natural. Isto confirma os resultados obtidos na difração de raios X com a formação dos silicoaluminatos de cálcio. A carbonatação pode ter sido o fator que mais contribuiu para degradação do material, visto que essa reação favorece a formação de uma

“capa” protetora nas proximidades das bordas dos corpos-de-prova impedindo a penetração do ar e, conseqüentemente, do CO<sub>2</sub>, não permitindo a continuidade do processo de carbonatação. O hidróxido de cálcio restante reagiu com os silicatos formando silicoaluminatos de cálcio e potássio em menor quantidade, quando comparada como os ciclos de molhagem e secagem onde as temperaturas mais elevadas favoreciam as reações pozolânicas, obtendo melhora na resistência à compressão simples.



## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E FÍSICA

A partir da caracterização física e mineralógica das matérias-primas convencionais e alternativas concluiu-se que:

- As cais apresentaram diâmetro médio de 4,43  $\mu\text{m}$  a 17,08  $\mu\text{m}$ ;
- o resíduo de granito apresentou diâmetro médio de 11,30  $\mu\text{m}$  ;
- as cais utilizadas apresentaram teores de óxido de cálcio superiores a 65,00%, sendo classificadas como cais calcíticas segundo ABNT NBR 7181(1984);
- os resíduos apresentaram teores de óxido de silício, alumínio e ferro, superiores ao valor mínimo de 70% exigidos pela ASTM (1998) para que um material seja considerado com atividade pozolânica;
- a difração de raios X das cais mostraram as seguintes fases: hidróxido de cálcio, calcita e pequenas quantidades de hidróxido e carbonato de magnésio; e
- a difração de raios X do resíduo Gr apresentou as seguintes fases: quartzo, feldspato potássico, feldspato sódico e, em menor quantidade, mica moscovita. Para os resíduos de construção foram observadas as seguintes fases: quartzo, feldspato e calcita.

### 5.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA

- As argamassas incorporadas RC-01 e RC-02 com teores de 35% e 50% de resíduos construções atenderam as especificações;
- em relação ao resíduo de granito demonstraram baixa atividade pozolânica.

### 5.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS AO ENVELHECIMENTO NATURAL E ACELERADO

- A difração de raios X dos corpos de provas apresentam as fases: quartzo, portlandita, calcita e, em menor quantidade, silicoaluminato e mica moscovita. Aos 28 dias de cura, destaca-se a presença a portlandita; com o processo de envelhecimento natural, há uma diminuição da portlandita, surgindo a calcita e reação de carbonatação das argamassas.

- Para os corpos-de-provas submetidos ao envelhecimento natural pode-se observar através da difração de raios X as seguintes fases: quartzo, portlandita, calcita e, em menor quantidade, silicoaluminato de cálcio e potássio. Nos corpos-de-prova com 28 dias de cura, destaca-se a presença da portlandita. Após 180 dias de envelhecimento, há um consumo da portlandita, surgindo a calcita e indícios de carbonatação das argamassas; e
- Os corpos de provas submetidos ao envelhecimento acelerado, após 90 ciclos de molhagem e secagem, pode-se concluir através da difração de raios X as seguintes fases: quartzo, portlandita, calcita e, em maior quantidade, silicoaluminato de cálcio e potássio.

#### 5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS AO ENVELHECIMENTO NATURAL

- Os valores de RCS começaram a diminuir após 60 dias de envelhecimento natural para a maioria dos corpos de prova incorporados com resíduos de construção e granito;
- a carbonatação das argamassas contribuiu diretamente para alteração no comportamento mecânico dos corpos-de-prova;
- os corpos-de-prova com 50% de RC-02 e 30% RC-01 apresentaram melhor comportamento mecânico em relação ao tempo de envelhecimento; e
- em relação as normas da ABNT todas as argamassas estudadas apresentaram resultados dentro das especificações para uso em construção civil.

#### 5.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS AO ENVELHECIMENTO ACELERADO

- O processo de envelhecimento acelerado através da técnica de ciclos de molhagem e secagem favoreceu a reação pozolânica;
- o método de secagem e molhagem reduziu a ação da carbonatação;
- o hidróxido de cálcio reagiu com os silicatos formando os neosilicoaluminatos de cálcio e potássio, que podem ter contribuído para melhora no comportamento mecânico;

- o processo de envelhecimento acelerado não afetou a durabilidade dos materiais;
- os corpos de prova com 40% RC-01 e 50% de RC-02 apresentaram melhores comportamentos mecânicos em relação ao envelhecimento acelerado;
- os corpos de prova do tratamento C2 apresentaram comportamento superiores ao tratamento C1;
- os corpos de prova submetidos ao envelhecimento acelerado apresentaram comportamentos mecânicos superiores ao envelhecimento natural.

Os resultados obtidos, neste trabalho, mostraram a importância do estudo dos resíduos de construção e de serragem de granito. Ficou evidenciado a importância do conhecimento do comportamento físico, mineralógico e mecânico dos produtos alternativos, como fundamento tecnológico, que contribuam para a formação de banco de dados técnico quanto à forma de uso, condições, quantidade e qualidade dos materiais produzidos com reciclagem dos resíduos, além da contribuição à conservação das reservas naturais e preservação do meio ambiente.

Os trabalhos desenvolvidos evidenciaram um processo de envelhecimento, principalmente, nos corpos-de-prova expostos ao meio ambiente, enquanto que os corpos-de-prova envelhecidos artificialmente em laboratório apresentaram uma melhor resistência ao processo de envelhecimento através do processo de secagem e molhagem.

Esta discrepância deve-se aos mecanismos de reação ocorridos nos dois casos, em que o envelhecimento natural ao meio ambiente não favoreceu as reações pozolânicas e sim as reações de carbonatação, enquanto que no caso dos corpos-de-prova submetidos aos processos artificiais de envelhecimento tiveram favorecidas as reações pozolânicas justificando os comportamentos observados. Estas discrepâncias confirmam a grande dificuldade de análise dos processos de envelhecimento, constituindo-se, na atualidade, como um dos mais sérios problemas no campo da engenharia quando do estudo da durabilidade de materiais.

## **6 POSSÍVEIS LINHAS DE PESQUISAS**

A partir deste trabalho propõe-se como futuras linhas de pesquisas:

- avaliar a durabilidade dos materiais alternativos através de câmara climatizada em diversas temperaturas e umidade relativa;
- verificar a atividade pozolânica e durabilidade do resíduo de granito após queima nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C;
- avaliar o efeito da penetração da carbonatação na durabilidade das argamassas alternativas incorporadas com esses resíduos;
- avaliar o envelhecimento acelerado com maior número de ciclo e variação na duração do ciclo; e
- avaliar o efeito da carbonatação e da atividade pozolânica das argamassas alternativas através da difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura.

## REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10004. Resíduos Sólidos – Classificação. 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduo. 2004

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10006 – Solubilização de resíduos, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10007 - Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 13279 Determinação da Resistência a Compressão. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 13281 – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 1985.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5751 - Materiais Pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica, 1992.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7215 - Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão, 1991.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6474. Determinação de Massa Específica Real. Rio de Janeiro, 1984

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. - NBR 7181 – Análise granulométricas de solo/método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984

AJDUKIEWICZ, B .A.; KLISZCZEWICZ, T. A. Properties of structural concrete with rubble aggregate from demolition of RC/PC structures. In: CONCRETE IN THE SERVICE OF MANKIND - INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION, Dundee- Escócia junho 1996. Proceedings Ravindra & Thomas Grã Bretanha. 115 a 120 p.

AMORIM, L. V. Influência da Área Específica na Reatividade do Sistema Pozolana-Cal, visando a Obtenção de Aglomerantes Alternativos. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. 1999. 135p.

AMORIM, L. V; PEREIRA, A. S. G; NEVES, G. A; FERREIRA, H. C. Reciclagem de rejeitos da construção civil para uso em argamassas de baixo custo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 1999. v.3,n.2, 222-228 p.

ÂNGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 2005. 167p.

ÂNGULO, S. C. Variabilidade de agregados graúdos de construção e demolição reciclados. 2000. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 2000. 155p.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M., Variabilidade dos Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados. E-Mat – Revista de Ciências e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Maio 2004. Vol 1, n.1, 22-32 p.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M. Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição. Câmara Ambiental da Construção. São Paulo, 2002a. 15p.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. IX Encontro Nacional de Tecnologia dos Ambientes Construídos – ENTAC. 2002b, Foz do Iguaçu, PR – Brasil. 1613-1624p.

ARAÚJO, E.A., NEVES, G.A. E FERREIRA, H.C., Aproveitamento dos Resíduos da Construção Civil para Uso como Aglomerantes Pozolânicos em Argamassas. Anais do 42º Congresso Brasileiro de cerâmica, Poços de Caldas, MG, 1998.

ASTM, American Society for Testing and Materials Standard Specification for coal fly ash and raw of calcined natural pozzolans for use as mineral admixtures in concrete, C-618.1998.

B.C.S.J. BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN. Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste. 1977.

BARONIO, G. E; BINDA, L. Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. Construction and Building Materials, 1997. Vol. 11, No. 1, 41-46p.

BARRA, J. Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado em su aplicación com Hormigón Armado. Barcelona. Tese (Doutorado). Escola Técnica Superior d'Engenyers de Camins, Canals i Ports, Universidade Politècnica de Catalunya. 1996. 223p

BARRETO-NETO, A. A. In: V SEMINÁRIO INTERESTADUAL EM DEFESA DO SANEAMENTO AMBIENTAL. SISAMA. [www.creaes.org.br/docs/V SISAMA/Estudocaso](http://www.creaes.org.br/docs/V SISAMA/Estudocaso) Acessado em mar. de 2007.

BARROTE, L. G. Utilização de rejeitos (cacos) de mármore em massas cerâmicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 44. São Pedro, SP. Anais. Associação Brasileira de Cerâmica. S. Pedro, 2000. 2201-2211p.

BRITO FILHO, J. A. Cidade versos entulho. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2. São Paulo, Anais. São Paulo, IBRACON, 1999. 56-67 p.

BROWN, V. M.; MATOS, G. R.; SULLIVAN, D. Materials and Energy Flows in the Earth Science Century. A Summary or a Workshop Help by the USGS in November 1998. US Geological Survey, 1999.

CAIADO, M. C. C.; MENDONÇA, A. S. F. Impactos de atividades de exploração de mármore e granito sobre a qualidade da água hidrográfica, coletada de trabalhos de Espírito Santo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18. 1995. Salvador, BA. Anais, Salvador, ANTAC, 54-59p.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÉLLO, F. S. S.; DA SILVA, A. C.; MATTOS, F. V. Aproveitamento de Resíduos de Corte de Grantio para a Produção de Argamassas de Assentamento. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. Salvador, BA. Abril, 1997. 65p.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÉLLO, F. S. S.; SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Aproveitamento de resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II., 1997., Salvador BA. Anais. Salvador, ANTAC, 1997. 40-49p.

CAMARGO, A. Reciclagem: minas de entulho. Técnica. São Paulo, Pini. N.15, p.15-18, mar/abr, 1995.

CAMPOS, J. O.; BRAGA, R.; CARVALHO, P. F. Manejo de Resíduos: pressuposto para a gestão ambiental. Rio Claro: LPM/UNESP, 2002. p. 99-110 / ISBN 85-89154-02-5)

CARA, S., CARCANGIU, G., MASSIDDA, L., MELONI, P., SANNA, U., TAMANINI, M., Assessment of pozzolanic potential in lime–water systems of raw and calcined kaolinic clays from the Donnigazza Mine (Sardinia–Italy). Technical Note. Applied Clay Science. 2006.

CINCOTTO, M. A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil, Tecnologia de Edificações, São Paulo, 1983. 71-78 p.

COLLINS, R. Use of recycled materials as aggregates in the construction industry. V.2. Bruxelas. ETN Recycling in construction, Marco-setembro 2000.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Diretrizes e procedimentos para gestão dos resíduos da construção. Brasília: MMA/CONAMA. 2002.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução CONAMA 307, de 05 de julho de 2002. <http://conama.org.br> acessado em set. 2006

D'AGOSTINO, L. Z. SOARES, L. O Uso De Finos De Pedreira De Rocha Granítico-Gnáissica Em Substituição Às Areias Naturais Na Elaboração De Argamassa. São Paulo, UNESP, Geociências. 2003, v. 22, n. 1, 65-73p,

DIAS, G. F. Fundamentos de educação ambiental. 2. ed. Brasília: Editora Universal, 2004. 110 p. ISBN 8586591653

DING, J.; FU, Y.; BEAUDOIN., J. J. Effect of Different Inorganic Salts / Alkali on Conversion-Prevention in High Alumina Cement Products. Elsevier Science Inc. Feb. 1996. 43-47p.

EC (EUROPEAN COMMISSION). Management of construction and demolition waste. Working document 1. DG ENV E.3. 2000. <<http://europa.eu.int/comm/enterprise/environment/indexhome/wastemanagement/constrdemwaste000404.pdf>. Acessado em set. 2002.

ELWAN, M. M.; HASSAN, M. S. Recycling or some Egyptian industrial solid waste in clay bricks. Industrial Ceramics, 1998. v. 18, n.1. 1-6p.

ERDOGAN, T. Y. Admixture for Concrete, Middle East Technical Univ. Press. Ankara. Turkey, 1997.

FARIAS FILHO, J., Efeito da adição metacaulinita e tijolo moído queimado na durabilidade de compósitos argamassa-fibra de sisal. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba – Campus II. Campina Grande. 1999. 109p.

FARIAS FILHO, J., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C., NASCIMENTO, J. W. B., LOPES LUCENA, L. F. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY, ENVIRONMENT AND DISASTER (INCEED 2005), Evaluation of Pozzolanic Activity In Mortars By Using Granite Residues. July, 2005. Charlotte, NC, USA.

FEITOSA, A. O. Utilização do Resíduo de Serragem de Granito para Uso em Blocos de Concreto sem Função Estrutural. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba – Campus II. Campina Grande. 2004. 92p.



FILHOS, C. D.; RODRIGUES, E. P. Quadro setorial brasileiro das rochas ornamentais e de revestimento de mármore e granitos. Rochas de Qualidade. 1999. v.27. nº 147. 86-90p.

FREIRE, A. S.; MOTTA, J. F. Potencialidades para aproveitamento econômico de rejeito de serragem de granito. Rochas de Qualidade. 1995. V. 16, n. 123. 98-108p.

FREIRE, L.; BRITO, J. Custos e benefícios da demolição seletiva. In: CONSTRUÇÃO 2001. Lisboa. Anais. Portugal: Instituto Superior Técnico, 2001. 863-870p.

GALIVAN, R. M.; BERNOLD, L. E. Source evaluation of Solid Waste in Building Construction Journal of Construction Engineering and Management, 1994. n. 120, 536-552p.

HAMADA, M. Neutralization of concrete and corrosion of reinforcing steel, In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CHEMISTRY OF CEMENT. 5 Proceedings 1969 II-3, 343-382p.

HAMASSAKI, L. T, SBRIGHI NETO, C., FLORINDO, M. Uso do entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: Seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo: PCC – USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1996. 109-117p.

HAMASSAKI, L. T.; NETO, C. S.; FLORINDO, M. C. Utilization of construction waste in rendering mortar. In: CONCRETE IN THE SERVICE OF MANKIND. INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION. Dundee – Grã-Bretanha. Ravindra & Thomas. 1996. 20-115p.

HANSEN T. C. RILEM Report 6 Recycling of Demolished Concrete and Masonry, London, E&FN SPON an imprint of Chapman & Hall, 1992. 305p.

HAYASHI, A. M. Windows or change – Can Skyscrapers withstand stronger hurricanes Scientific American. Jan 2000. 25-26p.

HENAO. A. M. H. & LÓPEZ, E. A. A., Evaluación experimental del mortero de pega elaborado com agregado reciclado. E-Mat – Revista de Ciências e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Maio 2004. Vol 1, n.1, 33-46 p.

HENDRIKS, C. F. The building cycle. Holanda: Aeneas, 2000. 231p.

HOBBS, G.; HURLEY, J. Deconstruction and reuse of construction materials. In: CHINI, A.R. DECONSTRUCTION AND MATERIAL REUSE: TECHNOLOGY, ECONOMY AND POLICY. Florida. 2003. 227-234p.

IEA (International Energy Agency. Statement on climate change. Bonn, 1999. 29p.

JALALI, R. M. F. S. Avaliação dos Ensaios Correntes para a Medição da Durabilidade do Betão. Engenharia Civil - UM N° 12, 2001. 41-54p.

JOHN, V, M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção – Projeto entulho bom. Salvador, EDUFBA, 2001. 28-45p.

JOHN, V. M. Pesquisa e Desenvolvimento de merco para resíduos. In: SEMINARIO SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO. Anais. São Paulo. PUC-USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. 1996. 161p.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. Cement and Concrete Research 33. 2003. 703-711p

LAPPIATTI, B. B. Building for Environmental and Economic Sustainability. I Manual na User Guide. Gainthersburg. NIST 1998.

LAURITZEN, K. E. RILEM Bulletin – International RILEM symposium on demolition and reuse of concrete and masonry. Materials and Structures. 1994. n.27.,307 p.

LE SAOUT, G.; LÉCOLIER, E.; RIVEREAU, A.; ZANNI, H. Chemical structure of cement aged at normal and elevated temperatures and pressures. Part I. Class G oilwell cement. Cement and Concrete Research 36. 2006. 71-78p

LEITE, M. B., MOLIN, D. D.. Avaliação da Atividade Pozolânica do Material Cerâmico Presente no Agregado Reciclado de Resíduo de C&D. Sitientibus, Feirde Santana, n. 26. jan./jun./2002. 111-130p.

LEVY, S. M. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tese (Doutorado). 2001. 194p.

LEVY, S. M. Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização como agregados para argamassas e concretos. São Paulo, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1997. 147p.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Propriedades mecânicas de argamassas produzidas com entulho de construção civil. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologias das Argamassas, 1., Goiânia, 1995. Anais. Goiânia, UFG, 1995. 315-325p.

LIMA, J. A. R. Proposição de Diretrizes para Produção e Normalização de Resíduo de Construção Reciclado e suas Aplicações em Argamassas e Concretos. São Paulo, 1999. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. 240p.

LUCENA, L. F. L. NEVES, G. A. NASCIMENTO, J. W. B. OLIVEIRA, D. F. Diagnóstico da Geração de Resíduos da Construção Civil no Município de Campina Grande. In: IV SIBRAGEC – SIMPOSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA EM CONSTRUÇÃO / I ELAGEC – ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO. Porto Alegre – Brasil. 2005

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MENEZES R. R., FERREIRA, H. S., NEVES, G. A., LIRA, H. L., FERREIRA, H. C. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles Journal of the European Ceramic Society 25 (2005) 1149–1158p.

MONTEIRO, S. N., PEÇANHA, L. A. VIEIRA, C. M. F., Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations. J. Eur. Ceram. Soc., in press. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), Novembro, 2004.

MOTA, N. M. B., Cais pozolânicas para uso em argamassas de revestimentos e alvenarias. Dissertação de (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. 1994. 145p.

MOTHÉ FILHO, H. F.; POLIVANOV, H.; MOTHÉR, C. G. Propriedades Térmica e Mecânica do cerâmico obtido com rejeito da indústria do granito e do mármore. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45. 2001, Florianópolis, SC. Anais. Associação Brasileira de Cerâmica, Florianópolis, 2001, 6401-6412p.

MÜLLER, A.; LINSZ, E. Processing of concrete with high performance sonic impulses. In: INTERNACIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004. v.1. 123-132p.

NEVES, G. A, PATRÍCIO, S. R.; FERREIRA, H. C. Obtenção de Argamassas Industriais a Partir de Entulhos da Construção Civil. Interação, Campina Grande, n.1, , maio. 2000. 9-13 p.

NEVES, G. A. Reciclagem de resíduos da serragem de granito para uso como matéria-prima cerâmica. Tese (Doutorado) –Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande. 2002. 242p.

NEVES, G. A.; FERREIRA H. C.; SILVA, M. C. Aproveitamento de resíduos da serragem de granito para confecção de tijolos e telhas cerâmicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45. 2001. Florianópolis-SC. Anais. Associação Brasileira de Cerâmica. 2701-2713p.

NEVES, G. A.; FERREIRA H. C.; SILVA, M. C. Utilização de resíduos da serragem de granito para confecção de tijolos cerâmicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 43. 1999. Florianópolis-SC. Anais. Associação Brasileira de Cerâmica, Florianópolis.

NEVES, G. A.; PATRÍCO S. M. R.; FERREIRA H. C. Utilização de resíduos da serragem de granito para confecção de tijolos cerâmicos. *Interação*, 2000..v.1, p.3,

NIK, D. O. Recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composite*. n. 27. 2005. 315-318p.

NISCHER, P; Influence of concrete quality and environment on carbonation. In: RILEM SEMINAR, Hanover Proceedings 1984. 231-238p.

NITES (Núcleo Regional de informação Tecnológica do Espírito Santo), Estudo Geológico sobre mármore e granitos. *Rochas de Qualidades*. 1994.. V.24, n 110. 78-81p.

NOBREGA, A. R. SÁ. Contribuição ao diagnóstico da geração de entulho da construção civil no município de Campina Grande, PB. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande. Dissertação (Mestrado). 2002. 96p.

NURAN AY, J. Ü. The use of waste ceramic tile in cement production. *Technical . Cement and Concrete Research*. 2000. 497-499p

OLIVEIRA, D. F. Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Blocos de Concreto Produzidos com a Utilização de Entulho da Construção Civil. Tese (Doutorado) Engenharia de Processos. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2004. 218p.

OLIVEIRA, M. P.; NOBREGA, A. F.; CAMPOS, M. S. BARBOSA, N. P. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: CONFERENCIA BRASILEIRA DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO CONVENCIONAIS: HABITAÇÕES E INFRA-ESTRUTURA DE INTERESSE SOCIAL BRASIL-NOCMAT 2004. Pirassununga, SP. Brasil. Novembro de 2004. 377-386p.

ONU Agenda 21. Disponível na THE FLETCHER SCHOOL Library Resources-Multilateral Projects. 1992.

OWSAIK, Z. Alkali-aggregate reaction in concrete containing high-alkali cement and granite aggregate. *Science@Direct. Cement and Concrete Research*. 2004. 07-11p.

PERA, J. State of the art report – use of waste materials in construction in western Europe. In: SEMINÁRIO SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. Anais São Paulo: PCC – USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1996. 161p.

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de Cimento Portland*, Editora Globo, Rio de Janeiro, 1993.

PINTO, P. T. Resultados da gestão diferenciada. *Téchne*, São Paulo, n.5, ,nov.dez, 1997. 31-34p.

PINTO, T. P. Bacias de Captação de Resíduos Sólidos –Instrumento Para Uma Gestão Sustentável Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana, In: III SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL junho 2000, São Paulo SP ANAIS, São Paulo, junho 2000 PCC/USP, IBRACON. 25-34p.

PINTO, T. P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção civil urbana. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 189p.

REINHARDT, H. STEGMAIER, M. Influence of heat curing on the por structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC). Article in press.. Scence@Direct. Cement and Concrete Research. 2005. CEMCON-03348. 7p.

RESCHKEA, J. S.; CECCATTOA, D. M.; MASUEROA, A. B.; MORAES. B. C. A. M.; VILELAC. A. C. F. Avaliação da utilização de escória granulada de fundição como substituição de parte do cimento em concreto. E-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil, Maio 2005. Vol. 2, n. 1, 78-91p.

RILEM RECOMMENDATION. Specification for concrete with recycled aggregates. Materials and Structures. 1994. n.27, 557-559p.

SANTOS, P. S. Ciência e tecnologia de argila. 3.ed.São Paulo, Edgar Blucher LTDA, v.2,1992

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. F. Recycling of mansoru rubble. In: Hhansen, T. C. Recycling of demolished concrete and mansory. London. Chapman e Hall, 1992. Part Two, (RILEM TC Report t). 161-255p.

SENSALE, G. R., Strength development of concrete with rice-husk ash. Cement & Concrete Composites. 2006. 158–160p.

SIDERIS. K. K.; SAVVA,A. E.; PAPAYIANNI, J. Sulfate resistance and carbonation of plain and blended cements. Cement & Concrete Composites. 2006. 47–56p.

SILVA, A. C. Estudo da Durabilidade de Compósitos Reforçados com Fibra de Celulose. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2002. 128p

SILVA, S. A. Caracterização do resíduo de serragem de blocos de granitos. Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de solo-cimento. Vitória, ES. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. 1998.

SINDICATO DA INDUSTRIA DA CONSTRUÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDUSCON-SP). Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SINDUSCON-SP. PINTO, T.P. et. Al. São Paulo: Obra Limpa/I&T/SINDUSCON-SP, 2005. 48p.

SOUZA, P. S. L., DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). Engenharia Civil • UM, Número 15, 2002. 45-65p.

SYMONDS. Construction and demolition waste management practices and their economic impact. 1999. Disponível em: <http://europe.eu.int/comm/environment> . Acessado em: Acesso: Set. de 2002.

ULSEN, C. et al. Applied Mineralogy characterization of construction and demolicion waste from Brazilian recycling plants. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 8, 2004, Águas de Lindóia. Proceedings. São Paulo: ICAM, 2004. 63-66p.

UNEP (United Nations Environment Program) Outlook 2000. Overview GEO 2000. Nairobi, 20p.

VICENZI, J.; BERGMANN, C. P. Aproveitamento de um resíduo industrial em uma massa cerâmica para piso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. 43. 1999. Florianópolis-SC. Anais. Florianópolis, Associação Brasileira de Cerâmica, 1999.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C.; LIMA, F. B. Resistência e Durabilidade de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição. Engenharia Civil, UM. Nº 19. 2004. 18p.

WANG, K.; HSIEH, H. Pozzolanic reactions in municipal solid waste incinerator fly-ash-slag-blended cements. Cement and Concrete Research. 2004, Article in Press. CEMCON-03113, 5p.

ZAMPIERI, V.A. "Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas". Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo. 1989. 191p.

ZORDAN, S. E., A UTILIZAÇÃO DO ENTULHO COMO AGREGADO, NA CONFECÇÃO DO CONCRETO. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, SP, 1997. Engenharia Civil, na área de Saneamento Campinas, SP. 1997

## **ANEXOS**

### **DADOS METEOROLÓGICOS**

Dados Meteorológicos da Estação Climatológica Principal – Ano 2006

Estação: Campina Grande – Paraíba

Altitude: 547,56 m

Latitude: 07°13 S

Longitude: 35°53 W

TABELA 4.5: Dados meteorológicos do município de Campina Grande relativos ao ano 2006

	T E M P E R A T U R A   D O   A R (°C)								P R E C I P I T A Ç Ã O						
	Pressão Atmosférica	Média das Máximas	Média das Mínimas	Máxima Absoluta	Data	Mínima absoluta	Data	Média Compensada	Umidade Relativa	Altura Total	Max. em 24 horas	Data	Evaporação Total	Insolação Hs e Dec.	Velocidade Vento
MESES	(mb)	°C	°C	°C		°C		°C	%	mm	mm		ml		m/s
Janeiro	951,0	31,3	20,5	32,5	30	19,2	08	24,7	69	1,0	0,6	01	142,8	187,3	4,4
Fevereiro	951,0	31,6	21,3	33,5	14	20,1	23	25,3	74	14,9	7,3	18	171,8	216,2	3,7
Março	951,4	30,8	21,7	33,2	11	20,9	21	25,1	78	95,5	29,4	21	156,1	237,4	3,6
Abril	950,6	29,0	21,4	30,9	02	19,6	17	24,4	80	142,7	38,9	15	108,2	210,9	3,2
Maiο	953,0	28,0	20,6	30,2	07	18,5	20	23,6	81	115,5	18,8	24	100,2	177,9	3,1
Junho	954,2	26,1	19,5	27,9	08	18,1	11	22,1	83	173,5	52,7	12	80,8	139,8	3,1
Julho	955,1	26,0	18,7	28,2	30	16,6	19	21,6	81	66,8	15,6	26	83,2	175,3	3,2
Agosto	954,6	26,8	18,7	29,7	30	16,8	03	21,9	77	62,4	19,1	10	136,2	222,1	3,7
Setembro	954,3	28,9	19,5	31,0	24	17,8	13	23,0	71	12,4	4,9	17	162,2	258,2	4,2
Outubro	952,2	30,9	20,5	33,5	21	19,3	04	24,1	69	5,9	2,6	25	216,7	296,4	4,2
Novembro	951,1	30,7	20,7	32,3	09	19,5	04	24,3	71	40,4	24,7	18	201,3	281,6	4,4
Dezembro	952,1	31,4	21,3	32,7	11	20,1	01	24,9	69	4,2	1,9	20	151,4	190,3	4,0
Total	11430,6	351,5	244,4	375,6		226,5		285,0	903	735,2	216,5		1710,9	2593,4	44,8
Média	952,6	29,3	20,4	33,5		16,6		23,8	75	61,3	52,7-12/06		142,6	216,1	3,7

Fonte: EMBRAPA - ALGODÃO