



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA SERRAGEM DE GRANITOS
NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS SÍLICA-CAL PARA USO EM
CONSTRUÇÃO CIVIL

EUZÉBIO SOARES DE ARAÚJO

CAMPINA GRANDE

MARÇO-2002



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
ÁREA DE GEOTECNIA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II – CAMPINA GRANDE

**UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA SERRAGEM DE GRANITOS
NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS SÍLICA – CAL PARA USO EM
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Euzébio Soares de Araújo

Campina Grande – Paraíba
Marco - 2002

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE GEOTECNIA**

**UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA SERRAGEM DE GRANITOS
NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS SÍLICA – CAL PARA USO EM
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Euzébio Soares de Araújo

Dissertação de Mestrado

**Campina Grande – Paraíba
Março – 2002**

Euzébio Soares de Araújo

**UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA SERRAGEM DE GRANITOS
NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS SÍLICA – CAL PARA USO EM
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba - CAMPUS II - Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**.

Área de Concentração: **Geotecnia**

Professor Orientador: **Dr. Heber Carlos Ferreira**

Campina Grande – Paraíba
Março – 2002

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca – UFPB/Campus II

A658
2002

Araújo, Euzébio Soares de

Utilização dos resíduos da serragem de granitos na produção de tijolos sílica-cal para uso na construção civil/Euzébio Soares de Araújo – Campina Grande: UFPB, 2002.

108p.:il.

Dissertação (Mestrado). DEC/ UFPB
Inclui bibliografia

1. Granito na construção – utilização de resíduos
2. Tijolos sílica – cal.

CDU: 691.212.0028

DIGITALIZAÇÃO:

SISTEMOTECA - UFCG

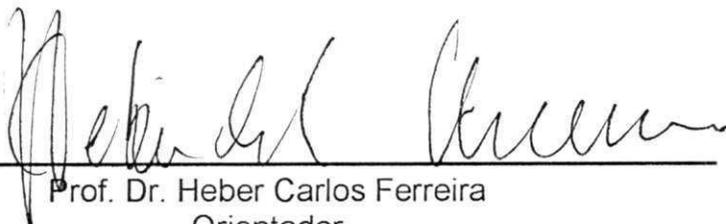
FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor : *Euzébio Soares de Araújo*

**UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA SERRAGEM DE GRANITOS NA
PRODUÇÃO DE TIJOLOS SÍLICA – CAL PARA USO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação Defendida e Aprovada em : 20 / 03 / 2002.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira
Orientador
DEMa/UFPB



Prof. Dr. Hélio de Lucena Lira
Examinador
DEMa/UFPB



Prof. Dr. Raimundo Leidimar Bezerra
Examinador
DEC/UFPB

Campina Grande - PB
Março - 2002

A meu pai Elpidio Soares dos Santos, pelo incentivo, dedicação e primeiras lições, e minha mãe Maria Luzimar de Araújo Soares, pela dedicação, amor, carinho e perseverança, que puderam tornar mais amenas as tarefas desenvolvidas.

A você Eldiman, irmão querido, glorifico-me de ter teu nome presente neste trabalho, que viu ser sonhado, planejado, iniciado e concluído. Meu amor e gratidão a você, irmão e amigo de todos os momentos. Com todo amor e carinho lhes dedico esta dissertação.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS** sobretudo, presença constante em meu aprimoramento intelectual.

Ao prof. Dr. **Heber Carlos Ferreira**, orientador desta dissertação, os sinceros agradecimentos, pelos ensinamentos transmitidos, pela assiduidade, transparência e amizade que contribuíram valiosamente na orientação desta dissertação.

Ao prof. **Gelmires de Araújo Neves**, pela amizade, incentivo, informações transmitidas e auxílio nos ensaios realizados nos laboratórios, meu sincero agradecimento por tudo.

Aos professores e funcionários do DEC/CCT/UFPB e do curso de mestrado em Engenharia Civil, da Área de Geotecnia, pela oportunidade de convivência e colaboração.

Ao aluno de Iniciação Científica **Vitor Gomes de Araújo**, ao amigo **Ideu Ferreira Guedes** e aos funcionários e amigos **Lelé, Mano e Cris**, por suas dedicações, que muito ajudaram na obtenção dos resultados e amizade que sempre me trataram.

Aos amigos do curso de pós-graduação, pela amizade construída. Em especial, aos amigos Alex e Frank, expresse meus sinceros agradecimentos, por suas relevantes ajuda na realização dos experimentos.

Aos Engenheiros **Solange e Romualdo Rodrigues Meneses**, pelo auxílio na execução da parte experimental deste trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro fornecido para realização desta dissertação.

A bibliotecária **Maurise**, pela colaboração na busca de artigos técnicos.

A ATECEL, nas pessoas dos professores **Francisco Edimar Brasileiro e Edson da Costa Pereira**, pelo apoio técnico durante o período de realização deste trabalho.

A indústria de rochas ornamentais **POLIGRAN**, pelo fornecimento dos resíduos e apoio nos ensaios realizados.

Aos técnicos **Rui e Sobreira**, pelo apoio nos ensaios de laboratório e a todos que contribuíram para realização deste trabalho.

Aos amigos, em especialmente **Manoel Henrique Nóbrega Marinho**, que foram os principais incentivadores para que eu ingressasse no mestrado.

Enfim, aos meus familiares, que me transmitiram sentimentos de união fraterna. A minha mãe **Maria Luzimar** e meu pai **Elpidio**, pelas suas orações. A meu irmão **Eldiman** e a minha amada, **Adilana Fechine Cruz**, pela sua presença decisiva na realização deste trabalho.

SOARES, E.A. - Utilização dos Resíduos da Serragem de Granitos na Produção de Tijolos Sílica-Cal para uso em Construção Civil.

Campina Grande – PB, UFPB, 2002.

RESUMO

O Brasil hoje apresenta algumas centenas de tipos esteticamente diferentes de mármore e granito. O sistema de desdobramento de blocos de rochas gera uma quantidade significativa de rejeitos na forma de lama, geralmente constituídos de água, gralha, cal, e rocha moída. Sob condições adequadas, estes materiais podem ser reaproveitados, diminuindo assim o consumo dos recursos naturais e a necessidade de tratamento, armazenamento ou eliminação dos rejeitos, tendo-se como consequência, a redução dos riscos gerados, além de poder dar utilidade a um material, atualmente sem valor econômico. É de fundamental importância a mudança de conceitos ultrapassados e a implantação de uma política capaz de conciliar o aproveitamento racional dos recursos naturais, com o desenvolvimento de novas tecnologias. Estudos preliminares, direcionados no sentido do aproveitamento destes rejeitos, podem confirmar de forma satisfatória a utilização destes produtos nas indústrias de tijolos sílica-cal. Tijolos sílica-cal são materiais de construção obtidos de misturas de areias silicosas combinadas com pequenas proporções de cal e água, suficientes para que a mistura seja moldada sob pressão e curadas em autoclave. Este trabalho fundamenta-se principalmente no uso do rejeito da serragem de blocos de granito na produção de tijolos sílica-cal para uso em construção civil. Para viabilização deste trabalho foram realizados ensaios de caracterização: análise granulométrica, análise química, análise térmica diferencial, análise térmica gravimétrica e difração de raios-X, assim como determinações físico-mecânicas de acordo com metodologia da associação brasileira de normas técnicas. Nas diversas composições (resíduo – areia) e utilizando cals calcínicos e dolomíticos, observou-se que nas amostras com hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 as resistências mecânicas foram superiores. Salientando o crescimento substancial da resistência para as demais cals utilizadas, à medida que, aumentou-se o período de cura. Os resultados comprovam que é possível a utilização dos resíduos do granito em composições com areias na produção dos tijolos sílica-cal.

USE OF GRANITE WASTES IN THE PRODUCTION OF SAND LIME BRICKS TO USE IN CIVIL CONSTRUCTION

ABSTRACT

Nowadays, Brazil has some hundreds types of different marbles and granites. The processing of granite rocks blocks to obtain ornamental rocks produce a great amount of wastes in form of mud, generally constituted of water, lime, iron oxide and grounded rocks. Under adjusted conditions, these materials can be reused, decreasing in this way, the consumption of the natural resources and the necessity of treatment to disposal or elimination of the wastes, and so, there is the decreasing of the produced risks, and can also give utility to a material, nowadays without economic value. It is really important to change the concepts and the implantation of politics that can conciliate the rational exploitation of the natural resources, with the development of new technologies. Preliminary studies, looking for the utilization of these wastes, can confirm, in a satisfactory way the use of these products in the industries of sand lime bricks. Sand lime bricks are construction materials obtained by mixtures of sand, small portions of lime and sufficient water to form bricks by pressing and cured in an autoclave. This work is based on the use of granite sawing wastes in the production of sand lime brick to use in civil construction. Characterizing tests was conducted: particle size distribution, chemical analysis, distinguishing thermal analysis, gravimetric thermal analysis and x-ray diffraction, and physical-mechanical determinations according to ABNT. In the diverse compositions (wastes-sand) and using wharf calcíticas and dolomíticas, was observed that in the samples with hidróxido of calcium Ca(OH)_2 the mechanical resistências were superior. Pointing out the substantial growth of the resistance to the other used wharves, to the measure that, magnified the period of cure. The results confirm that is possible to use the granite wastes with sands in the production of sand lime bricks.

SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas

ABPC – Associação Brasileira de Produtores de Cal

ATD – Análise térmica diferencial

ATG – Análise térmica gravimétrica

AG – Análise gravimétrica

AE – Área específica

AQ – Análise química

CCT – Centro de Ciências e Tecnologia

DEMa – Departamento de Engenharia de Materiais

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

MER – Massa específica real

NITES – Núcleo Regional de Informação Tecnológica do Espírito Santo

POLIGRAN – Indústria de Polimento de Granito S/A

RCS – Resistência à Compressão Simples

SUMÁRIO

	Pág.
DEDICATÓRIA_____	i
AGRADECIMENTOS_____	ii
RESUMO_____	iv
ABSTRACT_____	v
SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA_____	vi
SUMÁRIO_____	vii
LISTA DE TABELAS E EQUAÇÕES_____	xi
LISTA DE FIGURAS_____	xiv
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO_____	1
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA_____	4
2.1 – Histórico_____	4
2.2 - Produção de Rochas Ornamentais_____	6
2.3 – Impactos Ambientais no Processo de Mineração_____	9
2.4 – Desperdício na Extração e Industrialização das Rochas Ornamentais_____	14
2.5 – Alternativas Utilizadas para Aproveitamento dos Resíduos_____	15
2.6 – Tijolos Sílica – Cal _____	17
2.7 – Cal_____	22
2.7.1 – Classificação das cais_____	25
2.7.2 – Propriedades das cais_____	26
2.8 – Areia_____	29

CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 – Materiais	33
3.1.1 – Material alternativo	33
3.1.2 – Material convencional	34
3.1.2.1 – cal	34
3.1.2.2 – areia	35
3.1.2.3 – água	36
3.2 – Métodos	36
3.2.1 – Ensaio de caracterização	36
3.2.1.1 – Caracterização física	37
3.2.1.2 – Caracterização mineralógica	37
3.2.2 – Ensaio tecnológico	38
3.2.2.1 – Preparação dos corpos de prova	38
3.2.3 – Propriedades físico-mecânicas	41
CAPÍTULO IV – DISCUSSÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
4.1 - Ensaio de Caracterização	43
4.1.1 - Caracterização física	43
4.1.1.1 - Massa específica real	43
4.1.1.2 - Análise granulométrica	44
4.1.1.3 - Área específica	44
4.1.2 - Caracterização mineralógica	45
4.1.2.1 - Análise química	45
4.1.2.2 - Análise térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG)	47

4.1.2.3 - Difração de raios-X	52
4.2 - Ensaio Tecnológicos	55
4.2.1 – RCS das amostras em função da porcentagem de 8% à 16% de cal após cura por autoclavagem e carbonatação	55
4.2.2 – RCS das amostras em função da porcentagem de 8% à 16% de cal após cura por carbonatação	63
4.2.3 – RCS das amostras para os tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação	70
4.2.4 – RCS das amostras para os tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação	78

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES **87**

5.1 – Resíduo	87
5.2 – Cal	87
5.2.1 - Hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$	87
5.2.2 – Megaó	87
5.2.3 – Carbomil	88
5.2.4 - Cimencal	88
5.2.5 – Brancal	88
5.2.6 - JA	88
5.3 - Comportamento Mecânico das Amostras Estudadas	89
5.3.1 - RCS das amostras após cura por autoclavagem e carbonatação	89
5.3.2 - RCS das amostras após cura por carbonatação	90
5.4 – Conclusões Finais	90

<u>CAPÍTULO VI – SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</u>	92
<u>CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	93
<u>ANEXO</u>	98

LISTA DE TABELAS E EQUAÇÕES

	Pág.
Tabela 2.1 – Impactos gerados durante a pesquisa mineral, exploração e beneficiamento das rochas ornamentais _____	11
Tabela 2.2 – Composição química da cal _____	26
Tabela 2.3 – Propriedades da cal virgem e hidratada _____	28
Tabela 4.1 – Massa específica real das amostras estudadas _____	43
Tabela 4.2 – Análise granulométrica da amostra de resíduo _____	44
Tabela 4.3 – Área específica das amostras estudadas _____	45
Tabela 4.4 – Composição química das amostras estudadas _____	46
Tabela 4.5 – RCS em função da porcentagem de 8% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação _____	98
Tabela 4.6 – RCS em função da porcentagem de 10% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação _____	98
Tabela 4.7 – RCS em função da porcentagem de 12% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação _____	99
Tabela 4.8 – RCS em função da porcentagem de 14% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação _____	99
Tabela 4.9 – RCS em função da porcentagem de 16% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação _____	100
Tabela 4.10 – RCS em função da porcentagem de 8% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação _____	100
Tabela 4.11 – RCS em função da porcentagem de 10% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação _____	101

Tabela 4.12 – RCS em função da porcentagem de 12% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação____	101
Tabela 4.13 – RCS em função da porcentagem de 14% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação____	102
Tabela 4.14 – RCS em função da porcentagem de 16% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação____	102
Tabela 4.15 – RCS para o tempo de 0 dia (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por autoclavagem _____	103
Tabela 4.16 – RCS para o tempo de 15 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal após cura por autoclavagem e carbonatação_	103
Tabela 4.17 – RCS para o tempo de 30 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por autoclavagem e carbonatação_	104
Tabela 4.18 – RCS para o tempo de 60 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal após, cura por autoclavagem e carbonatação_	104
Tabela 4.19 – RCS para o tempo de 90 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por autoclavagem e carbonatação_	105
Tabela 4.20 – RCS para o tempo de 120 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por autoclavagem e carbonatação_____	105
Tabela 4.21 – RCS para o tempo de 15 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por carbonatação_____	106
Tabela 4.22 – RCS para o tempo de 30 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por carbonatação_____	106
Tabela 4.23 – RCS para o tempo de 60 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por carbonatação_____	107
Tabela 4.24 – RCS para o tempo de 90 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por carbonatação_____	107

Tabela 4.25 – RCS para o tempo de 120 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por carbonatação	108
Equação 1	23
Equação 2	25
Equação 3	42

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 – Fluxograma esquemático do setor, com os principais produtos dos segmentos do ciclo de produção _____	8
Figura 2.2 – Depósito do resíduo de granito da indústria POLIGRAN. _____	12
Figura 2.3 – Origem da serragem de blocos de granito _____	13
Figura 2.4 – Resíduo da serragem de granito da indústria POLIGRAN _____	14
Figura 2.5 – Fluxograma adotado em grandes centros de produção de cal _____	24
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas dos ensaios de caracterização _____	36
Figura 3.2 – Fotos do molde, do processo de moldagem e dos corpos de prova. _____	39
Figura 3.3 – Fotos dos corpos de provas submetidos à cura nos tanques. _____	40
Figura 3.4 – Fotos do ensaio de resistência a compressão e do corpo de prova após rompimento. _____	41
Figura 4.1 – Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra de resíduo. _____	47
Figura 4.2 – Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 . _____	48
Figura 4.3 – Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra da cal Megaó. _____	49
Figura 4.4 – Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra da cal Carbomil. _____	49
Figura 4.5 – Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra da cal Calcimento. _____	50
Figura 4.6 – Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra da cal Brancal. _____	51

Figura 4.7 –	Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra da cal JÁ.	52
Figura 4.8 –	Difratogramas de raios-x da amostra de resíduo e das seis cais estudadas.	53
Figura 4.9 –	RCS das composições estudadas para as percentagens de cal Megaó de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.	56
Figura 4.10 –	RCS das composições estudadas para as percentagens de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.	59
Figura 4.11 –	RCS das composições estudadas para as percentagens de cal Carbomil de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.	61
Figura 4.12 –	RCS das composições estudadas para as percentagens de cal Megaó de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação.	64
Figura 4.13 –	RCS das composições estudadas para as percentagens de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação.	66
Figura 4.14 –	RCS das composições estudadas para as percentagens de cal Carbomil de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação.	68
Figura 4.15 –	RCS das composições estudadas para as percentagens de cal Megaó de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.	71
Figura 4.16 –	RCS das composições estudadas para as percentagens de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.	74
Figura 4.17 –	RCS das composições estudadas para as percentagens de cal Carbomil de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.	76
Figura 4.18 –	RCS das composições estudadas para as percentagens de cal Megaó de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação.	79

Figura 4.19 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação. _____ 81

Figura 4.20 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Carbomil de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação. _____ 83

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios de nossa era é a eliminação dos resíduos, sejam eles domésticos (papelão, embalagens, objetos de consumo, restos de alimentos, etc.), industriais (entulho, escórias e os mais variados resíduos decorrentes de processos industriais) ou hospitalares (seringas utilizadas, medicamentos, etc.). As empresas que beneficiam as rochas graníticas têm como principal atividade a serragem e polimento para produção de rochas ornamentais utilizadas na construção civil. Na produção destes artigos formam-se quantidades apreciáveis de resíduos, que certamente acabam por comprometer o meio ambiente.

O sistema de beneficiamento de blocos de rochas gera uma quantidade significativa de rejeito na forma de lama. Assim, 20 a 25% dos blocos, geralmente constituídos de água, gralha, cal, e rocha moída, são lançados no meio ambiente.

Quanto ao fator econômico, a falta de planejamento no processo de industrialização pode ser identificada como fonte de desperdício de insumos e matérias primas. Sob condições adequadas, pode-se reaproveitar estes materiais, diminuindo assim o consumo dos recursos naturais e a necessidade de tratamento, armazenamento ou eliminação dos rejeitos, tendo-se como consequência, a redução dos riscos gerados, além de poder dar utilidade a um material, atualmente sem valor econômico.

Nos últimos anos, os diversos setores industriais vêm sendo citados como fontes de contaminação e/ou poluição do meio ambiente. Durante o processo de industrialização geram-se resíduos que descarregados sem quaisquer cuidados

constituem um dos principais componentes de poluição ambiental, além de colocar em risco à saúde pública.

Segundo SAUTEREY (1978), a construção civil é o ramo da atividade tecnológica que, pelo volume de recursos naturais consumidos, parece ser o mais indicado a absorver os resíduos sólidos.

É viável lembrar que, o aproveitamento de rejeitos deve ser encarado com uma atividade complementar, que poderá contribuir muito na redução de custos finais de produção, permitindo a adição de algum valor ao resíduo. Os depósitos de resíduos devem ser vistos como mais uma fonte de renda e não apenas simples armazenadores de resíduos.

O Brasil hoje, apresenta-se com algumas centenas de tipos esteticamente diferentes de mármore e granitos e que a demanda mundial é cerca de 370 milhões de metros quadrados, o que representa um enorme potencial de mercado a ser alcançado (DESSAUNE, 1995).

As indústrias que beneficiam as rochas ornamentais vêm causando preocupações para os empresários, ambientalistas e governo, em virtude da quantidade crescente de resíduos. Estes rejeitos acumulam-se nos depósitos e sem nenhum cuidado prévio são lançados no meio ambiente, contaminando o solo e/ou águas.

Sabendo-se dos problemas ambientais causados pela deposição do rejeito de granitos no meio ambiente e de algumas características específicas tais como: fina granulometria, composição pré-definida (rocha moída, cal ou substituto e gralha de ferro ou aço) e a inexistência de grãos mistos entre os três componentes básicos, vislumbra-se a possibilidade de sua aplicação como materiais alternativos para uso na construção civil.

Estudos preliminares realizados na UFPB, direcionados no sentido do aproveitamento destes rejeitos, poderão confirmar de forma satisfatória a utilização destes produtos nas indústrias de tijolos sílica-cal. Na construção civil,

os tijolos sílica-cal podem ser utilizados em substituição aos tijolos convencionais, pois normalmente apresentam algumas vantagens sobre os convencionais.

Países como o Brasil, que dispõem de importantes recursos geológicos e onde a produção encontra-se em pleno desenvolvimento, enfrentam graves problemas com os resíduos gerados na industrialização. A falta de planejamento no processo de industrialização pode ser identificada como fonte de desperdício de insumos e matérias primas. Os resíduos provenientes da industrialização das rochas ornamentais contaminam o solo e/ou águas, além de desfigurar a paisagem, o que vem preocupando as autoridades, empresas e população.

Este trabalho fundamenta-se principalmente na expectativa de exploração, através da caracterização física, mineralógica e tecnológica das potencialidades do uso do rejeito da serragem de blocos de granito na produção de **tijolos sílica-cal** para uso em construção civil, no sentido de agregar valor aos rejeitos provenientes da industrialização, minimizar os efeitos ambientais e reduzir seu custo final de produção.

CAPITULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica de tópicos relacionados à pesquisa. Verifica-se que estudos de reaproveitamento, bem como a aplicação dos resíduos na produção de materiais alternativos, para uso na construção civil, constitui-se num assunto pouco difundido na literatura especializada. Inicialmente, tratar-se-á da extração das rochas ornamentais e os problemas causados ao meio ambiente (impactos, desperdício na extração, alternativas de reaproveitamento, etc.). Posteriormente, abordar-se-á sobre os tijolos sílica-cal, seus constituintes (cal e areia), suas propriedades e o reaproveitamento do rejeito em misturas com areia na produção dos tijolos sílica-cal.

2.1 – Histórico

As primeiras aplicações das rochas ornamentais pelo homem data-se dos tempos pré – históricos (paleolítico, ± 500 mil anos A.C). A princípio os “mármore” e “granitos” foram usados na produção de utensílios domésticos, armas para ataques, defesas e objetos sacros. Em seqüência, as rochas ornamentais tiveram as primeiras e importantes aplicações pelo homem nas construções, sendo sua evolução conhecida através da história dos povos. As civilizações utilizavam as rochas na construção civil , de acordo com suas características, finalidades e estilos arquitetônicos (Vidal,1995, Alencar, 1996, Azambuja,1977).

No Brasil as rochas ornamentais tiveram suas aplicações datadas no período colonial, utilizadas pelos portugueses nas construções dos fortes e em diversas cidades de Minas Gerais, como: Ouro Preto, Tiradentes, Diamantina e São João Del Rei, em Olinda no estado de Pernambuco, entre outras. Passou pelo Brasil Império e estendeu-se até o início da República, quando apresentou construções arquitetônicas mais refinadas como a de edifícios na cidade do Rio

de Janeiro, o Palácio das Laranjeiras, Igreja da Candelária, o Palácio do Catete, Teatro Municipal e em túmulos. Diversas outras cidades brasileiras possuem um valioso patrimônio histórico, construído pelos mestres portugueses da cantaria, que deixaram sua marca na arquitetura brasileira (Vidal, 1995, Azambuja, 1977).

As primeiras indústrias de beneficiamento de mármore implantadas no Brasil foram de formas artesanais por imigrantes italianos e portugueses no século XIX. Utilizando métodos rudimentares estas indústrias pouco se desenvolveram, principalmente devido a concorrência sofrida junto às importações de mármore italiano de Carrara (Azambuja e Gonçalves, 1977).

O termo rocha ornamental, pedra natural, rocha lapídea, rocha dimensional e material de cantaria é usado para designar pedras extraídas e beneficiadas, visando a obtenção de dimensões, especificações e formas de uso na construção civil, arte funerária, arte de decoração, revestimento de elementos urbanos etc. O termo está associado tanto a blocos de rochas brutas como a material já acabado, polido e com lustre (Moya, 1995, Chiodi, 1995).

Segundo STELLIN JÚNIOR (1990), o primeiro tear foi importado e utilizado para incrementar a produção de rochas ornamentais no Brasil durante o período da Primeira Guerra (1914 – 1918). Os teares passaram a ser construídos com base no protótipo importado, dada a impossibilidade da importação devido ao bloqueio marítimo em consequência da guerra.

A extração de granito iniciou-se no estado do Rio de Janeiro e posteriormente Espírito Santo, São Paulo, Bahia e Minas Gerais. Esta atividade teve um crescimento significativo somente nas últimas décadas, sendo uma atividade mineral relativamente nova, conseqüentemente as modernas técnicas de extração e beneficiamento não atingiram ainda uma performance tão alta como aquelas apresentadas em outras partes do mundo, principalmente na Europa.

Segundo ALENCAR, CARANASSIOS e CARVALHO (1996), a escolha e adoção da alternativa tecnológica, seja para corte, polimento ou acabamento, é função, sobretudo, dos produtos finais que se quer produzir, na flexibilidade

produtiva com que se planeja dotar a fábrica de beneficiamento e das características do material com que se vai trabalhar.

2.2 – Produção de Rochas Ornamentais

De todas as rochas existentes na natureza, os mármore e granitos foram e continuam sendo as mais utilizadas como material de cantaria (ornamental). O emprego cada vez maior destas rochas, em especial o granito, vem estimulando cada vez mais uma evolução tecnológica, que leva ao aprimoramento de insumos, máquinas e ferramentas em todas as fases de processamento das rochas (Caruso, 1985).

A industrialização das rochas ornamentais tem alcançado um desenvolvimento crescente no Brasil, refletido no grande volume de exportações. A padronização geométrica dos blocos, das chapas e dos ladrilhos é fruto de um exigente mercado consumidor, bem como de investimento e novas tecnologias em todas as fases do processamento. Além destas, um produto para adquirir uma alta qualidade se faz necessário o conhecimento de suas características tecnológicas (propriedades mineralógicas, físicas, químicas e mecânicas), mediante análises e ensaios executados segundo procedimentos rigorosos, normalizados por entidades nacionais (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT) e/ou estrangeiras (American Society for Testing and Materials – ASTM, Deustsch Institut fur Normung – DIN, etc.).

As solicitações que sofrem os mármore e granitos podem ser percebidas desde a fase de extração na pedreira, passando pelo beneficiamento (serragem, polimento e lustro) até a aplicação final nas obras. Estas solicitações físicas e mecânicas de diferentes modalidades e intensidades, tais como: atrito, impacto e desgaste, vêm acompanhadas da agressividade do meio ambiente, através de agentes físico-químicos naturais (ação de intempéries) ou artificiais (produtos de limpeza).

O trabalho de exploração das rochas ornamentais é simples e de baixo custo, devido a existência de grandes maciços aflorantes e matacões de grandes dimensões. Nos maciços rochosos o granito não é extraído de forma tão

homogênea quanto o mármore. Os blocos são delineados por furos de martelotes pneumáticos e obtidos pelo uso de explosivos ou “jet flame” (maçaricos que geram chamas de grande impacto para o corte do granito), sendo o mesmo procedimento utilizado nos matacões, com a desvantagem de se obter blocos de formato irregular, dependendo do tamanho dos matacões.

Após o processo de extração, os blocos são transformados em chapas ou placas semi-acabadas, utilizando máquinas denominadas de teares. Este processo conhecido como desdobramento ou serragem ocorre nas serrarias. Os produtos desta fase de industrialização utilizam como principais insumos: componentes abrasivos (granalha de aço ou ferro fundido), água, cal (calcário, carbureto de cálcio, etc.) e energia elétrica.

Os teares são equipamentos robustos, constituídos por colunas as quais sustentam um quadro que realiza movimento perpendicular. Neste quadro, são dispostas de forma paralelas, lâminas de aço no sentido longitudinal do equipamento. Nos teares com misturas abrasivas, o material abrasivo é o elemento essencial para o corte da rocha e, ao mesmo tempo, o mais complexo de todo o sistema.

A polpa abrasiva é distribuída por chuveiros, sobre o bloco, através de bombeamento, infiltra-se nos canais abertos pelas lâminas e retornando ao tanque de bombeamento, iniciando novamente o ciclo de distribuição da polpa (Freire e Motta, 1995). No controle da composição da mistura, a parcela mais fina da lama é descartada, gerando assim o resíduo de serragem de blocos de granito.

Por fim, o acabamento das placas. Após serragem, as placas são levadas às marmorarias para que, numa primeira etapa, sejam polidas. Seqüencialmente têm-se aplicações sucessivas de politrizes, que trabalham com abrasivos sucessivamente mais finos, desgastando as superfícies das placas até o polimento desejável. A placa estando plana e lisa inicia-se a lustração que irá conferir o aspecto final desejado para o uso. A industrialização das rochas ornamentais pode ser entendida de acordo com o fluxograma da Figura 2.1.

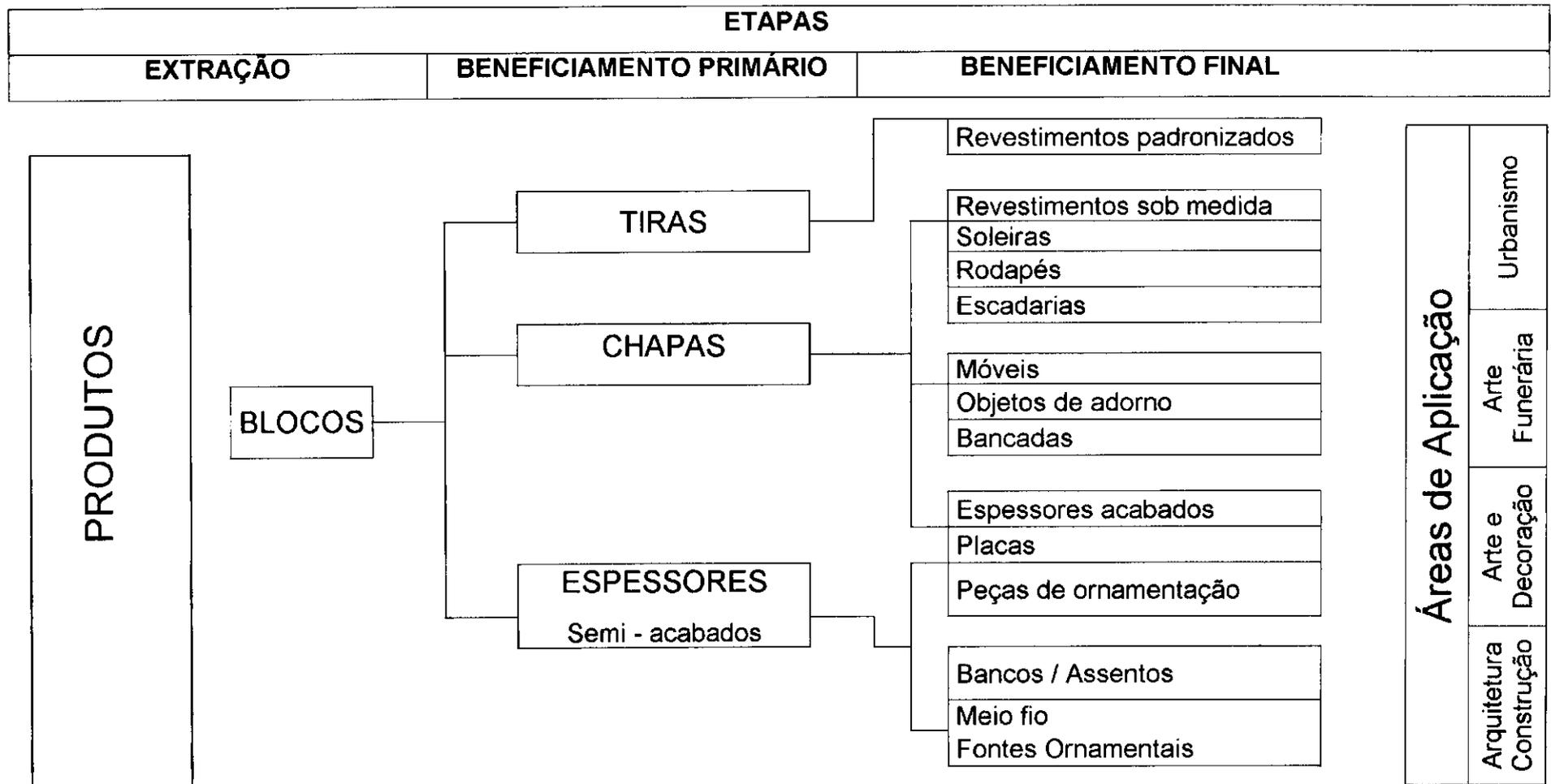


Figura 2.1 - Fluxograma esquemático do setor, com os principais produtos dos segmentos do ciclo de produção.

2.3 - Impactos Ambientais no Processo de Mineração

A complexa interação existente entre os recursos naturais (solo, água, ar, energia, bens minerais e as diversas fontes biológicas) e os diferentes processos de industrialização dificultam a realização e, também, o correto controle dos impactos gerados no meio ambiente pelo desenvolvimento destes processos.

O termo meio ambiente deve ser entendido como sendo todos os aspectos relacionados à flora, à fauna e ao ser humano. Portanto, ele inclui os aspectos ligados ao ambiente natural e à sua interação com os ambientes construídos. Assim, esta descrição abrange todos os componentes da terra – o solo, a água, o ar e todas as camadas da atmosfera; as construções (estradas, rodovias, casas, edifícios, etc.), e facilidades ligadas à recreação (IBRAM, 1984).

Assim os efeitos que degradam o meio ambiente, em relação a um projeto industrial, devem ser considerados, assim como quaisquer alterações que o mesmo pode causar ao meio ambiente, incluindo efeitos sobre a saúde, condições sócio – econômicas, patrimoniais, culturais ou físicos, devido ao corrente uso de recursos naturais ou processos de industrialização (Fellenberg, 1980).

Hoje, com os avanços tecnológicos, de mercado, de competitividade, as empresas do mundo inteiro têm buscado modernizar seus sistemas de produção, para poder assim garantir produtos e serviços tecnologicamente modernos e ecologicamente corretos, sendo imprescindível para o Brasil uma completa adequação ao mercado exterior. Para isto existem as normas de Sistema de Gestão da Qualidade Total ISO 9000 e de Sistema de Gestão Ambiental ISO 14000, que possibilitam uma correta organização das indústrias nacionais aos parâmetros internacionais.

Pode-se identificar como uma das principais causas da desestabilização dos ecossistemas, o desmatamento e retirada da cobertura vegetal. A falta de

vegetação elimina o efeito de interceptação das chuvas ou dispersão da energia das águas, provocando assim uma erosão hídrica. Esta erosão altera a estabilidade natural do solo, assoreando rios e lagos, conseqüentemente prejudicando a manutenção da vida.

A falta de um armazenamento adequado e, até mesmo de tratamento apropriado para eliminação e/ou redução nos constituintes presentes nestes rejeitos gerados nas regiões produtoras de rochas ornamentais podem ser nocivos à preservação do meio ambiente, através da contaminação da água, ao serem lançados diretamente nos recursos hídricos ou quando são lançados no solo alterando as condições naturais do subsolo e do lençol freático. É de responsabilidade do governo, da comunidade e da própria empresa geradora o controle da poluição e reabilitação das áreas degradadas, visto que todos estão envolvidos no processo de fiscalização, uso e exploração destes recursos.

Como poluentes dos recursos hídricos, nas diferentes atividades realizadas na indústria mineral, pode-se destacar: sólidos em suspensão, íons metálicos, sais, compostos orgânicos sintéticos, produtos químicos inorgânicos, óleos, esgoto doméstico, calor e produtos capazes de alterar o pH (IBRAM, 1984).

Estudos realizados por CAIADO e MENDONÇA (1995), concluíram que as atividades de mineração de mármore e granitos causam alterações significativas na qualidade dos recursos hídricos, com incremento das concentrações de todos os parâmetros analisados (sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, cálcio, bicarbonato e pH), exceto as concentrações de ferro e magnésio, que não apresentaram alterações que pudessem ser caracterizadas como resultados de impactos dessas atividades.

De forma sucinta descrevem-se na Tabela 2.1 os impactos ambientais sobre a qualidade das águas e do solo nas diversas fases de industrialização das rochas ornamentais.

Tabela 2.1 – Impactos gerados durante a pesquisa mineral, exploração e beneficiamento das rochas ornamentais

Pesquisa Mineral		
Tipo	Causa do Impacto	Parâmetro Gerador
Sondagem rotativa ou percussão.	Arraste das partículas por água pluvial.	Incremento de turbidez e sólidos sedimentáveis.
Sondagem e amostragem de grandes volumes.	Revolvimento e turbilhonamento de áreas alagadas e leitos de cursos d'água.	Incremento de turbidez e sólidos sedimentáveis.
Lavra (exploração)		
Tipo	Causa do Impacto	Parâmetro Gerador
A céu aberto, em bancadas.	Arraste de partículas finas das áreas decapadas por água pluvial	Incremento de turbidez e sólidos sedimentáveis.
Desmonte hidráulico.	Aporte de partículas por arraste pluvial e lançamento de resíduos sob forma de polpa.	Incremento de turbidez e sólidos sedimentáveis, pH e outros compostos.
Beneficiamento		
Tipo	Causa do Impacto	Parâmetro Gerador
Serragem de blocos	Lançamento de resíduos sob a forma de polpa em tanques de deposição ou nos cursos d'água.	Incremento de turbidez e sólidos sedimentáveis, podendo ocorrer solubilização de metais pelo tempo de contato com a água.
Polimento e corte	Lançamento de resíduos sob a forma de polpa em tanques de deposição ou nos cursos d'água podendo conter insumos químicos incorporados.	

Fonte: Quadro adaptado de IBRAM (1984).

Pode-se constatar que o método de deposição final destes rejeitos está sendo feito em tanques de decantação de acordo com a produção da empresa. Assim, o uso adequado de um método de deposição para estes rejeitos possibilitará um equilíbrio dos recursos naturais, permitindo uma recuperação do

rejeito através do desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem, podendo tornar-se mais uma fonte de receita para a indústria responsável por tais danos.

Deve-se ressaltar a importância da realização de um planejamento adequado para implantação da empresa (escolha do local para depósito ou do “bota fora”, estudo do terreno de fundação e sua limpeza, implantação de drenagem na base do depósito, não comprometimento dos mananciais e vegetações, etc.), reduzindo ao mínimo as conseqüências danosas ao meio ambiente.

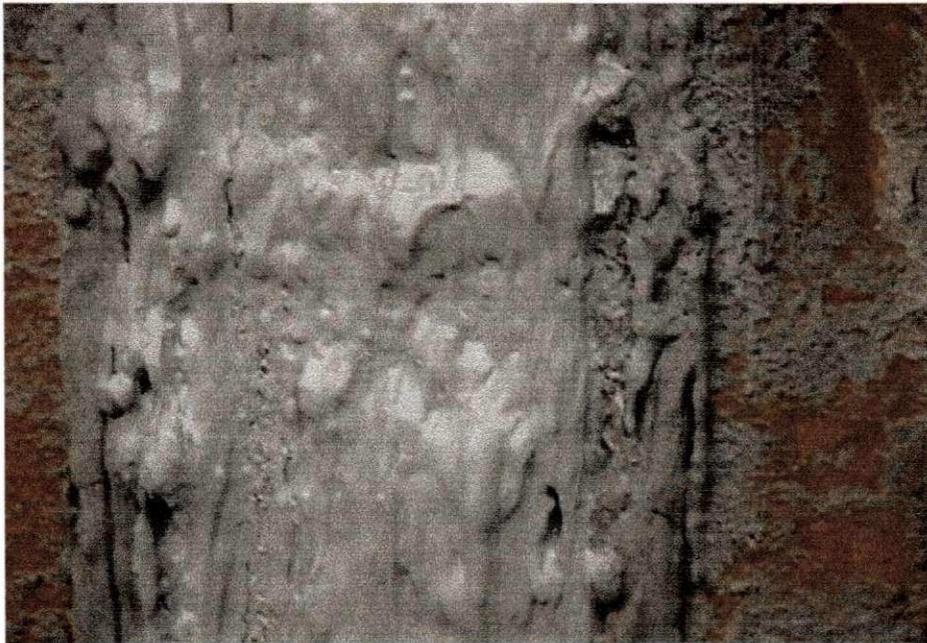


Figura 2.2 – Depósito do resíduo de granito da indústria POLIGRAN.

A produção de materiais alternativos, tendo-se como constituintes os rejeitos gerados nas indústrias de transformação de rochas, poderão promover o aparecimento de novas oportunidades de trabalho e renda, imprescindíveis ao processo de desenvolvimento. A possibilidade do aproveitamento de rejeitos de granitos como atividade complementar, poderá contribuir para a redução de custos finais, a partir da adição de algum valor ao resíduo.

A Figura 2.3 descreve o esquema de origem da serragem na confecção de blocos graníticos .

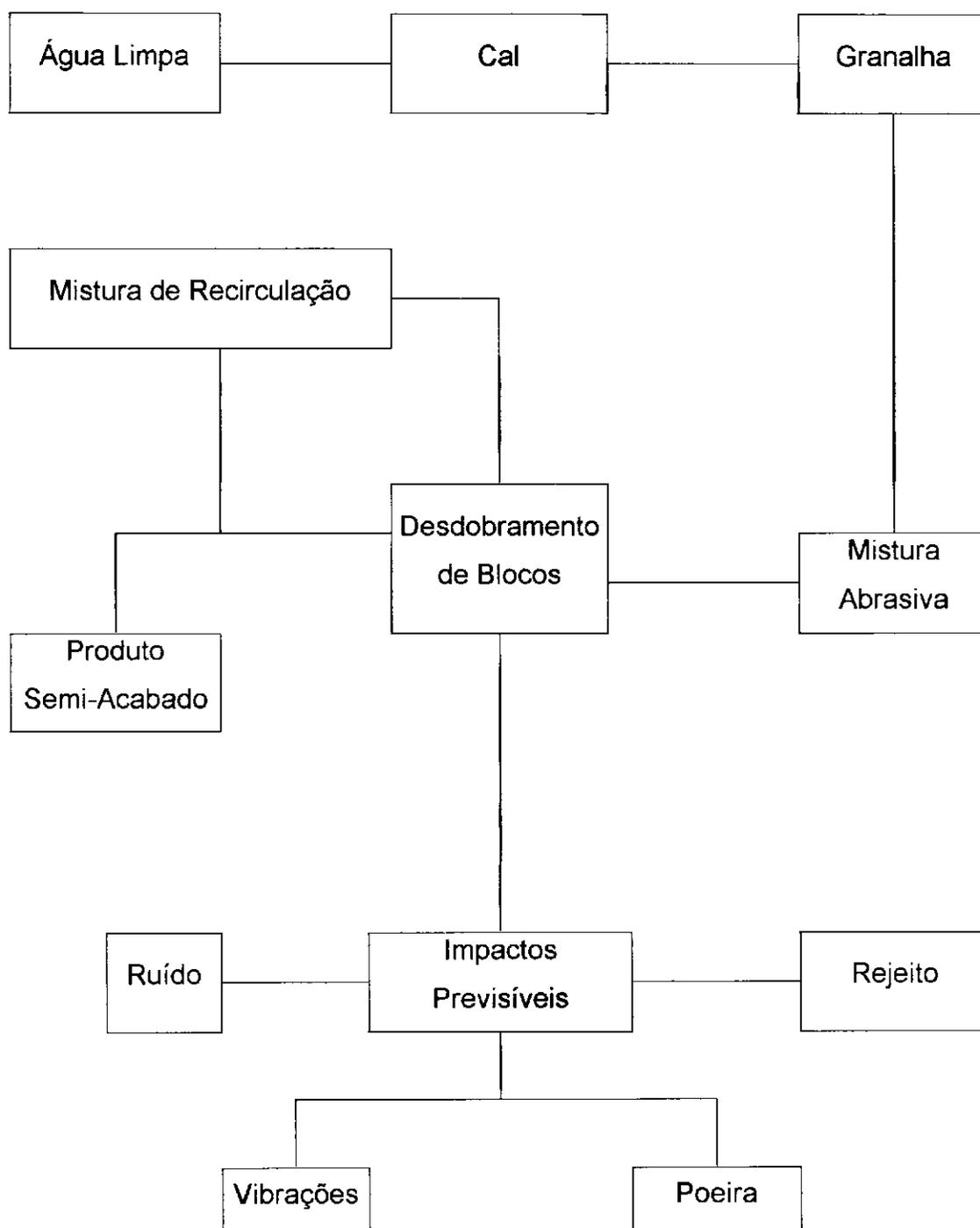


Figura 2.3 – Origem da serragem de blocos de granito (Giunton, 1993).

2.4 - Desperdício na Extração e Industrialização das Rochas Ornamentais

Nos processos que envolvem o fluxo de produção das rochas ornamentais podem-se observar a falta de tecnologia e também de mão-de-obra especializada. O Brasil possui no seu processo de extração e industrialização de rochas elevados índices de desperdício.

O desperdício pode estar relacionado à utilização de mão-de-obra desqualificada e incapacitada, tendo em vista que a negligência dada ao ser humano desvaloriza sua mão-de-obra. Como outro fator de desperdício pode-se citar a tecnologia, onde diferentemente dos países industrializados que têm conseguido significativas reduções no desperdício, através da utilização de modernas tecnologias em equipamentos e processos de extração e industrialização, o Brasil apresenta perdas significativas com a falta de planejamento e manutenção deficiente nos equipamentos, gerando queda no rendimento.

Segundo estudos realizados pelo NITES (1994), estima-se que hoje o percentual médio de desperdício no processo de extração de rochas chega a 40%, provenientes da perda do material (monólito fora das dimensões, lascas e pó de pedra). No processo de serragem, as perdas podem chegar a 30% dos blocos, na forma de costaneiras e lama abrasiva.

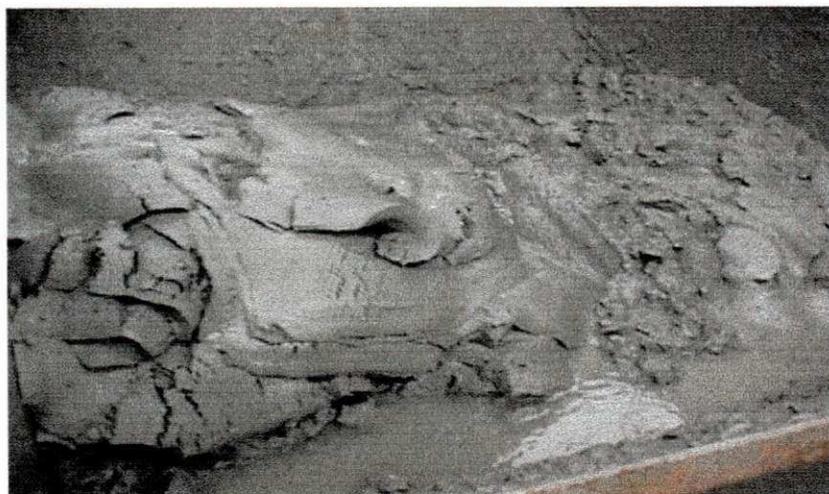


Figura 2.4 – Resíduo da serragem de granito da indústria POLIGRAN.

Estas não são as únicas formas de perdas no processo de extração e industrialização das rochas ornamentais. Pode-se considerar ainda as perdas por imperfeições das laterais dos blocos (casqueiros), as quebras de placas por falha de empilhamento, placas defeituosas devido ao corte ruim, uso de polpa abrasiva de composição inadequada, blocos fraturados ou fora das proporções dos teares, entre outras. Estima-se que as perdas durante a manufatura dos ladrilhos podem atingir a ordem de 10% de toda a produção (NITES, 1994). É importante observar que a geração de desperdício ocorre em cadeia, tendo como consequência perdas de matérias primas e, portanto, aumento nos custos e gastos desnecessários.

Por fim, as perdas ocasionadas quando da aplicação de pedras ornamentais na construção civil. Estas atingem uma média de 30% durante a construção das edificações. Deve-se esclarecer que os percentuais descritos acima não são acumulativos.

2.5 - Alternativas Utilizadas para Aproveitamento dos Resíduos

No Brasil, a produção de rochas ornamentais é estimada em 45 milhões de t/ano e vem apresentando um crescimento de 6% ao ano, ao longo dos últimos cinco anos (anônimo). Os mármore representam cerca de 50% e outros 50% são atribuídos aos granitos. Em termos regionais, aproximadamente 70% do território paraibano é formado por rochas graníticas, gnássicas, migmáticas e quartzíticas do embasamento cristalino pré-cambriano (Farias, 1995), ocasionando grandes problemas de ordem ambiental.

Diante do exposto acima é válido a busca do desenvolvimento de tecnologias de reciclagem ou do aproveitamento dos subprodutos gerados no processo de extração e industrialização das rochas, assim convertendo as perdas em fontes de lucros para a própria empresa.

Relegada ao segundo plano nos últimos anos, a problemática dos resíduos sólidos industriais retornou à atualidade. Considerando a gravidade da situação atual, os órgãos ambientais exercem pressão sobre as empresas para

resolverem seus problemas relacionados com os resíduos. Sabe-se que muitas destas empresas depositam seus resíduos de forma clandestina, no solo ou em terrenos próximos à serrarias, podendo ser comprovado com uma visita nestas empresas.

O resíduo da industrialização do mármore (pó) é bastante solicitado para fabricação de papel, na preparação de produtos farmacêuticos (como aspirina) e também como corantes de certos materiais da construção civil, em fundições, e como substituto ao carbonato de sódio (ROCHAS DE QUALIDADE, 1990).

Pode-se verificar as potencialidades do aproveitamento dos resíduos nos diferentes segmentos da sociedade e setores industriais. Na agricultura a utilização dos rejeitos encontra-se na forma da chamada "agricultura orgânica", que se baseia no uso dos rejeitos gerados na industrialização dos recursos naturais visando uma melhor regeneração e fertilização do solo, se bem gerenciada.

As granalhas e lâminas, sem utilidade no processo de serragem, podem ser vendidas como sucatas para as indústrias siderúrgicas, ao invés de simplesmente serem descartadas de forma inadequadas. Pode-se ter também o aproveitamento dos rejeitos na forma de cacos de rocha de extração, da serraria e marmoraria, sendo beneficiadas sobre a forma de britas ou pó de pedra, ou ainda com agregados em produtos sintéticos.

BODI et al. (1995), estudaram a utilização do entulho de construção civil na pavimentação com a finalidade de estabilização de solos. SILVA (1998), fez uma abordagem sobre o potencial e aproveitamento do resíduo de serragem de blocos de granito das indústrias do Espírito Santo para aplicação em argamassas de assentamento e tijolos de solo-cimento, cujos resultados mostraram que são potencialmente utilizáveis na produção de elementos de construção.

Os Departamentos de Engenharia Civil, Materiais e Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba vêm desenvolvendo pesquisas desde 1997 com rejeito da serragem de blocos de granito nas áreas de

construção civil como argamassas, tijolos maciços sem queima, elementos de alvenaria e revestimento cerâmicos com queima; na área rodoviária; na área agrícola como corretivo de solos e, recentemente, na melhoria de solos para revestimento primários e materiais de enchimentos em concretos asfálticos. Os resultados são promissores.

Segundo algumas pesquisas realizadas na UFBA, a reciclagem e o aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção é de fundamental importância para o controle e minimização dos problemas ambientais causados pela geração de resíduos de atividades industriais e urbanas, tais como: mineração, metalurgia, construção civil e limpeza urbana. O aproveitamento destes resíduos na construção civil requer uma avaliação dos aspectos econômicos e tecnológicos, bem como do risco de contaminação ambiental que o uso destes materiais com resíduos incorporados poderá ocasionar durante o ciclo de vida do material e após a sua destinação final.

Com base nestas premissas, surgiu a rede Reciclar cujo objetivo é o desenvolvimento de estudos visando o aproveitamento seguro e racional de resíduos sólidos disponíveis na região metropolitana da Grande Salvador e Feira de Santana, para produção de materiais de construção, incluindo os aspectos econômicos, tecnológicos e ambientais, contribuindo desta forma para o desenvolvimento sustentável da região.

Conforme exposta acima, verificamos que existe um amplo mercado para o uso dos resíduos provenientes da exploração das rochas ornamentais, sendo necessário apenas novas tecnologia e pesquisas que viabilizem melhores aproveitamentos deste material.

2.6 - Tijolos Silica-Cal

A partir de 1880, na Europa, a propriedade da cal reagir rapidamente com óxido de silício, formando silicatos hidratados de cálcio, quando em atmosfera saturada de vapor e em temperaturas superiores a 180°C, passou a ser explorada para a produção de blocos construtivos com resistências mecânica e à ação da

água, compatíveis com as exigências da construção dos modernos edifícios (Cincotto, 1986).

Tijolos sílica-cal são materiais de construção obtidos de misturas de areias silicosas combinados com pequenas proporções de cal e com água suficiente para que a mistura seja moldada sob pressão e curadas em autoclave por ação da pressão de vapor e temperatura. Os silicatos de cálcio hidratados formam-se por uma reação direta entre a cal e o material silicoso, atuando como forte agente cimentante ou ligante sobre o agregado (Bessey, 1948).

Os tijolos sílica-cal são largamente produzidos na Europa e nos Estados Unidos e só recentemente estão sendo produzidos no Brasil (Machado, 1982). Particularmente na Rússia e Alemanha, as misturas de cal e areia quartzosa estão sendo usadas para fabricação de vários tipos de blocos e painéis destinados às paredes, forros, divisórias e revestimentos de fachadas. Na Rússia, onde é muito usado, seu custo é menor que o tijolo cerâmico.

No Brasil, uma firma paulista fabrica o “tijolo sílica-cal” de idêntica composição que os produzidos na Rússia, com resistência à compressão de até 30 MPa, absorção de água entre 10 e 12%, peso da unidade de 3,75 kg a 6,0 kg, dimensões variadas e ótimo acabamento.

Os tijolos sílica – cal tratam-se de blocos de forma prismática, fabricados por prensagem a partir de uma mistura de cal virgem em pó e areia silicosa, submetida a um processo de autoclavagem à alta pressão. Os tijolos silicocalcário são produzidos em duas linhas: de vedação e estrutural. A linha de vedação (blocos com dois furos) apresenta as seguintes características: largura (9cm, 14 cm ou 19 cm), peso (7,4 kg, 9,7 kg e 11,3 kg), quantidade (12,5 pç/m²) e resistência à compressão (6 MPa). O bloco estrutural (com 14 furos) apresenta quatro linhas de produção, com as seguintes características: dimensões (11,5cm x 7,1cm x 24cm; 11,5cm x 11,3cm x 24cm; 14cm x 11,3cm x 24cm e 17,5cm x 11,3cm x 24cm), peso unitário (3,0 kg, 4,5 kg, 6,15 kg e 6,6 kg), quantidade (48 pç/m², 32 pç/m², 32 pç/m² e 32 pç/m²) respectivamente. A resistência à compressão do bloco é de 10 MPa. Outras características técnicas dos tijolos

silicocalcários são: absorção (10% a 12%), isolação acústica (cerca de 42 dB), resistência ao fogo e tolerância dimensional ± 2 mm.

TEHRI SP CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS (1996), realizaram investigações no processo de fabricação dos tijolos com resíduos granulados da indústria de ferro e aço. Os tijolos eram confeccionados através da mistura entre areia, cal e resíduos submetidos a uma pressão de 5MPa. O resultado deste estudo revelou que os tijolos apresentaram boa qualidade para uma resistência a compressão variando de 8 – 15 MPa obtido após 28 dias de cura em temperatura ambiente, como também reduziu o consumo de energia na produção destes tijolos comparados aos tijolos de argilas convencionais e os tijolos sílica-cal.

Estudos realizados por AMJAD e ALSAYED, (1998), publicado na Arab Bureau Education Gulf States, indicaram que há uma grande variação nas propriedades mecânicas das amostras analisadas. A pesquisa consistiu na análise de 330 blocos de concretos e 30 de sílica-cal coletados em 24 fábricas da região. Estes resultados devem-se a influência do tipo de material utilizado (areia branca ou vermelha), proporcionalidades da mistura, circunstâncias de cura e processo de fabricação. Baseados nos resultados dos testes nos blocos eles sugeriram numa análise estatística, formulas empíricas relacionando a absorção, módulo de elasticidade, densidade, resistência à compressão, etc.

A reação química do hidróxido de cálcio com a sílica em alta temperatura e pressão forma a base para produção de tijolos sílica-cal. As exigências principais da cal e areia são que ambas formem uma pasta de qualidade suficiente para que reduza os custos na fabricação dos tijolos sílica-cal. A velocidade de formação da pasta e as propriedades da cal e areia dependem de muitos fatores (composição e reatividade dos materiais constituintes, aceleradores), condições de preparação (mistura, quantidade de água e material) e condições de autoclavagem (temperatura, pressão e tempo de autoclavagem). Objetivando baixar os custos de produção dos tijolos sílica-cal, as indústrias em anos recentes tiveram a tendência de reduzir a pressão e o tempo no processo de autoclavagem, tentando reter as propriedades padrões (KISHAR, 1996).

A resistência de tijolos verdes de sílica-cal é afetada pelo método de fabricação e por vários fatores materiais. Algumas relações de materiais foram estudadas com o objetivo de conseguir um aumento de resistência. A resistência do material deve-se principalmente a cal hidratada. Conclui-se que um tijolo é mais resistente quanto mais homogênea for a distribuição da cal hidratada na superfície dos grãos de areia. A distribuição da cal depende do tempo da mistura, intensidade dos materiais presentes, do índice de absorção de água e temperatura. Observou-se que o aumento na quantidade da cal acima de determinada proporção não tem nenhum efeito na resistência final. Esta resistência é afetada consideravelmente pela densidade do tijolo verde de sílica-cal e pela hidratação incompleta que ocorre na cal em presença d'água (MULDERS, 1998).

Estudos realizados para indicar a influência da areia e do cimento portland nas propriedades físico-mecânicas de tijolos cerâmicos, mostraram que estes aditivos podem melhorar em proporções variadas as propriedades dos tijolos para diversos processos de queima e cura (saturada). A adição de 15% de areia fina a argila melhora a resistência do tijolo em aproximadamente 77% após cura de 90 dias em água (ASSAL, 1999).

Na construção civil, os tijolos sílica-cal podem ser utilizados em substituição aos tijolos convencionais, pois normalmente apresentam algumas vantagens sobre os convencionais. As vantagens dos tijolos sílica-cal quando utilizados em substituição aos convencionais empregados na construção são: relativa simplicidade no processo de manufatura, boa uniformidade e aparência geometricamente correta, conferindo grande qualidade, podem ser usados em todas as formas e tamanhos de conformidade com o mercado e com os padrões especificados. A principal desvantagem destes tijolos refere-se ao seu peso que é superior aos tijolos convencionais.

MACHADO (1982), realizou um estudo comparativo com dois tipos de areias utilizados na fabricação de tijolos sílica-cal, sendo a primeira obtida a partir de rejeitos de beneficiamentos de caulins e a segunda era uma areia natural, de maior teor de pureza. Seu estudo consistiu da moldagem, para cada tipo de areia,

corpos de prova com dois tipos de composição granulométrica, verificando a influência nas propriedades dos tijolos sílica-cal devida aos tipos de cais e diferentes composições granulométricas. Após avaliação dos resultados obtidos, observou-se que quando se trata de cais dolomíticos, as areias da CAULISA nas composições granulométricas (1 e 2) conduziram a resultados (tensão de ruptura à compressão) sem diferenças significativas. Quanto às areias do Marinho, a composição granulométrica - 1 apresentou melhores resultados (tensão de ruptura à compressão) que os obtidos com a composição granulométrica - 2. Em se tratando das areias da CAULISA, o uso de cais calcíticas conduz a melhores resultados (tensão de ruptura à compressão) do que os obtidos com cais dolomíticos; sendo que a composição granulométrica - 2 apresentou resultados superiores à composição granulométrica - 1.

As matérias primas, areia de sílica e cal, devem ser puros, não devendo conter substâncias prejudiciais, como sais solúveis em água que são os causadores dos problemas de eflorescência. Um dos principais fatores na qualidade dos tijolos sílica-cal é a natureza e qualidade da areia ou dos outros agregados utilizados, pois tem bastante influência em suas propriedades. É preferível uma areia fina com um teor de SiO_2 acima de 60%, com pequena quantidade de argila e matéria orgânica o mínimo possível. A cal deve ser hidratada e conter um teor de CaO entre 70% e 95% e de MgO inferior a 3%.

A reação química da areia com o agente cimentante durante a autoclavagem depende das características da areia e, apesar de suas propriedades não serem completamente identificadas, pode-se atribuir as variações na resistência em parte às diferentes faixas granulométricas.

Os tijolos sílica-cal apresentam as seguintes características físico-mecânicas:

- dimensões usuais (25 x 12 x 6,5 cm);
- superfície lisa e cor branca;
- massa específica real ($2,5 \text{ g/cm}^3$);
- massa específica aparente ($1,9 \text{ g/cm}^3$);
- porosidade aparente (25%);

absorção de água (12%);

tensão de ruptura à compressão (10 à 30 MPa).

2.7 - Cal

A cal é uma substância branca muito estável, resultante da calcinação de calcários (CaCO_3) a temperatura elevada entre 800°C e 1000°C, apresentam-se sob diversas variedades com características resultantes da natureza da matéria-prima empregada e do processamento conduzido (Verçosa, 1975).

Seguindo a trilha da tecnologia moderna, a cal tem procurado conquistar novos mercados, mais refinados, e até mais sofisticados, a fim de baixar os custos de produção. Utilizada pelo homem das cavernas em suas moradas, a cal tem participação constante nas grandes e formidáveis obras que marcam os períodos históricos da humanidade, em geral, como ligante dos materiais de construção dos grandiosos monumentos e edifícios dos povos da antiguidade.

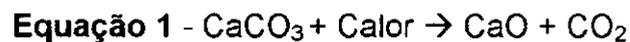
Os romanos, os egípcios, os gregos e os chineses a usavam nas mais variadas aplicações, até mesmo nas pavimentações de suas estradas e na melhoria da durabilidade do revestimento de suas ruas, como as das cidades chinesas. As tentativas de substituição deste aglomerante por modernos sais e resinas não têm obtido êxito, sendo a cal ainda o mais comum e barato aglomerante e a ter seu uso ampliado cada vez mais com o passar dos anos.

As rochas carbonatadas na natureza constituem a parte sólida da superfície terrestre. Estas rochas são denominadas conforme a participação maior ou menor de um desses dois minerais. Quando predomina o carbonato de cálcio, cujo nome como mineral é calcita, recebe a denominação de calcário; quando predomina o carbonato de cálcio e magnésio, cujo mineral é dolomita, recebe o nome de dolomita.

O termo calcário é usado para designar todas as rochas carbonatadas com proporções variadas de cálcio e magnésio, puras ou impuras e não só para as compostas por carbonato de cálcio. A palavra "cal" comumente designa as

mais diversas misturas de óxido de cálcio e óxido de magnésio, e mesmo alguns dos derivados desses óxidos alcalinos terrosos, com as mais variadas impurezas. A obtenção da cal envolve a calcinação dos calcários ou dolomitos, através de uma das mais simples de todas as reações químicas – a decomposição térmica.

O calcário sob ação do calor perde água, que se evapora, e em seguida decompõe-se, despreendendo anidrido carbônico; ficam, assim, reduzidas a óxido de cálcio anidro ou cal viva.



Quando em contato com a água, a cal mostra grande afinidade pela umidade, absorvendo-a em seus poros. Por causa de sua hidrosopicidade elevada, a absorção continua simultaneamente ao processo de hidratação que se inicia. Com a penetração de água nos poros, o calor de hidratação liberado cria forças de expansão internas causando a desintegração completa, em pó ou gel, conforme a quantidade de água utilizada na hidratação. A água assimilada está combinada sob a forma de hidróxido de cálcio ou de magnésio.

A cal pode sofrer reações químicas tais como: calcinação, extinção e carbonatação. Estas reações ocorrem em temperatura ambiente com a presença d'água ou submetidas à ação do calor à temperatura aproximada de 900 °C.

As fábricas de cal podem ter dimensões as mais variadas; desde aqueles de artesanato até as grandes instalações industriais, desde produções em medas até em grandes fornos rotativos ou verticais. A qualidade do produto acompanha em seus traços principais, também, as características da dimensão do estabelecimento industrial.

Geralmente, as indústrias de cal se completam com instalações que transformam a cal virgem em cal hidratada, pela adição de água. Este derivado, mas fácil de ser transportado e manuseado, por ser menos caústica, substitui a cal virgem em muitas das aplicações. Conforme a cal virgem que lhe dá origem, a cal hidratada tem composição diferente e, conseqüentemente, nomes diferentes,

isto é, cal hidratada cálcica, derivada da cal virgem cálcica; cal hidratada magnesiânica, derivada da cal magnesiânica; cal hidratada dolomítica, derivada da cal virgem dolomítica (Guimarães, 1984).

A Figura 2.5 mostra o fluxograma adotado em grandes centros de produção de cal.

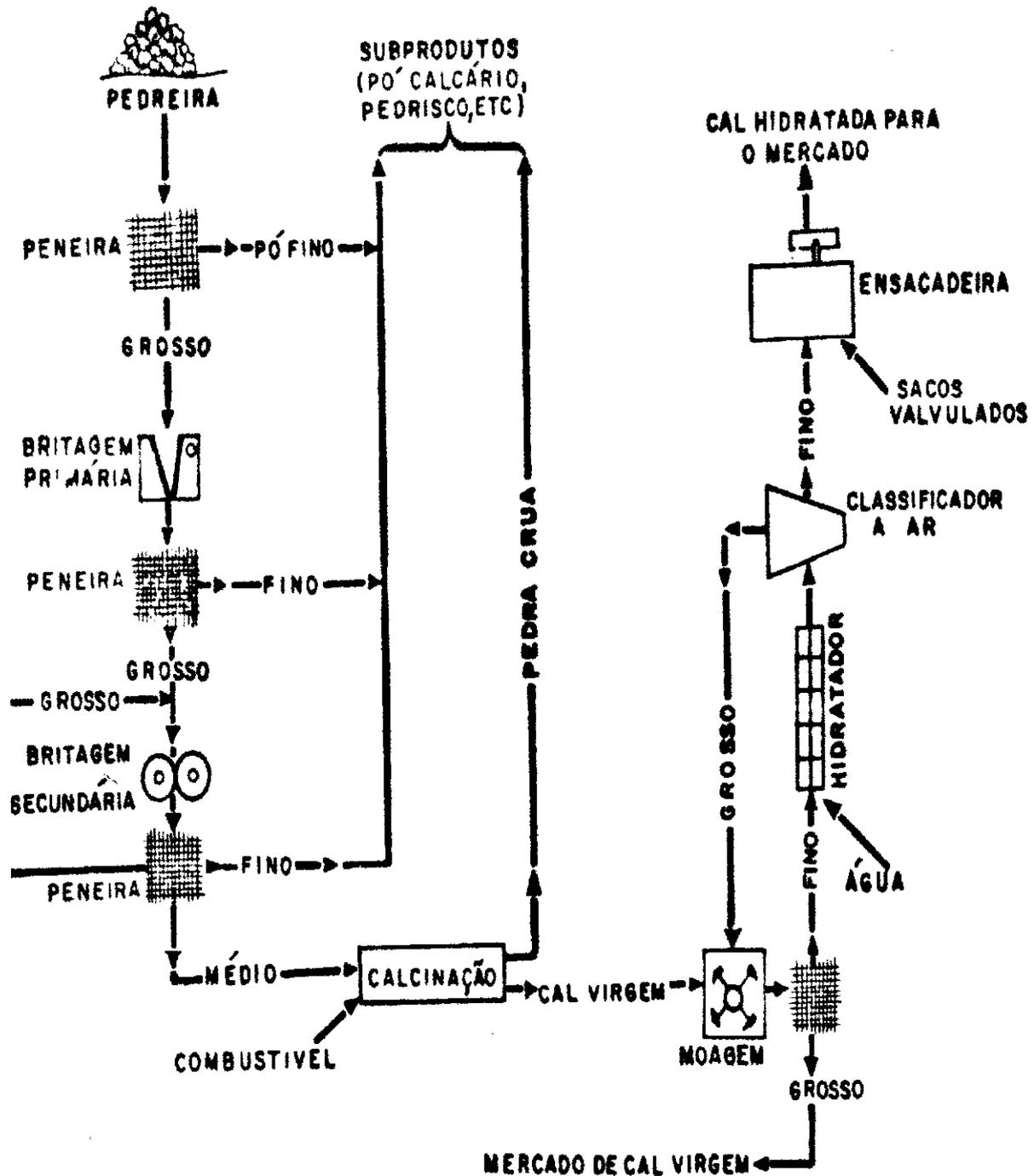


Figura 2.5 – Fluxograma adotado em grandes centros de produção de cal.

2.7.1 – Classificação das cais

Cais Hidráulicas

As cais hidráulicas podem ser natural, obtida pelo mesmo processo da cal aérea, e artificial, obtida por dois processos: o primeiro reunindo-se calcário fragmentado e argila, e um segundo que consiste na calcinação do calcário. Sua hidraulicidade depende da porcentagem de argila e o tempo de pega.

Vicar chama índice ou coeficiente de hidraulicidade à relação existente entre argila pura e a cal pura, sendo de grande importância no estudo de argamassas hidráulicas.

$$\text{Equação 2} - i = \frac{SiO_2 + AlO_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO} \quad i, \text{ índice de hidraulicidade}$$

Segundo o índice de hidraulicidade fazem pega num tempo variável entre 2 dias a 1 mês, assim, as cais classificam-se em:

ligeiramente hidráulicas _____ 15 a 30 dias _____ i (0,10 - 0,16)
 medianamente hidráulicas _____ 8 a 15 dias _____ i (0,16 - 0,31)
 hidráulica propriamente dita _____ 4 a 8 dias _____ i (0,31 - 0,42)
 eminentemente hidráulica _____ > de 4 dias _____ i (0,42 - 0,50)

A boa cal hidráulica não deve apresentar aumento de temperatura durante a pega, pois isso revela a existência de partículas não extintas e que em seguida podem inchar e desagregar a massa.

Cais Aéreas

As cais aéreas possuem índice de hidraulicidade muito baixo, variando de 0 a 0,1 (Verçosa, 1975).

Pode-se afirmar que, enquanto nas cais hidráulicas os valores do grau de hidraulicidade crescem paulatinamente, nas cais aéreas ocorre o inverso, pois seus valores são inferiores.

Outro critério para classificação das cais aéreas é conforme o teor de CaO, dividindo-se estas cais em: a) cal gorda, com 90% de CaO e os 10% restantes entre MgO e outros compostos e b) cal magra, proveniente dos calcários magnesianos e dolomitas, chegando a conter até 50% de magnésio (Batista, 1977).

2.7.2 – Propriedades das cais

O modelo da estrutura do mercado consumidor da cal nos países desenvolvidos tem como principais setores: siderurgia, tratamento de água potável, tratamento de águas servidas e gases poluentes, engenharia civil, álcalis, celulose e papel, açúcar, mineração, carbureto de cálcio, vidro, tratamento de minérios, agricultura, etc. No Brasil, não considerando os estabelecimentos de caráter artesanal, sem técnica ou controle de produção, a indústria da cal apresenta as mesmas diretrizes deste modelo, apenas com maior destaque para o setor da construção civil (Guimarães, 1984).

Qualquer que seja o tipo de forno de calcinação, o produto resultante da queima é a "cal virgem", óxido de cálcio ou óxido de cálcio e magnésio não hidratado. O produto granulado ou pó tem composição química variável, em torno dos teores apresentados abaixo (ABPC, 1971).

Tabela 2.2 – Composição química da cal

	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CO ₂	SO ₃	P
Cal Cálcica (%)	90 a 98	0,3 a 3,0	0,2 a 5,0	0,1 a 0,5	0,1 a 0,6	0,4 a 2,5	0,01 a 0,1	-- a 0,05
Cal Magnesiana ou Dolomítica (%)	64 a 57	36 a 41	0,2 a 6,0	0,1 a 0,5	0,1 a 0,6	0,4 a 2,5	0,01 a 0,1	-- a 0,05

Fonte: Estabilização de Solos com Cal. Boletim nº 5 (ABPC, 1971).

A cal hidratada atua como aglomerante em argamassas, a sua qualidade é indicada pelo teor de hidróxidos presentes, cujo teor depende da pureza e do grau de calcinação da matéria prima, do grau de hidratação da cal virgem e do armazenamento do produto (Cincotto, 1986).

Caso a matéria prima possua teor elevado de silicatos ou de quartzo, estes permanecerão no produto hidratado. Quanto maior este teor, maior o grau de impureza. Na análise química, essas impurezas são indicadas pelo teor de insolúveis, sendo seu limite mínimo de 90% de óxido de cálcio e magnésio para o material não volátil, segundo as especificações brasileiras.

O armazenamento inadequado do produto permite a carbonatação pelo ar. Os carbonatos representam um constituinte inerte, reduzindo a capacidade aglomerante da cal hidratada. As especificações brasileiras limitam o teor de anidrido carbônico de amostras coletadas no local da produção ou em depósitos, em 5 a 7% . A cor da cal, apagada em pó, é muito variada. Dependendo da composição e demais propriedades da matéria prima, varia de branco-amarelado até o marrom escuro, enquanto que o hidróxido de cálcio é, em sua maioria, de cor branca.

A perda ao fogo traduz o teor de constituintes voláteis da cal hidratada, ou seja, a água de hidratação e o anidrido carbônico. Assim, o valor na diferença entre perda ao fogo e o anidrido carbônico é indicativo do grau de hidratação (Cincotto, 1986).

As variações das composições apresentadas pelos dois óxidos – CaO e MgO – produzem os vários tipos de cal, encontrados no comércio sob nomes também diversos. As principais propriedades dos dois tipos de maior consumo – virgem e hidratada – são sintetizadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Propriedades da cal virgem e hidratada

Propriedades	Composição da Cal	Cal Virgem	Cal Hidratada
Odor	qualquer	terroso	terroso
Cor	qualquer	branca a creme	branca a creme
Textura	qualquer	cristalina	micro-cristalina ou coloidal
Estrutura Cristalina	qualquer	cúbica	hexagonal; romboédrica
Porosidade	qualquer	19 a 48%	—
Massa Específica	cálcica	3,0 g/cm ³	2,3 g/cm ³
	dolomítica	3,3 g/cm ³	2,4 g/cm ³
Índice de Refração	qualquer	1,70 a 1,82	1,54 a 1,58
Ponto de Fusão	cálcica	2570°C	2570°C
	dolomítica	2600 a 2800°C	2600 a 2800°C
Calor Específico	cálcica	0,27 (0°C) a 0,37 (400°C)	0,27 (0°C) a 0,37 (400°C)
	dolomítica	0,29 (0°C) a 0,39 (400°C)	0,29 (0°C) a 0,39 (400°C)

A qualidade da cal a ser usada é uma das considerações mais importantes na fabricação de tijolos sílica-cal. Cais comerciais podem conter porcentagens variadas de carbonato de cálcio, magnésia, sílica, alumínio, álcalis e sulfato.

A hidratação completa da cal antes da autoclavagem do tijolo é essencial. Fracasso neste sentido é comumente devido à composição da cal. É provável que cais que contenham quantias apreciáveis de magnésia sejam insatisfatórias para tijolos de areia-cal. Aparte do efeito prejudicial, tendo-se cuidado no processo de hidratação da cal e sob condições normais, um limite de 3% de magnésio pode ser aceito na composição da cal.

A queima de uma cal é um fator importante para determinação da sua qualidade. A “baixa-queima” da cal contém um resíduo composto de pedra calcária, conhecido como “caroço”, no meio dos blocos. A “baixa-queima” pode ser devido à baixa temperatura do forno, ou um curto tempo de exposição à temperatura do forno. Tal cal só é insatisfatória se tem uma proporção alta de carbonato de cálcio. Em muitas fabricas o “caroço” é parcialmente afastado da cal quando deixa o forno.

Resumindo, a cal deve, preferivelmente, possuir um baixo conteúdo de carbonato, com limite de 7% de CO₂ e baixo conteúdo de magnésia, não contendo mais que 5%. Em geral, a cal de qualquer tipo pode ser usada se elas são prontamente e completamente capazes de se hidratar antes do uso.

2.8 – Areia

As areias são substâncias minerais que na natureza apresentam-se sob a forma de grãos, de forma e dimensões variadas. Segundo a NBR – 7200 (1982), em argamassas devem ser utilizadas areias de grãos mistos de composição identificável em ensaios de laboratórios. É favorável a forma arredondada dos grãos, pois os grãos achatados ou longos, com forma lamelar, dificultam a trabalhabilidade e prejudicam a capacidade de compactação da argamassa.

Sendo o elemento inerte na argamassa, a areia é ligada pela pasta, aglomerante mais água, formando um todo homogêneo (Pinto, 1986). As areias podem ser obtidas naturalmente dos rios, de arroios, do mar e das minas ou, artificialmente, pelo britamento das rochas e das escórias dos altos fornos que possuam composição conveniente. As areias provenientes de rios e arroios são geralmente mais puras, por conseguintes as preferidas. Já as provenientes do mar geralmente apresentam impurezas, assim como as obtidas das minas.

Estudos realizados por BESSEY (1948), indicam que cerca de 90% ou mais de um tijolo sílica-cal é constituído de areia. A primeira consideração na fabricação do tijolo é, então, um fornecimento suficiente de areia de qualidade

satisfatória. Quando avalia-se um depósito de areia para fabricação de tijolo de sílica-cal, existem vários fatores que precisam ser considerados. Areias variam amplamente nas suas características, como por exemplo: na cor, na classificação do tamanho de partícula e na quantidade e natureza das impurezas. As prováveis impurezas encontradas na areia são:

- material mineral (inclusive barro) cobrindo ou tendendo a cobrir grãos de areia;
- grãos minerais diferentes de sílica;
- sais solúveis;
- material orgânico.

Até certo ponto, a argila em uma areia pode ser benéfica, mas também tem efeitos prejudiciais sérios. As vantagens são encontradas principalmente nos efeitos de pressão, no colorido menos intenso ao tijolo acabado e na textura mais lisa. A plasticidade da mistura é maior com facilidade na modelagem, além da densidade do tijolo ser aumentada e a permeabilidade diminuída. Porém, existem desvantagens que podem surgir da presença de uma proporção grande de barro na areia. Pode recobrir a areia granular, retardando a formação do agente cimentante - silicato de cálcio hidratado - durante a autoclavagem e tende a enfraquecer a ligação entre os grãos de areia, diminuindo sua resistência.

Vários grãos de outros minerais de pedra, como, por exemplo: feldspato, mica, magnetita, etc., normalmente estão presentes nas areias. A maioria somente atua como material inerte e não é mensurável em quantidades pequenas. Os sais solúveis devem ser evitados, em parte por causa do perigo de formar uma florescência nos tijolos, e em parte porque há alguma evidência que a presença de sais como cloreto pode ter um efeito prejudicial na durabilidade dos tijolos. Já as impurezas orgânicas devem estar ausentes, pois são responsáveis pela descoloração dos tijolos e também podem afetar a resistência.

As areias são classificadas como: areias grossas, que passam na malha 4,8 mm e retidas na malha 1,2 mm, médias as que passam na malha 1,2 mm e ficam retidas na malha 0,3 mm e por fim as areias finas que passam na malha 0,3

mm. Segundo BAUER (1993), o agregado deve apresentar granulometria contínua e teor de finos adequado. O excesso de finos acarreta maior consumo de água de amassamento, gerando maior retração por secagem. O teor de materiais finos de natureza argilosa não deve ultrapassar 5% em massa para as areias utilizadas em argamassas. Estes materiais são nocivos quando envolvem grãos de agregados, ou quando se apresentam em forma de aglomerantes.

No emprego da areia, é necessário levar em conta a umidade, porque o uso desse material, seco ou úmido, ocasiona sensível irregularidade na dosagem. A umidade contribui para reduzir o peso e aumentar o volume, ate certos limites. Na prática, todas as areias contêm certo teor de umidade, o qual deve ser levado em conta na sua medição.

A necessidade de atender às exigências de manejo e do gerenciamento adequado dos resíduos sólidos gerados pelos mais diversas atividades, vem sendo imposta principalmente nestas últimas décadas. Isto está se tornando um grande desafio para todos os sistemas produtivos, sejam eles de pequeno ou grande porte. O Brasil, detentor de grandes reservas de rochas ornamentais, precisa se conscientizar da importância que ocupa no cenário internacional e buscar criar e desenvolver metas no setor que sirvam como exemplos e inovações.

É de fundamental importância a mudança de conceitos ultrapassados e a implantação de uma política que concilie o aproveitamento racional de recursos naturais, com o desenvolvimento de novas tecnologias e o respeito ao meio ambiente.

É importante salientar que os objetivos e perspectivas no desenvolvimento do setor industrial, devem seguir nas tentativas de se buscar soluções para os problemas enfrentados, sendo de fundamental importância a participação do setor, tanto gerador do resíduo, como o interessado na reciclagem de produtos alternativos para a construção civil, uma vez que demonstram interesses econômicos concretos.

Diante de todo contexto, buscou-se fazer um levantamento das condições atuais da problemática que envolve os resíduos gerados na industrialização de rochas ornamentais, assim como suas relações com o meio ambiente, tentando-se explorar com maior profundidade as potencialidades do resíduo da serragem de granito, para sua utilização na produção de materiais alternativos para a construção civil, particularmente na fabricação de tijolos sílica-cal.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e métodos de ensaios utilizados no decorrer desta pesquisa. O material alternativo é composto por amostra de resíduo procedente do estado da Paraíba e resultante da serragem de rochas ornamentais (granitos) e os materiais convencionais são amostras de areia e cascas procedentes dos estados da Paraíba, Pernambuco e Ceará. Os métodos de ensaios constantes de normas da ABNT serão apenas citados, enquanto que os outros métodos serão descritos.

3.1 – Materiais

3.1.1 - Material alternativo

Resíduo

Foi selecionada e coletada amostra de resíduo proveniente da empresa POLIGRAN, Polimento de granitos do Brasil S/A, localizada na Alça Sudoeste km 14, Quadra 18, Distrito Industrial do Ligeiro, Campina Grande – PB. A amostra foi coletada na forma de polpa (pó) e posteriormente seca em estufa a 110°C, acondicionada em sacos plásticos devidamente lacrados, pesados e identificados através de etiquetas.

Este resíduo é originário dos teares, sendo constituído geralmente de água, cal moída, gralha e pó de granito. As rochas ornamentais da indústria POLIGRAN são provenientes dos municípios de Sumé, Picuí, Serra Branca e Pocinho, no estado da Paraíba, e são conhecidos como granito Sucuru, granito Picuí e granito São Marcos respectivamente. A textura destas rochas apresenta-se com granulação grosseira e média, com coloração cinza escura, branca e bege. Atualmente está sendo comercializada no Brasil e principalmente para países europeus.

3.1.2 - Materiais convencionais

3.1.2.1 - Cal

Foram selecionadas três amostras de cals das seis adquiridas; são elas:

Hidróxido de cálcio PA Ca(OH)_2

Proveniente de Recife- PE, fabricada pela Indústria Vetec Química Fina LTDA, localizada na rua Pastor Manoel Avelino de Souza, 1021, Distrito Industrial de Duque de Caxias - RJ e adquirida no comércio local de Campina Grande – PB. A cal chegou ao laboratório acondicionada em garrafas plásticas com 500g de material, sendo retirada da embalagem original e em seguida, acondicionada em sacos plásticos devidamente lacrados, pesados e identificados através de etiquetas.

Megaó

Proveniente de Recife- PE, fabricada pela Indústria Fazenda Megaó de Cima – Indústria e Comércio Megaó LTDA e adquirida no comércio local de Campina Grande-PB. A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos plásticos com 10 kg de material, sendo retirada da embalagem original e em seguida, acondicionada em sacos plásticos devidamente lacrados, pesados e identificados através de etiquetas.

Carbomil

Proveniente de Fortaleza, fabricada no município de Limoeiro do Norte – CE e adquirida no comércio local de João Pessoa – PB. A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel “Kraft”, 3 camadas, com 20 kg de material, sendo retirada da embalagem original e em seguida, acondicionada em sacos plásticos devidamente lacrados, pesados e identificados através de etiquetas.

Calcimento

Proveniente de Campina Grande – PB, fabricada pela Dolomil Dolomita Minérios LTDA, localizada na Av. Senador Argemiro de Figueiredo, s/n, no Distrito Industrial. A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel “Kraft”, 3 camadas, sendo retirada da embalagem original e em seguida, acondicionada em sacos plásticos devidamente lacrados, pesados e identificados através de etiquetas.

Branca

Proveniente de Campina Grande - PB, fabricada pela Indústria Mibra Minérios LTDA, localizada na Rodovia BR 230, km 166, Distrito Industrial de Campina Grande – PB. A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos plásticos com 10 kg de material, sendo retirada da embalagem original e em seguida, acondicionada em sacos plásticos devidamente lacrados, pesados e identificados através de etiquetas.

JA

Proveniente de Campina Grande – PB, fabricada pela Dolomil Dolomita Minérios LTDA, localizada na Av. Senador Argemiro de Figueiredo, s/n, no Distrito Industrial. A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos plásticos com 10 kg de material, sendo retirada da embalagem original e em seguida, acondicionada em sacos plásticos devidamente lacrados, pesados e identificados através de etiquetas.

3.1.2.2 – Areia

Foi utilizada uma areia natural coletada em jazidas próximas a cidade de Campina Grande-PB. Para esta areia preparou-se uma composição granulométrica, formada por 21% de areia retida na peneira ABNT n° 30 (0,60mm); 36% retida na peneira ABNT n° 50 (0,30mm); 35% retida na peneira ABNT n° 100 (0,15mm); 8% retida na peneira ABNT n° 200 (0,074mm) (Machado, 1982).

3.1.2.3 – Água

A água utilizada foi fornecida pela CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba, para abastecimento normal da cidade de Campina Grande-PB.

3.2 – Métodos

3.2.1 - Ensaios de caracterização

Na caracterização física, os ensaios efetuados na areia e na serragem granítica são: teor de umidade natural, massa específica real e composição granulométrica por peneiramento e sedimentação. Realizam-se, também, estudos mineralógicos que incluem: análise química, análise térmica diferencial, análise térmica gravimétrica e difração de raios-X. Utilizaram-se três tipos de cais, passando estas por tratamento na peneira ABNT N° 40 (0,42mm) determinando, assim, a massa específica real e sua composição mineralógica através da análise química, análise térmica diferencial, análise térmica gravimétrica e difração de raios-X. A Figura 3.1 mostra o fluxograma com as etapas dos ensaios de caracterização das amostras.

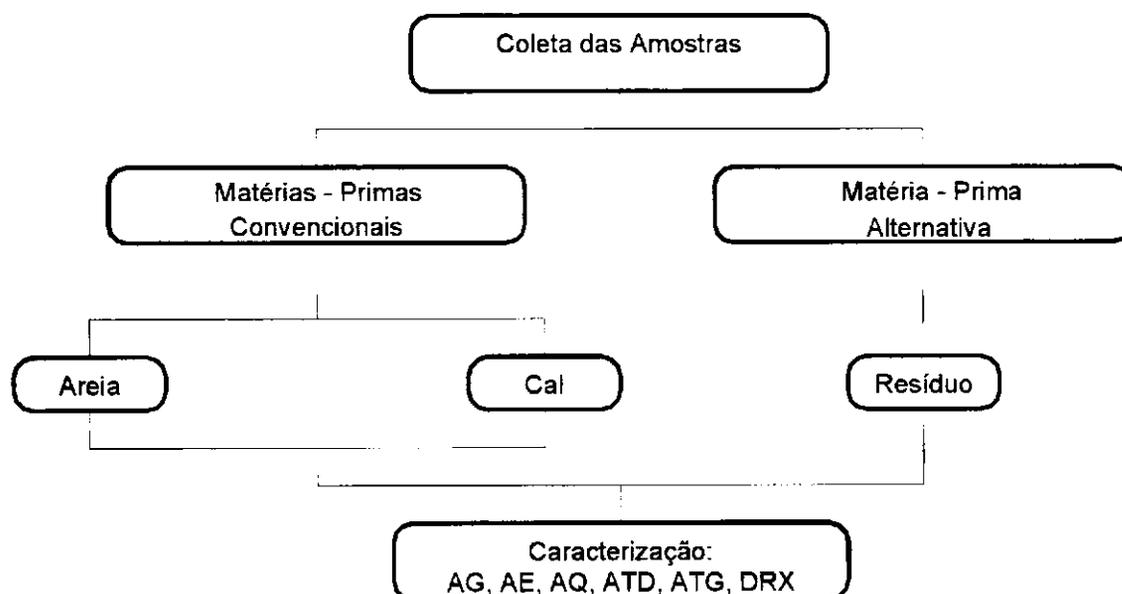


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas dos ensaios de caracterização.

3.2.1.1 - Caracterização física

Massa específica real

As amostras de resíduos, areia e cal foram secas em estufa à 110°C, até massa constante, e acondicionada em sacos plásticos e hermeticamente fechados até a realização dos ensaios. A determinação da massa específica real das (08) amostras foi realizada de acordo com a norma NBR-6474 (1984) da ABNT.

Análise granulométrica

As composições granulométricas foram determinadas via úmida por peneiramento e sedimentação. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NBR-7181 (1984) da ABNT, no laboratório de solos do DEC/CCT/UFPB, Campina Grande - PB.

Área específica

As amostras de resíduo e cal foram secas em estufas à 110°C, até massa constante, e acondicionadas em sacos plásticos e hermeticamente fechados até a realização dos ensaios. As áreas específicas das (07) amostras foram determinadas pelo método do permeâmetro de Blaine, expressas em m²/g, segundo norma NBR-7224 (1984) da ABNT.

3.2.1.2 - Caracterização mineralógica

Para os estudos mineralógicos, através da análise química, análise térmica diferencial, termogravimétrica e difração de raios-X, a amostra de resíduo foi passada em peneiras ABNT N° 200 (0,074mm), sendo a amostra de cal utilizada na sua forma original.

Análise química

As amostras de resíduos e cais foram submetidas à análise química. Estas análises foram efetivadas segundo métodos de análise química do Laboratório de Análises Mineraias do CCT/PRAI/UFPB, LAM-CG. As determinações usuais são: umidade, perda ao fogo, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , (SOUZA SANTOS, 1992).

Análises térmica diferencial e termogravimétrica (ATD e ATG)

As curvas termodiferencial e termogravimétrica foram obtidas através de um sistema de Análises Térmicas Modelo RB-3000 da BP Engenharia, com velocidade de aquecimento $12,5^\circ\text{C}/\text{min}$. A temperatura máxima para ATD e ATG foi 1000°C e o padrão utilizado na ATD foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica do DEMa/CCT/UFPB, segundo a metodologia proposta por SOUZA SANTOS (1992).

Difração de raios-X

A DR-X foi realizada em João Pessoa, utilizando um difratômetro Rigaku Denki, operando com radiação K-alfa de cobre ($1,5918 \text{ \AA}$) obtida com 40 mA e 30 kV, com varredura a 2° por minuto, para 2θ entre 3 e 80° .

3.2.2 - Ensaio tecnológicos

3.2.2.1 - Preparação dos corpos de prova

Para realização dos ensaios tecnológicos (físico – mecânicos), inicialmente foi preparada uma areia, com composição granulométrica adequada. Os corpos de prova foram obtidos pela combinação da cal com teores variando de 8% a 16%, em intervalos de 2%, mais proporções das composições de areia e serragem granítica prefixados conforme indicado abaixo:

Areia (%)	Granito (%)
0	100
20	80
40	60
60	40
80	20
100	0

O processo de preparação dos corpos de prova foi dividido em três estágios: mistura, moldagem e cura. Para o processo de mistura adicionou-se à composição areia-serragem granítica uma porcentagem de cal e água suficiente para obter-se uma argamassa com pouca plasticidade. Todas as composições foram umedecidas até um teor de 12%, após homogeneizadas em um misturador mecânico, marca “Blakeslee”, com duas velocidades de rotação. À medida que os compostos eram misturados aumentava-se a velocidade, tendo-se o cuidado de raspar o material que aderiria nas paredes da cuba e da pá. Com auxílio de uma espátula, colocava-se novamente a mistura no interior da cuba.

Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados com dimensões de 5x5cm, utilizando moldes cilíndricos. Antes da moldagem passou-se óleo, de baixa viscosidade, na superfície interna do molde para facilitar o desmolde. Em seguida, adotou-se uma medida padrão no enchimento dos moldes a fim de garantir alturas aproximadamente iguais dos corpos de prova. Aplicou-se uma pressão de 20MPa, em uma prensa “Losenhausen” com capacidade de 40t a uma velocidade constante de 0,25 mm/min. Após o desmolde, os corpos de prova foram identificados através das porcentagens, tipos de cal e período de cura.

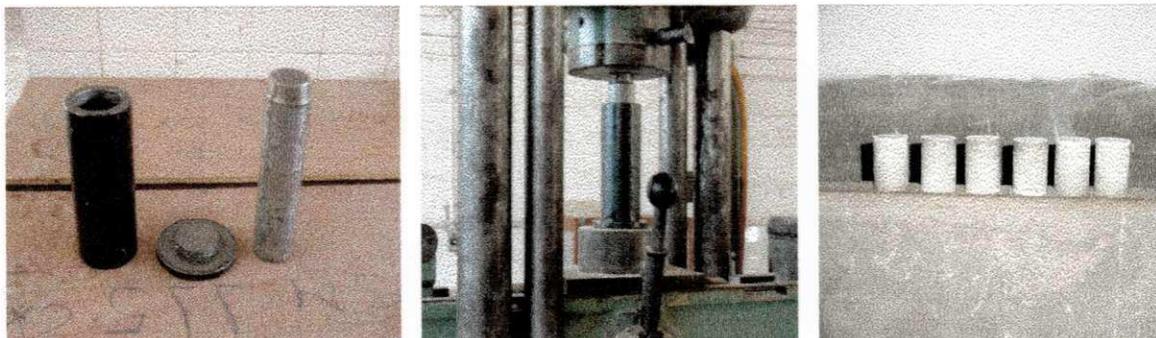


Figura 3.2 – Fotos do molde, do processo de moldagem e dos corpos de prova.

Cura

Após moldagem, os corpos de prova foram submetidos a períodos de cura com 0, 15, 30, 60, 90 e 120 dias, com temperaturas de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, tendo sido utilizados dois tipos de cura:

a) autoclavados e carbonatados – foi realizado de maneira que os corpos de prova fossem colocados em estufa com temperaturas de 105°C a 110°C , por um período de 24h. Nesse estágio de cura parte dos corpos de prova foi autoclavada com uma pressão de 1,2MPa, com uma temperatura correspondente a 190°C durante 8h, sendo rompidos posteriormente; outra parte, após autoclavagem, foi exposta ao ar dentro de um tanque seco para que ocorresse o processo de carbonatação da cal.

b) carbonatadas - foi realizado de maneira que os corpos de prova ficassem expostos ao ar dentro de um tanque seco para que ocorresse somente o processo de carbonatação da cal antes de serem rompidos.

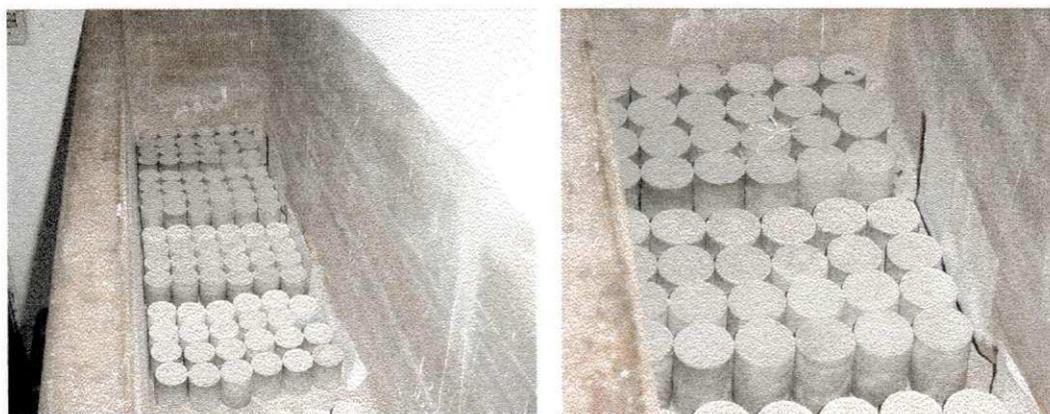


Figura 3.3 – Fotos dos corpos de prova submetidos à cura nos tanques.

3.2.3 - Propriedades físico-mecânicas

Após o período de cura os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, de acordo com a norma NBR-7215 (1991), da ABNT.

Resistência à compressão simples

Para cada composição foram preparados noventa corpos de prova, sendo quinze corpos de prova para cada tipo de cal e período de cura, destes quinze, três para cada porcentagem de cal. Após os respectivos períodos de cura, os corpos de prova foram retirados do tanque e rompidos em uma prensa “Losenhausen” com capacidade de 40t a uma velocidade constante de 0,25 mm/min. A carga de ruptura foi a carga máxima em quilogramas-força, indicada no instante da ruptura.



Figura 3.4 – Fotos do ensaio de resistência a compressão e do corpo de prova após rompimento.

A resistência à compressão simples, em MPa, com aproximação de centésimos, foi determinada pela divisão da carga máxima de ruptura pela área da secção transversal do corpo de prova, conforme a seguinte equação:

$$\text{Equação 3} - R = \frac{N}{(10.A)}$$

Sendo:

R – resistência à compressão simples, em MPa;

N – carga máxima de ruptura, em kgf;

A – área de secção transversal do corpo de prova, em cm².

Foi efetuada a média das resistências obtidas, e calculado o desvio relativo máximo de $\pm 10\%$ dos resultados dos três corpos de prova. Quando um dos valores de resistência deferia da média $\pm 10\%$, este era automaticamente eliminado e calculava-se a média dos dois restantes. Se mais de dois valores se afastavam da média $\pm 10\%$, abandonava-se o resultado e procedia-se novo ensaio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização (físicos e mineralógicos) e ensaios tecnológicos (físico - mecânicos), da amostra de resíduo do estado da Paraíba e resultantes da serragem de rochas ornamentais (granitos), e das amostras de areia e cais estudadas no decorrer da pesquisa. A caracterização física constitui-se na determinação da densidade e granulometria. A caracterização mineralógica constitui-se na determinação da composição química, análise termodiferencial, termogravimétrica e difração de raios-X. O ensaio tecnológico realizado nos corpos de prova constitui-se na determinação da resistência à compressão simples.

4.1 - Ensaio de Caracterização

4.1.1 - Caracterização física

4.1.1.1 - Massa específica real

Na Tabela 4.1, são apresentados os valores obtidos para massa específica real do resíduo proveniente do corte e polimento de granitos, da areia e das seis amostras de cais.

Tabela 4.1 – Massa específica real das amostras estudadas

Amostras	Massa Específica Real (g/cm ³)	Desvio Padrão (g/cm ³)
Resíduo	2,690	± 0,005
Areia	2,590	± 0,005
Ca(OH) ₂	2,265	± 0,005
Megaó	2,606	± 0,005
Carbomil	2,286	± 0,005
Cimencal	2,318	± 0,005
Branca	2,507	± 0,005
JA	2,494	± 0,005

Observando os resultados apresentados na Tabela 4.1, verifica-se que os valores da massa específica real variam de 2,265 g/cm³, para Ca(OH)₂, a 2,690 g/cm³, para o resíduo. Verifica-se que o resíduo estudado apresenta massa específica real superior a 2,60 g/cm³, estando dentro da faixa das rochas graníticas que varia de 2,60 a 2,90 g/cm³.

O Ca(OH)₂ apresenta a menor massa específica real das amostras de cais estudadas, enquanto que a cal Megaó apresenta a maior massa específica real. As demais amostras apresentam massa específica real de 2,286g/cm³ para Carbomil, 2,318g/cm³ para Cimencal, 2,494g/cm³ para JÁ e 2,507g/cm³ para Brancal. Esta variação na massa específica das amostras, pode indicar um processo de queima, provavelmente mais adequado, nas cais com menor massa específica.

4.1.1.2 - Análise granulométrica

A Tabela 4.2 apresenta os valores da distribuição granulométrica por peneiramento e sedimentação do resíduo proveniente do corte e polimento de granitos.

Tabela 4.2 – Análise granulométrica da amostra de resíduo

Amostra	Diâmetro Médio das Partículas (µm)								
	70	60	50	40	30	20	10	5	2
Massa Acumulada do Resíduo (%)	99,0	97,0	96,0	90,0	86,0	77,0	57,0	34,0	15,0

Observando os valores contidos na Tabela 4.2, verifica-se que o resíduo estudado tem 99% em peso de partículas com diâmetro equivalentemente inferior a 70µm, tendo uma redução gradativa para as demais dimensões.

4.1.1.3 - Área específica

Na Tabela 4.3, são apresentados os valores obtidos da área específica da amostra de resíduo e das seis amostras de cal.

Tabela 4.3 – Área específica das amostras estudadas

Amostras	Área Específica (m²/g)
Resíduo	1,000
Ca(OH) ₂	1,126
Megaó	1,738
Carbomil	1,146
Cimencal	1,178
Branca	1,104
JA	1,456

Os resultados apresentam os valores obtidos para área específica pelo método de Blaine, NBR-7224 (1984). Observando-se a Tabela 4.3, verifica-se que o resíduo apresentou área específica de 1,000 m²/g indicando uma provável atividade pozolânica, para as amostras de cal os valores da área específica variam de 1,104 m²/g para a cal Branca a 1,738 m²/g para a cal Megaó. As demais amostras apresentam área específica de 1,126 m²/g para Ca(OH)₂, 1,146 m²/g para Carbomil, 1,178 m²/g para Cimencal e 1,456 m²/g para JA.

Analisando os resultados obtidos para área específica das amostras de cal, constata-se que a Megaó é a cal com maior área específica, provavelmente mais reativa, por causa de sua maior superfície de área de contato; já a Branca é a cal com menor área específica e, provavelmente, com menor reatividade.

4.1.2 - Caracterização mineralógica

4.1.2.1 - Análise química

Na Tabela 4.4, são apresentados os valores das composições químicas obtidas a partir das seis amostras de cal e do resíduo proveniente do corte e polimento de granitos.

Tabela 4.4 – Composição química das amostras estudadas

Amostras	PR (%)	RI (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
Resíduo	4,44	Traços	59,61	5,98	11,77	4,48	Traços	2,70	3,63
Ca(OH) ₂	Traços	Traços	0,10	Traços	Traços	73,36	1,00	Traços	Traços
Megaó	17,17	0,08	3,27	Traços	Traços	46,48	32,55	Traços	Traços
Carbomil	23,62	0,06	0,78	Traços	Traços	72,80	2,31	Traços	Traços
Cimencal	28,45	1,10	4,40	Traços	2,09	57,37	5,95	Traços	Traços
Branca	23,09	3,02	11,26	Traços	Traços	56,98	5,55	Traços	Traços
JA	24,70	1,56	11,72	Traços	Traços	56,56	5,04	Traços	Traços

Observando a Tabela 4.4, verifica-se que o resíduo estudado apresenta elevado teor de SiO₂, aproximadamente 60%, teor de Al₂O₃ de 11,77%, teor de Fe₂O₃ de 5,98% e CaO em torno de 4,5%. Estes resultados confirmam que o resíduo é proveniente de rochas graníticas. Comparando-se estes resultados com os determinados por Freire e Motta (1995), para resíduos provenientes de Guarulhos, verifica-se que os teores de SiO₂ e Al₂O₃ são superiores. Os óxidos de ferro (Fe₂O₃) e cálcio (CaO) encontrados na amostra de resíduo são oriundos principalmente da granalha e cal utilizados como abrasivos.

Observa-se que a cal Megaó está incluída entre as cals dolomíticas, tendo em vista que a relação CaO/MgO é igual a 1,43, portanto, próxima da determinada por Cincotto (1990), NBR – 6453, (1983). Segundo CINCOTTO (1990), o dolomito é tanto mais puro quanto mais próximo está essa relação do valor 1,39.

A cal Megaó apresenta teor de SiO₂ de 3,27%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 46,5 e 32,6%, respectivamente, PR de 17,17% e RI de 0,08%. Trata-se de uma cal dolomítica.

A cal Carbomil apresenta teor de SiO₂ de 0,78%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 72,8% e 2,31%, respectivamente, PR de 23,62% e RI de 0,06%. Trata-se de uma cal calcítica.

A cal Cimencal apresenta teor de SiO₂ de 4,40%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 57,37% e 5,95%, respectivamente, PR de 28,45% e RI de 1,10%. Trata-se de uma cal calcítica.

A cal Brancal apresenta teor de SiO_2 de 11,26%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 56,98% e 5,55%, respectivamente, PR de 23,09% e RI de 3,02%. Trata-se de uma cal calcítica.

A cal JA apresenta teor de SiO_2 de 11,72%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 56,56% e 5,04%, respectivamente, PR de 24,70% e RI de 1,56%. Trata-se de uma cal calcítica.

4.1.2.2 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD e ATG)

As Figuras 4.1 a 4.7 apresentam as curvas de análises termodiferenciais e termogravimétricas da amostra de resíduo proveniente do corte e polimento de granitos e das seis amostras de cais.

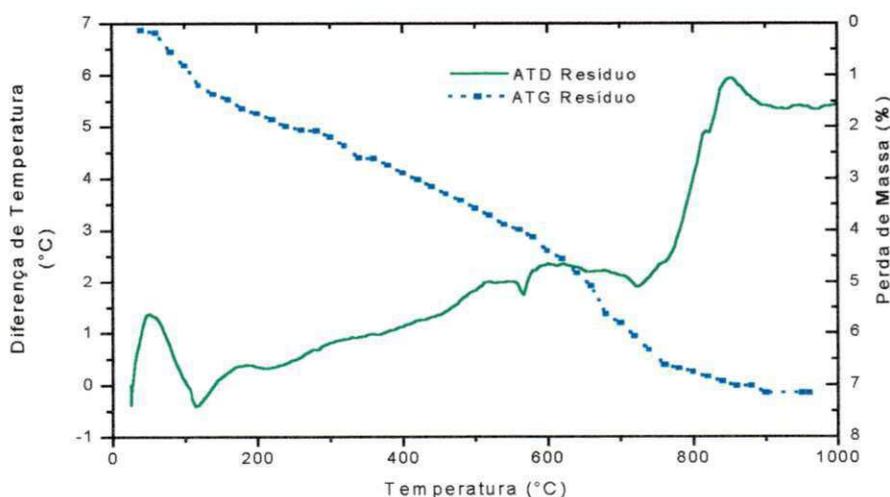


Figura 4.1 - Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra de resíduo.

Analisando-se a curva de ATD da Figura 4.1, verifica-se que o resíduo apresentou um pico endotérmico de pequena intensidade a 110°C, o que indica perda de água livre, pico endotérmico de pequena intensidade a 560°C, correspondente à transformação do quartzo alfa em quartzo beta, pico endotérmico de pequena intensidade a 730°C, correspondente à perda de hidroxilas da mica e pico endotérmico de pequena intensidade a 880°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio.

Analisando-se a curva de ATG da Figura 4.1, observa-se que o resíduo apresentou uma ligeira inflexão entre 60° e 265°C, correspondente a, aproximadamente, 2,05% de perda de massa de água livre e adsorvida, entre 265° e 516°C, perda de massa de 1,65%, correspondente à perda de hidroxilas da mica e entre 516° e 880°C perda de massa de 3,17%, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio.

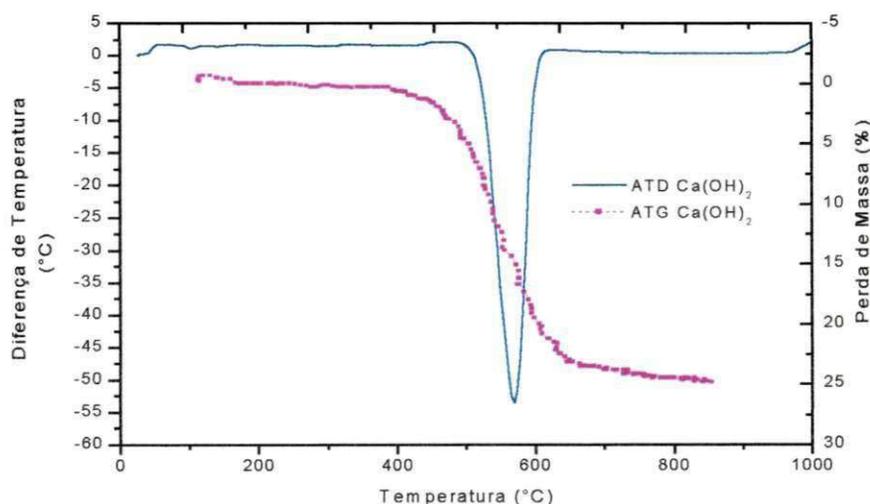


Figura 4.2 - Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Analisando-se a curva de ATD da Figura 4.2, verifica-se que o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresentou um pico endotérmico de pequena intensidade á 110°C, correspondente a perda de água livre, grande pico endotérmico a 580°C, característico da perda de hidroxilas e pequeno pico endotérmico a 785°C, característico da decomposição do CaCO_3 .

Analisando-se a curva de ATG da Figura 4.2, verifica-se que o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresentou uma perda de massa aproximada de 0,59% correspondente a água livre e adsorvida entre a temperatura ambiente e 365°C; perda de massa de 22,43% entre 365 e 670°C, correspondente a perda de hidroxilas; perda de massa de 1,26% entre 670 e 830°C, correspondente à decomposição do carbonato e outros componentes.

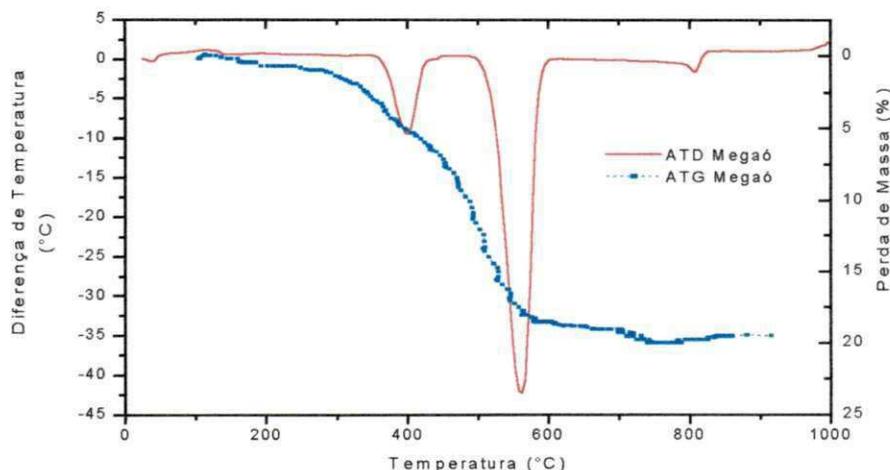


Figura 4.3 - Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra da cal Megaó.

Analisando-se a curva de ATD da Figura 4.3, verifica-se que a cal Megaó apresentou um pico endotérmico de média intensidade à 380°C, correspondente à perda de hidroxilas do $Mg(OH)_2$, grande pico endotérmico a 560°C, característico da perda de hidroxilas do $Ca(OH)_2$, pico endotérmico de pequena intensidade à 800°C, correspondente à decomposição do $CaCO_3$.

Analisando-se a curva de ATG da Figura 4.3, observa-se que a cal Megaó apresentou uma ligeira inflexão entre 200° e 400°C, correspondente a, aproximadamente, 3,7% de perda de massa de $Mg(OH)_2$; entre 400°C e 600°C, acentuada inflexão correspondente a aproximadamente 12,8% de perda de massa de $Ca(OH)_2$ e aproximadamente 2,0% de outros componentes.

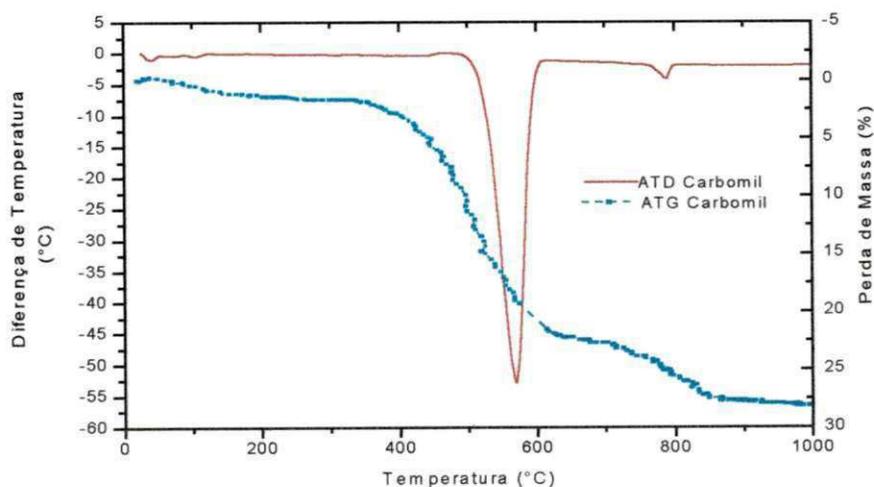


Figura 4.4 - Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra da cal Carbomil.

Analisando-se a curva de ATD da Figura 4.4, verifica-se que a cal Carbomil apresentou um pico endotérmico de pequena intensidade a 115°C, correspondente à perda de água livre, grande pico endotérmico a 580°C, característico da perda de hidroxilas do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e pico endotérmico de média intensidade a 780°C, característico da decomposição do CaCO_3 .

Analisando-se a curva de ATG da Figura 4.4, verifica-se que a cal Carbomil apresentou uma perda de massa de 1,49%, correspondente a água livre e adsorvida entre a temperatura ambiente e 245°C; perda de massa de 21,97% entre 245 e 730°C, correspondente à perda de hidroxilas e matéria orgânica; perda de massa de 4,54% entre 730 e 927°C, correspondente à decomposição do carbonato e outros componentes.

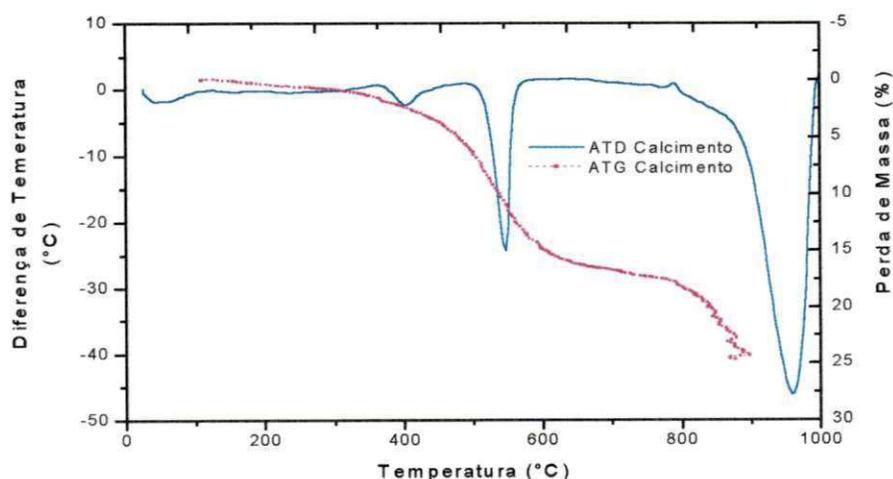


Figura 4.5 - Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra da cal Calcimento.

Analisando-se a curva de ATD da Figura 4.5, verifica-se que a cal Calcimento apresentou um pico endotérmico de pequena intensidade a 70°C, correspondente à perda de água livre, pico endotérmico a 410°C, correspondente à perda de hidroxilas do $\text{Mg}(\text{OH})_2$, pico endotérmico de média intensidade a 570°C, característico da perda de hidroxilas do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e grande pico endotérmico a 970°C, característico da decomposição do CaCO_3 e outros componentes.

Analisando-se a curva de ATG da Figura 4.5, verifica-se para a cal Calcimento uma perda de massa de 1,50%, correspondente a água livre e adsorvida entre a temperatura ambiente e 305°C; perda de massa de 14,45% entre 305 e 614°C, correspondente à perda de hidroxilas; perda de massa de 7,80% entre 614 e 900°C, correspondente à decomposição do carbonato e outros componentes.

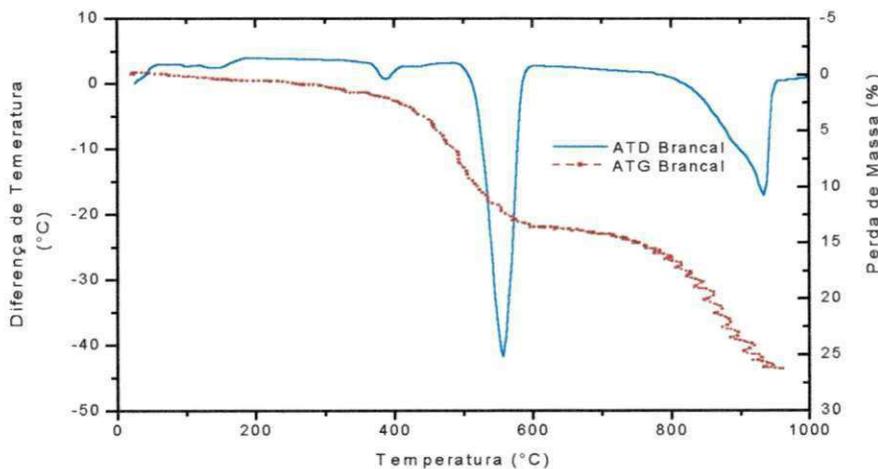


Figura 4.6 - Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra da cal Brancal.

Analisando-se a curva de ATD da Figura 4.6, verifica-se que a cal Brancal apresentou um pico endotérmico de pequena intensidade a 150°C, correspondente à perda de água livre, pico endotérmico a 390°C, correspondente à perda de hidroxilas do $Mg(OH)_2$, grande pico endotérmico a 560°C, característico da perda de hidroxilas do $Ca(OH)_2$ e pico endotérmico de média intensidade a 970°C, característico da decomposição do $CaCO_3$.

Analisando-se a curva de ATG da Figura 4.6, verifica-se para a cal Brancal uma perda de massa de 1,35%, correspondente a água livre e adsorvida entre a temperatura ambiente e 325°C; perda de massa de 12,33% entre 325 e 614°C, correspondente a perda de hidroxilas; perda de massa de 10,8% entre 614 e 915°C, correspondente a decomposição do carbonato e outros componentes.

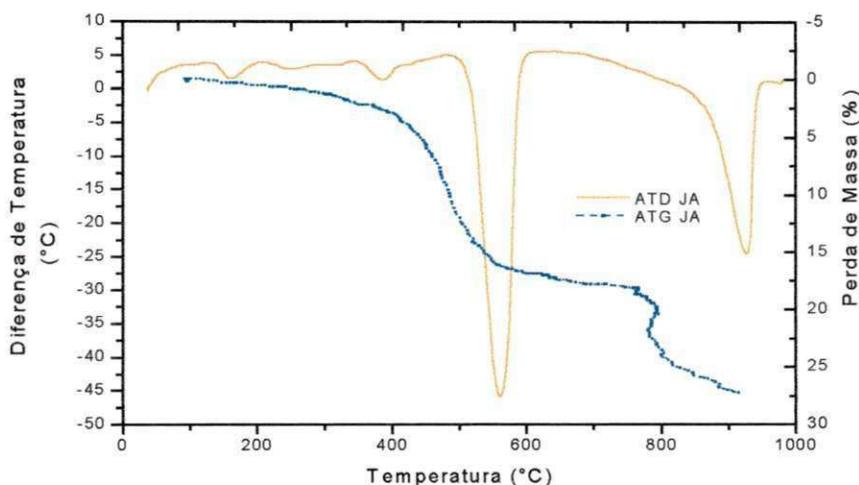


Figura 4.7 - Análise termodiferencial e termogravimétrica da amostra da cal JÁ.

Analisando-se a curva de ATD da Figura 4.7, verifica-se que a cal JA apresentou um pico endotérmico de pequena intensidade a 150°C, correspondente à perda de água livre, pico endotérmico a 390°C, correspondente à perda de hidroxilas do $Mg(OH)_2$, grande pico endotérmico a 570°C, característico da perda de hidroxilas do $Ca(OH)_2$ e pico endotérmico de média intensidade a 970°C, característico da decomposição do $CaCO_3$ e outros componentes.

Analisando-se a curva de ATG da Figura 4.7, verifica-se para a cal JA uma perda de massa de 2,25%, correspondente a água livre e adsorvida entre a temperatura ambiente e 345°C; perda de massa de 15,25% entre 345 e 590°C, correspondente à perda de hidroxilas; perda de massa de 10,55% entre 590 e 910°C, correspondente à decomposição do carbonato e outros componentes.

4.1.2.3 - Difração de raios-X

Na Figura 4.8 são apresentados os difratogramas de raios-X das seis amostras de cal e da amostra de resíduo proveniente do corte e polimento de granitos.

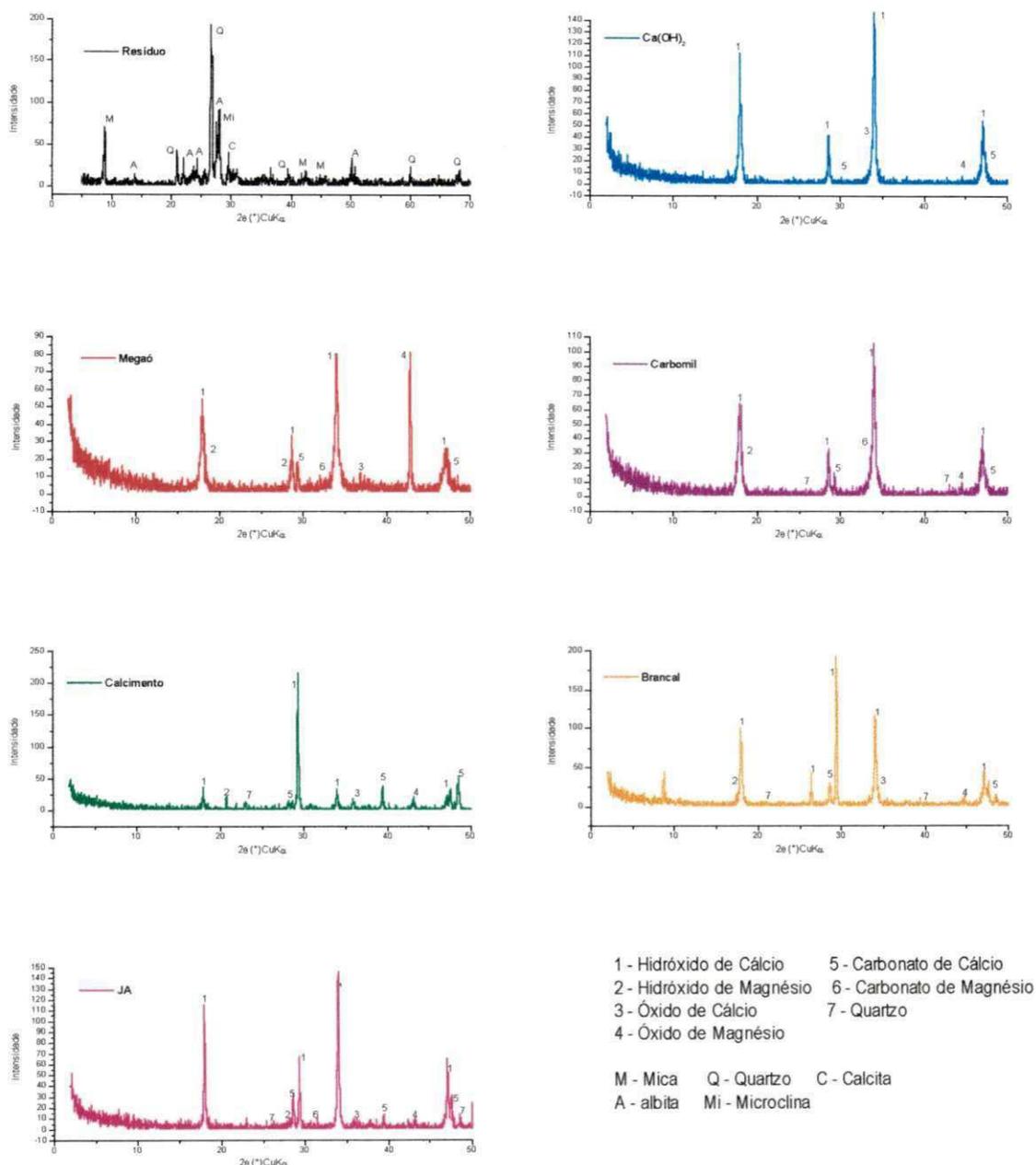


Figura 4.8 - Difratomogramas de raios-X da amostra de resíduo e das seis cais estudadas.

Analisando-se o difratograma da amostra de resíduo, observa-se presença de quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de $3,34 \text{ \AA}$, microclina (feldspato potássico- KAlSi_3O_8), caracterizado por $4,24$ e $3,20 \text{ \AA}$, albita (feldspato sódico- $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), caracterizado por $4,03$ e $3,19 \text{ \AA}$, em menor quantidade, mica moscovita, caracterizado por $10,04 \text{ \AA}$ e calcita (CaCO_3), caracterizado por $3,03$ e $2,13 \text{ \AA}$.

Observando-se as curvas das difrações de raios-X contidas na Figura 4.8 para as amostras das cals, verifica-se que o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 apresenta reflexões dos seguintes compostos: hidróxido de cálcio 4,92 Å, 3,08 Å, 2,63 Å e 1,93 Å, óxido de magnésio 2,08 Å e carbonato de cálcio 1,87 Å.

Para a cal Megaó, o difratograma apresenta reflexões dos seguintes compostos: hidróxido de cálcio 4,92 Å, 3,08 Å, 2,63 Å e 1,93 Å, hidróxido de magnésio 4,76 Å e 3,14 Å, óxido de cálcio 2,42 Å, óxido de magnésio 2,10 Å, carbonato de cálcio 3,00 Å e 1,87 Å, carbonato de magnésio 2,79 Å.

Para a cal Carbomil, o difratograma apresenta reflexões dos seguintes compostos: hidróxido de cálcio 4,92 Å, 3,08 Å, 2,63 Å e 1,93 Å, hidróxido de magnésio 4,76 Å, óxido de magnésio 2,08 Å, carbonato de cálcio 3,00 Å e 1,87 Å, carbonato de magnésio 2,79 Å e quartzo 3,37 Å.

Para a cal Calcimento, o difratograma apresenta reflexões dos seguintes compostos: hidróxido de cálcio 4,92 Å, 3,08 Å, 2,63 Å e 1,93 Å, hidróxido de magnésio 4,27 Å, óxido de cálcio 2,50 Å, óxido de magnésio 2,08 Å, carbonato de cálcio 3,08 Å, 2,29 Å e 1,87 Å e quartzo 4,21 Å.

Para a cal Brancal, o difratograma apresenta reflexões dos seguintes compostos: hidróxido de cálcio 4,92 Å, 3,08 Å, 3,36 Å, 2,63 Å e 1,93 Å, hidróxido de magnésio 4,96 Å, óxido de cálcio 2,59 Å, óxido de magnésio 2,08 Å, carbonato de cálcio 3,00 Å e 1,87 Å e quartzo 4,21 Å.

Para a cal JÁ, o difratograma apresenta reflexões dos seguintes compostos: hidróxido de cálcio 4,92 Å, 3,08 Å, 2,63 Å e 1,93 Å, hidróxido de magnésio 3,17 Å, óxido de cálcio 2,85 Å, óxido de magnésio 2,08 Å, carbonato

de cálcio $3,00 \text{ \AA}$, $2,28 \text{ \AA}$ e $1,87 \text{ \AA}$, carbonato de magnésio $2,85 \text{ \AA}$ e quartzo $3,35 \text{ \AA}$.

Os difratogramas confirmaram a presença, no resíduo, de quartzo e calcita, e nas cais de quartzo, óxidos de cálcio, óxidos de magnésio e carbonatos apresentados nos resultados da análise química.

A qualidade da cal a ser usada é uma das considerações mais importantes na manufatura de tijolos sílica-cal. Numa análise conjunta dos resultados de análise química, ATD, ATG e difração de raios-X, observa-se que as cais devem, preferencialmente, ser do tipo com elevado teor de cálcio, baixo teor de magnésia (não mais de 3% MgO), e baixos constituintes hidráulicos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ não mais que 5%). Todavia, cais de qualquer tipo podem ser usadas se estas são capacitadas e completamente adequadas antes do uso. Assim, das seis amostras de cais analisadas, foram escolhidas três amostras (Megaó, hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e Carbomil) para realização dos ensaios tecnológicos.

4.2 - Ensaios Tecnológicos

Nas Tabelas 4.5 a 4.36, estão apresentados os valores obtidos para RCS dos corpos de prova obtidos pela aditivação da cal com teores variando de 8% a 16%, em intervalos de 2%, mais proporções de resíduo-areia, variando de 0-100%, em intervalos de 20%. Os ensaios de RCS foram realizados seguindo duas sistemáticas: a primeira que consistiu na realização dos ensaios numa parte das amostras após autoclavagem, e numa outra parte após autoclavagem e carbonatação, e uma segunda, que consistiu na realização dos ensaios após somente o processo de carbonatação das amostras. Estes valores estão plotados nos gráficos das Figuras 4.9 a 4.25.

4.2.1 – RCS das amostras em função da porcentagem de 8% à 16% de cal após cura por autoclavagem e carbonatação

Nas Tabelas 4.5 a 4.9, são apresentados os diversos resultados de RCS nas diferentes composições e tempos após cura por autoclavagem e carbonatação.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.5 a 4.9, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência na RCS no que diz respeito à porcentagem de cal utilizada nas composições. Na Figura 4.9, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Megaó de 8% a 16% e tempos de cura de 0 a 120 dias.

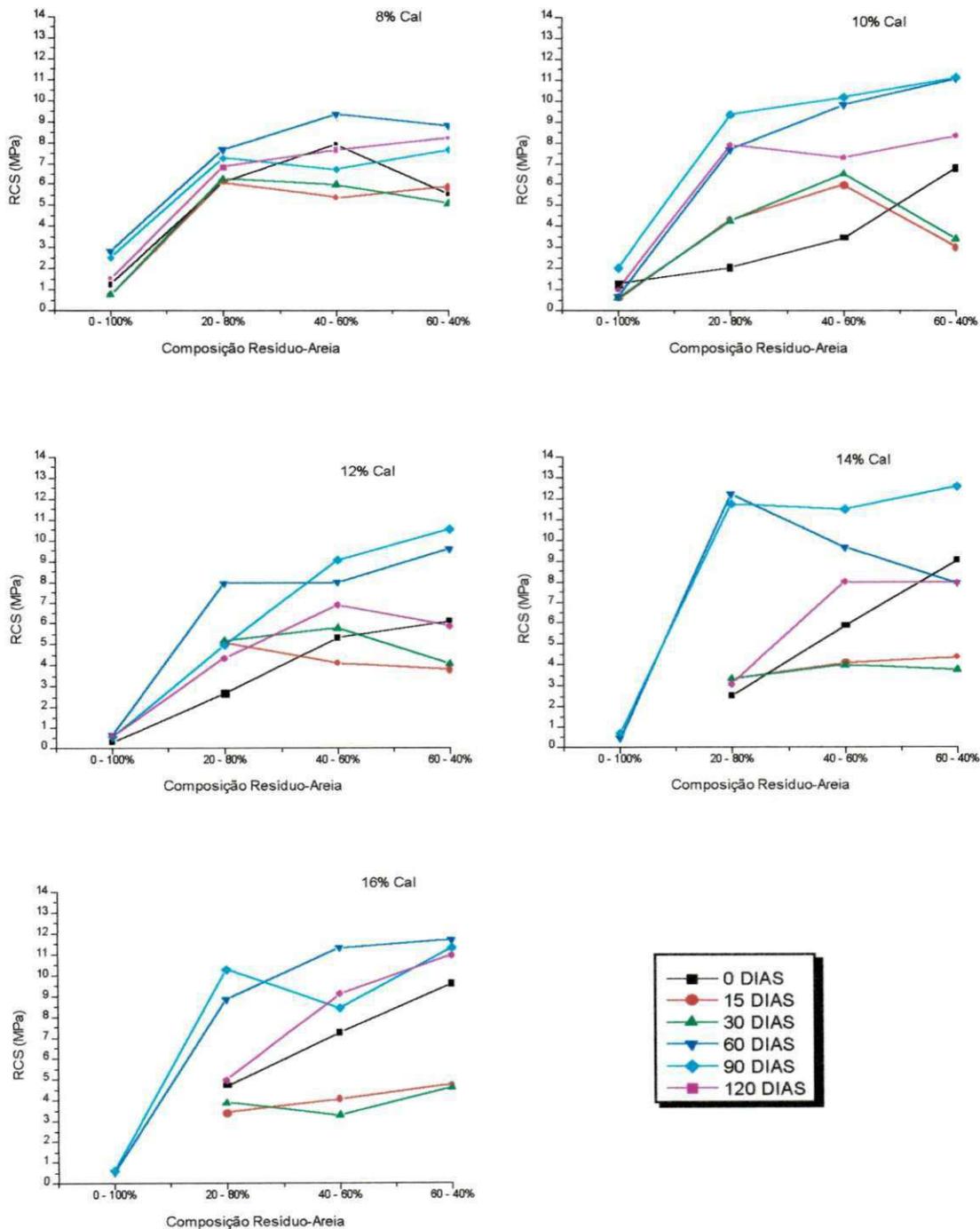


Figura 4.9 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Megaó de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.

a) para aditivação com 8% de cal Megaó

Observa-se que a composição (40 - 60%) resíduo – areia para a idade de 60 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (9,35 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,72 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 15 dias de cura, à 9,35 MPa, na composição de (40 - 60%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

b) para aditivação com 10% de cal Megaó

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (11,17 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,53 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 15 dias de cura, à 11,17 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias.

c) para aditivação com 12% de cal Megaó

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (10,49 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,25 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia ao zero dia de cura, à 10,49 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias. Vale ressaltar que para a composição (0-100%) resíduo-areia e os períodos de cura de 15 e 30 dias, ocorreram problemas após autoclavagem, ocasionados provavelmente pela presença do óxido de magnésio (MgO) na cal, o que fizeram os corpos romperem-se antes do período de cura por expansão.

d) para aditivação com 14% de cal Megaó

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (12,56 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,41 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 60 dias de cura, à 12,56 MPa, na composição de (60 - 40%)

resíduo – areia para a idade de 90 dias. Vale ressaltar que para a composição (0-100%) resíduo-areia e os períodos de cura de 0, 15 e 30 dias, ocorreram problemas após autoclavagem, ocasionados provavelmente pela presença do óxido de magnésio (MgO) na cal, o que fizeram os corpos romperem-se antes do período de cura por expansão.

e) para aditivação com 16% de cal Megaó

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (11,68 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,51 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 60 dias de cura, à 11,68 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias. Vale ressaltar que para a composição (0-100%) resíduo-areia e os períodos de cura de 0, 15 e 30 dias, ocorreram problemas após autoclavagem, ocasionados provavelmente pela presença do óxido de magnésio (MgO) na cal, o que fizeram os corpos romperem-se antes do período de cura por expansão.

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 14% de cal Megaó foi a que apresentou maior valor de RCS (12,56 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias. Comparando-se este resultado com os valores máximos apresentados por MACHADO (1982) para diferentes composições de areia e utilizando cais dolomíticas, observou-se que foi superior, à exceção da composição-1 com areia do Marinho. Para diferentes composições de areia e utilizando-se cais calcíticas, observou-se que os resultados foram similares.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.5 a 4.9, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência na RCS no que diz respeito à porcentagem de cal utilizada nas composições. Na Figura 4.10, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 de 8% a 16% e tempos de cura de 0 a 120 dias.

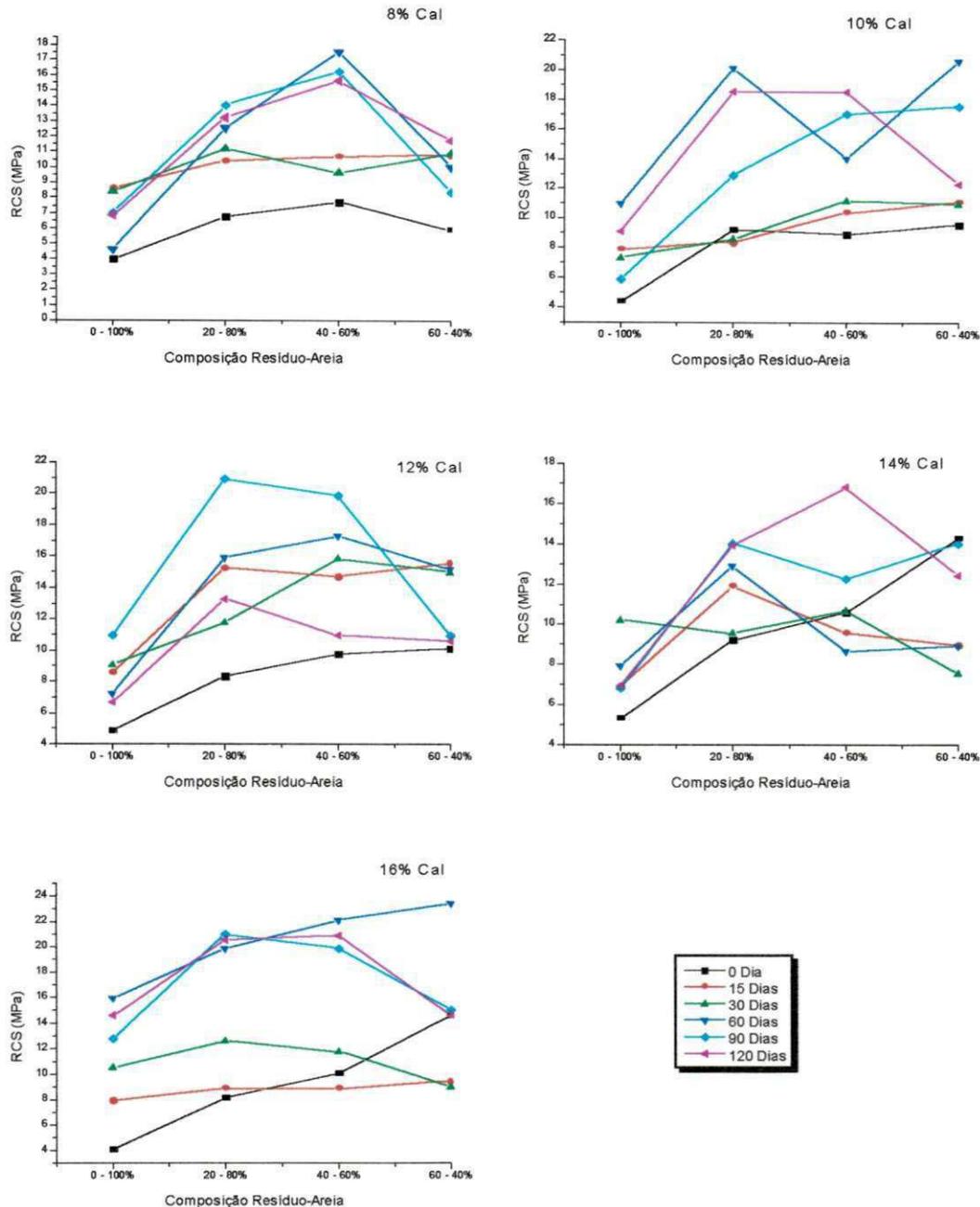


Figura 4.10 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.

a) para aditivção com 8% de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Observa-se que a composição (40 - 60%) resíduo – areia para a idade de 60 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (17,57 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 3,99 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia para zero dia de cura, à 17,57 MPa, na composição de (40 - 60%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

b) para aditivação com 10% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (20,63 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 4,38 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia para zero dia de cura, à 20,63 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

c) para aditivação com 12% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2

Observa-se que a composição (20 - 80%) resíduo – areia para a idade de 90 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (20,88 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 4,89 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia para zero dia de cura, à 20,88 MPa, na composição de (20 - 80%) resíduo – areia para a idade de 90 dias.

d) para aditivação com 14% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2

Observa-se que a composição (40 - 60%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (16,81 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 5,33 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia para zero dia de cura, à 16,81 MPa, na composição de (40 - 60%) resíduo – areia para a idade de 120 dias.

e) para aditivação com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (23,43 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 4,11 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia para zero dia de cura, à 23,43 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 foi a que apresentou maior valor de RCS (23,43 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia, para a idade de 60 dias. Comparando-se os resultados com os valores máximos apresentados por MACHADO (1982) para diferentes composições de

areia e utilizando cais calcínicas e dolomíticas, observou-se que as resistências mecânicas foram superiores.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.5 a 4.9, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência na RCS no que diz respeito à porcentagem de cal utilizada nas composições. Na Figura 4.11, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Carbomil de 8% a 16% e tempos de cura de 0 a 120 dias.

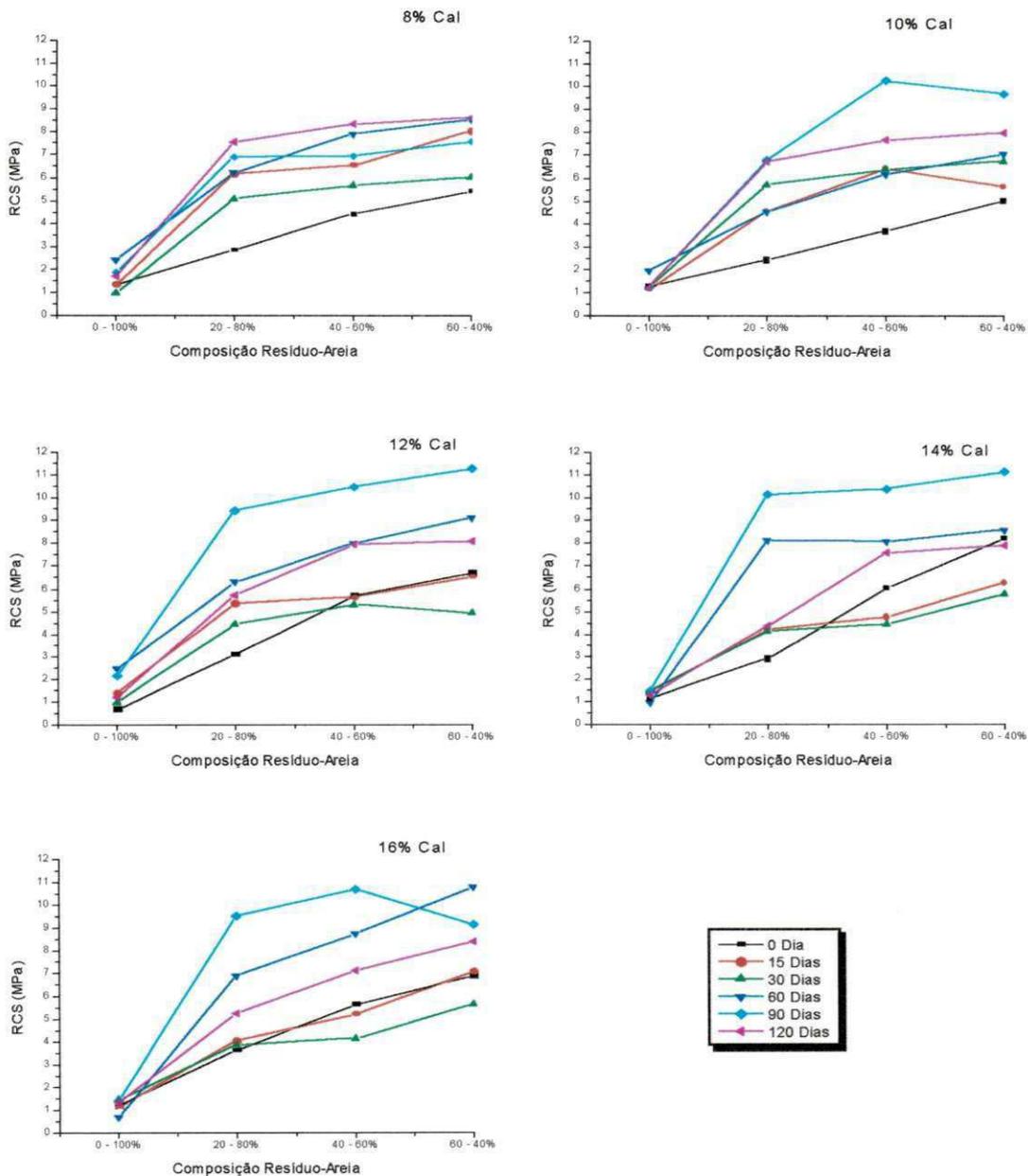


Figura 4.11 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Carbomil de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.

a) para aditivação com 8% de cal Carbomil

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (8,62 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,95 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia para 30 dias de cura, à 8,62 MPa na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

b) para aditivação com 10% de cal Carbomil

Observa-se que a composição (40 - 60%) resíduo – areia para a idade de 90 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (10,29 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 1,15 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia para 15 dias de cura, à 10,29 MPa na composição de (40 - 60%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

c) para aditivação com 12% de cal Carbomil

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (11,29 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,70 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia para zero dia de cura, à 11,29 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias.

d) para aditivação com 14% de cal Carbomil

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (11,12 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,93 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia para 60 dias de cura, à 11,12 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias.

e) para aditivação com 16% de cal Carbomil

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (10,78 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,70 MPa, na composição de (0 - 100%)

resíduo-areia para 60 dias de cura, à 10,78 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 12% de cal Carbomil foi a que apresentou maior valor de RCS (11,29 MPa) na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias. Comparando-se este resultado com os valores máximos apresentados por MACHADO (1982) para diferentes composições de areia e utilizando cais dolomíticas, observou-se que foi superior, à exceção da composição-1 com areia do Marinho. Para diferentes composições de areia e utilizando cais calcíticas observou-se que os resultados foram similares.

Pode-se avaliar que tanto a cal Megaó como a cal Carbomil, obtiveram RCS máximas semelhantes, para idênticas composições resíduo – areia.

Dentre as três cais estudadas nas diferentes composições resíduo – areia e tempos de cura, observa-se que a amostra com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 foi a que apresentou maior valor de RCS (23,43 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias, após autoclavagem e carbonatação.

4.2.2 – RCS das amostras em função da porcentagem de 8% à 16% de cal após cura por carbonatação

Nas Tabelas 4.10 a 4.14, são apresentados os diversos resultados de RCS, nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.10 a 4.14, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência na RCS no que diz respeito à porcentagem de cal utilizada nas composições. Na Figura 4.12, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Megaó de 8% a 16% e tempos de cura de 15 a 120 dias.

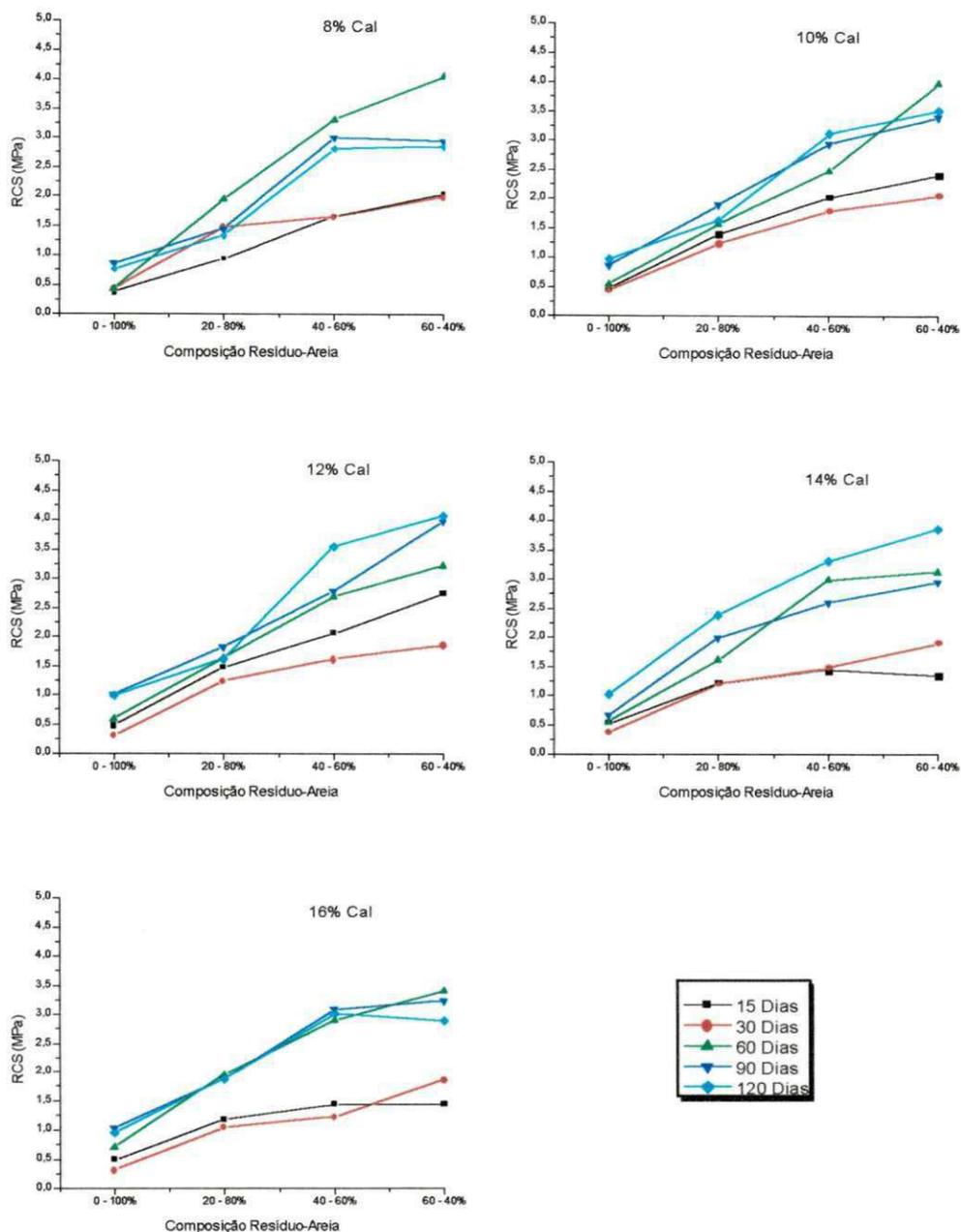


Figura 4.12 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Megaó de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação.

a) para aditivção com 8% de cal Megaó

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (4,05 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,37 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 15 dias de cura, à 4,05 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

b) para aditivação com 10% de cal Megaó

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (3,99 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,42 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 30 dias de cura, à 3,99 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

c) para aditivação com 12% de cal Megaó

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (4,06 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,31 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia ao 30 dia de cura, à 4,06 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias.

d) para aditivação com 14% de cal Megaó

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (3,85 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,36 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 30 dias de cura, à 3,85 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias.

e) para aditivação com 16% de cal Megaó

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (3,39 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,31 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 30 dias de cura, à 3,39 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 12% de cal Megaó foi a que apresentou maior valor de RCS (4,06 MPa) na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia, para a idade de 120 dias. Comparando-se este resultado com os valores máximos apresentados por MACHADO (1982) para diferentes composições de areia, e utilizando cais calcínicas e dolomíticas, observou-se que foram inferiores.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.10 a 4.14, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência na RCS, no que diz respeito à porcentagem de cal utilizada nas composições. Na Figura 4.13, são encontrados os valores obtidos para RCS, das composições estudadas para as porcentagens de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de 8% a 16% e tempos de cura de 15 a 120 dias.

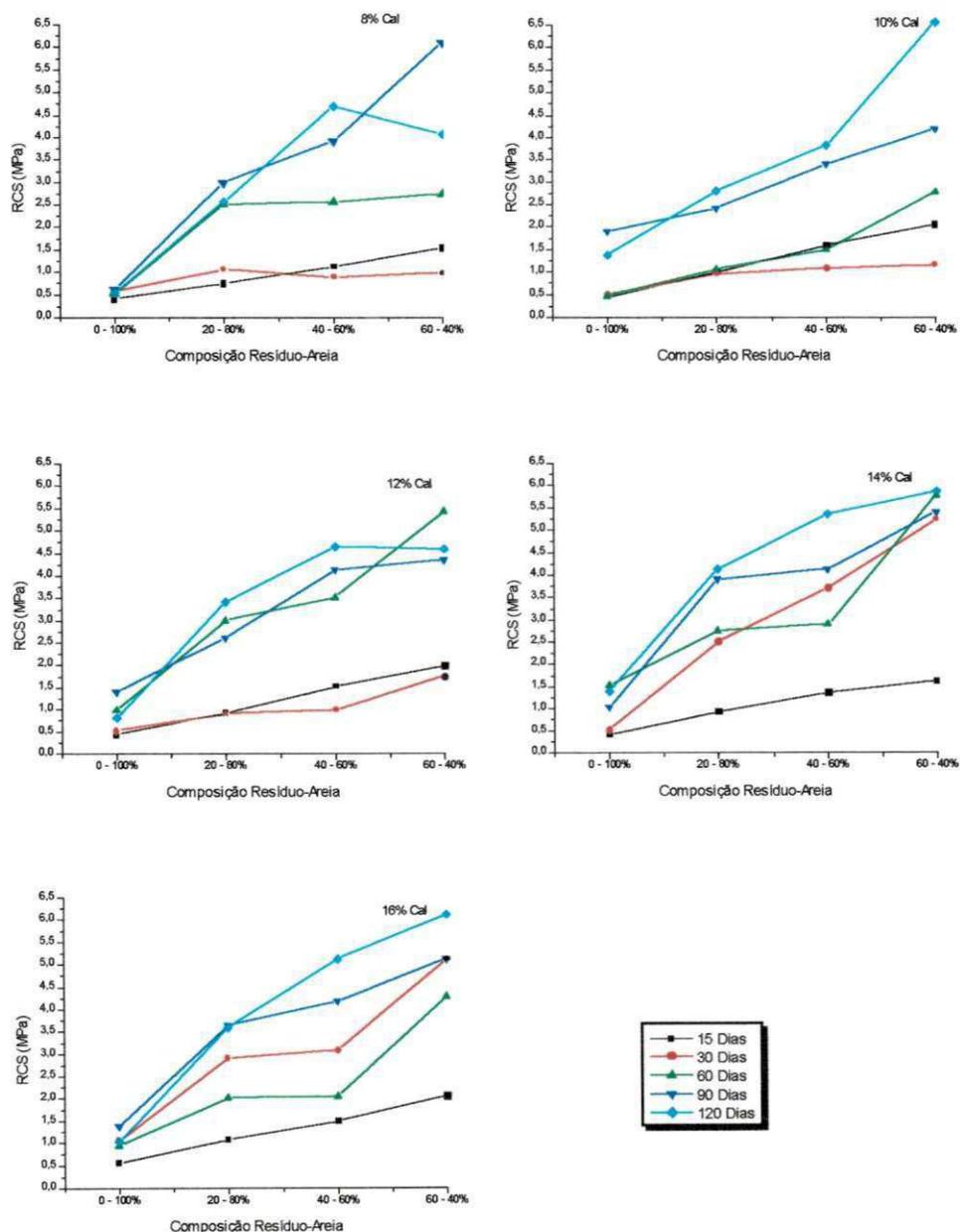


Figura 4.13 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias após, cura por carbonatação.

a) para aditivação com 8% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (6,11 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,42 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 15 dias de cura, à 6,11 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias.

b) para aditivação com 10% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (6,57 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,44 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 15 dias de cura, à 6,57 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias.

c) para aditivação com 12% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2

Observa-se que a composição (40 - 60%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (4,63 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,44 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 15 dias de cura, à 4,63 MPa, na composição de (40 - 60%) resíduo – areia para a idade de 120 dias.

d) para aditivação com 14% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (5,86 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,42 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 15 dias de cura, à 5,86 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias.

e) para aditivação com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (6,11 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,56 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 15 dias de cura, à 6,11 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias.

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 10% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 foi a que apresentou maior valor de RCS (6,57 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia, para a idade de 120 dias. Comparando-se este resultado com os valores máximos apresentados por MACHADO (1982), para diferentes composições de areia e utilizando cals calcínicas e dolomíticas, observou-se que as resistências mecânicas foram inferiores.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.10 a 4.14, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência na RCS no que diz respeito à porcentagem de cal utilizada nas composições. Na Figura 4.14, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Carbomil de 8% a 16% e tempos de cura de 15 a 120 dias.

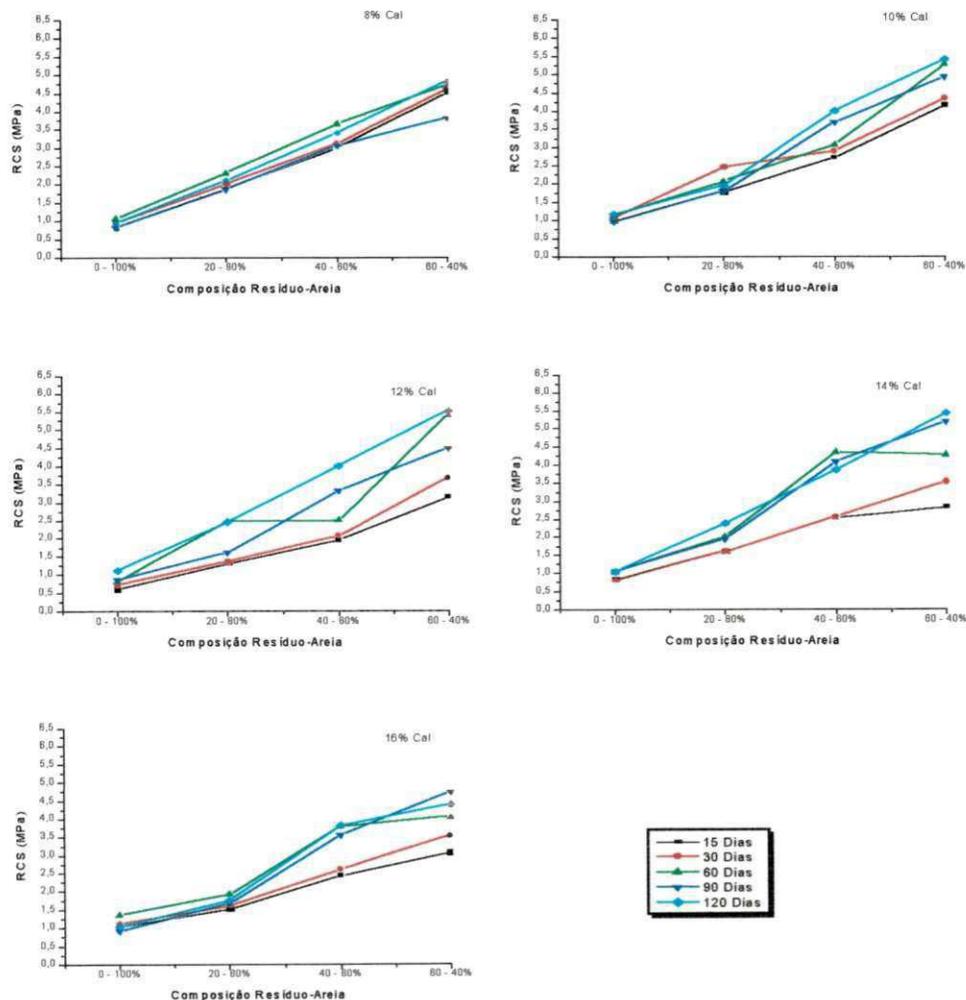


Figura 4.14 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Carbomil de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação.

a) para aditivção com 8% de cal Carbomil

Observa-se que a composioão (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (4,83 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,81 MPa, na composioão de (0 - 100%) resíduo-areia aos 15 dias de cura, à 4,83 MPa, na composioão de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias.

b) para aditivção com 10% de cal Carbomil

Observa-se que a composioão (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (5,43 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,95 MPa, na composioão de (0 - 100%) resíduo-areia aos 90 dias de cura, à 5,43 MPa, na composioão de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias.

c) para aditivção com 12% de cal Carbomil

Observa-se que a composioão (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (5,40 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,61 MPa, na composioão de (0 - 100%) resíduo-areia aos 15 dias de cura, à 5,40 MPa, na composioão de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias.

d) para aditivção com 14% de cal Carbomil

Observa-se que a composioão (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (5,43 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,80 MPa, na composioão de (0 - 100%) resíduo-areia aos 30 dias de cura, à 5,43 MPa, na composioão de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias.

e) para aditivação com 16% de cal Carbomil

Observa-se que a composição (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias foi a que apresentou maior valor de RCS (4,74 MPa). Para esta porcentagem de cal a RCS variou de 0,90 MPa, na composição de (0 - 100%) resíduo-areia aos 90 dias de cura, à 4,74 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 90 dias.

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 10% e 14% de cal Carbomil foi a que apresentou maior valor de RCS (5,43 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias. Comparando-se este resultado com os valores máximos apresentados por MACHADO (1982), para diferentes composições de areia, e utilizando-se cais calcínicas e dolomíticas, observou-se que as resistências mecânicas foram inferiores.

Dentre as três cais estudadas nas diferentes composições resíduo – areia e tempos de cura, observa-se que a amostra com 10% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 foi a que apresentou maior valor de RCS (6,57 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 120 dias, após carbonatação.

4.2.3 – RCS das amostras para os tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação

Nas Tabelas 4.15 a 4.20, são apresentados os diversos resultados de RCS para os tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação, nas diferentes composições e porcentagem de cal.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.15 a 4.20, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência dos tempos de cura na RCS para as composições. Na Figura 4.15, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Megaó de 8% a 16%, e tempos de cura de 0 a 120 dias.

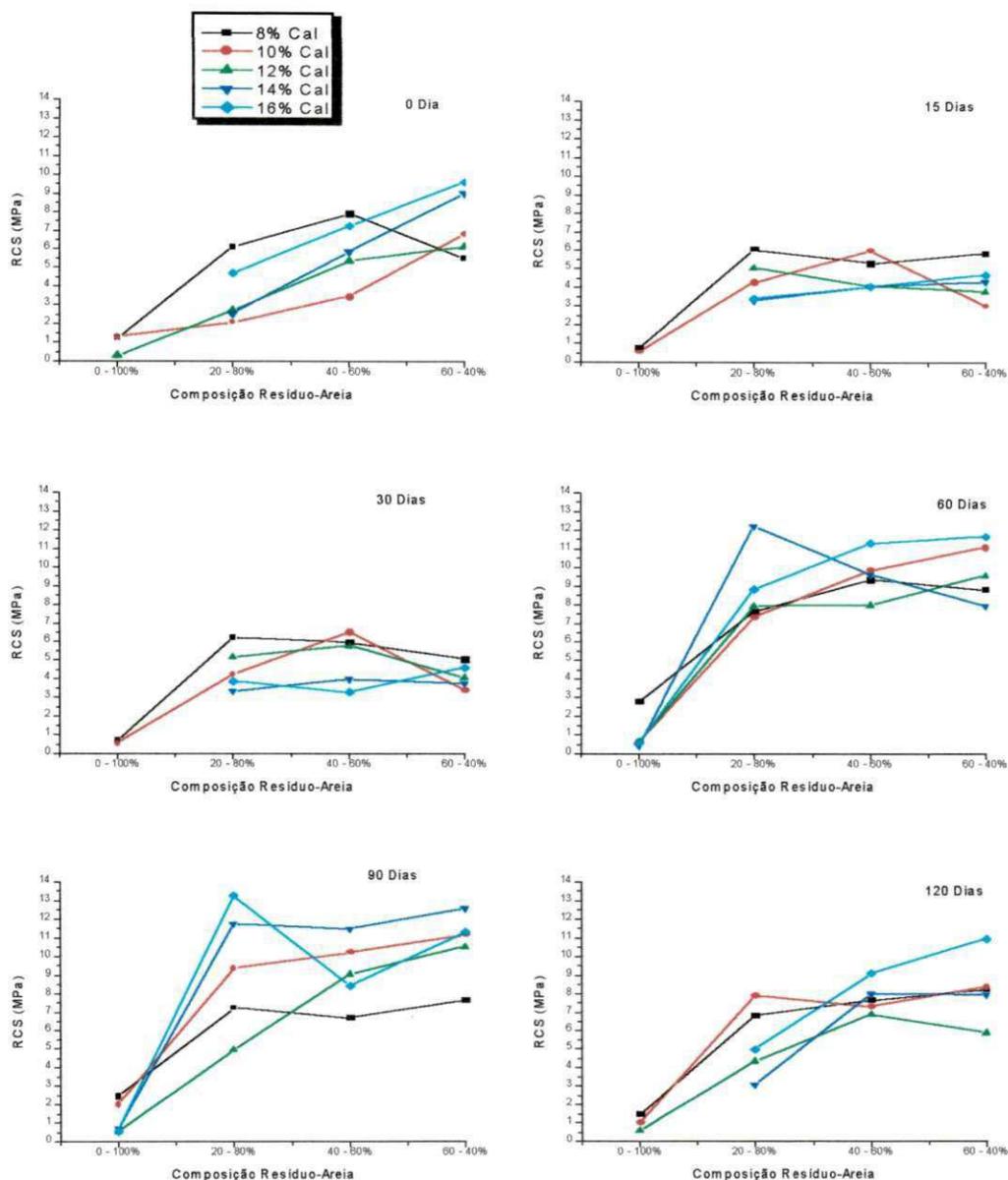


Figura 4.15 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Megaó de 8% a 16%, e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.

a) para zero dia de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 9,64 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 16% de cal Megaó. Vale ressaltar que para a composição (0 - 100%) resíduo – areia e porcentagens de cal de 14 e 16%, ocorreram problemas

após autoclavagem, ocasionados provavelmente pela presença do óxido de magnésio (MgO) na cal, o que fizeram os corpos romperem-se antes do período de cura por expansão.

b) para 15 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 6,08 MPa, na composição de (20 - 80%) resíduo – areia, com 8% de cal Megaó. Vale ressaltar que para a composição (0 - 100%) resíduo – areia e porcentagens de cal de 12, 14 e 16%, ocorreram problemas após autoclavagem, ocasionados provavelmente pela presença do óxido de magnésio (MgO) na cal, o que fizeram os corpos romperem-se antes do período de cura por expansão.

c) para 30 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS variaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 6,52 MPa, na composição de (40 - 60%) resíduo – areia com 10% de cal Megaó. Vale ressaltar que para a composição (0 - 100%) resíduo – areia e porcentagens de cal de 12, 14 e 16%, ocorreram problemas após autoclavagem, ocasionados provavelmente pela presença do óxido de magnésio (MgO) na cal, o que fizeram os corpos romperem-se antes do período de cura por expansão.

d) para 60 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas, com exceção da composição com 14% de cal. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 12,22 MPa, na composição de (20 - 80%) resíduo – areia com 14% de cal Megaó.

e) para 90 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas, com exceção das composições com 8% e 16% de cal. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 12,56 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia com 14% de cal Megaó.

f) para 120 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura a maior RCS foi de 10,93 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 16% de cal Megaó. Vale ressaltar que para a composição (0 - 100%) resíduo – areia e porcentagens de cal de 14 e 16%, ocorreram problemas após autoclavagem, ocasionados provavelmente pela presença do óxido de magnésio (MgO) na cal, o que fizeram os corpos romperem-se antes do período de cura por expansão.

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 14% de cal Megaó foi a que apresentou maior valor de RCS (12,56 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia, para a idade de 90 dias.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.15 a 4.20, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência dos tempos de cura na RCS para as composições. Na Figura 4.16, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 de 8% a 16% e tempos de cura de 0 a 120 dias.

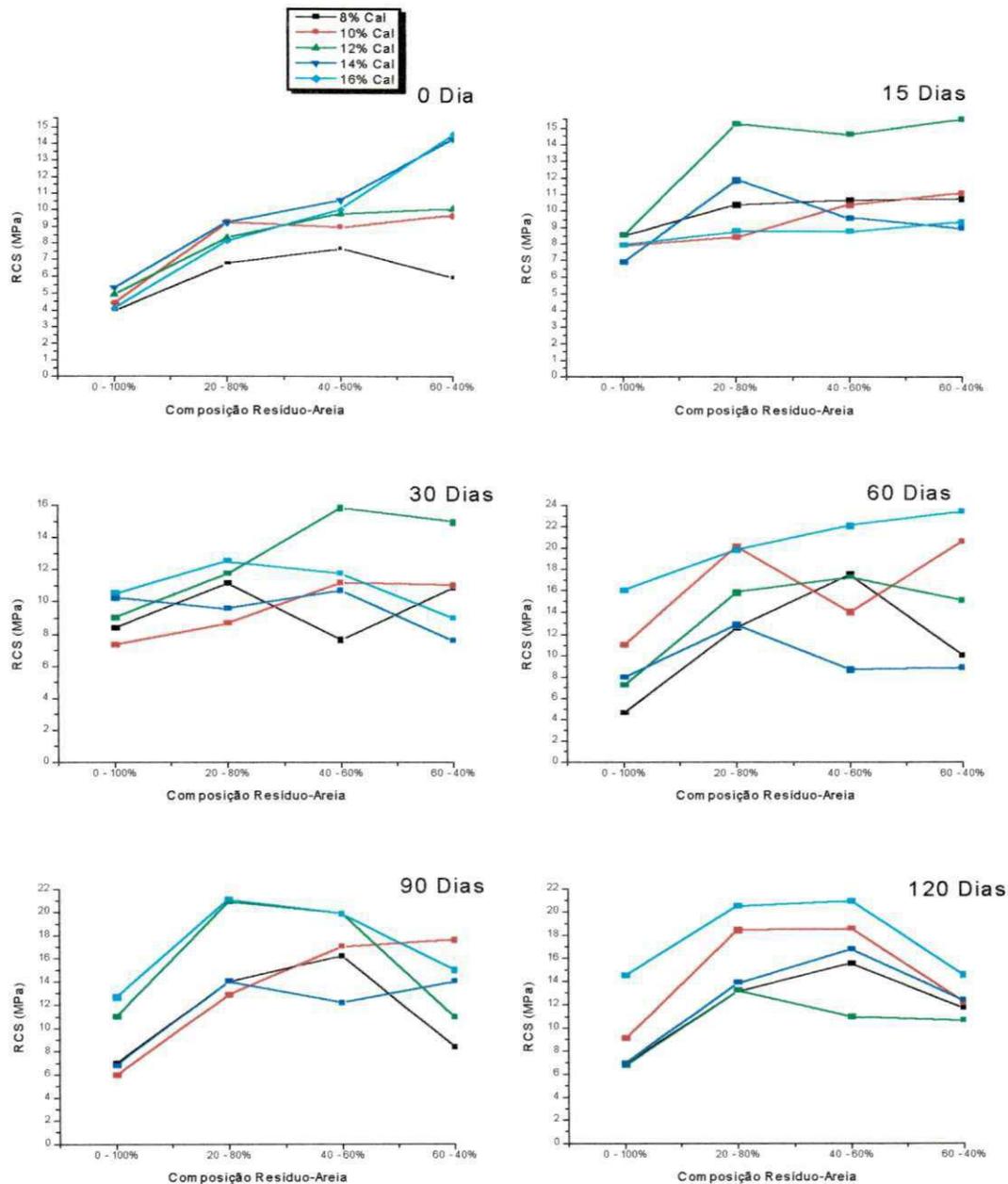


Figura 4.16 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.

a) para zero dia de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas, com exceção da composição com 8% de cal. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 14,59 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

b) para 15 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas, com exceção da composição com 14% de cal. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de, 15,55 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 12% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

c) para 30 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS variaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 15,82 MPa, na composição de (40 - 60%) resíduo – areia, com 12% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

d) para 60 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS variaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 23,43 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

e) para 90 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS variaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de, 21,05 MPa, na composição de (20 - 80%) resíduo – areia, com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

f) para 120 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS variaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 20,88 MPa, na composição de (40 - 60%) resíduo – areia, com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 foi a que

apresentou maior valor de RCS (23,43 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia, para a idade de 60 dias.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.15 a 4.20, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência dos tempos de cura na RCS para as composições. Na Figura 4.17, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal carbomil de 8% a 16% e tempos de cura de 0 a 120 dias.

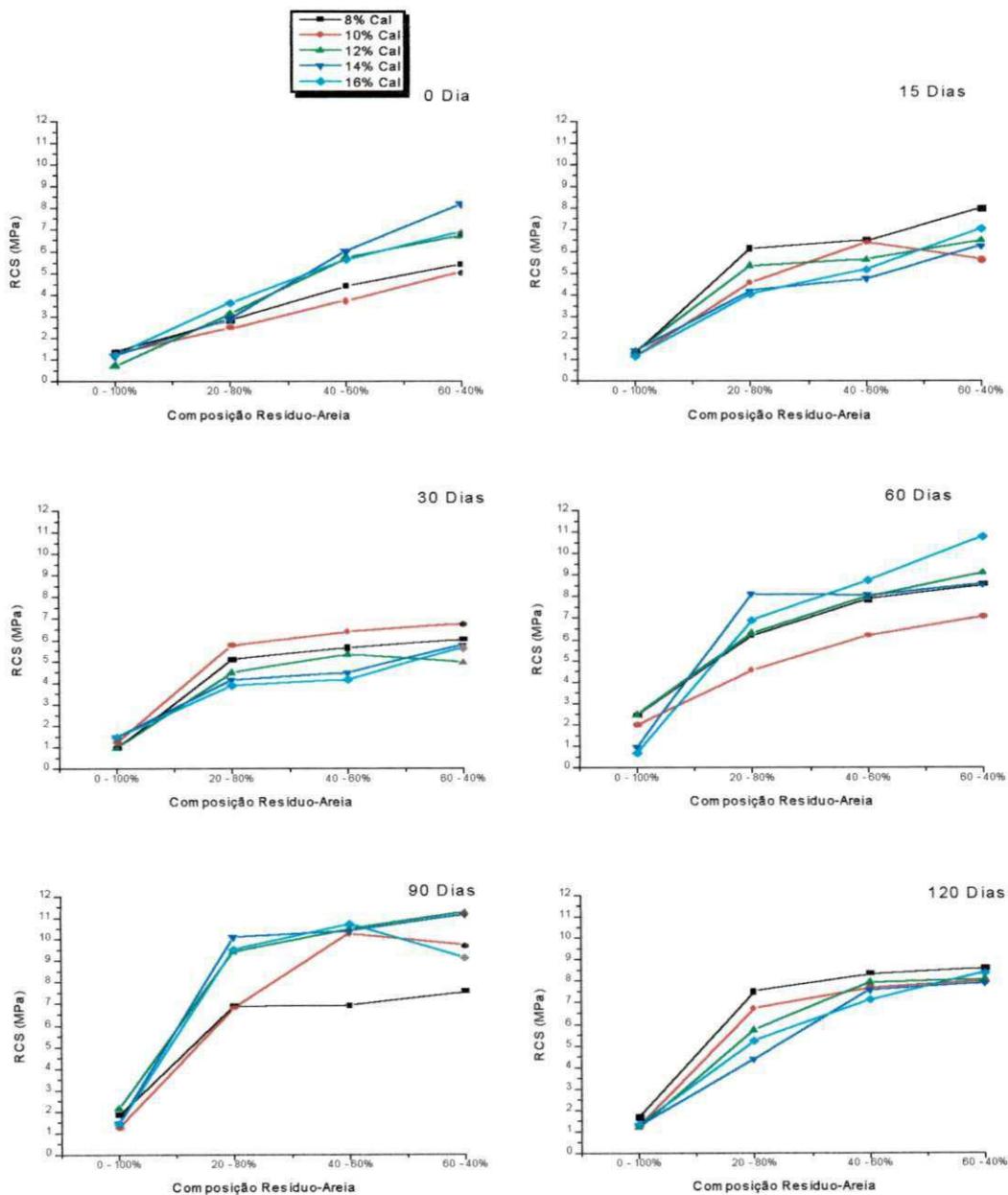


Figura 4.17 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal carbomil de 8% a 16% e tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação.

a) para zero dia de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 8,20 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 14% de cal Carbomil.

b) para 15 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram gradativamente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 8,03 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 8% de cal Carbomil.

c) para 30 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 6,74 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 10% de cal Carbomil.

d) para 60 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 10,78 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 16% de cal Carbomil.

e) para 90 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 11,29 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 12% de cal Carbomil.

f) para 120 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 8,62 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 8% de cal Carbomil.

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 12% de cal Carbomil foi a que apresentou maior valor de RCS (11,29 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia, para a idade de 90 dias.

4.2.4 – RCS das amostras para os tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação

Nas Tabelas 4.21 a 4.25, são apresentados os diversos resultados de RCS para os tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação, nas diferentes composições e porcentagens de cal.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.21 a 4.25, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência dos tempos de cura na RCS para as composições. Na Figura 4.18, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Megaó de 8% a 16% e tempos de cura de 15 a 120 dias.

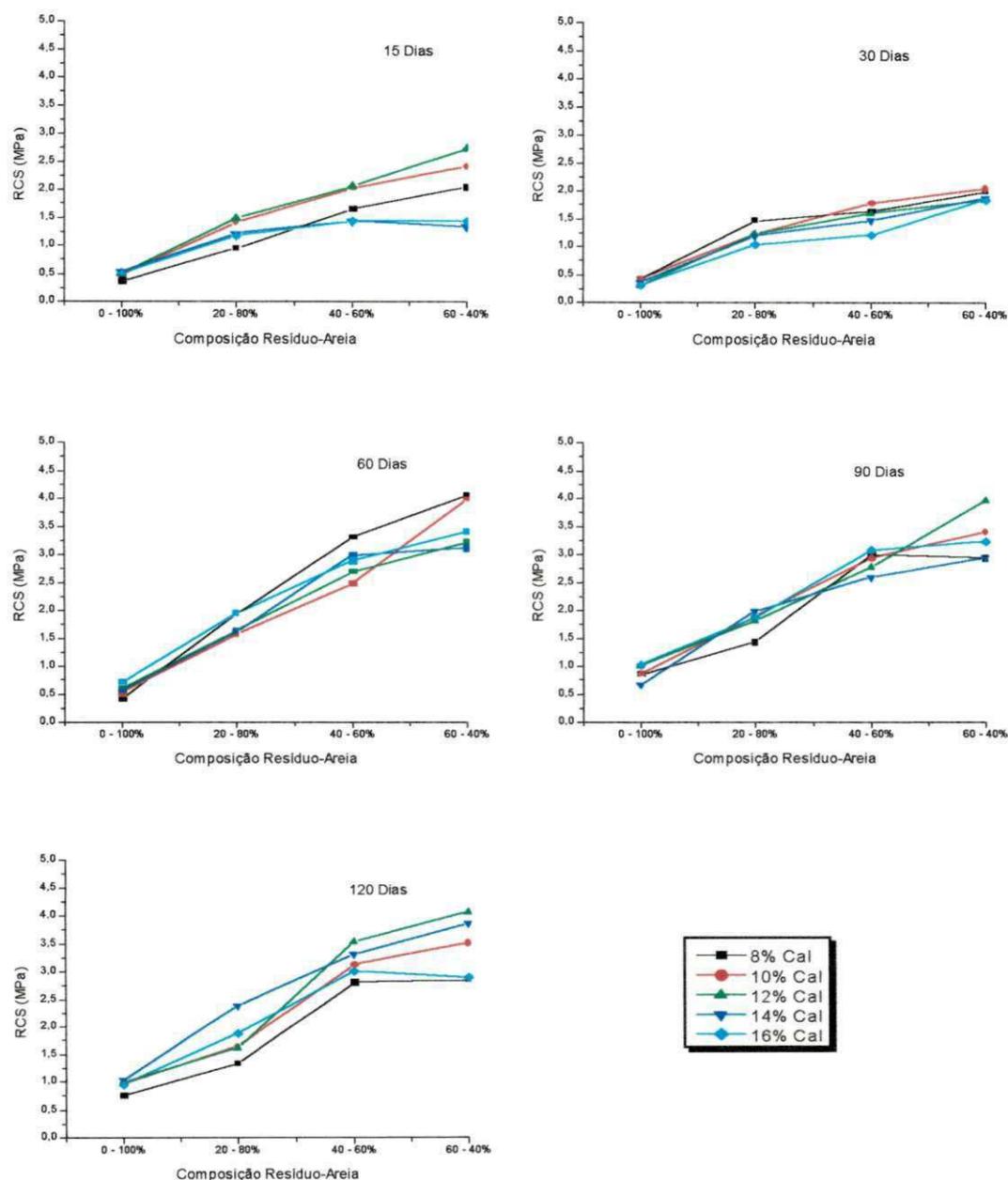


Figura 4.18 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Megaó de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação.

a) para 15 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram gradativamente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 2,73 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 12% de cal Megaó.

b) para 30 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram gradativamente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 2,06 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 10% de cal Megaó.

c) para 60 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 4,05 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 8% de cal Megaó.

d) para 90 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 3,97 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 12% de cal Megaó.

e) para 120 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram gradativamente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 4,06 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 12% de cal Megaó.

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 12% de cal Megaó foi a que apresentou maior valor de RCS (4,06 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia, para a idade de 120 dias.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.21 a 4.25, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência dos tempos de cura na RCS para as composições. Na Figura 4.19, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 de 8% a 16% e tempos de cura de 15 a 120 dias.

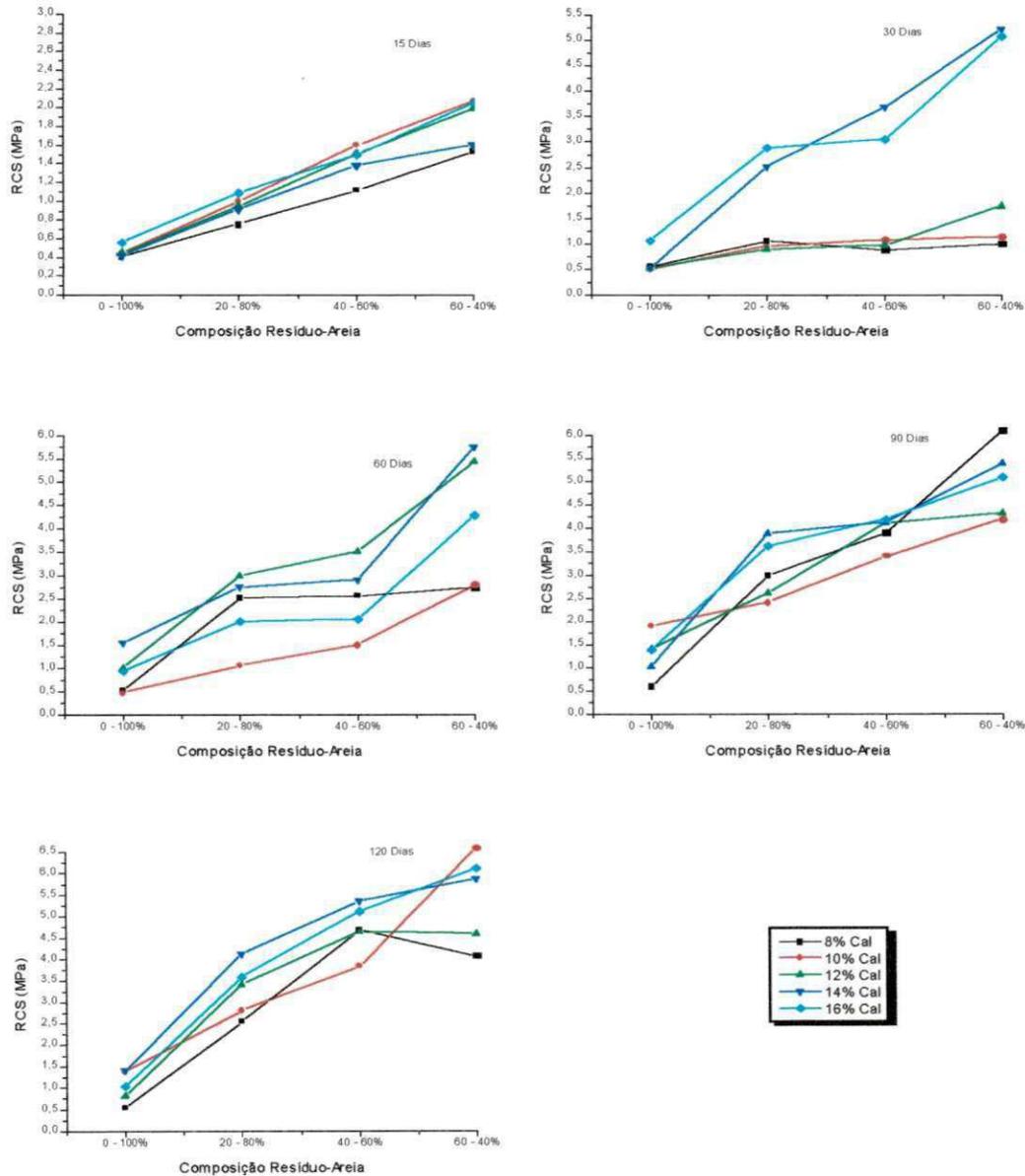


Figura 4.19 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação.

a) para 15 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal,

os valores de RCS aumentaram gradativamente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 2,07 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 10% hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

b) para 30 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram gradativamente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 5,23 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 14% hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

c) para 60 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 5,76 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 14% hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

d) para 90 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 6,11 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 8% hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

e) para 120 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram gradativamente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 6,57 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 10% hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 10% de hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , foi a que

apresentou maior valor de RCS (6,57 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia, para a idade de 120 dias.

A apresentação dos resultados das Tabelas 4.21 a 4.25, na forma de gráficos, permite uma melhor avaliação da influência dos tempos de cura na RCS para as composições. Na Figura 4.20, são encontrados os valores obtidos para RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Carbomil de 8% a 16% e tempos de cura de 15 a 120 dias.

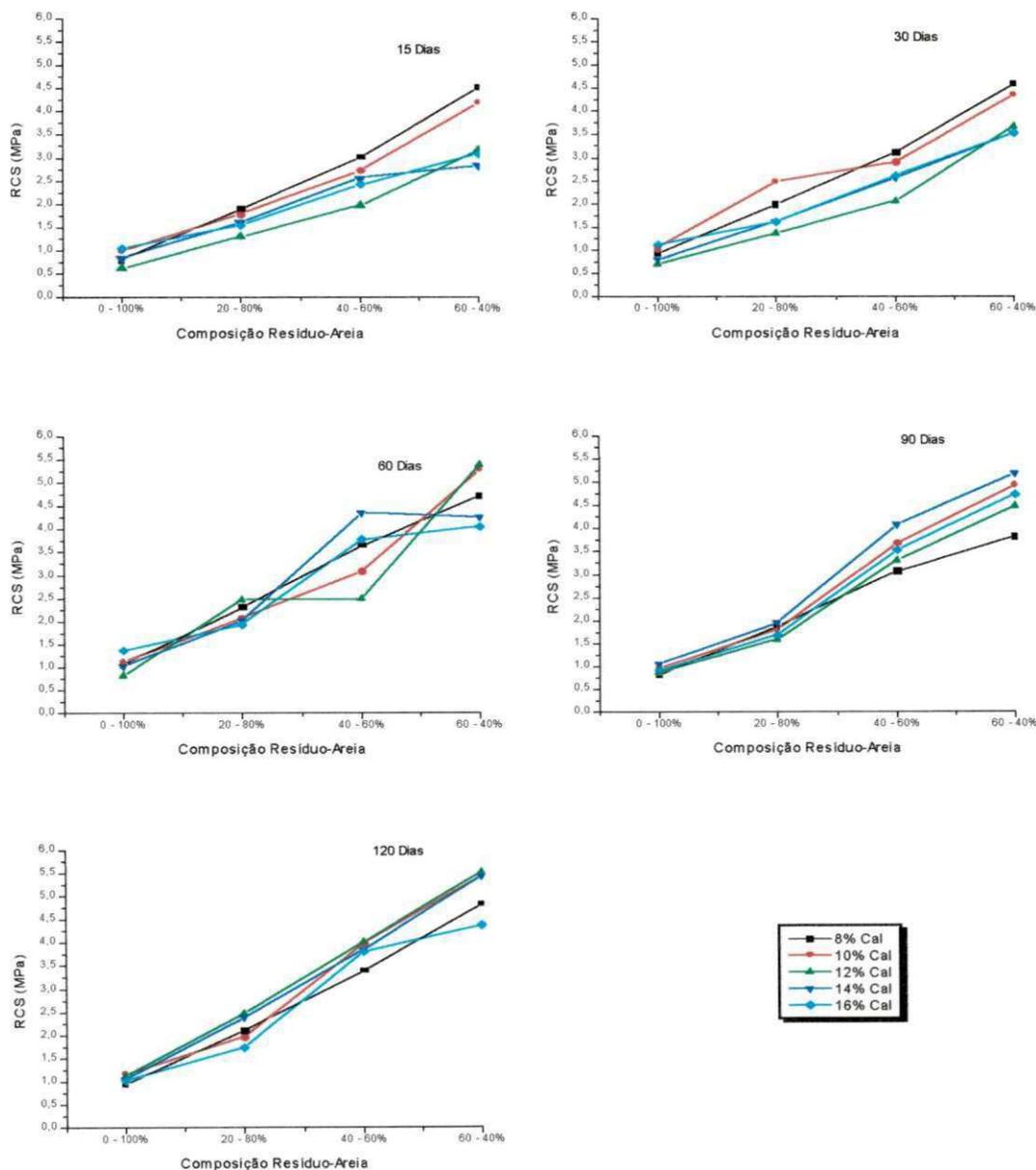


Figura 4.20 – RCS das composições estudadas para as porcentagens de cal Carbomil de 8% a 16% e tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação.

a) para 15 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram gradativamente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 4,52 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 8% de cal Carbomil.

b) para 30 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram gradativamente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 4,60 MPa, na composição de (60 - 40%) resíduo – areia, com 8% de cal Carbomil.

c) para 60 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 5,40 MPa, na composição (60 - 40%) resíduo – areia, com 12% de cal Carbomil.

d) para 90 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram substancialmente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 5,18 MPa, na composição (60 - 40%) resíduo – areia, com 14% de cal Carbomil.

e) para 120 dias de cura

Observa-se que os resultados das RCS aumentaram, à medida que a porcentagem de resíduo foi aumentando nas composições estudadas. Nesta cal, os valores de RCS aumentaram gradativamente de uma porcentagem de resíduo para outra. Para este tempo de cura, a maior RCS foi de 5,52 MPa, na composição (60 - 40%) resíduo – areia, com 12% de cal Carbomil.

Numa análise conjunta dos resultados das propriedades físico-mecânicas, observa-se que a amostra com 12% de cal Carbomil foi a que apresentou maior valor de RCS (5,52 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia, para a idade de 120 dias.

Comparando-se os resultados de RCS com os valores máximos apresentados por MACHADO (1982) para diferentes composições de areia e utilizando cal calcínicas e dolomíticas, observou-se que ao utilizarem-se amostras com hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, as resistências mecânicas foram superiores, enquanto que nas demais amostras, utilizando as cals Megaó e Carbomil, os resultados foram similares.

A cal Megaó e a Carbomil apresentaram maiores valores das RCS nas composições de (60 – 40 %) resíduo – areia, sendo os valores similares para as duas cals. Para as demais composições as maiorias dos resultados evidenciaram comportamentos mecânicos inferiores aos das composições citadas acima.

Para as composições (100 - 0% e 80 – 20%) resíduo – areia, ocorreram problemas após moldagem, ocasionados provavelmente pela granulometria e forma das partículas do resíduo e da cal, o que fizeram os corpos romperem-se após moldagem.

Numa análise conjunta dos resultados obtidos das amostras autoclavados e carbonatados e das amostras somente carbonatados, as amostras autoclavados e carbonatadas apresentaram maiores valores de RCS nas

composições estudadas, sendo que a amostra com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 apresentou o maior valor de RCS (23,43 MPa) na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia para a idade de 60 dias

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Dos ensaios realizados de caracterização e tecnológicos, para as diversas composições resíduo – areia, com porcentagens de cal variando de 8% a 16% e diversos tempos de cura, obtiveram-se diferentes comportamentos, sendo possível obter-se as conclusões a seguir descritas.

5.1 - Resíduo

O resíduo estudado tem proporcionado grandes vantagens no desempenho mecânico, quando misturados em proporções adequadas.

O resíduo apresentou 99% de sua granulometria inferior a peneira N° 200 (0,074mm), com uma composição mineralógica típica de granitos, contendo feldspatos potássico e sódico, mica e calcita.

5.2 - Cal

5.2.1 - Hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$

A cal estudada é uma cal calcítica. Apresentou teor de SiO_2 de 0,10%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 73,36 e 1,00%, respectivamente. Apresentou massa específica real de $2,265 \text{ g/cm}^3$. Obteve-se área específica de $1,126 \text{ m}^2/\text{g}$.

5.2.2 - Megaó

A cal estudada é uma cal dolomítica. Apresentou teor de SiO_2 de 3,27%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 46,5 e 32,6%,

respectivamente. Apresentou a maior massa específica real entre as cal estudadas, $2,606 \text{ g/cm}^3$, e a maior área específica, $1,738 \text{ m}^2/\text{g}$.

5.2.3 - Carbomil

A cal estudada é uma cal calcítica. Apresentou teor de SiO_2 de 0,78%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 72,8% e 2,31%, respectivamente. Apresentou a menor massa específica real de $2,286 \text{ g/cm}^3$ e área específica de $1,146 \text{ m}^2/\text{g}$.

5.2.4 - Cimencal

A cal estudada é uma cal calcítica. Apresentou teor de SiO_2 de 4,40%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 57,37% e 5,95%, respectivamente. Apresentou massa específica real de $2,318 \text{ g/cm}^3$ e área específica de $1,178 \text{ m}^2/\text{g}$.

5.2.5 - Brancal

A cal estudada é uma cal calcítica. Apresentou teor de SiO_2 de 11,26%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 56,98% e 5,55%, respectivamente. Apresentou massa específica real de $2,507 \text{ g/cm}^3$ e a menor área específica, $1,104 \text{ m}^2/\text{g}$.

5.2.6 - JA

A cal estudada é uma cal calcítica. Apresentou teor de SiO_2 de 11,72%, porcentagens de CaO e MgO de aproximadamente 56,56% e 5,04%, respectivamente. Apresentou massa específica real de $2,494 \text{ g/cm}^3$ e área específica de $1,456 \text{ m}^2/\text{g}$.

As características físico – mecânicas dos tijolos sílica-cal podem ser alteradas devido a influência do tipo da cal. O uso de cal dolomítica, na fabricação

dos tijolos sílica - cal, é evitado devido o alto teor de MgO causar, através da hidratação, uma expansão, no tijolo durante a autoclavagem. Fator percebido, quando do uso da cal Megaó na produção dos tijolos sílica - cal.

Os resultados de resistência à compressão obtidos com hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , são melhores devido suas características calcíticas, bem como, seu elevado teor de pureza.

5.3 - Comportamento Mecânico das Amostras Estudadas

Observou-se que as RCS assumiram valores diferenciados em cada amostra de cal e nas diferentes composições. De um modo geral, verificou-se que o comportamento mecânico para as composições, apresentaram aumentos gradativos, à medida que se aumentava a porcentagem de resíduo.

Para as composições (100 - 0% e 80 - 20%) resíduo - areia, ocorreram problemas após moldagens, ocasionados provavelmente pela presença de MgO em excesso, ou pela granulometria e forma das partículas de resíduo e da cal, o que provocou rompimento dos corpos de prova após moldagem e autoclavagem.

5.3.1 - RCS das amostras após cura por autoclavagem e carbonatação

Dentre as três cals estudadas nas diferentes composições resíduo - areia e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação, observa-se que a amostra com 16% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 foi a que apresentou maior valor de RCS (23,43 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo - areia, para a idade de 60 dias.

Pode-se observar que, tanto a cal Megaó como a cal Carbomil, obtiveram RCS máximas semelhantes, para idênticas composições resíduo - areia.

5.3.2 - RCS das amostras após cura por carbonatação

Dentre as três cais estudadas nas diferentes composições resíduo – areia e tempos, após cura por carbonatação, observa-se que a amostra com 10% de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 foi a que apresentou maior valor de RCS (6,57 MPa), na proporção de (60 - 40%) resíduo – areia, para a idade de 120 dias.

A cal Megaó e a Carbomil apresentaram maiores valores das RCS nas composições de (60 – 40 %) resíduo – areia, sendo os valores similares para as duas cais. Para as demais composições, a maioria dos resultados, evidenciaram comportamentos mecânicos inferiores aos das composições citadas acima.

5.4 – Conclusões Finais

Numa análise conjunta dos resultados obtidos das amostras autoclavadas e carbonatadas, e das amostras somente carbonatadas, os corpos autoclavados e carbonatados apresentaram maiores valores de RCS nas composições estudadas. Isto deve-se a reação do dióxido de cálcio (CO_2), presente na atmosfera, com os silicatos de cálcio hidratados, bem como o excesso de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2).

Nas diversas composições (resíduo – areia) e percentuais de cal (8% a 16%) pré-estabelecidos, obtiveram-se comportamentos mecânicos variáveis, salientando-se que o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , apresentou RCS maiores que as demais cais estudadas em quase todos os tempos de cura.

Comparando-se os resultados de RCS com os valores máximos apresentados por MACHADO (1982), para diferentes composições de areia e utilizando cais calcílicas e dolomíticas, observou-se que ao utilizarem-se amostras com hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , as resistências mecânicas foram superiores,

enquanto que nas demais amostras utilizando as cais Megaó e Carbomil, os resultados foram similares.

O estudo desenvolvido possibilitou o uso do resíduo da serragem de granito como material alternativo na fabricação de tijolos sílica-cal, sendo portanto promissora a sua utilização na construção civil.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A pesquisa realizada, utilizando o resíduo da serragem de blocos de granitos, deve ser vista como um ponto de partida para outras pesquisas que envolvam o aperfeiçoamento da tecnologia proposta, bem como, um incentivo para novas linhas de pesquisas que agreguem um melhor aproveitamento para o resíduo gerado pelas indústrias. Nesta linha de pensamento, propõem-se os seguintes pontos para novas pesquisas:

- Produzir tijolos sílica-cal em prensas hidráulicas, o que poderá acarretar melhores resultados para as propriedades físico-mecânicas;
- Construir protótipos em alvenarias usando os tijolos sílica-cal, para verificar, em condições reais de uso e posterior avaliação em longo prazo;
- Fazer um estudo do impacto ambiental na região, com atenção especial à contaminação dos rios, córregos, lagos, lagoas, açudes, etc., despertando a consciência ecológica sobre a importância da preservação ambiental nas regiões onde se processa essa atividade industrial;
- Realizar uma análise da viabilidade econômica na fabricação dos tijolos sílica-cal com resíduos da serragem de granito;
- Ensaiai outras proporções de resíduo-areia na fabricação dos tijolos sílica-cal;
- Desenvolver proposta de parceria com as empresas geradoras de resíduo da serragem de granito, de modo que elas assumam o compromisso com parte dos custos de beneficiamento dos resíduos da serragem de granito.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. "Determinação da Massa Específica Real". NBR – 6474, 1984.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. "Revestimentos de Paredes e Tetos com Argamassas - Materiais, Preparo, Aplicação e Manutenção – Procedimento". NBR – 7200, 1992.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. "Determinação da Análise Granulométrica de Solos". Método de Ensaio. NBR – 7181, 1984.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. "Determinação da Finura de Cimento Portland Mediante Emprego do Aparelho de Permeabilidade do Ar". NBR – 7224, 1984.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. "Determinação da Resistência à Compressão". Cimento Portland. NBR – 7215, 1991.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. "Cal Virgem para Construção". NBR – 6453, 1983.

ALENCAR, C.R.A.; CARANASSIOS, A. e CARVALHO, D. "Tecnologias de Lavra e Beneficiamento". Fortaleza: Instituto Euvaldo Lodi, 1996. (Estudos econômicos sobre rochas ornamentais, vol.3).

ANÔNIMO. Rochas de Qualidade. Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais. "Como Usar Mármore e Granito sem ferir a Natureza". São Paulo, Edição 102, Jul./Ago./Set. 1990. pg 82 - 83.

-
- AMJAD, MA e ALSAYED, SH. Properties of sand-lime and concrete brick/block units manufactured in Riyadh. ARAB GULF JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH. 16: (2)297-317. 1998. www.webofscience.fapesp, pesquisada em 22/10/2001.
- ASSAL, HH. Influence of fine sand and portland cement on the properties of fired and water cured lime-rich clay bricks. INDIAN JOURNAL OF ENGINEERING AND MATERIALS SCIENCES. Publisher, NATL INST SCIENCE COMMUNICATION, NEW DELHI. 6: (4) 219-224. 1999. www.webofscience.fapesp, pesquisada em 22/09/2001.
- AZAMBUJA, J.C. e SILVA, Z.C.G. "Perfil Analítico dos Mármore e Granitos". Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1977. (Boletim, N° 38).
- BATISTA, J.P. "Manual do Construtor". Vol.1, Editora Globo, 9º Edição. Porto Alegre. 1977.
- BAUER, F.L.A. "Materiais de Construção". Editora Livros Técnicos e Científicos, 2º Edição. Rio de Janeiro. 1995.
- BESSEY, G.E. "Sand Lime Bricks, National Building Studies". Special Report N° 3. Building Research Station, London, 1948.
- CAIADO, M.A.C. e MENDONÇA, A.S.F. "Impactos de Atividades de Exploração de Mármore e Granito sobre a qualidade da Água de Bacias Hidrográficas". In: 18º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Coletânea de Trabalhos do Espírito Santo. Salvador, 1995. pp 11 – 19.
- CARUSO, L.G. "Extração e Utilização de Rochas Ornamentais". Rochas de Qualidade. Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais. São Paulo. Edição 83, Out./Nov./Dez. 1985. pp 7 – 9.

-
- CHIODI FILHO, C. "Aspectos Técnicos e Econômicos do Setor de Rochas Ornamentais". Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1995. (Série Estudos e Documentos, N° 28).
- CINCOTTO, M.A. "Estudo das Cales Hidratadas Comercializadas em Diversos Estados Brasileiros". São Paulo. Associação Brasileira de Produtores de Cal. São Paulo. 1986.
- CINCOTTO, M.A. Características da Cal para Argamassas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo S/A (IPT), A Construção, Editora Pini, São Paulo, SP, 1990.
- DESSAUNE, J.F. "Comércio de rochas pode crescer 162% este ano". A Gazeta, Vitória, 29 de agosto de 1995. p 5.
- FARIAS, C.E.G. "Mercado Nacional". Fortaleza, Instituto Euvaldo Lodi, 1995. p 3 – 5. Estudos Econômicos sobre rochas Ornamentais, Vol. 2.
- FELLENBERG, G. "Introdução aos Problemas da Poluição Ambiental". 2ª Edição. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 1980, 193p.
- FREIRE, A.S. e MOTTA, J.F. "Potencialidades para o Aproveitamento Econômico de Rejeitos da Serragem de Granitos". Rochas de Qualidade. Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais. EMC. Editores Associados Ltda. São Paulo. Edição 123, Jul./Ago. 1995. pp 98 – 108.
- GIUNTON, M. "Problemática da Variação do Impacto Ambiental na Indústria Transformadora de Pedras Naturais". Rochas e Equipamentos – Revista de Informação Técnica de Mármore Granitos, Pedras Naturais, Maquinas e Equipamentos, Lisboa, Vol. 31. 3ª Trimestre. 1993. pg 19 – 34.

GUIMARÃES, J.E.P. "Estabilização de Solos com Cal". Nova e Importante Aplicação da Cal. Seus Conceitos e suas Vantagens. Associação Brasileira dos Produtores de Cal – ABPC. São Paulo. 1971. (Boletim N° 5).

GUIMARÃES, L.E.P. A Cal: sua Origem, seus Tipos, sua Aplicação e Importância Econômica e Social, sua Participação nas Obras e nas Argamassas da Engenharia Civil, Cerâmica 30, 196, 1984.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. "Mineração e Meio Ambiente". Brasília, DF. 1984. Comissão Técnica de Meio Ambiente/ Grupo de Trabalho e Redação.

KISHAR, E. Hydrothermal characteristics of sand-lime brick production ALWakeel EI. ZKG INTERNATIONAL. Publisher, BAUVERLAG GMBH, WALLUF. 49: (5)260-264. 1996. www.webofscience.fapesp, pesquisada em 22/10/2001.

MACHADO, E.C.C. e FERREIRA, H.C. "Tijolos Sílica – Cal. Uma Tentativa de Aproveitamento dos Resíduos Industriais da Caulisa I / II – Um Estudo Comparativo com Areias Naturais e Influencia de Diferentes Composições Granulométricas". Cerâmica 27, 134, 1981/1982.

MOYA, M.M. "A Indústria de Rochas Ornamentais: estudo de caso na região de Bragança Paulista". São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 1995. 116p.

MULDERS FMM. The strength of green sand-lime bricks. Glass HJ ZKG INTERNATIONAL. Publisher, BAUVERLAG GMBH, WALLUF. 51: (9) 512-521 1998. www.webofscience.fapesp, pesquisada em 22/09/2001.

NITES – Núcleo Regional de Informação Tecnológica do Espírito Santo. "Desperdício na Indústria de Mármore e Granitos". Rochas de Qualidade, Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais. São Paulo. Edição 118. Jul./Ago./Set. 1994. pg 27 – 32.

-
- PINTO, T.P. Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas, São Carlos, 1994. Dissertação (Mestrado)- Escola de engenharia São Carlos, 148p Departamento de Arquitetura e Planejamento. Universidade São Paulo.
- SILVA, S.A.C. "Caracterização do Resíduo da Serragem de Blocos de Granito Estudo do Potencial de Aplicação na Fabricação de Argamassa de Assentamento e de Tijolos de Solo-Cimento". Vitória. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Espírito Santo, 1998.
- STELLIN JÚNIOR, A. Mármore e Granitos Brasileiros. In: Congresso Ítalo-Brasileiro de Engenharia de Minas, 1., Cagliari, 1990. Memorie, Cagliari: Universita Degli Studi di Cagliari/Dep. Engenharia de Minas da EPUSP, 1990. pp 293-306.
- SAUTEREY, R. Allocucion d'ouverture. In: Colloque International Sur L'Utilization des Sous. Produits et Déchets Dans le Genie Civil. Paris, 1978. Proceedings..., Aaieenpo. Vol 1. pp 37-42.
- SOUZA SANTOS, P. Ciências Tecnológicas de Argilas 3ª Edição. São Paulo. Vol. I. Edgar Blucher Ltda, 1992.
- TEHRI SP CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. Development of bricks from granulated blast furnace slag Malhotra SK. BUTTERWORTH-HEINEMANN LTD. OXFORD. 10: (3) 191-193 APR 1996. www.webofscience.fapesp, pesquisada em 22/09/2001.
- VERÇOSA, E. J. "Materiais de construção". Editora Sagre S/A. Porto alegre. 1975.
- VIDAL, F.W.H. "A Indústria Extrativa de Rochas Ornamentais no Ceará". São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995. 178p.

ANEXO

Nas Tabelas 4.5 a 4.9, são apresentados os diversos resultados de RCS, nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação.

Tabela 4.5 – RCS em função da porcentagem de 8% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para a porcentagem de 8% de cal (MPa)					
		0 dia	15 dias	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Megaó	0 – 100%	1,27	0,72	0,74	2,82	2,47	1,49
	20 – 80%	6,15	6,08	6,26	7,66	7,25	6,82
	40 – 60%	7,95	5,33	5,96	9,35	6,72	7,64
	60 – 40%	5,53	5,86	5,07	8,83	7,67	8,20
Ca(OH) ₂	0 – 100%	3,99	8,56	8,39	4,58	6,96	6,82
	20 – 80%	6,79	10,42	11,20	12,56	14,01	13,17
	40 – 60%	7,74	10,70	9,64	17,57	16,30	15,62
	60 – 40%	5,96	10,82	10,87	10,02	8,40	11,71
Carbomil	0 – 100%	1,34	1,31	0,95	2,38	1,86	1,69
	20 – 80%	2,84	6,18	5,09	6,20	6,88	7,50
	40 – 60%	4,44	6,54	5,65	7,89	6,94	8,32
	60 – 40%	5,42	8,03	6,03	8,54	7,54	8,62

Tabela 4.6 – RCS em função da porcentagem de 10% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para a porcentagem de 10% de cal (MPa)					
		0 dia	15 dias	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Megaó	0 – 100%	1,27	0,53	0,58	0,66	2,02	1,02
	20 – 80%	2,05	4,26	4,21	7,66	9,37	7,89
	40 – 60%	3,44	5,98	6,52	9,85	10,19	7,30
	60 – 40%	6,82	3,00	3,39	11,08	11,17	8,35
Ca(OH) ₂	0 – 100%	4,38	7,89	7,28	10,95	5,87	9,07
	20 – 80%	9,27	8,40	8,61	20,12	12,89	18,46
	40 – 60%	8,96	10,42	11,15	14,06	17,06	18,49
	60 – 40%	9,63	11,10	10,98	20,63	17,57	12,31
Carbomil	0 – 100%	1,27	1,15	1,21	1,95	1,24	1,22
	20 – 80%	2,44	4,55	5,69	4,52	6,81	6,71
	40 – 60%	3,73	6,42	6,37	6,16	10,29	7,66
	60 – 40%	5,03	5,60	6,74	7,05	9,68	7,95

Tabela 4.7 – RCS em função da porcentagem de 12% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para a porcentagem de 12% de cal (MPa)					
		0 dia	15 dias	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Megaó	0 – 100%	0,25	ND	ND	0,65	0,51	0,58
	20 – 80%	2,67	5,06	5,17	7,91	4,97	4,31
	40 – 60%	5,33	4,07	5,77	8,00	9,03	6,86
	60 – 40%	6,11	3,82	4,07	9,54	10,49	5,87
Ca(OH) ₂	0 – 100%	4,89	8,56	9,01	7,18	10,95	6,62
	20 – 80%	8,32	15,18	11,71	15,87	20,88	13,24
	40 – 60%	9,78	14,64	15,82	17,27	19,86	10,95
	60 – 40%	10,0	15,55	14,94	15,11	10,95	10,61
Carbomil	0 – 100%	0,70	1,38	0,97	2,44	2,11	1,20
	20 – 80%	3,07	5,35	4,45	6,28	9,42	5,69
	40 – 60%	5,69	5,60	5,31	7,95	10,45	7,93
	60 – 40%	6,71	6,54	4,94	9,08	11,29	8,06

ND – Valores não determinados

Tabela 4.8 – RCS em função da porcentagem de 14% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para a porcentagem de 14% de cal (MPa)					
		0 dia	15 dias	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Megaó	0 – 100%	ND	ND	ND	0,41	0,68	ND
	20 – 80%	2,55	3,3	3,35	12,22	11,71	3,06
	40 – 60%	5,86	4,05	3,95	9,63	11,48	8,00
	60 – 40%	9,01	4,31	3,73	7,93	12,56	7,95
Ca(OH) ₂	0 – 100%	5,33	6,91	10,19	7,89	6,79	6,93
	20 – 80%	9,22	11,89	9,56	12,90	14,01	13,88
	40 – 60%	10,5	9,57	10,68	8,66	12,22	16,81
	60 – 40%	14,2	8,98	7,54	8,91	14,01	12,39
Carbomil	0 – 100%	1,19	1,41	1,46	0,93	1,45	1,29
	20 – 80%	2,90	4,18	4,13	8,11	10,16	4,36
	40 – 60%	6,03	4,74	4,46	8,06	10,36	7,54
	60 – 40%	8,20	6,26	5,77	8,57	11,12	7,88

ND – Valores não determinados

Tabela 4.9 – RCS em função da porcentagem de 16% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por autoclavagem e carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para a porcentagem de 16% de cal (MPa)					
		0 dia	15 dias	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Megaó	0 – 100%	ND	ND	ND	0,51	0,56	ND
	20 – 80%	4,69	3,39	3,85	8,83	10,24	4,97
	40 – 60%	7,23	4,06	3,29	11,31	8,4	9,07
	60 – 40%	9,64	4,69	4,61	11,68	11,33	10,93
Ca(OH) ₂	0 – 100%	4,11	7,89	10,51	15,99	12,73	14,51
	20 – 80%	8,13	8,79	12,51	19,86	21,05	20,54
	40 – 60%	10,0	8,79	11,70	22,07	19,86	20,88
	60 – 40%	14,5	9,36	8,96	23,43	15,02	14,60
Carbomil	0 – 100%	1,21	1,14	1,44	0,70	1,42	1,32
	20 – 80%	3,62	4,01	3,87	6,88	9,49	5,21
	40 – 60%	5,60	5,14	4,14	8,74	10,70	7,11
	60 – 40%	6,88	7,05	5,60	10,78	9,15	8,39

ND – Valores não determinados

Nas Tabelas 4.10 a 4.14, são apresentados os diversos resultados de RCS, nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação.

Tabela 4.10 – RCS em função da porcentagem de 8% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para a porcentagem de 8% de cal (MPa)				
		15 dias	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Megaó	0 – 100%	0,37	0,41	0,42	0,85	0,76
	20 – 80%	0,94	1,48	1,94	1,43	1,32
	40 – 60%	1,66	1,65	3,31	3,00	2,82
	60 – 40%	2,06	2,00	4,05	2,94	2,85
Ca(OH) ₂	0 – 100%	0,42	0,56	0,51	0,61	0,54
	20 – 80%	0,76	1,06	2,51	3,00	2,55
	40 – 60%	1,12	0,89	2,55	3,92	4,69
	60 – 40%	1,54	0,99	2,73	6,11	4,07
Carbomil	0 – 100%	0,81	0,93	1,06	0,81	0,94
	20 – 80%	1,90	2,00	2,31	1,87	2,11
	40 – 60%	3,02	3,12	3,65	3,07	3,40
	60 – 40%	4,52	4,60	4,74	3,82	4,83

Tabela 4.11 – RCS em função da porcentagem de 10% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para a porcentagem de 10% de cal (MPa)				
		15 dias	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Megaó	0 – 100%	0,48	0,42	0,53	0,84	0,97
	20 – 80%	1,39	1,22	1,56	1,88	1,63
	40 – 60%	2,02	1,78	2,48	2,95	3,12
	60 – 40%	2,41	2,06	3,99	3,39	3,51
Ca(OH)₂	0 – 100%	0,44	0,49	0,47	1,88	1,38
	20 – 80%	1,00	0,95	1,05	2,41	2,80
	40 – 60%	1,60	1,07	1,49	3,40	3,82
	60 – 40%	2,07	1,15	2,78	4,20	6,57
Carbomil	0 – 100%	0,97	1,05	1,11	0,95	1,15
	20 – 80%	1,78	2,46	2,06	1,78	1,94
	40 – 60%	2,72	2,90	3,07	3,67	3,99
	60 – 40%	4,18	4,35	5,28	4,94	5,43

Tabela 4.12 – RCS em função da porcentagem de 12% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para a porcentagem de 12% de cal (MPa)				
		15 dias	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Megaó	0 – 100%	0,49	0,31	0,59	1,00	0,98
	20 – 80%	1,48	1,22	1,63	1,81	1,61
	40 – 60%	2,06	1,61	2,68	2,78	3,52
	60 – 40%	2,73	1,85	3,21	3,97	4,06
Ca(OH)₂	0 – 100%	0,44	0,51	0,99	1,40	0,81
	20 – 80%	0,94	0,90	3,00	2,61	3,41
	40 – 60%	1,51	0,97	3,51	4,11	4,63
	60 – 40%	1,99	1,75	5,43	4,33	4,58
Carbomil	0 – 100%	0,61	0,70	0,82	0,85	1,10
	20 – 80%	1,29	1,36	2,47	1,59	2,46
	40 – 60%	1,97	2,05	2,49	3,31	4,00
	60 – 40%	3,14	3,67	5,40	4,48	5,52

Tabela 4.13 – RCS em função da porcentagem de 14% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para a porcentagem de 14% de cal (MPa)				
		15 dias	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Megaó	0 – 100%	0,53	0,36	0,55	0,66	1,01
	20 – 80%	1,21	1,19	1,60	1,99	2,38
	40 – 60%	1,43	1,48	2,99	2,58	3,31
	60 – 40%	1,34	1,88	3,12	2,95	3,85
Ca(OH)₂	0 – 100%	0,42	0,51	1,53	1,02	1,39
	20 – 80%	0,92	2,51	2,75	3,90	4,13
	40 – 60%	1,38	3,70	2,90	4,13	5,35
	60 – 40%	1,61	5,23	5,76	5,40	5,86
Carbomil	0 – 100%	0,83	0,80	1,03	1,05	1,04
	20 – 80%	1,60	1,60	2,02	1,95	2,38
	40 – 60%	2,56	2,55	4,35	4,07	3,85
	60 – 40%	2,82	3,53	4,26	5,18	5,43

Tabela 4.14 – RCS em função da porcentagem de 16% de cal (MPa) nas diferentes composições e tempos, após cura por carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para a porcentagem de 16% de cal (MPa)				
		15 dias	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Megaó	0 – 100%	0,50	0,31	0,69	1,02	0,95
	20 – 80%	1,17	1,04	1,95	1,87	1,87
	40 – 60%	1,44	1,21	2,88	3,07	3,00
	60 – 40%	1,43	1,85	3,39	3,23	2,88
Ca(OH)₂	0 – 100%	0,56	1,05	0,93	1,38	1,02
	20 – 80%	1,09	2,89	2,00	3,62	3,57
	40 – 60%	1,50	3,06	2,04	4,18	5,09
	60 – 40%	2,05	5,09	4,27	5,09	6,11
Carbomil	0 – 100%	1,04	1,10	1,36	0,90	1,02
	20 – 80%	1,53	1,60	1,92	1,68	1,73
	40 – 60%	2,43	2,61	3,77	3,53	3,80
	60 – 40%	3,07	3,53	4,05	4,74	4,38

Nas Tabelas 4.15 a 4.20, são apresentados os diversos resultados de RCS para os tempos de 0 a 120 dias, após cura por autoclavagem e carbonatação, nas diferentes composições e porcentagens de cal.

Tabela 4.15 – RCS para o tempo de 0 dia (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por autoclavagem

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 0 dia (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	1,27	1,27	0,25	ND	ND
	20 – 80%	6,15	2,05	2,67	2,55	4,69
	40 – 60%	7,95	3,44	5,33	5,86	7,23
	60 – 40%	5,53	6,82	6,11	9,01	9,64
Ca(OH) ₂	0 – 100%	3,99	4,38	4,89	5,33	4,11
	20 – 80%	6,79	9,27	8,32	9,22	8,13
	40 – 60%	7,74	8,96	9,78	10,59	10,02
	60 – 40%	5,96	9,63	10,08	14,26	14,59
Carbomil	0 – 100%	1,34	1,27	0,70	1,19	1,21
	20 – 80%	2,84	2,44	3,07	2,90	3,62
	40 – 60%	4,44	3,73	5,69	6,03	5,60
	60 – 40%	5,42	5,03	6,71	8,20	6,88

ND – Valores não determinados

Tabela 4.16 – RCS para o tempo de 15 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por autoclavagem e carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 15 dias (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	0,72	0,53	ND	ND	ND
	20 – 80%	6,08	4,26	5,06	3,30	3,39
	40 – 60%	5,33	5,98	4,07	4,05	4,06
	60 – 40%	5,86	3,00	3,82	4,31	4,69
Ca(OH) ₂	0 – 100%	8,56	7,89	8,56	6,91	7,89
	20 – 80%	10,42	8,40	15,18	11,89	8,79
	40 – 60%	10,70	10,42	14,64	9,57	8,79
	60 – 40%	10,82	11,10	15,55	8,98	9,36
Carbomil	0 – 100%	1,31	1,15	1,38	1,41	1,14
	20 – 80%	6,18	4,55	5,35	4,18	4,01
	40 – 60%	6,54	6,42	5,60	4,74	5,14
	60 – 40%	8,03	5,60	6,54	6,26	7,05

ND – Valores não determinados

Tabela 4.17 – RCS para o tempo de 30 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por autoclavagem e carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 30 dias (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	0,74	0,58	ND	ND	ND
	20 – 80%	6,26	4,21	5,17	3,35	3,85
	40 – 60%	5,96	6,52	5,77	3,95	3,29
	60 – 40%	5,07	3,39	4,07	3,73	4,61
Ca(OH) ₂	0 – 100%	8,39	7,28	9,01	10,19	10,51
	20 – 80%	11,20	8,61	11,71	9,56	12,51
	40 – 60%	7,64	11,15	15,82	10,68	11,70
	60 – 40%	10,87	10,98	14,94	7,54	8,96
Carbomil	0 – 100%	0,95	1,21	0,97	1,46	1,44
	20 – 80%	5,09	5,69	4,45	4,13	3,87
	40 – 60%	5,65	6,37	5,31	4,46	4,14
	60 – 40%	6,03	6,74	4,94	5,77	5,60

ND – Valores não determinados

Tabela 4.18 – RCS para o tempo de 60 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por autoclavagem e carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 60 dias (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	2,82	0,66	0,65	0,41	0,56
	20 – 80%	7,66	7,35	7,91	12,22	8,83
	40 – 60%	9,35	9,85	8,00	9,63	11,31
	60 – 40%	8,83	11,08	9,54	7,93	11,68
Ca(OH) ₂	0 – 100%	4,58	10,95	7,18	7,89	15,99
	20 – 80%	12,56	20,12	15,87	12,90	19,86
	40 – 60%	17,57	14,06	17,27	8,66	22,07
	60 – 40%	10,02	20,63	15,11	8,91	23,43
Carbomil	0 – 100%	2,38	1,95	2,44	0,93	0,70
	20 – 80%	6,20	4,52	6,28	8,11	6,88
	40 – 60%	7,89	6,16	7,95	8,06	8,74
	60 – 40%	8,54	7,05	9,08	8,57	10,78

Tabela 4.19 – RCS para o tempo de 90 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por autoclavagem e carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 90 dias (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	2,47	2,02	0,51	0,68	0,51
	20 – 80%	7,25	9,37	4,97	11,71	10,24
	40 – 60%	6,72	10,19	9,03	11,48	8,4
	60 – 40%	7,67	11,17	10,49	12,56	11,33
Ca(OH) ₂	0 – 100%	6,96	5,87	10,95	6,79	12,73
	20 – 80%	14,01	12,89	20,88	14,01	21,05
	40 – 60%	16,30	17,06	19,86	12,22	19,86
	60 – 40%	8,40	17,57	10,95	14,01	15,02
Carbomil	0 – 100%	1,86	1,24	2,11	1,45	1,42
	20 – 80%	6,88	6,81	9,42	10,10	9,49
	40 – 60%	6,94	10,29	10,45	10,36	10,70
	60 – 40%	7,54	9,68	11,29	11,12	9,15

Tabela 4.20 – RCS para o tempo de 120 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por autoclavagem e carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 120 dias (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	1,49	1,02	0,58	--	--
	20 – 80%	6,82	7,89	4,31	3,06	4,97
	40 – 60%	7,64	7,30	6,86	8,00	9,07
	60 – 40%	8,20	8,35	5,87	7,95	10,93
Ca(OH) ₂	0 – 100%	6,82	9,07	6,62	6,93	14,51
	20 – 80%	13,17	18,46	13,24	13,88	20,54
	40 – 60%	15,62	18,49	10,95	16,81	20,88
	60 – 40%	11,71	12,31	10,61	12,39	14,60
Carbomil	0 – 100%	1,69	1,22	1,20	1,29	1,32
	20 – 80%	7,50	6,71	5,69	4,36	5,21
	40 – 60%	8,32	7,66	7,93	7,54	7,11
	60 – 40%	8,62	7,95	8,06	7,88	8,39

Nas Tabelas 4.21 a 4.25, são apresentados os diversos resultados de RCS para os tempos de 15 a 120 dias, após cura por carbonatação, nas diferentes composições e porcentagens de cal.

Tabela 4.21 – RCS para o tempo de 15 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 15 dias (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	0,37	0,48	0,49	0,53	0,50
	20 – 80%	0,94	1,39	1,48	1,21	1,17
	40 – 60%	1,66	2,02	2,06	1,43	1,44
	60 – 40%	2,06	2,41	2,73	1,34	1,43
Ca(OH) ₂	0 – 100%	0,42	0,44	0,44	0,43	0,56
	20 – 80%	0,76	1,00	0,94	0,92	1,09
	40 – 60%	1,12	1,60	1,51	1,38	1,50
	60 – 40%	1,54	2,07	1,99	1,61	2,05
Carbomil	0 – 100%	0,81	0,97	0,61	0,83	1,04
	20 – 80%	1,90	1,78	1,29	1,60	1,53
	40 – 60%	3,02	2,72	1,97	2,56	2,43
	60 – 40%	4,52	4,18	3,14	2,82	3,07

Tabela 4.22 – RCS para o tempo de 30 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 30 dias (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	0,41	0,42	0,31	0,36	0,31
	20 – 80%	1,48	1,22	1,22	1,19	1,04
	40 – 60%	1,65	1,78	1,61	1,48	1,21
	60 – 40%	2,00	2,06	1,85	1,88	1,85
Ca(OH) ₂	0 – 100%	0,56	0,49	0,51	0,52	1,05
	20 – 80%	1,06	0,95	0,90	2,51	2,89
	40 – 60%	0,89	1,07	0,97	3,70	3,06
	60 – 40%	0,99	1,15	1,75	5,23	5,09
Carbomil	0 – 100%	0,93	1,05	0,70	0,80	1,10
	20 – 80%	2,00	2,46	1,36	1,60	1,60
	40 – 60%	3,12	2,90	2,05	2,55	2,61
	60 – 40%	4,60	4,35	3,67	3,53	3,53

Tabela 4.23 – RCS para o tempo de 60 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 60 dias (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	0,42	0,53	0,59	0,55	0,69
	20 – 80%	1,94	1,56	1,63	1,60	1,95
	40 – 60%	3,31	2,48	2,68	2,99	2,88
	60 – 40%	4,05	3,99	3,21	3,12	3,39
Ca(OH)₂	0 – 100%	0,51	0,47	0,99	1,53	0,93
	20 – 80%	2,51	1,05	3,00	2,75	2,00
	40 – 60%	2,55	1,49	3,51	2,90	2,04
	60 – 40%	2,73	2,78	5,43	5,76	4,27
Carbomil	0 – 100%	1,06	1,11	0,82	1,03	1,36
	20 – 80%	2,31	2,06	2,47	2,02	1,92
	40 – 60%	3,65	3,07	2,49	4,35	3,77
	60 – 40%	4,74	5,28	5,40	4,26	4,05

Tabela 4.24 – RCS para o tempo de 90 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 90 dias (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	0,85	0,84	1,00	0,66	1,02
	20 – 80%	1,43	1,88	1,81	1,99	1,87
	40 – 60%	3,00	2,95	2,78	2,58	3,07
	60 – 40%	2,94	3,39	3,97	2,95	3,23
Ca(OH)₂	0 – 100%	0,61	1,88	1,40	1,02	1,38
	20 – 80%	3,00	2,41	2,61	3,90	3,62
	40 – 60%	3,92	3,40	4,11	4,13	4,18
	60 – 40%	6,11	4,20	4,33	5,40	5,09
Carbomil	0 – 100%	0,81	0,95	0,85	1,05	0,90
	20 – 80%	1,87	1,78	1,59	1,95	1,68
	40 – 60%	3,07	3,67	3,31	4,07	3,53
	60 – 40%	3,82	4,94	4,48	5,18	4,74

Tabela 4.25 – RCS para o tempo de 120 dias (MPa) nas diferentes composições e porcentagens de cal, após cura por carbonatação

Amostras	Composição Resíduo-Areia	RCS das composições estudadas para o tempo de cura de 120 dias (MPa)				
		8%	10%	12%	14%	16%
Megaó	0 – 100%	0,76	0,97	0,98	1,01	0,95
	20 – 80%	1,32	1,63	1,61	2,38	1,87
	40 – 60%	2,82	3,12	3,52	3,31	3,00
	60 – 40%	2,85	3,51	4,06	3,85	2,88
Ca(OH)₂	0 – 100%	0,54	1,38	0,81	1,39	1,02
	20 – 80%	2,55	2,80	3,41	4,13	3,57
	40 – 60%	4,69	3,82	4,63	5,35	5,09
	60 – 40%	4,07	6,57	4,58	5,86	6,11
Carbomil	0 – 100%	0,94	1,15	1,10	1,04	1,02
	20 – 80%	2,11	1,94	2,46	2,38	1,73
	40 – 60%	3,40	3,99	4,00	3,85	3,80
	60 – 40%	4,83	5,43	5,52	5,43	4,38