
Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências e Tecnologia
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química

**Influência da Área Específica na Reatividade do
Sistema Pozolana-Cal Visando a Obtenção de
Aglomerantes Alternativos**

Luciana Viana Amorim

Dissertação de Mestrado

Campina Grande - Paraíba

Fevereiro - 1999

Influência da Área Específica na Reatividade do Sistema Pozolana-Cal Visando a Obtenção de Aglomerantes Alternativos

Dissertação Apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba em Cumprimento às Exigências para Obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: **Tecnologia de Materiais Não-Metálicos**
Professor Orientador: **Dr. Heber Carlos Ferreira**

Campina Grande - Paraíba
Fevereiro - 1999



A524i Amorim, Luciana Viana.
Influência da área específica na reatividade do sistema
pozolana-cal visando a obtenção de aglomerantes
alternativos / Luciana Viana Amorim. - Campina Grande,
1999.
135 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 1999.
"Orientação : Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira".
Referências.

1. Pozolana - Cal. 2. Rejeitos Cerâmicos. 3. Construção
Civil. 4. Dissertação - Engenharia Química. I. Ferreira,
Heber Carlos. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina
Grande (PB). III. Título

CDU 666.953(043)

Influência da Área Específica na Reatividade do Sistema Pozolana-Cal Visando a Obtenção de Aglomerantes Alternativos

Luciana Viana Amorim

Dissertação Aprovada em: 22 / 02 / 1999



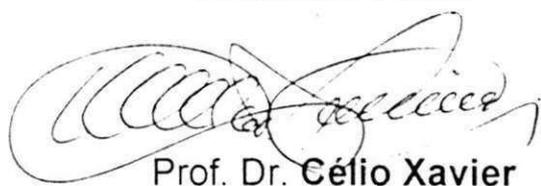
Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira

Orientador



Prof. Dr. Hélio de Lucena Lira

Examinador Interno



Prof. Dr. Célio Xavier

Examinador Externo

Campina Grande - Paraíba

Fevereiro - 1999

Aos meus pais, Arnaldo e Graça, por sempre me oferecerem as melhores oportunidades para minha formação pessoal e profissional e, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

À meu esposo, Maurício Beltrão, por sua dedicação, paciência e incentivo, dia após dia, nesta importante etapa da minha vida.

Agradecimentos

Em especial agradeço a Deus, pela força constante.

Ao Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira, pelos ensinamentos transmitidos, pela incansável orientação e colaboração e, pela amizade, que contribuíram de forma grandiosa, e, sem os quais, não seria possível a realização deste trabalho.

À Itapessoca Agro Industrial S.A. pelo fornecimento de matéria prima, colaborando com o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Pérsio de Souza Santos pelo apoio dado para realização dos ensaios de difração de raios-X.

Ao Prof. Dr. Pedro K. Kiyohara pelo apoio dado para realização dos ensaios de análise térmica diferencial.

Ao Prof. Hélio de Lucena Lira pela tradução do resumo deste trabalho.

À minha irmã, Karine, pela companhia e ajuda nos momentos difíceis.

Ao meu esposo, Mauricio Beltrão, pela colaboração durante a editoração deste documento.

Aos amigos Solange Maria Rocha Patrício e Salomon Mony Levy.

À aluna Ana Sílvia, bolsista do CNPq/PIBIC, pela colaboração na parte experimental deste trabalho.

À todos os funcionários dos Laboratórios de Solos I, Solos II e Solos III, que de alguma forma colaboraram para execução deste trabalho, em especial a José Nivaldo Sobreira, Geraldo Marcelino de Araújo e Francisco de Assis Santana.

À Maria José B. Cavalcanti e Maricé P. da Silva, pela colaboração prestada e pela organização do curso de mestrado.

À Associação Técnico Científica Ernesto de Oliveira Júnior (ATECEL), pelo apoio financeiro.

À CAPES que proporcionou o suporte financeiro para viabilizar a realização deste trabalho.

Simbologia e Abreviaturas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

RILEM - Réunion International des Laboratoires d'Essais et Matériaux

OECD - Organization for Economic Cooperation and Development

ATD - Análise Térmica Diferencial

ATG - Análise Termogravimétrica

RCS - Resistência à Compressão Simples

RCS₇ - Resistência à Compressão Simples aos 7d de cura

RCS₂₈ - Resistência à Compressão Simples aos 28d de cura

RCS₆₀ - Resistência à Compressão Simples aos 60d de cura

A.E. - Área Específica

R - Coeficiente de Correlação

α - Nível de Significância

Y - Resistência à Compressão Simples

X - Área Específica

AS₂ - Metacaulinita

CH - Hidróxido de Cálcio

C₃AH₆ - Trialuminato de Cálcio Hidratado

C₄AH₁₃ - Tetraaluminato de Cálcio Hidratado

C₂AH₈ - Gehlenita

CSH - Tobermorita

Resumo

A constante busca por materiais alternativos de baixo custo, aliada ao aprimoramento de suas propriedades mecânicas, além dos problemas de ordem ecológica, causados pelo volume crescente de resíduos sólidos gerados pela indústria da construção civil, motivaram o desenvolvimento deste trabalho de dissertação, que objetiva estudar a influência da área específica de rejeitos cerâmicos e da construção civil, para uso como agente pozolânico, no sistema pozolana-cal, visando a obtenção de aglomerantes alternativos de baixo custo.

Para este propósito, foram estudadas duas amostras de cais hidratadas e quatro amostras de rejeitos e materiais pozolânicos, sendo duas amostras de entulho, uma amostra de resíduo cerâmico, composta por uma mistura de tijolos furados e telhas, e uma amostra de pozolana artificial, tomada como referência. As amostras de cais, de rejeitos e de materiais pozolânicos foram caracterizadas mineralogicamente através dos ensaios de análise química, análise térmica diferencial, análise termogravimétrica e difração de raios-X. As amostras de entulho e resíduo cerâmico foram moídas em moinho de bolas por períodos de 10, 30, 60 e 90min, enquanto a amostra de pozolana artificial, foi moída em moinho de discos, com várias aberturas entre os discos, de forma a se obter diferentes áreas específicas, determinadas pelo método de Blaine.

O grau de pozolanicidade, em função da área específica dos rejeitos e dos materiais pozolânicos, foi avaliado através dos ensaios de consumo de cal, índice de atividade pozolânica com cal e resistência à compressão simples de argamassas de cais pozolânicas. Essas argamassas foram preparadas no traço 1:3 (uma parte de aglomerante, cal pozolânica, e três partes de agregado, areia normal), na consistência normal e nas composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de cal e pozolana. Os corpos de prova foram curados por períodos de 7, 28 e 60d. Adicionalmente, foram efetuadas análises estatísticas, através de correlações lineares simples, a fim de verificar o grau de correlação entre a área específica dos rejeitos e dos materiais pozolânicos e as propriedades mecânicas das argamassas preparadas com estes materiais.

Os resultados obtidos permitem concluir que a área específica de rejeitos e materiais pozolânicos tem significativa influência na sua atividade pozolânica.

Abstract

The constant looks for alternative materials of low cost and good mechanical properties, besides the ecological problems, caused by the growing of solid volume residues from civil construction industry, motivated the development of this work. The main objective of this work is to study the influence of specific area of rejects of ceramic industry and waste of civil construction in the system pozzolana-lime, also to obtain alternative cement of low cost.

For this purpose, two samples of lime (hydrated lime), two samples of rejects (waste from civil construction), one sample from rejects of bricks and tiles (from the industry) and one sample of artificial pozzolana (as reference) were selected. All sample were characterised by chemical analysis, thermal differential analysis, thermogravimetry and X-ray diffraction. The wastes samples and ceramic residue were ground in a ball mill for periods of 10, 30, 60 and 90min, while the sample of artificial pozzolana, was ground in a disk mill, with different opening between the disks, to obtain different specific areas, determined by the Blaine method.

The pozzolanic activity, as function of the specific area of the rejects and the pozzolanics materials, was evaluated through the consumption of lime, index of pozzolanic activity with lime and simple compression strength (for mortars of lime pozzolana cement). Those mortars were prepared in the proportion of 1:3 (one part of lime pozzolana cement, and three parts of standard sand), in the normal consistency and in the compositions of 30-70%, 40-60% and 50-50% of lime and pozzolana. The specimens were cured for periods of 7, 28 and 60 days. Additionally, it was made a statistical analyses of the results, through simple linear correlations, to verify the correlation degree between the specific area (of the rejects and pozzolanics materials) and the mechanical properties of the mortars prepared with these materials.

The obtained results shown the specific area of ceramic rejects and wastes from the civil construction has a great influence in the pozzolanic properties.

Sumário

Capítulo 1

Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Organização do Trabalho	3

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica	5
2.1 Histórico dos Aglomerantes	5
2.2 Cal Hidratada	10
2.3 Materiais Pozolânicos	12
2.3.1 Pozolana	12
2.3.2 Classificação dos Materiais Pozolânicos	14
2.3.3 Atividade Pozolânica	15
2.3.4 Produtos de Reação do Sistema Pozolana-Cal	19
2.3.5 Vantagens do Uso de Pozolanas	21
2.4 Cais Pozolânicos	23
2.5 Entulho de Construção Civil	25
2.6 A Utilização do Entulho	27
2.7 Processo de Reciclagem do Entulho	29
2.8 Argamassas	31
2.9 Área Específica	36
2.9.1 Conceituação	36
2.9.2 Determinações de Área Específica	36
2.9.2.1 Método de Blaine	39
2.9.3 Importância da Área Específica	40

Capítulo 3

Etapa Experimental	43
3.1 Introdução	43
3.2 Materiais	43
3.2.1 Cais	43
3.2.2 Rejeitos e Materiais Pozolânicos	44

3.2.3 Areia	45
3.2.4 Água	45
3.3 Métodos	45
3.3.1 Preparação das Amostras	45
3.3.2 Moagem	46
3.3.3 Ensaios de Caracterização	46
3.3.3.1 Caracterização Mineralógica	47
3.3.3.1.1 Análise Química	47
3.3.3.1.2 Análise Térmica Diferencial – ATD	47
3.3.3.1.3 Análise Termogravimétrica – ATG	47
3.3.3.1.4 Difração de Raios-X	48
3.3.3.2 Massa Específica Real	48
3.3.3.3 Área Específica	48
3.3.3.4 Análise Granulométrica por Peneiras	49
3.3.3.5 Consumo de Cal	49
3.3.3.6 Índice de Atividade Pozolânica com Cal	50
3.3.4 Ensaios Tecnológicos	50
3.3.4.1 Preparação das Argamassas	50
3.3.4.2 Consistência Normal	51
3.3.4.3 Moldagem dos Corpos de Prova	51
3.3.4.4 Cura	52
3.3.4.5 Resistência à Compressão Simples – RCS.....	52
3.3.5 Análise Estatística	53
Capítulo 4	
Resultados e Discussões	55
4.1 Introdução	55
4.2 Ensaios de Caracterização	55
4.2.1 Caracterização Mineralógica	55
4.2.1.1 Análise Química	55
4.2.1.2 Análise Térmica Diferencial - ATD	58
4.2.1.3 Análise Termogravimétrica - ATG	62
4.2.1.4 Difração de Raios-X	69
4.2.2 Massa Específica Real	74

4.2.3 Área Específica	75
4.2.3 Análise Granulométrica por Peneiras	79
4.2.4 Consumo de Cal	82
4.2.5 Índice de Atividade Pozolânica com Cal	85
4.3 Ensaio Tecnológico	88
4.3.1 Consistência Normal	88
4.3.2 Resistência à Compressão Simples – RCS	95
4.4 Análise Estatística	108
Capítulo 5	
Conclusões	114
5.1 Introdução	114
5.2 Conclusões Parciais	114
5.2.1 Caracterização Mineralógica	114
5.2.1.1 Entulho 1	114
5.2.1.2 Entulho 2	114
5.2.1.3 Mistura	115
5.2.1.4 Pozolana	115
5.2.1.5 Cal Carbomil	115
5.2.1.6 Cal Megaó	115
5.2.2 Área Específica	115
5.2.3 Consumo de Cal	116
5.2.4 Índice de Atividade Pozolânica com Cal	116
5.2.5 Consistência Normal	117
5.2.6 Resistência à Compressão Simples - RCS	117
5.2.7 Análise Estatística	118
5.3 Conclusão Final	118
Capítulo 6	
Sugestões para Estudos Futuros	119
Capítulo 7	
Referências Bibliográficas	121
Anexo I	
Método de Ensaio - Consumo de Cal	131

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Composição Química das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos	55
Tabela 2 – Composição Química das Amostras de Cais	58
Tabela 3 - Descrição e Interpretação das Reações Caracterizadas nas Análises Termodiferenciais das Amostras de Rejeitos, de Materiais Pozolânicos e das Amostras de Cais	59
Tabela 4 - Descrição e Interpretação das Reações Caracterizadas nas Análises Termogravimétricas das Amostras de Rejeitos, de Materiais Pozolânicos e das Amostras de Cais	63
Tabela 5 - Teores dos Hidróxidos e Carbonatos Obtidos da Termogravimetria das Amostras de Cais Hidratadas	65
Tabela 6 - Descrição das Distâncias Interplanares e Interpretação dos Compostos Obtidos por Difração de Raios-X das Amostras de Rejeitos, de Materiais Pozolânicos e das Amostras de Cais	73
Tabela 7 - Massa Específica Real das Amostras de Rejeitos, de Materiais Pozolânicos e da Amostra de Cal	74
Tabela 8 - Áreas Específicas das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos, Determinadas pelo Método do Permeâmetro de Blaine, para os Tempos de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50min de Moagem	75
Tabela 9 - Áreas Específicas das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos, Determinadas pelo Método do Permeâmetro de Blaine, para os Tempos de 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 e 90min de Moagem	75
Tabela 10 - Áreas Específicas das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos, Determinadas pelo Método do Permeâmetro de Blaine, para os Tempos de 10, 30, 60 e 90min de Moagem	77
Tabela 11 - Áreas Específicas da Amostra Pozolana, Determinadas pelo Método do Permeâmetro de Blaine	77

Tabela 12 - Área Específica da Amostra de Cal, Determinada pelo Método do Permeâmetro de Blaine	78
Tabela 13 - Composição Granulométrica das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos	79
Tabela 14 - Consumo de Cal das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos nas Diferentes Áreas Específicas	84
Tabela 15 - Índice de Atividade Pozolânica com Cal das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos nas Diferentes Áreas Específicas	86
Tabela 16 - Índice de Consistência e Fator Água/Aglomerante para as Argamassas com Entulho 1 nas Áreas Específicas Estudadas e nas Composições de 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana	91
Tabela 17 - Índice de Consistência e Fator Água/Aglomerante para as Argamassas com Entulho 2 nas Áreas Específicas Estudadas e nas Composições de 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana	92
Tabela 18 - Índice de Consistência e Fator Água/Aglomerante para as Argamassas com Mistura nas Áreas Específicas Estudadas e nas Composições de 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana	93
Tabela 19 - Índice de Consistência e Fator Água/Aglomerante para as Argamassas com Pozolana nas Áreas Específicas Estudadas e nas Composições de 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana	94
Tabela 20 - Resistência à Compressão Simples das Argamassas com Entulho 1, com Diferentes Áreas Específicas, nas Composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	95
Tabela 21 - Resistência à Compressão Simples das Argamassas com Entulho 2, com Diferentes Áreas Específicas, nas Composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	97

Tabela 22 - Resistência à Compressão Simples das Argamassas com Mistura, com Diferentes Áreas Específicas, nas Composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	99
Tabela 23 - Resistência à Compressão Simples das Argamassas com Pozolana, com Diferentes Áreas Específicas, nas Composições de 30-70%, 40-60% e 50-50%, de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	101
Tabela 24 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 1, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	108
Tabela 25 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 1, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	108
Tabela 26 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 1, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	108
Tabela 27 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 2, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	109
Tabela 28 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 2, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	109
Tabela 29 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 2, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	109

Tabela 30 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Mistura, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	110
Tabela 31 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Mistura, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	110
Tabela 32 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Mistura, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	110
Tabela 33 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Pozolana, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	111
Tabela 34 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Pozolana, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	111
Tabela 35 - Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Pozolana, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	111

Índice de Figuras

Figura 1 - Ciclo da Cal	13
Figura 2 – Processo de Reciclagem do Entulho	30
Figura 3 - Permeâmetro de Blaine	42
Figura 4 - Fluxograma Representativo das Etapas do Projeto de Dissertação	54
Figura 5 - Curvas Termodiferenciais das Amostras de Rejeitos, de Materiais Pozolânicos e das Amostras de Cais	60
Figura 6 - Curva Termogravimétrica da Amostra Entulho 1	66
Figura 7 - Curva Termogravimétrica da Amostra Entulho 2	66
Figura 8 - Curva Termogravimétrica da Amostra Mistura	67
Figura 9 - Curva Termogravimétrica da Amostra Pozolana	67
Figura 10 - Curva Termogravimétrica da Amostra Cal Carbomil	68
Figura 11 - Curva Termogravimétrica da Amostra Cal Megaó	68
Figura 12 - Difratoograma de Raios-X da Amostra Entulho 1	70
Figura 13 - Difratoograma de Raios-X da Amostra Entulho 2	70
Figura 14 - Difratoograma de Raios-X da Amostra Mistura	71
Figura 15 - Difratoograma de Raios-X da Amostra Pozolana	71
Figura 16 - Difratoograma de Raios-X da Amostra Cal Carbomil	72
Figura 17 - Difratoograma de Raios-X da Amostra Cal Megaó	72
Figura 18 – Área Específica em Função do Tempo de Moagem, para as Amostras Entulho 1, Entulho 2 e Mistura	76
Figura 19 - Composições Granulométricas da Amostra Entulho 1 com Diferentes Áreas Específicas	80
Figura 20 - Composições Granulométricas da Amostra Entulho 2 com Diferentes Áreas Específicas	80
Figura 21 - Composições Granulométricas da Amostra Mistura com Diferentes Áreas Específicas	81
Figura 22 - Composições Granulométricas da Amostra Pozolana com Diferentes Áreas Específicas	81

Figura 23 - Fator Água/Aglomerante para Consistência Normal em Função da Área Específica para as Argamassas com Entulho 1 nas Composições 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana	91
Figura 24 – Fator Água/Aglomerante para Consistência Normal em Função da Área Específica para as Argamassas com Entulho 2 nas Composições 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana	92
Figura 25 – Fator Água/Aglomerante para Consistência Normal em Função da Área Específica para a Argamassa com Mistura nas Composições 30-70%, 40- 60%, 50-50% de Cal e Pozolana	93
Figura 26 – Fator Água/Aglomerante para Consistência Normal em Função da Área Específica para a Argamassa com Pozolana nas Composições 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana	94
Figura 27 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 1, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	96
Figura 28 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 1, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	96
Figura 29 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 1, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	97
Figura 30 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 2, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	98

Figura 31 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 2, na Composição 40-60% de Cal Pozolânica, Curados por Períodos de 7, 28 e 60d	98
Figura 32 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 2, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	98
Figura 33 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Mistura, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	100
Figura 34 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Mistura, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	100
Figura 35 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Mistura, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	101
Figura 36 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Pozolana, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	102
Figura 37 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Pozolana, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	102
Figura 38 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Pozolana, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d	103

Capítulo 1

Introdução

Desde a antiguidade, o homem sempre dependeu das rochas, inicialmente usadas como abrigo e, depois, como armas e ferramentas. Hoje, mesmo com toda a sofisticação e tecnologia de que dispomos, é indiscutível a nossa dependência aos recursos naturais. Apesar disto, o mundo atravessa graves problemas de ordem ecológica, seja devido ao desmatamento e às queimadas de florestas, à emissão excessiva de gases poluentes, à poluição das águas dos rios e mares, aos graves problemas urbanos causados pelo lixo doméstico, industrial e hospitalar, proveniente de entulhos de demolições e obras civis, bem como ao acúmulo de rejeitos oriundos do controle de qualidade quando da fabricação de tijolos, telhas e manilhas, entre muitos outros.

Aliado aos problemas ambientais, encontram-se os problemas de ordem econômica, que afetam a grande maioria da população, a chamada população carente, que, em virtude dos altos custos dos materiais de construção civil, não podem usufruir de uma habitação popular.

Todos estes motivos levam a procura, cada vez maior, por materiais econômicos, ecológicos e mecanicamente satisfatórios. Com isto, ressurgem o interesse pelas cãs pozolânicas, utilizadas na antiguidade, por diversas civilizações e, abandonadas por um longo período. As cãs pozolânicas, são misturas de cãs e pozolanas em proporções adequadas, que possuem grande campo para a sua aplicação, seja na estabilização de solos lateríticos, seja na utilização em argamassas de alvenaria e revestimento.

Os materiais pozolânicos, quando finamente divididos e na presença de umidade, reagem com hidróxidos em condições ambientais originando novos compostos hidratados, de propriedades cimentícias e insolúveis em água. O sistema pozolana-cal adquire, portanto, resistência mecânica com o tempo, dando origem a materiais resistentes e duráveis.

As pozolanas artificiais são comumente obtidas através da ativação térmica de argilas. Esta técnica tem-se revelado em muitos casos a solução mais adequada. Atualmente, em virtude dos fatores citados anteriormente, um

outro material tem sido alvo de vários pesquisadores, o entulho de construção civil, utilizado inicialmente na década de 40, após a 2ª Guerra Mundial, durante a reconstrução de Berlim, Paris, Tóquio e tantas outras cidades destruídas no combate, como material constituinte de argamassas. O principal motivo que justifica o interesse por este material é a preservação do meio ambiente, na medida em que a utilização desse entulho elimina sua nociva deposição em valas comuns, rios e vias públicas, poupa preciosas reservas minerais ainda não contaminadas, além da possibilidade de obtenção de elementos construtivos de baixo custo.

O entulho de construção civil reciclado, é hoje, utilizado como agregado na produção de argamassas alternativas, que apresentam propriedades comparáveis e mesmo superiores às aquelas apresentadas pelas argamassas convencionais. Contudo, sendo o entulho composto, principalmente, por argamassas endurecidas e materiais cerâmicos (tijolos e telhas), quando moído transforma-se em material pulverulento, capaz de reagir com cal e, assim, produzir um aglomerante hidráulico alternativo, com propriedades comparáveis às das cãs pozolânicas, utilizadas anteriormente à descoberta do cimento Portland.

A aplicação de pozolanas, de entulhos da construção civil e de resíduos cerâmicos gerados pelas olarias, como agente pozolânico em argamassas, depende do desenvolvimento das suas propriedades pozolânicas, as quais são função, principalmente, da natureza e conteúdo do argilomineral presente, das condições de calcinação e da finura do produto. Dentre estes fatores, a área específica (finura), definida como a área de superfície externa das partículas por unidade de massa, possui fundamental importância, pois é ela um dos fatores que rege a cinética de todos os processos de interação, nos quais fases sólidas e líquidas estão envolvidas.

Apesar da grande importância da área específica, a literatura é deficiente quando se trata deste assunto. Os estudos que visam correlacionar a área específica e a atividade pozolânica restringem-se aos solos lateríticos, argilas e caulins, e muito pouco tem sido feito no campo dos materiais com propriedades aglomerantes.

1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo verificar a influência da área específica de rejeitos cerâmicos e da construção civil, para uso como agente pozolânico, no sistema pozolana-cal, visando a obtenção de aglomerantes alternativos de baixo custo.

1.2 Organização do Trabalho

Esta dissertação é constituída por sete capítulos. No Capítulo 1, é feita uma introdução, descrevendo a motivação para a realização deste estudo, e são apresentados os objetivos deste trabalho.

No Capítulo 2, encontra-se a revisão bibliográfica, na qual procura-se mostrar um pouco sobre a história dos aglomerantes, algumas definições relevantes ao tema em questão, o sistema pozolana-cal com os produtos formados a partir de reações entre estes dois constituintes, trabalhos já desenvolvidos correlatos a este, a problemática que envolve a geração de rejeitos sólidos e área específica.

No Capítulo 3, encontram-se os materiais e a metodologia utilizados para o desenvolvimento desta dissertação. A metodologia contém ensaios de caracterização das amostras individuais, quanto ao aspecto mineralógico e físico. A caracterização abordou, também, ensaios para avaliar a atividade pozolânica dos rejeitos e dos materiais pozolânicos estudados. Ainda na metodologia, foram avaliadas as propriedades mecânicas dos elementos construtivos, as argamassas, bem como análises estatísticas, através de correlações lineares simples, envolvendo os parâmetros de RCS e área específica.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios descritos no capítulo anterior. Em paralelo, são discutidos os resultados de cada ensaio.

Nas conclusões, Capítulo 5, são apresentados, em síntese, os resultados mais relevantes da caracterização e da atividade pozolânica das

amostras. Também são apresentadas conclusões relativas à potencialidade de utilização dos rejeitos e materiais pozolânicos na construção civil. Em uma conclusão final, são confrontados os objetivos desejados e os resultados alcançados.

No Capítulo 6, encontram-se as perspectivas de trabalhos futuros que se propõem como extensão deste trabalho de dissertação.

No Capítulo 7, estão reunidas as referências e normas utilizadas para a realização do presente trabalho.

Finalmente, o Anexo I, no qual pode ser encontrado o método de ensaio não normalizado para a determinação do consumo de cal.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Histórico dos Aglomerantes

Desde a antiguidade, o homem procurou um ligante que fosse seguro e econômico para unir os elementos que compunham suas rústicas construções. Embora se registre alguma controvérsia na literatura, o primeiro material cimentante utilizado nas construções egípcias, até o período Greco-Romano, era derivado da calcinação do gesso, e não de rochas calcárias (Bogue, 1947 e Lea, 1970). Este fato foi comprovado, através de estudos desenvolvidos em argamassas, extraídas das fundações das pirâmides de Gize e do Templo da Esfinge, nos quais é apresentado um grande número de difratogramas de raios-X, atestando a utilização do gesso como material ligante. A opção por este material se justifica pela escassez de combustível da época, já que a temperatura de calcinação das rochas calcárias é bastante superior à das rochas gipsíticas (Ghorab et al., 1986).

A civilização grega parece ter sido uma das pioneiras na utilização da cal como aglomerante, difundindo uma prática que, supostamente, iniciou-se em Creta (Davis, 1934 e Lea, 1970). Na Itália, foram os etruscos que iniciaram o emprego de argamassas em suas construções. Os romanos, por sua vez, derivaram seus conhecimentos muito provavelmente daqueles dos etruscos e/ou dos gregos (Davis, 1934).

Tanto os gregos como os romanos tinham conhecimentos de que certos materiais vulcânicos, quando finamente moídos e misturados à cal extinta e areia, proporcionavam argamassas de melhor desempenho mecânico, que exibiam a propriedade de endurecer, mesmo submersas em água.

Com essa finalidade os gregos utilizavam um tufo vulcânico encontrado na ilha de Thera (posteriormente denominada de Santorim), material este que ainda hoje goza de grande reputação no meio técnico, sendo conhecido

normalmente como "Terra de Santorim". Da mesma forma, os romanos utilizavam um certo tipo de areia vulcânica (tufo vulcânico avermelhado), encontrado nas proximidades da Baía de Nápoles. Como os materiais de melhor qualidade eram obtidos nas vizinhanças do Monte "Puzzioli", atribui-se a estes materiais a designação de pozolanas (Petrucci, 1979).

Outras ocorrências de rochas vulcânicas, com características similares, foram encontradas, como é o caso dos tufos vulcânicos das margens do Reno, proveniente do pequeno vale de Brohlbach, conhecidos como "Trass", que provavelmente, começaram a ser empregados naquela época, e, ainda hoje são utilizados como pozolanas naturais.

Os romanos certamente difundiram seus conhecimentos em todas as regiões do seu, então, vasto império, tendo construído o Panteão Romano, o Coliseu, a Basílica de Constantino, a Ponte de "Gard" (nas proximidades de Nimes no Sul da França) e outras obras que, ao longo do tempo, resistem, de forma admirável, às intempéries. Estruturas contemporâneas a essas, construídas, entretanto, com outros materiais, ou sem a adição de pozolanas, simplesmente deixaram de existir ou se fragmentam com facilidade, quando submetidas a algum esforço (Zampieri, 1989).

Depois dos tempos romanos registra-se um declínio acentuado na qualidade das argamassas, constatado pelas obras executadas.

Um exame das construções dos séculos IX a XI revela que a arte de fabricar o aglomerante achava-se quase completamente perdida, sendo a cal usada em fragmentos mal queimados e sem a adição de pozolanas. Do século XII em diante, a qualidade dos aglomerantes foi melhorada, e, nas obras que ficaram, principalmente naquelas construídas depois do século XIV, encontram-se excelentes argamassas, constituídas de misturas de cal, pozolana natural e areia, repercutindo, assim, na melhor qualidade do produto então elaborado.

Até meados do século XVIII, a mistura de pozolana e cal extinta apresentava-se como a única opção para as construções expostas à ação das águas.

Ainda no século XVIII, a durabilidade das construções romanas causava grande admiração e alguns autores da época chegavam de fato a supor que algum conhecimento tivesse sido perdido. Estudos posteriores não revelaram, entretanto, nada de anormal nos trabalhos romanos, exceção feita à textura

das argamassas que invariavelmente apresentava-se bastante coesa e compacta, sugerindo um processo de compactação bem controlado e bastante vigoroso. Efetivamente, nas porções centrais desses corpos, a cal não se havia ainda carbonatado, atestando a expressiva impermeabilidade dessas argamassas aos gases (Zampieri, 1989).

Um importante avanço no estudo dos materiais cimentícios ocorreu em 1756, quando o engenheiro inglês John Smeaton foi convidado para reconstruir o farol de Eddystone, na costa de Cornwall (Inglaterra), que havia sido destruído em um incêndio. Smeaton necessitaria identificar qual material suportaria a severa ação das águas do mar. De suas experiências concluiu que os calcários utilizados na produção da cal de Aberthaw, Condado de Glamorgan, contendo uma certa quantidade de argila, revelavam-se superiores aos calcários puros para a fabricação de aglomerantes hidráulicos, isto é, resistentes à ação da água depois de endurecidos. Assim, na reconstrução do referido farol, optou-se por utilizar uma argamassa constituída de cal argilosa (cal hidráulica natural de Aberthaw) e pozolana procedente da Itália, dosadas em proporções iguais e muito bem misturadas.

Todavia, apesar do sucesso dos experimentos de Smeaton, o uso desse tipo de cal não se generalizou na época, e, a antiga mistura de cal extinta e pozolana manteve sua supremacia por muito tempo.

Vários estudiosos tentaram descobrir qual elemento proporcionava a hidráulica às cals, mas, só em 1813, Coletis Descotils, com base em seus experimentos, acertadamente postulava que durante a calcinação do calcário tinha havido uma combinação da sílica com a cal, sendo os compostos formados por essa reação os responsáveis por tal hidráulica (Coutinho, 1958).

Por volta de 1818, L. J. Vicat, provou ser possível fabricar cal hidráulica a partir de uma mistura artificial de rocha calcária e argila. Rompia-se assim, com o antigo conceito estabelecido por Smeaton, que afirmava serem as rochas calcárias naturais relativamente impuras, as únicas potencialmente adequadas à obtenção de materiais hidráulicos; da mesma forma, comprovava-se, de maneira absoluta, que as propriedades hidráulicas da cal eram devidas, exclusivamente, à combinação da argila.

As cais hidráulicas propostas por Vicat, eram obtidas pela calcinação de misturas convenientes de carbonato de cálcio e argila, podendo-se seguir duas metodologias distintas. O primeiro processo, admitido na época como melhor, tinha como material inicial uma mistura de cal e argila, que, após ser homogeneizada, era submetida a um segundo processo de queima. Obtinha-se, desse modo, uma cal artificial duplamente queimada. No segundo método, os materiais iniciais eram a rocha calcária e a argila que, pulverizados e misturados, sofriam um único processo de queima (Bogue, 1947).

Paralelamente aos avanços científicos, surgiram nessa época os primeiros cimentos hidráulicos comerciais. Em 1796, na Inglaterra, Joseph Parker introduzia o então denominado Cimento Romano (originalmente, Cimento de Parker) que, exceto por suas propriedades hidráulicas ou tonalidade marron, pouco lembrava as argamassas romanas preparadas a partir de cal extinta e pozolana.

A matéria-prima utilizada para a fabricação do cimento romano era constituída de nódulos, contendo a associação de matérias primas formadas por materiais argilosos com impurezas de calcário, que eram queimados com uma energia superior àquela utilizada na calcinação das cais, quase suficiente para vitrificá-los. Em seguida eram reduzidos a pó, mecanicamente. Desta forma, obtinha-se um cimento natural de pega rápida (20min).

Em 1822, James Frost patenteava um novo produto sob a designação de Cimento Inglês. Este era obtido através da queima de calcários ou margas, magnesianas ou não, os quais eram inteiramente ou praticamente isentos de qualquer mistura de alumina ou material argiloso, e continha de 9 a 40% de material silicoso ou sílica e óxido de ferro, encontrando-se a sílica em excesso e finamente moída (Gooding e Halstead, 1952).

Dois anos mais tarde, em 1824, Joseph Aspdin patenteava o "Cimento Portland", que, apesar de sua descrição, não revelava nenhum constituinte ou procedimento original, particularmente quando comparado com a cal artificial duplamente queimada, de Vicat (Bogue, 1947). O processo produtivo descrito na patente por Aspdin, não consta a exata proporção de cal e argila utilizada no processo, muito embora ao empregar o termo quantidades específicas fica claro que a dosagem não era feita de forma aleatória, e, quanto à temperatura

de queima, esta era necessária tão somente até a total eliminação do gás carbônico. Este produto não deveria, a princípio, exibir diferenças marcantes com relação aos demais concorrentes da época, em virtude do seu processo produtivo, que indicava ser o produto apenas uma cal hidráulica. Todavia, aparentemente, o mesmo tinha grande prestígio junto aos consumidores, o que se fez supor que a forma pela qual o cimento era produzido não se processava exatamente como descrito na patente, ou então teria sido o processo gradativamente aperfeiçoado, se não por Joseph, por seu filho William, e os conhecimentos obtidos propositadamente guardados, com o objetivo de manter a supremacia do produto. Entretanto, se alguma destas suposições ocorreu, a história não registrou.

Em 1845, Johnson, tentou elaborar um cimento de características semelhantes, e se referiu ao processo de William Aspdin como um mistério, destacando que nem mesmo os funcionários sabiam o que era adicionado durante a fabricação (Gooding e Halstead, 1952).

Ainda em seus experimentos, Johnson comenta que, por mero acidente, parte do material do forno ficou exposto a uma temperatura mais alta, clinquerizou-se, e, mesmo sendo admitido na época que tais materiais parcialmente fundidos não proporcionavam bons cimentos, resolveu analisá-los. Para sua surpresa, depois de decorrido algum tempo, o cimento produzido a partir de nódulos parcialmente fundidos exibia uma resistência muito superior àquela proporcionada pelo material submetido a uma queima mais branda, e, adicionalmente, uma coloração acinzentada. Comprovava-se, finalmente, a real importância de uma queima mais enérgica.

Pouco tempo mais tarde, a continuidade dos experimentos de Johnson possibilitava otimizações na temperatura de queima e na dosagem das matérias-primas, dando início à fabricação de um cimento hidráulico de características muito similares às do cimento Portland atualmente produzido.

2.2 Cal Hidratada

A cal é um dos materiais básicos mais tradicionais usados em construção. No início do século, após o surgimento do cimento Portland, o uso da cal foi quase que totalmente abandonado, havendo um verdadeiro endeuamento do novo produto, pelas suas propriedades de pega rápida e alta resistência inicial. Só alguns anos mais tarde, nas proximidades da década de 30, por ocasião dos exames técnico-científicos das patologias apresentadas pelos edifícios norte-americanos, construídos com as modernas argamassas ricas em cimento Portland, é que se reconheceu o erro cometido com tão exagerada predileção. A investigação das falhas constatadas permitiram revelar a importância de várias outras propriedades, que não a resistência e a pega, para a escolha dos componentes das argamassas eficientes. Também nessa época, foram os construtores alertados para o fato de que a qualquer elemento construtivo é dado um certo tempo para que sejam obtidos os índices exigidos de resistência, e que são necessários altos valores de resistência para cumprir as funções construtivas de responsabilidade das argamassas (Guimarães e Cincotto, 1985).

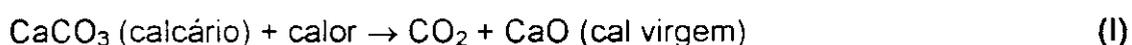
A durabilidade é uma das propriedades de grande importância apresentada pelas argamassas de cal hidratada. A história da arquitetura mostra ser possível alcançar esta propriedade utilizando tais argamassas, graças a edificações que atravessam os séculos testemunhando bom gosto e técnica de bem construir, como o prédio em Rock Village, construído em 1675 e o pavilhão da Universidade de Harvard, construído em 1720, ambos em Massachusetts, EEUU.

Hoje, mesmo com o advento do cimento Portland, a cal hidratada possui importância destacada entre os diversos aglomerantes utilizados na obtenção de argamassas. Segundo Cincotto (1986), a utilização da cal em construção civil é bastante expressiva, cerca de 1,1 sacos de cal por metro quadrado de área construída, atendendo a múltiplas finalidades, tais como: aglomerante aéreo em argamassas de assentamento e revestimento, plastificante e retentor de água em concretos, estabilizante de solos, etc.

Segundo a NBR-7175 (1992), a cal hidratada é definida como um pó seco, obtido pela hidratação de cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio; ou, ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio, sendo designada conforme os teores de óxidos não hidratados e de carbonatos, indicados no item 5.1 da referida norma.

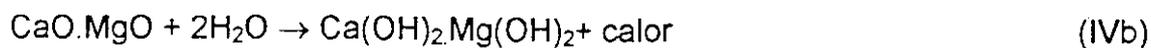
A cal hidratada é obtida a partir de um processo aplicado às rochas denominadas genericamente de calcários e dolomitos. Calcários são aquelas onde o carbonato predominante é o de cálcio (CaCO_3), conhecido pelos nomes de calcita e aragonita. Já nos dolomitos, o carbonato dominante é duplo, de cálcio e de magnésio, representado pela fórmula química $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, cujo cristal tem o nome de dolomita.

Os calcários e os dolomitos quando calcinados à temperaturas próximas de 1000°C , produzem a cal virgem, pela perda de parte dos seus constituintes, o anidrido carbônico (CO_2). A cal virgem assim obtida, composta somente de óxidos, recebe o nome de cal virgem cálcica, quando resulta da queima de calcários, e de cal virgem dolomítica ou cal magnesiana, quando provém de rochas dolomíticas e magnesianas. Estes processos estão representados nas equações químicas I e II:



Quando se adiciona água à cal virgem, numa operação denominada de hidratação, os seus óxidos transformam-se em hidróxidos, isto é, Ca(OH)_2 ou $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{Mg(OH)}_2$, com várias propriedades diferentes daquelas dos óxidos anidros iniciais (Guimarães e Cincotto, 1985). A reação de hidratação ou extinção da cal virgem está representada nas equações III, IVa e IVb abaixo:





Estas reações podem ser consideradas como reversíveis, sob condições de aquecimento, uma vez que a desidratação regenera a cal virgem, volatilizando a água.

A propriedade aglomerante da cal hidratada é resultante da reação de carbonatação dos hidróxidos, reação que ocorre porque o dióxido de carbono da atmosfera reage com a cal, produzindo carbonato de cálcio ou magnésio, dependendo do tipo de cal. As reações de carbonatação estão representadas nas equações V e VI:



A cal de melhor qualidade deve ser a mais rica em hidróxidos, aquela que resultou de condições ótimas de calcinação da matéria-prima e de hidratação da cal virgem.

Na Figura 1 está esquematizado o ciclo da cal, da produção ao endurecimento que ela propicia à argamassa.

2.3 Materiais Pozolânicos

2.3.1 Pozolana

Pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, não possui apreciável poder aglomerante hidráulico, mas que, em forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxidos (de cálcio e/ou magnésio), em temperaturas próximas à ambiente, para formar compostos que possuem poder aglomerante. Segundo Souza Santos (1992), a

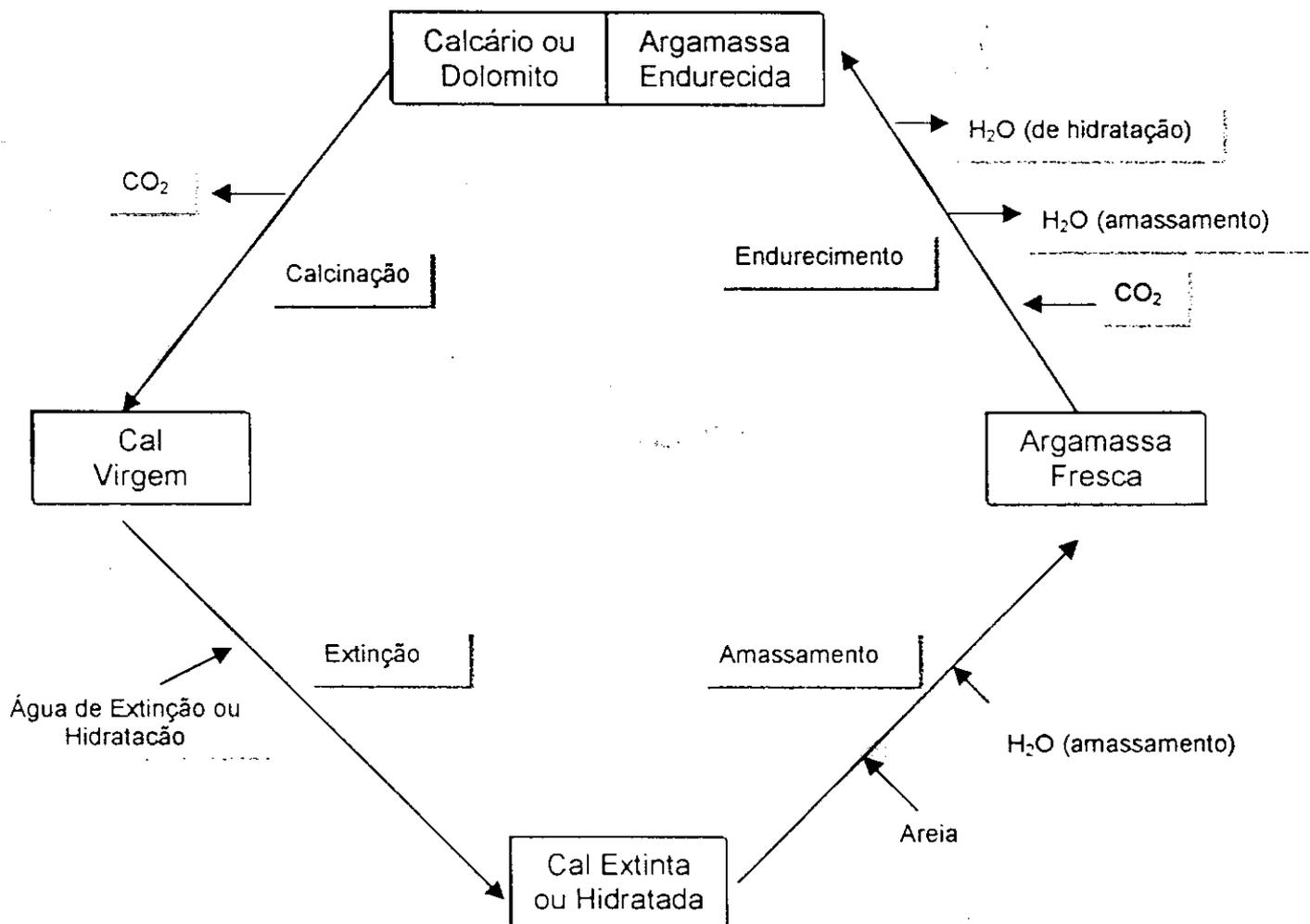


Figura 1 – Ciclo da Cal (Guimarães e Cincotto, 1985).

pozolana é um material natural ou artificial que quando adicionado à argamassas e concretos, dá origem a produto com características tecnológicas superiores às dos produtos sem adição, além de apresentar baixo custo.

Segundo Ruas (1977), pozolanas são todos os materiais que, por si só, não apresentando propriedades aglomerantes e atividade hidráulica, contém constituintes que combinam com a cal, à temperatura ambiente e em presença de água, dando lugar a compostos permanentemente insolúveis e estáveis que se comportam como aglomerantes hidráulicos. Em resumo, são materiais reativos à cal.

O termo pozolana, inicialmente usado para designar uma cinza vulcânica de Puzzuoli, monte próximo de Nápoles, estendeu-se a outros materiais

naturais ou artificiais, com as mesmas características. Seu uso deve provavelmente ter sido motivado pelo seu desempenho nas antigas argamassas de pozolanas e cais, utilizadas pelos romanos e, mais antigamente, pelos gregos.

As obras antigas, realizadas com argamassas compostas por misturas de pozolanas e cais, existem até hoje como inestimáveis relíquias dos romanos, mais técnicos e menos artistas que os gregos. Citam-se, por exemplo, o Panteão (Templo dos Deuses), o Coliseu, estádios, basílicas, cisternas, pontes, portos, aquedutos e as mais diversas estruturas que perduram até hoje (Calleja, 1958).

Embora a pozolana, por definição, seja um material capaz de reagir com hidróxidos de cálcio e/ou magnésio, julgou-se conveniente neste trabalho centralizar os estudos com o hidróxido de cálcio.

2.3.2 Classificação dos Materiais Pozolânicos

São considerados materiais pozolânicos, aqueles capazes de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em condições normais de pressão e temperatura, e formar novos compostos de propriedades aglomerantes.

Uma vez que são vários os materiais que satisfazem essas condições, é necessário agrupá-los segundo critérios que possibilitem uma avaliação prévia de seu desempenho e também de suas características químicas e mineralógicas. Portanto, os materiais pozolânicos são classificados em dois grupos: naturais e artificiais. As pozolanas naturais são aquelas que foram formadas por algum processo da natureza e que, em geral, necessitam apenas de uma moagem para o seu uso. As pozolanas artificiais são aquelas obtidas por processo industrial ou como um subproduto.

As pozolanas naturais são:

- tufos e cinzas vulcânicas – são talvez as primeiras pozolanas de que se tem notícia, usadas na antiguidade pelos romanos e que são ainda hoje exploradas;
- rochas contendo minerais de opala – em geral são encontradas na forma de xistos, contendo outras formas de sílica que não a amorfa, necessitando, portanto, de uma calcinação para sua ativação completa;
- terras diatomáceas – são as pozolanas mais ativas na reação com cal. O diatomito é formado por sedimentação de carapaças de micro-organismos.

As pozolanas artificiais são:

- xistos e argilas calcinadas – são mais comumente usados que as pozolanas naturais, em virtude da facilidade de obter-se matéria-prima adequada para sua fabricação; em contraposição com as jazidas de pozolanas naturais, as de xistos e argilas próprios à fabricação de pozolana são bem mais uniformes (Castro Sobrinho, 1970).

Uma das mais abrangentes e detalhadas classificações dos materiais pozolânicos deve-se a Massazza (1976) que, de forma similar, agrupa os materiais pozolânicos em duas classes: naturais e artificiais. As pozolanas naturais são aquelas que dispensam qualquer tipo de tratamento para revelar ou acentuar o seu caráter pozolânico, exceção feita aos processos normais de moagem. As pozolanas artificiais, por sua vez, abrangem os materiais que, através de modificações do quimismo e da mineralogia original, passam a exibir acentuada atividade pozolânica, incluindo os subprodutos industriais.

2.3.3 Atividade Pozolânica

A fundamental propriedade de uma pozolana é sua habilidade de combinar-se com cal, em condições normais de temperatura e pressão,

formando compostos de poder aglomerante. A esta propriedade dá-se o nome de atividade pozolânica.

No passado, acreditava-se que a atividade pozolânica era devida a uma atividade zeolítica, pois muitos pesquisadores tinham encontrado materiais zeolíticos em pozolanas, materiais esses conhecidos por serem capazes de absorver cal no contato com soluções, através de um mecanismo de troca de bases. Mais tarde, utilizando as técnicas de raios-X, foi provado que a reação predominante, que define a atividade pozolânica, não é a troca de bases, e sim a formação de novos compostos hidratados (Lea, 1970).

Normalmente, a aptidão de reagir com cal, em temperaturas próximas à ambiente e formar compostos com propriedades cimentícias é característica daqueles materiais onde o silício e o alumínio encontram-se em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente, ou ainda, em minerais instáveis frente ao sistema CaO-água. A princípio, quanto maior o desarranjo estrutural do material e a sua instabilidade em meio básico ($\text{pH} \cong 12$) mais intensamente se manifestar-se-á a reação pozolânica.

Segundo Ruas (1977), os compostos silicosos e aluminosos de uma pozolana, finamente moída, ao reagirem com cal hidratada, formam compostos aglomerantes estáveis, em geral silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Porém, os fatores que afetam o desenvolvimento e velocidade destas reações, bem como o porquê de uns materiais silicosos e aluminosos reagirem favoravelmente e outros não, são ainda desconhecidos. Contudo, sabe-se que a sílica e os silicatos amorfos reagem mais rapidamente que suas formas cristalinas.

A composição química de uma pozolana oferece poucos elementos para julgar sua atividade pozolânica. Em princípio, parece lógico, que quanto maior a porcentagem de sílica presente, melhor sua atividade pozolânica. Entretanto, existem boas pozolanas com apenas 40% de SiO_2 (Ruas, 1977).

Segundo Castro Sobrinho (1970), as propriedades pozolânicas são induzidas a temperaturas em torno de 500°C , sendo considerada a temperatura de calcinação ótima, aquela encontrada na faixa entre 700°C a 850°C . O superaquecimento das argilas, a temperaturas de 920°C a 1000°C , provoca

uma recristalização, com formação de compostos estáveis, diminuindo bastante sua atividade química. Logo, para a obtenção de pozolanas artificiais o controle da temperatura tem um papel importante; a temperatura ótima de queima é aquela necessária tão somente à desestruturação e colapso do argilomineral, na qual os óxidos de silício, alumínio e ferro se tornam bastante reativos e distribuídos em um material de elevada área específica (IS - 1344, 1968).

Nas argilas cauliniticas, a atividade pozolânica é devida à formação da metacaulinita, que ocorre entre 500°C e 800°C, composto esse de elevado grau de desordem cristalina, e portanto de grande atividade química (Kihara, 1982).

Em geral, torna-se bastante difícil determinar a atividade pozolânica de um material, em virtude da inexistência de um critério absoluto para tal. É necessário efetuar ensaios baseados em diferentes aspectos, como resistência mecânica e atividade química.

Alguns ensaios que podem ser realizados com o objetivo de determinar a atividade pozolânica no sistema cal-pozolana, seguem abaixo:

- como a atividade pozolânica, por definição, está associada à fixação do hidróxido de cálcio, na forma de compostos hidratados, mais ou menos definidos, os quais contribuem para as resistências mecânicas, sua avaliação pode ser feita segundo método Chapelle Modificado, no qual é determinada a quantidade de cal fixada pelo material pozolânico, em solução aquosa à ebulição, por 16h (Raverdy et al., 1980);
- no aspecto mecânico, a atividade pozolânica é manifestada pela resistência mecânica (resistência à compressão uniaxial e/ou resistência à tração por compressão diametral), que por sua vez exige a formação de compostos ou fases mineralógicas de propriedades ligantes, que só se formarão se ocorrer uma reação química entre a pozolana e a cal. A norma NBR-5751 (1992) sugere a elaboração de ensaios em argamassas. Os ensaios envolvem a medição da resistência mecânica de misturas de pozolana, cal e areia, moldadas em corpos de prova cilíndricos, lacrados, à idade de 7d e curados à temperatura de 55°C.

- o índice de atividade pozolânica pode ainda ser avaliado com o uso do cimento Portland. É o índice comparativo da resistência de duas argamassas de mesma proporção aglomerante-agregado e mesma trabalhabilidade, sendo uma moldada com cimento Portland e a outra, com substituição de 35% (em volume sólido) de cimento por material pozolânico, à idade de 28d, curadas em ambiente saturado, a 38°C (NBR-5752, 1992). É importante ressaltar que devido à significativa influência das características físicas e mineralógicas do cimento sobre a qualidade dos resultados, torna-se por vezes difícil avaliar a real qualidade da pozolana, prestando-se esse método muito mais à verificação da compatibilidade entre o cimento e a pozolana considerada (Zampieri, 1989).

Segundo Zampieri (1989), em estudos desenvolvidos com pozolanas de argilas calcinadas, objetivando um melhor conhecimento dos mecanismos de ativação e reação desses materiais, conclui que as reações pozolânicas, envolvendo argilas ativadas termicamente e o hidróxido de cálcio são, em essência, reações de dissolução e formações de novas fases. No meio fortemente alcalino, característico das misturas contendo hidróxido de cálcio, os argilominerais ativados termicamente encontram-se em forte desequilíbrio físico-químico, proporcionando, a nível de superfície das partículas, a dissolução do alumínio e do silício. Numa etapa posterior, e em função da grande disponibilidade de cálcio desse meio, observa-se a formação de aluminatos (carboaluminato e C_4AH_{13}), silicatos (gel de C-S-H) e aluminosilicatos de cálcio hidratados (C_2ASH_8 – gehlenita hidratada). A proporção e a sequência de formação dessas fases dependem da reatividade e da atividade química da pozolana, do tempo de reação e da proporção pozolana/cal adotada.

Outra conclusão, também de grande importância, dos estudos de Zampieri (1989), diz que o desenvolvimento das propriedades pozolânicas dos materiais argilosos é função, principalmente, da natureza e conteúdo do argilomineral presente, das condições de calcinação e da finura do produto. E para um bom desempenho mecânico as pozolanas devem apresentar um teor de SiO_2 reativo.

2.3.4 Produtos de Reação do Sistema Pozolana-Cal

O Instituto Nacional de Ciências Aplicadas (INSA), na França, vem desde a década de 80, dedicando-se ao estudo das reações de hidratação e endurecimento das argilas calcinadas (pozolanas) com o hidróxido de cálcio.

Em uma primeira etapa (Murat, 1983a), foi estudada uma mistura composta por metacaulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ou AS_2), obtida a partir de uma argila caulinítica a 730°C , hidróxido de cálcio (CH) e água, curada durante 28d. Os compostos hidratados formados à temperatura ambiente são, essencialmente, C_3AH_x (trialuminato de cálcio hidratado), C_4AH_{13} (tetraaluminato de cálcio hidratado), CSH (tobermorita ou CSH_I) e C_2ASH_8 (gehlenita), ou, ainda, uma mistura de C_2ASH_8 e CSH_I . As reações de hidratação possíveis de se propor são:



A identificação destes produtos formados pode ser efetuada com o auxílio da análise térmica diferencial (ATD), através dos picos endotérmicos: $180^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$ (C_2AH_8); 120°C (CSH) e 260°C (C_4AH_{13}). A caracterização por difração de raios-X é bastante simples para a gehlenita, e muito complicada para os outros, devido a sobreposição de algumas linhas, tais como: $d = 2,81 \text{ \AA}$ (C_4AH_{13}) e $d = 2,87 \text{ \AA}$ (C_2ASH_8); $d = 12,5 \text{ \AA}$ (CSH_I) e $d = 12,58 \text{ \AA}$ (C_2ASH_8); $d = 3,07 \text{ \AA}$ (CSH_I) e $d = 3,11 \text{ \AA}$ (CH). A tobermorita, quando presente, não pode ser detectada com segurança por esta técnica.

No tocante à reatividade dos materiais argilosos ativados termicamente, foi observado que as características mineralógicas da caulinita (matéria prima), tais como tamanho de grão, impurezas e especialmente grau de cristalinidade, podem modificar a reação de hidratação da metacaulinita, obtida pela

calcinação de argilas; quanto melhor o grau de cristalização da caulinita, maiores o volume de CSH_1 presente no material endurecido, e as resistências à compressão obtidas durante a idade de cura de 28d (Murat, 1983b).

Outro importante aspecto dos trabalhos desenvolvidos pelos pesquisados do INSA refere-se à determinação das condições ótimas de cura do sistema pozolana-cal. Foram investigados três diferentes processos de cura: 1) conservação dos corpos de prova nos moldes até o momento do ensaio mecânico; 2) remoção dos corpos de prova dos moldes ao atingir o sétimo dia de cura e a seguir curá-los em água até o vigésimo sétimo dia e, 3) remoção dos corpos de prova dos moldes ao atingir o sétimo dia de cura e então curá-los em compartimentos plásticos com ar comprimido, até o momento dos ensaios mecânicos. Recorrendo a estes processos foi observado que o mais eficiente é aquele no qual os corpos de prova permanecem nos moldes durante os 7 primeiros dias de cura e, a seguir, são imersos em água até o vigésimo sétimo dia, quando, então, são secos a uma temperatura de 50°C por 24h, antes dos ensaios mecânicos. Este processo conduz a um considerável aumento de resistência, devido a uma maior formação do CSH_1 no material (Ambroise et al., 1985).

No seu estudo mais recente, datado de 1986, Ambroise, Murat e Pera, enfatizam que as caulinitas mais puras e de menor grau de cristalinidade, proporcionam os melhores desempenhos mecânicos, muito embora, em trabalho anterior (Murat, 1983b), relatado acima, tivesse sido veiculada a opinião de que as caulinitas melhor cristalizadas seriam, quando aditivadas termicamente e misturadas com cal, mais propícias para o desenvolvimento de resistência mecânica.

Especificamente no que se refere ao sistema metacaulinita- $Ca(OH)_2$, não se pode deixar de registrar a pioneira contribuição de Stratling, que em 1940 já reconhecia o C_2ASH_8 como um dos produtos de reação dessa mistura (Coutinho, 1958). A partir daí, em vários artigos posteriores, pode-se encontrar referências ao C_2ASH_8 como "composto de Stratling".

2.3.5 Vantagens do Uso de Pozolanas

Muitas são as pesquisas envolvendo pozolanas, sejam elas naturais ou artificiais, a fim de verificar seu emprego em construções de diversos tipos e portes. Hoje, seu uso é bastante frequente como aditivo em cimentos para obtenção dos cimentos pozolânicos (CP II – Z 25, CP II – Z 32 e CP II – Z 40, cimentos Portland com pozolana, com 6% a 14% de material pozolânico, e CP IV 25 e CP IV 32, cimentos Portland pozolânicos, com 15% a 50% de material pozolânico) e em concretos.

Segundo Castro Sobrinho (1970), o uso de uma boa pozolana, em quantidade adequada e com condições ótimas de cura, melhora a maioria das propriedades importantes de um concreto. Seu uso em mistura com cimento pode variar de 15% a 40% nos concretos; essa porcentagem de substituição refere-se ao volume sólido do cimento, para facilidade dos trabalhos de dosagem.

Algumas das vantagens advindas da utilização de materiais pozolânicos em concretos são:

- trabalhabilidade - as pozolanas, quando usadas em substituição parcial do cimento, aumentam a plasticidade do concreto e diminuem a exudação de água e a segregação;
- permeabilidade – as pozolanas agem positivamente, tornando os concretos mais impermeáveis;
- calor de hidratação – misturas de cimento e pozolana despreendem a mesma quantidade de calor, durante a hidratação, que o cimento sozinho, porém, de uma maneira melhor distribuída. Este fato pode evitar trincas em grande massa de concretos, mesmo em pequena parcela;
- resistência química – embora tenham sido poucas as pesquisas que comprovam essa resistência, têm-se exemplos de obras marítimas e sujeitas ao ataque de águas sulfatadas, onde foram usadas pozolanas e que se encontram em perfeito estado, apesar do seu longo tempo de vida.

- combate à reação álcali-agregado - o uso de materiais pozolânicos foi reconhecido como um método efetivo no controle da reação álcali-agregado; tendo uma área específica alta, os materiais pozolânicos reagem prontamente com os álcalis formando um gel, minimizando a concentração de tensões na superfície dos agregados;
- resistência – a resistência dos concretos contendo pozolana cresce mais lentamente até a idade de 28d, porém em idades mais avançadas (90d a 60 meses) é de se esperar uma resistência mais elevada, quando comparados com concretos sem pozolanas. Uma limitação, portanto, da pozolana é o seu uso em obras onde se necessita resistências altas do concreto nas primeiras idades;

Segundo Ruas (1977), ao perguntar-se porque produzir cimento pozolânico, explica que além do aspecto econômico, principalmente devido ao baixo consumo de óleo combustível, existe também o aspecto técnico. E acrescenta que, com as inovações tecnológicas incorporadas ao processo produtivo e aos novos conhecimentos acerca da composição e natureza dos constituintes do cimento Portland, os fabricantes de cimento são tentados a produzir um clínquer, formado unicamente de silicato tri-cálcio. Mas, estes cimentos apresentam uma limitação, liberam grande quantidade de sua cal na forma de Ca(OH)_2 , composto solúvel muito vulnerável quimicamente e que praticamente não participa do comportamento mecânico. Este problema pode ser resolvido pela fixação desta cal liberada, e uma das maneiras de se conseguir isto, é adicionar pozolana, finamente moída, ao cimento Portland.

Além das vantagens tecnológicas e econômicas, o uso de pozolanas tem implicações ecológicas, contribuindo para um melhor aproveitamento de resíduos industriais poluidores, como é o caso, por exemplo, das cinzas volantes transportadas pelos gases de exaustão das termoelétricas e da microssilica decorrente das indústrias de ferro-silício e silício metálico (Zampieri, 1989).

2.4 Cais Pozolânicas

Cal pozolânica é uma mistura composta por um aglomerante simples, a cal, com uma pozolana; esta mistura é efetuada após o tratamento térmico do aglomerante simples, obtendo-se um cimento hidráulico pela formação de silicatos e aluminatos de cálcio insolúveis (Petrucci, 1979).

As cais pozolânicas eram produzidas comercialmente na ex-URSS e tratavam-se de misturas de pozolana, finamente dividida, com cal hidratada seca na proporção de 10% a 30% em peso. O tempo de pega era ajustado pela adição de até 5% de gesso durante a moagem conjunta dos constituintes ou durante a mistura dos componentes. As cais pozolânicas eram disponíveis em três categorias: 5,0 MPa, 10,0 MPa e 15,0 MPa (Vorobiev, 1965).

Segundo Silva (1992), as cais pozolânicas são bastante promissoras, devido ao baixo custo energético necessário à fabricação das pozolanas, comparado-se com o alto custo dos cimentos; podendo, também, ser aditivadas com cimento, quando se desejarem resistências mais elevadas, diminuindo, assim, o consumo de materiais dispendiosos, como são atualmente considerados os cimentos Portland.

Silva e Ferreira (1992a), ao estudar misturas de aglomerantes em diferentes composições (cal pozolânica industrial, 25% de cimento Portland pozolânico e 75% de pozolana industrial; cal pozolânica industrial, 50% de cimento Portland pozolânico e 50% de pozolana industrial, e, cal pozolânica industrial, 75% de cimento Portland pozolânico e 25% de pozolana industrial), verificaram que o aglomerante com apenas 25% de cimento Portland pozolânico e 75% de pozolana, obtida a 800°C, apresentou uma RCS de 9,6MPa. Em outro estudo (Silva e Ferreira, 1992b), verificaram que em composição de apenas 14,5% a 21% de pozolana, os valores de RCS obtidos ficaram entre 3,6MPa a 4,8MPa. Desta forma, fica evidenciada a superioridade mecânica das cais pozolânicas.

Segundo Lima (1993), uma das formas de obtenção do aglomerante cal pozolânica, é através de misturas de cais hidratadas e pozolanas, em

proporções adequadas, que variam com o tipo de cal utilizada. Ainda segundo este autor, o comportamento mecânico das cals pozolânicas, na composição de 40% de cal e 60% de pozolana, aos 60d de cura apresenta uma RCS de 16,50MPa, e conclui dizendo que, o uso deste aglomerante em substituição à cal hidratada, comumente utilizada nas argamassas mistas convencionais, traz um considerável aumento na resistência mecânica, possibilitando assim, uma redução na proporção de cimento Portland, de forma a se obter uma argamassa alternativa mecanicamente equivalente e de menor custo, o que conduzirá a uma evidente redução no custo total da argamassa.

O comportamento mecânico desenvolvido em argamassas alternativas com redução de 40% na proporção de cimento Portland é similar ou superior ao das argamassas convencionais, em virtude das cals pozolânicas propiciarem um comportamento mecânico bem superior aos obtidos com as cals hidratadas (Mota et al., 1994). Esta superioridade é facilmente constatada quando se utiliza uma composição adequada de cal-pozolana, viabilizando assim um custo bastante reduzido em obras de construção civil (Lima et al., 1994).

Os estudos efetuados por Mota (1994), confirmaram mais uma vez a superioridade mecânica proveniente das cals pozolânicas. Neste importante trabalho foi determinada a equivalência de traços alternativos com uso de cals pozolânicas em substituição às cals hidratadas e a redução da proporção de cimento Portland. Os traços são os recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e Editora PINI, para chapisco, alvenaria, emboço e reboco. Esta substituição permite uma redução de até 79% na proporção volumétrica de cimento Portland. As argamassas alternativas, assim obtidas, tem o seu custo reduzido em até 24% em relação as argamassas convencionais.

O uso do aglomerante cal pozolânica também foi objeto de estudo na estabilização de solos vermelhos tropicais. Segundo Amorim (1996), a substituição da cal hidratada, aglomerante comumente utilizado no processo de estabilização de solos, por cals pozolânicas, confere um ganho significativo nas propriedades mecânicas destes solos, sendo portanto, viável a sua utilização.

Acreditamos que as cais pozolânicas possuem um grande campo para o seu desenvolvimento, tendo em vista que existe uma maior possibilidade no controle das matérias primas envolvidas, bem como das temperaturas mais baixas de processamento que conduzirão a aglomerantes de menor custo, repercutindo no barateamento da construção civil e contribuindo para minorar a problema habitacional.

2.5 Entulho de Construção Civil

Na antiguidade, os romanos, quando não dispunham de materiais vulcânicos empregavam tijolos, telhas ou cerâmicas moídas, que eram utilizadas no preparo de argamassas de pozolana e cal.

Mais recentemente, após a Segunda Guerra Mundial, durante a reconstrução da cidade de Berlim, destruída no combate, materiais cerâmicos de construção, retirados dos destroços, após serem moídos eram misturados com cais hidratadas e areia para produção de argamassas (Vorobiev, 1965).

Hoje, o interesse por estes materiais foi retomado, e, nos últimos 20 anos, tem crescido significativamente o número de pesquisadores voltados para estudos de aproveitamento geral dos resíduos industriais e urbanos.

A nível internacional, as pesquisas neste sentido são relativamente superiores em relação às nacionais. Segundo Cincotto (1983), a preocupação com o aproveitamento dos resíduos industriais e urbanos tomou forma com a realização de simpósios internacionais a partir de 1968 e com a criação de comitês normalizados pela ASTM (American Society for Testing and Materials), RILEM (Réunion International des Laboratoires d'Essais et Matériaux) e OECD (Organization for Economic Cooperation and Development).

São três as razões motivadoras dessa atenção. Primeiro, a preocupação com o esgotamento de reservas de matéria-prima. Segundo, a preocupação com a preservação do meio ambiente, afetada pelo volume crescente de resíduos sólidos descartados e, terceiro, em países carentes de matéria-prima, a necessidade de compensar o desequilíbrio econômico provocado pela alta do petróleo, reciclando resíduos sólidos (Cincotto, 1983).

No Brasil, os estudos sobre o aproveitamento de resíduos tiveram início em 1983, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Das atividades realizadas no IPT, visando o aproveitamento de resíduos em argamassas, como aglomerantes e como agregados, e em estabilização de solos para produção de tijolos, ficou evidenciada a viabilidade deste material, sendo, porém, necessário estabelecer uma metodologia adequada ao estudo desses materiais, quando utilizados na produção de argamassa (Cincotto, 1988).

Ainda no IPT, em 1996, foram realizados estudos específicos, objetivando o uso do entulho como agregado miúdo em argamassas mistas. As argamassas foram preparadas usando cimento Portland, cal hidratada e como agregado, areia natural de rio (argamassa padrão) e/ou entulho moído. Os resultados mostraram que as argamassas alternativas (com entulho) apresentaram melhores propriedades mecânicas que aquelas apresentadas pela argamassa padrão (cimento-cal-areia). O autor ressalta que é necessário uma permanente preocupação com a qualidade do agregado reciclado, que, pode ser um material não homogêneo, pode variar, e por vezes, ser inferior a dos agregados convencionais. Por esta razão, algumas propriedades como por exemplo, durabilidade do concreto, pode ser prejudicada, e portanto, o uso de agregados reciclados oriundos de entulhos de construção civil, tem sido direcionado a elementos não-estruturais: argamassas, blocos de concreto, etc. (Hamassaki et al., 1996).

Estudos desenvolvidos na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), com o objetivo de analisar a influência da adição de entulho reciclado em argamassas mistas, mostraram que sua utilização é tecnicamente apropriada, propiciando grande incremento nas propriedades mecânicas, possivelmente devido ao desenvolvimento do potencial aglomerante do material cerâmico, presente no entulho. As argamassas assim obtidas, permitem, em média, uma redução de 30% no consumo de cimento, 100% no consumo de cal e 15% a 30% no consumo de areia, conforme o traço utilizado (Levy e Heiene, 1995 e Levy et al., 1997).

O entulho reciclado também é objeto de estudo na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (EPUFBA), que, em função do grande volume de entulho nos canteiros de obras de construção, procurou efetuar pesquisas que propiciassem a utilização deste material, chegando a resultados que

mostram a redução de tal resíduo, graças ao seu aproveitamento em argamassas mistas de comportamento bastante satisfatório (Silva et al., 1997).

Na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), o estudo sobre a reciclagem do entulho teve início em 1997, quando as empresas de construção civil da região de Campina Grande, preocupadas com o volume crescente de rejeitos ou entulhos gerados nos canteiros de obra, solicitaram pesquisas visando o aproveitamento destes materiais, como agregados, para uso em argamassa de assentamento e revestimento de alvenarias de paredes e tetos. Os resultados revelaram que o entulho de construção civil beneficiado, quando utilizado em substituição ao agregado convencional (areia), melhora as características das argamassas estudadas, atendem às normas da ABNT quanto às propriedades mecânicas, bem como diminui o impacto ambiental (Patrício et al., 1997).

O entulho de construção civil também foi estudado como agente pozolânico, na UFPB. Os resultados evidenciaram que o entulho, após adequada cominuição, pode ser utilizado como agente pozolânico, juntamente com cais hidratadas, originando aglomerantes alternativos de baixo custo (Araújo et al., 1998).

Segundo Pinto (1986), os resíduos de construção compõem um material com potencial concreto de reutilização, e longe de constituírem "lixo", podem ser considerados, praticamente, tão limpos quanto uma areia de uso normal.

Uma outra definição, ainda segundo Pinto (1995), menciona o entulho de construção como um material resultante da mistura de todas as fases de construção ou demolição de uma obra.

2.6 A Utilização do Entulho

A idéia de reciclar material de construção para reutilizar na própria obra não é nova. Nos Estados Unidos, o aproveitamento do entulho é feito há mais de 30 anos. Na Europa, trata-se de uma atitude cultural: a Holanda recicla 70% dos resíduos e a Alemanha, 30% (Coelho e Chaves, 1998). No Japão, por exemplo, a necessidade de reciclagem foi inevitável nas duas últimas décadas,

devido à falta de espaço físico para depositar o entulho das obras ou das demolições. No Brasil, esta necessidade decorre, além dos motivos ecológicos, do crescente déficit habitacional e da escassez de áreas adequadas para a deposição do entulho, que se tornam cada vez mais remotas com o crescimento metropolitano. Em 1991, foi instalada a primeira unidade de reciclagem de rejeitos, localizada no aterro Itatinga, em São Paulo, e segundo dados da época 50% do material que chegava à usina podia ser reciclado, já que o restante apresentava-se comprometido por materiais de origem orgânica, o que não permite sua reutilização. Em 1992, a usina apresentava uma produção de 500t diárias de agregado (pedras, pedriscos e areia), com custos 80% menores que os de mercado (Villari, 1992). Em 1993, a prefeitura de São Paulo construiu um alojamento de 190m² com cerca de 4.000 blocos de concreto feitos com entulho processado, e decorridos cinco anos da construção, o prédio encontra-se em excelentes condições. O custo de produção reportado por estes blocos foi 70% inferior ao dos convencionais (Coelho e Chaves, 1998).

Hoje, existem, no Brasil, oito unidades de reciclagem (duas em Belo Horizonte, uma em Ribeirão Preto, São José dos Campos, Londrina, Piracicaba e Muriaé) que se seguiram à usina de Itatinga. Em Belo Horizonte, por exemplo, os resíduos reciclados já fazem parte de sua realidade, e são utilizados com viabilidade em substituição aos agregados convencionais e na produção de blocos de vedação, apresentando grandes vantagens econômicas (Pinto, 1997). Ainda segundo este autor, pode-se dizer que "cada rua pavimentada seria um aterro de pequena altura; cada tijolo produzido, mais que um componente barato e racional, um litro de aterro que foi viabilizado".

Embora ainda não existam estatísticas de todo o país, em média, o entulho que sai dos canteiros de obras brasileiros é composto basicamente de 64% de argamassa, 30% de componentes de vedação (tijolo maciço, tijolo furado e bloco) e 6% de outros materiais, como concreto, pedra, areia, metálicos e plásticos (Pinto, 1995). Desta forma, não sendo este o "lixo" mais incômodo, e sim, um material inerte, é muitas vezes utilizado na recuperação de áreas alagadas, para aterros e reaterros, ou então, simplesmente, lançado de maneira aleatória e irregular nas beiras de estradas, cursos d'água ou

antigas cavas (Coelho e Chaves, 1998). Por outro lado, este material pode ser reciclado, gerando elementos construtivos, como o agregado, que utilizado na produção de argamassas, confere propriedades comparáveis às argamassas convencionais.

2.7 Processo de Reciclagem do Entulho

O aproveitamento do entulho oriundo da indústria da construção civil e/ou de demolições depende de alguns aspectos, tais como: origem e composição do entulho; quantidade de entulho gerado; sua coleta e transporte, entre outros (Hamassaki et al., 1996).

A reciclagem do entulho pode ser uma boa opção técnica e econômica, e segundo Silveira (1993), este processo apresenta as seguintes vantagens:

- redução e/ou eliminação de áreas ilegais de despejos, onde o custo da operação de limpeza destas áreas é superior a U\$ 10,00/m³ de entulho;
- os agregados reciclados apresentam custo de produção de aproximadamente U\$ 2,50/m³, enquanto as áreas naturais de construção são comercializadas por U\$ 6,50, sem o transporte;
- promove maior vida as áreas tradicionais de disposição do entulho;
- preservação de recursos naturais.

Contudo, segundo este mesmo autor, a reciclagem tem como desvantagem a qualidade inferior das agregados reciclados, quando comparada a qualidade dos agregados naturais; isto devido a não homogeneidade do entulho.

O processo básico da reciclagem do entulho é bastante simples e pode ser representado na Figura 2.

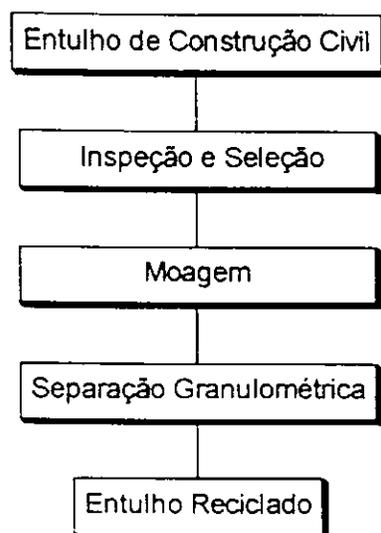


Figura 2 - Processo de Reciclagem do Entulho.

Os equipamentos utilizados para reciclar o entulho de construção civil e os resíduos cerâmicos em geral, tratam-se de moinhos-misturadores, constituídos por dois rolos de 600 kg cada um, que operam de forma simples e rápida. Esses moinhos processam, como matérias-primas, cimento, entulho (blocos cerâmicos, blocos de concreto, tijolos e telhas quebrados, e restos de argamassas), areia e água. O produto final obtido é uma argamassa de melhor qualidade, isto porque, na moagem do entulho, ficam liberados cimento e cal na forma pulverulenta, que ainda preservam parte de suas propriedades aglomerantes (Makhoul, 1992), além de características como plasticidade, trabalhabilidade e aderência, que são obtidas pela produção de finos, os quais geram a liga entre os grãos de areia, e, preenchendo os vazios, aumentam a impermeabilidade.

Segundo Natenzon (1992), o moinho-misturador proporciona uma economia de 50% de cimento, 40% de areia e 80% de cal, e produz uma ótima massa fina, utilizando cal e areia sem peneirar.

Portanto, a reciclagem do entulho de construção civil e resíduos cerâmicos em geral, pode ser um bom negócio, uma indústria lucrativa, que no Brasil, embora incipiente, busca, com sua implantação, obter materiais de construção mais baratos e de boa qualidade, além de preservar o meio

ambiente, na medida em que elimina a nociva deposição de tais resíduos em valas, rios e vias públicas.

2.8 Argamassas

As primeiras misturas que tiveram sucesso, na junção de blocos de alvenaria, foram batizadas com o nome de "argamassas", palavra que etimologicamente designa misturas de cal, água e areia para construções (Guimarães e Cincotto, 1985).

Segundo a NBR-7200 (1982), a argamassa é definida como sendo a mistura de aglomerantes e agregados miúdos com água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência.

As argamassas são constituídas por material ativo, a pasta, e material inerte, o agregado miúdo. A pasta é uma mistura isolada do(s) aglomerante(s) com a água e é responsável pela ligação dos grãos de areia entre si, a fim de formar um todo homogêneo. A presença do material inerte à pasta, além de oferecer um barateamento do produto, elimina em parte a retração por secagem.

O aglomerante comumente utilizado em argamassas é o cimento Portland. No Brasil, existem vários tipos de cimentos; alguns propiciam adequado nível de resistência e de durabilidade para uso em geral, e outros, em que certas propriedades predominam, são particularmente indicados para usos específicos (Tesuka, 1988). Por ser o cimento Portland o elemento ativo de maior custo unitário, são hoje estudados aglomerantes alternativos, de baixo custo e mecanicamente satisfatórios, que possam ser utilizados em sua substituição, total ou parcial. Dentre estes aglomerantes encontram-se as cais pozolânicas, que são formadas a partir de misturas de pozolanas naturais, artificiais ou resíduos cerâmicos de construção civil, com cais hidratadas. Estes aglomerantes conferem boas características físicas e mecânicas às argamassas.

Quando a substituição do aglomerante principal se dá parcialmente, tem-se o uso de mais de um aglomerante na composição da argamassa, sendo esta denominada de argamassa mista.

O uso da cal hidratada em argamassas oferece grandes vantagens tanto do ponto de vista ambiental como técnico. No setor ambiental diz respeito às propriedades que as argamassas proporcionam à qualidade do meio-ambiente, devido às características físicas e químicas da cal, como: a alcalinidade ($\text{pH} > 11,5$), que torna o meio mais asséptico; a cor branca que clareia as misturas, tornando-as mais neutras, e o pequeno teor de álcalis que ocasiona uma redução sensível das eflorescências, perturbadoras do visual e danificadoras da estrutura das mesmas argamassas. Tecnicamente, oferecem duas outras características às quais: maior retenção de água pelas suas partículas e maior plasticidade que estas partículas transmitem às suas argamassas. Estas características ocorrem devido a elevada finura deste aglomerante, bem como pela habilidade de suas partículas de reter, em sua volta, um película líquida de água firmemente aderida (Guimarães e Cincotto, 1985).

O uso de mais de um agregado miúdo na composição da argamassa, também é bastante comum, e proporciona uma granulometria contínua e teor de finos adequado, levando a um menor índice de vazios.

As quantidades de aglomerantes e agregados numa argamassa são determinadas através do traço. Traço é a proporção relativa, expressa em massa ou volume, entre os diversos componentes da argamassa, sendo, normalmente, o primeiro número correspondente ao aglomerante principal, tomado como unidade. No caso de argamassas mistas a ordem é definida pelo aglomerante mais caro para o mais barato.

Segundo a NBR-7200 (1982), na escolha do traço devem ser consideradas as propriedades dos aglomerantes, a granulometria dos agregados, o processo de mistura (manual ou mecânico), os requisitos do revestimento, a qualidade da base do revestimento, o tipo de acabamento e as condições locais.

As propriedades das argamassas podem ser divididas em três classes: propriedades da argamassa no estado fresco, propriedades da argamassa no estado endurecido e propriedades da argamassa no período de uso.

i) Propriedades da argamassa no estado fresco

Consistência - determinada no estado fresco, é de extrema importância; é influenciada pelo comportamento da pasta (quantidade de água, tipo de aglomerante) e pelas características do agregado miúdo, como, por exemplo, distribuição granulométrica (Rago e Cincotto, 1995).

Trabalhabilidade - influenciada pela distribuição granulométrica do agregado, seu módulo de finura e forma dos grãos, além do teor de aglomerantes e utilização ou não da cal (Cincotto et al., 1995).

Por ser a consistência uma propriedade associada também a esta série de fatores, pode ser utilizada como uma medida da trabalhabilidade, que em termos práticos significa facilidade de manuseio (Cavani et al., 1997).

As argamassas podem ser classificadas, segundo a consistência, em argamassas secas, plásticas e fluidas, existindo um sentido crescente de valores da consistência da argamassa seca para fluida. Esta classificação baseia-se na situação da película da pasta que envolve os grãos do agregado. Na argamassa seca (farofa), a pasta preenche os vazios entre os grãos, os quais permanecem em contato. A argamassa plástica caracteriza-se por uma fina película de pasta que atua como lubrificante na superfície dos grãos de agregado, e a argamassa fluida, caracteriza-se pela imersão dos grãos de agregado na pasta (Cincotto et al, 1995).

Plasticidade - propriedade pela qual a argamassa tende a reter a deformação, após a redução do esforço de deformação. É influenciada pelo teor de ar, natureza e teor de aglomerantes e pela intensidade de mistura das argamassas.

Retenção de Água - é a capacidade da argamassa fresca em manter sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água (evaporação, sucção, absorção pelo componente)

(Cincotto et al., 1995). Segundo Rosselo (1976), esta propriedade pode ser definida como a capacidade da argamassa de não enrijecer quando em contato com a superfície absorvente, onde é aplicada.

Os fatores que influem sobre a capacidade de retenção de água das argamassas são: área específica dos materiais constituintes; a maturação prévia das argamassas de cal (período em que a pasta ou argamassa de cal são deixadas em descanso antes da aplicação); a natureza da cal; a relação dos aglomerantes no traço e a relação agregado/aglomerante do traço.

As argamassas de cal apresentam características favoráveis de retenção de água pela sua elevada área específica e pela grande capacidade de adsorção de seus cristais (até 100% de seu volume).

Além de determinar as condições de manuseio da argamassa, a retenção de água influi sobre as propriedades no estado endurecido, na medida em que determina as condições de hidratação do cimento e a carbonatação da cal, responsáveis pela evolução do processo de endurecimento, nas argamassas de cimento e cal (Cincotto et al., 1985). Nas argamassas de cal pozolânica, esta propriedade também é importante pois a água retida auxilia nas reações entre a cal e a pozolana.

Massa Específica - esta propriedade afeta a trabalhabilidade, pois, à medida que a massa específica diminui, a argamassa se torna mais leve e com melhor trabalhabilidade.

Adesão Inicial - propriedade que caracterizará o comportamento futuro do conjunto base-revestimento quanto ao desempenho decorrente da aderência. A forma como ocorre essa adesão inicial depende tanto das características de trabalhabilidade da argamassa de revestimento, quanto das características de porosidade ou rugosidade da base, ou de tratamento prévio que aumente a superfície de contato entre os materiais (Cincotto et al., 1985).

ii) Propriedades da argamassa no estado endurecido

Resistência Mecânica - a resistência mecânica das argamassas de revestimento diz respeito à capacidade destas argamassas resistirem às tensões de tração, compressão ou cisalhamento às quais o revestimento pode

estar sujeito. Está diretamente relacionada à natureza e dosagem dos materiais, bem como à relação água/aglomerante.

Elasticidade ou Capacidade de Deformação - é a capacidade que a argamassa apresenta em deformar-se sem que ocorra à ruptura, retornando às suas dimensões iniciais quando cessam as solicitações que lhes são impostas. A elasticidade é, portanto, uma propriedade que determina a ocorrência de fissuras no revestimento e, desta forma, influi decisivamente sobre o grau de aderência da argamassa à base e, conseqüentemente, sobre a estanqueidade da superfície e sua durabilidade (Cincotto et al., 1985).

Retração - é resultado de um mecanismo complexo, relacionado ao processo de variação na umidade da pasta aglomerante. Ao ser aplicada, a argamassa perde água de amassamento para a base, por efeito de sucção, o qual é tanto mais acentuado quanto mais porosos forem os componentes da base. Essa perda de água ocasiona movimentação reversível ou irreversível, estando a primeira relacionada à capacidade de absorção de água do sistema base-revestimento e, a movimentação irreversível relacionada ao processo de secagem, gerando tensões de tração (Cincotto et al., 1985).

Aderência - é a propriedade que permite à argamassa absorver tensões normais e tangenciais na superfície de interface com a base (Rosello, 1976).

Permeabilidade - é a propriedade que identifica a possibilidade de passagem da água através da argamassa endurecida por meio de infiltração sob pressão, capilaridade ou difusão de vapor de água. É diretamente proporcional à relação água/aglomerante(s) e inversamente proporcional à resistência da pasta aglomerante (Cincotto et al., 1985).

iii) Propriedades da argamassa no período de uso

Durabilidade - a durabilidade não se constitui em uma única propriedade com mecanismos próprios, mas no resultado da ação conjunta de uma série de propriedades e fatores externos que caracterizam a capacidade do revestimento em desempenhar as funções para as quais foi especificado, ao

longo da vida útil da edificação. Logo, são necessárias atenções especiais à todas aquelas propriedades citadas anteriormente, à ação de agentes degradantes ou fatores de degradação, às condições de exposição que determinam tal ação e às decisões tomadas ao longo do processo produtivo, uso e manutenção da edificação e, conseqüentemente, do revestimento.

2.9 Área Específica

2.9.1 Conceituação

A expressão área específica refere-se à área externa total das partículas de um sólido pulverulento referido à unidade de massa, e, mais raramente, à unidade de volume. É normalmente expressa em m^2/g ou cm^2/g . É a tradução das expressões da língua inglesa "surface area" ou "specific surface", uma vez que, em geometria, área é o número que mede, em uma certa unidade, a superfície de uma figura geométrica plana ou a superfície externa de um sólido tridimensional (Souza Santos, 1989 e Souza Santos e Cruz, 1971).

2.9.2 Determinações de Área Específica

São vários os métodos existentes para determinação de área específica, usando diferentes princípios físicos e químicos.

Segundo Ferreira et al. (1972), esses métodos podem ser divididos em: método absoluto e métodos relativos. O método absoluto é aquele que se utiliza de adsorção de gases, a baixas temperaturas, sendo também conhecido como método de B.E.T. (Brunauer, Emmett e Teller). Os métodos relativos são aqueles que usam, como referência, áreas específicas determinadas, previamente, a partir de conceitos geométricos relativos à forma das partículas, de determinações microscópicas, usualmente eletrônicas e outros. Os principais métodos relativos são: adsorção de pigmentos e moléculas polares à temperatura ambiente; métodos granulométricos, a partir da composição

granulométrica determinada por sedimentação; métodos microscópicos, usualmente através da microscopia eletrônica por transmissão; de permeabilidade, com permeâmetro de Fisher, que se utiliza de padrões fornecidos pelo "National Bureau of Standard", EEUU e do permeâmetro de Blaine, que se utiliza de padrões de cimento fornecidos pelo "National Bureau of Standard", EEUU ou pela Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP.

Os métodos de permeabilidade ao ar, Blaine e Fisher, comparam o tempo requerido, por um dado volume de ar, que atravessa uma amostra cilíndrica de material compactado, com o mesmo volume de ar, que passa através de uma amostra de área específica conhecida. O Blaine é utilizado, comumente, na indústria cimenteira, enquanto o Fisher, é usado para determinar a finura de óxidos e pós metálicos. O método de Fisher utiliza um equipamento mais sofisticado e mais caro que o Blaine.

Os métodos granulométricos, para determinação de área específica, fazem uso dos tamanhos de grãos, determinados por sedimentação e com auxílio dos diâmetros médios aritméticos, geométricos e diâmetro médio de Mellor (Souza Santos e Cruz, 1971 e Singer e Singer, 1971). A equação empregada para a determinação dos valores de área específica é:

$$S = \frac{6}{dr} \left(\frac{w_1}{D_1} + \frac{w_2}{D_2} + \frac{w_3}{D_3} + \frac{w_4}{D_4} \right)$$

onde: S é a área específica em m^2/g ; dr é a densidade real da amostra em g/cm^3 ; w_i é a porcentagem correspondente às faixas; D_i é o diâmetro médio correspondente às faixas em μm .

A adsorção de moléculas polares de glicerol (Kinter e Diamond, 1968), éter monoetil etileno glicol (EGME) (Carter et al., 1965) e etileno glicol (EG) (Brower e Gschwend, 1952), é um método tradicionalmente utilizado na determinação de área específica de solos e em estudos agrícolas. Este método é caracterizado por um grau relativamente alto de precisão e repetibilidade.

O método baseado na adsorção de azul de metileno, tem sido usado no controle da finura de matérias-primas na indústria cerâmica, e tem sido utilizado recentemente na caracterização de solos, em aplicações de mecânica dos solos. Este método é rápido e leva, aproximadamente, 30min por ensaio, mas sua precisão e repetibilidade são baixos. A equação para o cálculo da área específica é:

$$S = c.t.c \times fc$$

onde: *c.t.c* é a capacidade de troca de cátions da amostra e *fc* o fator de conversão igual a 7,8043 (Hang e Brindley, 1970).

O método de BET é um método clássico de determinação de área específica, e é baseado na adsorção de gases de hidrogênio e nitrogênio. É largamente utilizado na indústria química e na tecnologia de materiais. O tempo para cada ensaio é em torno de 2h, e sua precisão e repetibilidade são boas. Apresenta como desvantagem o elevado custo do equipamento.

A análise de tamanho de partículas através de medidas diretas é realizado utilizando a microscopia eletrônica de transmissão ou varredura. Este método é de grande exatidão, e é utilizado, principalmente, em pesquisas. É um dos métodos de determinação de área específica mais lento, e requer microscópios eletrônicos muito caros.

O sedígrafo de raios-X é um método de análise de tamanho de partículas, que usa sedimentação. É um método rápido e mede a distribuição de tamanho de partículas na faixa entre 0,2µm a 50µm. Sua técnica consiste em um feixe de raios-X, que é projetado através de uma suspensão de espessura conhecida, dentro de uma foto-célula. A intensidade do feixe de raios-X transmitida pode ser medida com precisão e determina a concentração de partículas que permanecem em suspensão, como uma função do tempo (Cooper, 1978).

Os valores de área específica, obtidos através desses diferentes métodos, variam largamente. Em alguns casos, a correlação existente, entre os

resultados obtidos pelos diferentes métodos, é pequena ou quase nenhuma (Ferreira e Brito, 1984 e Amorim et al., 1998).

2.9.2.1 Método de Blaine

O método de permeâmetro de Blaine (Blaine, 1943), é utilizado comumente na indústria cimenteira, e destaca-se dos demais pela sua praticidade, facilidade de operação, rapidez (em torno de cinco minutos por ensaio) e baixo custo.

O método de Blaine consiste em fazer passar uma quantidade determinada de ar, através de uma camada de pó compactada e, compara o tempo requerido pelo ar, para atravessar a amostra, com o tempo levado pelo mesmo volume de ar para atravessar uma amostra de área específica conhecida. Esta amostra é denominada de amostra padrão, ou padrão de finura, e possui massa específica, área específica e porosidade definidas. É fornecida por laboratório de referência, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Este método funciona através do princípio de permeabilidade ao ar, para medir o tamanho médio das partículas do pó. O princípio emprega o fato de que as partículas, no caminho de um regulado fluxo de ar, afetarão aquele fluxo conforme seu tamanho, ou seja, uma corrente de ar flui mais rapidamente através de uma camada de pó grosso do que em uma de igual volume de pó fino.

A norma NBR - 7224 (1994) prescreve o método para a determinação da área específica de cimento e outros materiais em pó, mediante o emprego do permeâmetro de Blaine. Segundo o item 6 da referida norma, o cálculo da área específica é realizado através da seguinte expressão:

$$Am = \frac{k \cdot \sqrt{E^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-E) \cdot \sqrt{\eta}}$$

onde: Am = área específica em massa em m^2/kg ;

E = porosidade da camada;

t = tempo em segundos;

ρ = massa específica do material em Mg/m^3 ;

η = viscosidade dinâmica do ar em $\text{Pa}\cdot\text{s}$ e,

k = constante do aparelho em $\text{Pa}^{1/2} / \text{m}$.

A constante k é determinada mediante os dados da amostra padrão.

O permeâmetro de Blaine é composto por uma câmara, chamada câmara de permeabilidade, constituída de um cilindro rígido, de vidro ou metal não corrosível, juntamente com o disco, o êmbolo e o manômetro em "U". A Figura 3 ilustra o equipamento.

2.9.3 Importância da Área Específica

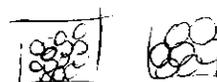
A área específica é usada na prática, para correlacionar o tamanho de partículas de materiais granulares com outras propriedades de engenharia. Essas correlações podem ser usadas como parâmetros de controle, em uma larga variedade de processos tecnológicos (Ferreira et al., 1995).

O grande interesse pelo estudo da área específica dos materiais sólidos pulverulentos, deve-se a sua ampla aplicabilidade. É um dado fundamental no controle das propriedades tecnológicas das argilas e cerâmicas, bem como na estabilização de solos, além de ter grande importância em processos como conformação plástica e sinterização. Segundo Souza Santos (1989), a cinética de todos os processos de interação, onde uma fase sólida esteja envolvida, depende diretamente da área específica do reagente sólido.

A área específica é objeto de inúmeros trabalhos, em diversas áreas de construção civil. Em geotecnia, foi verificado através de diversos estudos, envolvendo a estabilização de solos lateríticos, que a atividade pozolânica desses solos está intimamente relacionada com sua área específica, podendo, portanto, ser utilizada como parâmetro de avaliação da reatividade à cal (Machado e Ferreira, 1987), (Neves et al., 1988), (Neves, 1989) e (Ferreira et al., 1993).

Também, nos materiais aglomerantes, a área específica apresenta papel importante. No cimento Portland composto, por exemplo, segundo a norma EB 2138 (1991), tem-se os seguintes dados: o CP II – Z 25 apresenta área específica de 240 m²/kg e uma resistência à compressão de 25 MPa, para o período de 28d de cura; o CP II – Z 32 apresenta área específica de 260 m²/kg e uma resistência à compressão de 32 MPa, para o período de 28d de cura, e o CP II – Z 40 apresenta área específica de 280 m²/kg e uma resistência à compressão de 40 MPa, para o período de 28d de cura. Estes dados vêm comprovar que, quanto maior a área específica do material, maiores serão suas propriedades mecânicas.

Portanto, é importante estudos que busquem correlacionar a área específica (área de reação) com a resistência mecânica dos materiais, objetivando estudos mais dinâmicos, bem como a obtenção de materiais com melhores propriedades.



Em resumo, as cais pozolânicas foram usadas amplamente na antiguidade pelos gregos e romanos e a história da arquitetura mostra que as construções daquela época continuam imponentes até hoje. Contudo, a descoberta do cimento Portland colocou as argamassas de cais pozolânicas no esquecimento e o interesse por este material ressurgiu decorrente dos problemas econômicos e ecológicos que o mundo atravessa. Logo, com o objetivo de obter materiais de construção de baixo custo e preservar o meio ambiente, pesquisadores estudam o entulho de construção e de demolição ou, ainda, os rejeitos cerâmicos da indústria de tijolos, telhas e manilhas, como matéria prima para elementos construtivos. O entulho reciclado pode substituir em grande parte os agregados naturais empregados na produção de concretos, blocos e argamassas. Porém, este mesmo entulho ou rejeito sólido se empregado com cal hidratada pode gerar um ligante hidráulico, com características similares às das cais pozolânicas, fazendo com que os custos dos elementos construtivos se tornem ainda menores.

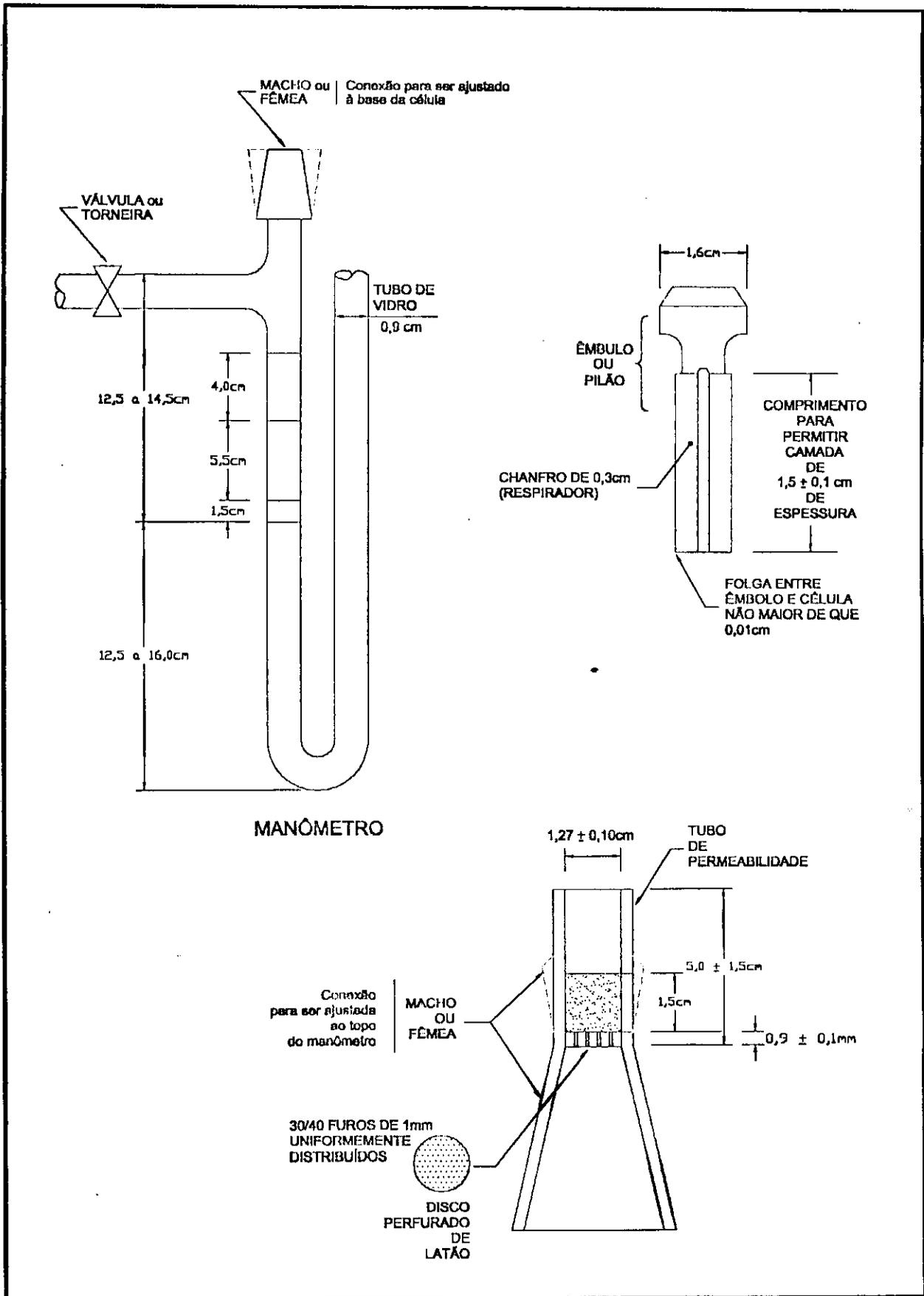


Figura 3 – Permeâmetro de Blaine.

Capítulo 3

Etapa Experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os materiais escolhidos e os métodos de ensaios utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Os materiais serão a seguir relacionados, identificando-se suas procedências e condições físicas. Os métodos de ensaios normalizados pela ABNT serão apenas citados, enquanto os métodos que não constam desta normalização serão descritos.

3.2 Materiais

Os materiais estudados foram os seguintes:

3.2.1 Cais

Foram estudadas duas amostras de cais hidratadas, adquiridas no comércio de Campina Grande e João Pessoa, PB.

A amostra de cal, conhecida comercialmente como "**Megaó**", proveniente de Recife, PE, fabricada pela Indústria Fazenda Megaó de Cima – Indústria e Comércio Megaó Ltda., chegou ao laboratório acondicionada em sacos plásticos de 10 kg.

A amostra de cal, conhecida comercialmente como "**Carbomil**", proveniente de Fortaleza, fabricada no Município de Limoeiro do Norte, CE, chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel "kraft", 3 camadas, de 20 kg.

As amostras de cais foram retiradas de suas embalagens de origem e, a seguir, colocadas em sacos plásticos, identificadas por etiquetas e devidamente lacrados, de forma a não modificar suas propriedades intrínsecas.

3.2.2 Rejeitos e Materiais Pozolânicos

Foram estudadas quatro amostras de rejeitos e materiais pozolânicos: duas amostras de entulho de construção civil, uma amostra de resíduos cerâmicos e uma pozolana artificial.

A amostra de entulho de construção civil, denominada de "**Entulho 1**", é proveniente da demolição de uma casa residencial construída há 60 anos, localizada na rua Desembargador Trindade, nº 588, Centro, Campina Grande, PB. A segunda amostra de entulho, denominada de "**Entulho 2**", é proveniente da demolição de parte de uma das torres da Igreja Nossa Senhora da Conceição – Catedral, construída há 248 anos, localizada na Avenida Floriano Peixoto, Centro, Campina Grande, PB. As amostras de entulho, chegaram ao laboratório acondicionadas em sacos de "nylon", e foram coletadas por engenheiro responsável pelas obras e transportadas para o laboratório.

A amostra de resíduos cerâmicos, denominada de "**Mistura**", é proveniente de uma mistura composta por 50% de tijolos furados e 50% de telhas, utilizados em construções e adquiridos no comércio de Campina Grande, PB. Os tijolos furados e as telhas, chegaram ao laboratório na sua forma original, e foram acondicionadas em local seguro até o momento da preparação das amostras.

A amostra de pozolana artificial, denominada de "**Pozolana**", é produzida pela Itapessoca Agro Industrial S.A., localizada na Ilha de Itapessoca, no Município de Goiana, PE. Esta pozolana é obtida por tratamento térmico, à temperatura em torno de 700°C, a partir de uma argila caulinitica, de origem sedimentar, na formação Barreiras, PE. A amostra de pozolana chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel "kraft", 3 camadas, tendo sido retirada da embalagem original e, a seguir, colocada em sacos plásticos e

etiquetada, de forma a não modificar suas propriedades originais e permitir sua identificação.

3.2.3 Areia

Foi utilizada uma areia normal, obtida por peneiração, segundo norma NBR-7214 (1982), a partir de areias normalmente utilizadas em construção civil e proveniente do Rio Paraíba, PB.

3.2.4 Água

Foi utilizada água potável, fornecida pela CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba, para o sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande, PB.

3.3 Métodos

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho consiste nas etapas descritas a seguir, conforme atividades desenvolvidas e ensaios realizados.

3.3.1 Preparação das Amostras

As amostras de entulho, Entulho 1 e Entulho 2, e a amostra de resíduos cerâmicos, Mistura, ao chegarem ao laboratório foram submetidas ao processo de trituração, em britador de mandíbulas, e, em seguida, peneiradas em peneira ABNT nº 4 (4,76mm). Após esta etapa, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de 50 kg, e etiquetadas de forma a permitir sua identificação.

A amostra de pozolana artificial, Pozolana, não passou por nenhum beneficiamento (trituração ou peneiração) antes da etapa de moagem, uma vez que foi enviada ao laboratório com granulometria ideal para o estudo.

3.3.2 Moagem

As amostras de entulho, Entulho 1 e Entulho 2, e a amostra de resíduos cerâmicos, Mistura, foram secas em estufa, a 110°C, até massa constante, e, em seguida, foram moídas em moinho de bolas, por períodos de 10, 15, 20, ..., 80, 85 e 90 min, sendo retiradas pequenas porções de material, a cada intervalo de tempo. Estas porções foram passadas em malha ABNT nº 50 (0,297mm) e encaminhadas ao ensaio de área específica.

O moinho de bolas utilizado possui um volume de 8,17 litros, e operou com carga de bolas igual a 55% do seu volume (4,8 kg), sendo 80% de bolas pequenas (21mm) e 20% de bolas grandes (30mm). A quantidade de material utilizada em cada moagem foi equivalente a 40% da quantidade de bolas (1,8 kg) (Singer e Singer, 1971).

A amostra de pozolana artificial, Pozolana, foi moída em moinho de discos, com diferentes aberturas entre os discos, denominadas de AB0 (0,3mm) e AB1 (0,2mm). Parte da amostra moída na abertura AB1 foi passada em peneira ABNT nº 200 (0,074mm), sendo esta denominada de AB2. Foi estudada, ainda, uma amostra de Pozolana, denominada de PM (0,1mm), recebida da fábrica já moída, também em moinho de discos.

3.3.3 Ensaios de Caracterização

As amostras de cais, de rejeitos e materiais pozolânicos, foram caracterizadas através dos ensaios abaixo relacionados. Para a realização dos ensaios de massa específica real, análise química, análise térmica diferencial, análise termogravimétrica e difração de raios-X, as amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos foram passadas em peneira ABNT nº 200 (0,074mm).

3.3.3.1 Caracterização Mineralógica

3.3.3.1.1 Análise Química

As amostras de cais, de rejeitos e de materiais pozolânicos foram submetidas à análise química. Estas análises foram realizadas segundo método do laboratório de análise minerais, do CCT/PRAI/UFPB, LAM – CG.

Os resultados da análise química permitem avaliar a qualidade da matéria-prima utilizada, bem como a qualidade do processo produtivo.

3.3.3.1.2 Análise Térmica Diferencial – ATD

As amostras de cais, de rejeitos e de materiais pozolânicos foram acondicionadas em vidros, hermeticamente fechados, até o momento dos ensaios, a fim de evitar a umidificação e a carbonatação, no caso das amostras de cais.

Foi utilizado um aparelho da marca "BP Engenharia", modelo RB12, operando a 12,5°C/min. A temperatura máxima foi de 1000°C e o padrão utilizado, o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.

3.3.3.1.3 Análise Termogravimétrica - ATG

As amostras de cais, de rejeitos e de materiais pozolânicos foram acondicionadas em vidros, hermeticamente fechados, até o momento dos ensaios, a fim de evitar a umidificação e a carbonatação, no caso das amostras de cais.

Foi utilizado um aparelho do tipo "Shimadzu TGA-50", operando a 12,5°C/min. A temperatura máxima foi de 950°C.

3.3.3.1.4 Difração de Raios-X

As amostras de cais, de rejeitos e de materiais pozolânicos foram acondicionadas em vidros, hermeticamente fechados, até o momento dos ensaios, a fim de evitar a umidificação e a carbonatação, no caso das amostras de cais.

As análises foram realizadas em equipamento Philips, modelo X'Pert MPD, operando com radiação k-alfa de cobre, 40 kV e 40 mA, com varredura entre 2θ (2°) e 2θ (90°).

3.3.3.2 Massa Específica Real

As amostras de cais, de rejeitos e de materiais pozolânicos foram secas a 110°C , até massa constante, esfriadas em dessecador até à realização dos ensaios. A determinação da massa específica real das amostras foi realizada segundo a norma NBR-6474 (1984). O método consiste em determinar o volume do material sólido de massa conhecida, excluindo todos os poros, dentro de picnômetro com capacidade de 50 ml.

A massa específica real é uma propriedade usada para controle e para o proporcionamento e dosagem dos aglomerantes, e se faz necessária para a execução da medida da área específica.

Os resultados são a média de três determinações, com desvio relativo máximo de 2%, e são apresentados em g/cm^3 , com aproximação de duas casas decimais.

3.3.3.3 Área Específica

As amostras de cais, de rejeitos e de materiais pozolânicos foram secas a 110°C , até massa constante, e esfriadas em dessecador, até a realização dos ensaios. As áreas específicas foram determinadas pelo método do permeâmetro de Blaine, segundo a norma NBR-7224 (1984).

Para a aplicação do método, utilizou-se uma amostra padrão de cimento, fornecida pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, com massa específica de $3,15 \text{ g/cm}^3$ e área específica de $0,354 \text{ m}^2/\text{g}$.

Os resultados são a média de três determinações, com desvio relativo máximo de 2% e expressos em m^2/g , com aproximação de três casas decimais.

3.3.3.4 Análise Granulométrica por Peneiras

A composição granulométrica das amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos foi determinada segundo a norma NBR-7217 (1982), sendo utilizadas as peneiras ABNT n^{os} 100 (0,147mm), 200 (0,074mm), 325 (0,044mm) e 400 (0,038mm). O ensaio de granulometria se deu em duas etapas: inicialmente as amostras foram passadas por via úmida em peneira ABNT n^o 400 e, após secagem a 110°C , até massa constante, por via seca, nas demais peneiras. Os resultados são expressos em percentagem acumulada que passa da amostra, com aproximação de uma casa decimal.

3.3.3.5 Consumo de Cal

As amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos foram ensaiadas segundo método Chappelle modificado (Raverdy et al, 1980), a fim de determinar sua atividade pozolânica. Este ensaio consiste na determinação quantitativa do consumo de cal pela amostra de material pozolânico, em solução aquosa, sob agitação magnética e a 90°C , durante 16h (Anexo I). Os resultados são expressos pela quantidade de óxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material pozolânico (mg CaO/g pozolana), com aproximação de uma casa decimal.

3.3.3.6 Índice de Atividade Pozolânica com Cal

As amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos foram ensaiados segundo a norma NBR-5751 (1992), que prescreve o método de ensaio de atividade pozolânica em materiais pozolânicos, através do índice de atividade pozolânica com cal. Este ensaio é uma medida direta do grau de pozolanicidade, através da determinação da resistência à compressão simples atingida por corpos de prova de argamassas de pozolana, hidróxido de cálcio, areia e água, curados durante 24 ± 2 h à temperatura ambiente, e durante seis dias, a $55 \pm 2^\circ\text{C}$. Os resultados são a média de três corpos de prova, expressos em MPa, com aproximação de duas casas decimais e com desvio relativo máximo de 6%.

3.3.4 Ensaio Tecnológicos

3.3.4.1 Preparação das Argamassas

Foram preparadas argamassas com cais pozolânicas, utilizando traço 1:3 (uma parte de aglomerante, cal pozolânica, e três partes de areia normal) e fator água/aglomerante (fa/a) determinado através dos ensaios de consistência normal, descrito no item 3.3.4.2.

Foram utilizadas três proporções para compor as cais pozolânicas: 30% de cal e 70% de pozolana; 40% de cal e 60% de pozolana, e 50% de cal e 50% de pozolana (Lima, 1993).

As argamassas foram preparadas em um misturador mecânico, marca "Blakeslee", com três velocidades de rotação. Após pesado cada componente, nas suas devidas proporções, homogeneizava-se inicialmente a cal com a pozolana e, em seguida, misturava-se todos os componentes da argamassa de acordo com o procedimento realizado no ensaio de consistência normal.

3.3.4.2 Consistência Normal

As argamassas contendo cal, material pozolânico ou rejeito e areia normal, foram submetidas aos ensaios de consistência, realizados na mesa de fluidez, segundo a norma NBR-9290 (1986), que prescreve como 205 mm a 215 mm o intervalo de espalhamento que confere à argamassa uma consistência normal.

Este ensaio consiste na medida de espalhamento (diâmetros) de uma porção de argamassa, inicialmente moldada em forma tronco-cônica, sobre uma mesa de ensaio. A argamassa moldada é forçada a deformar-se mediante quedas padronizadas dessa mesa (30 golpes em 30s) e são medidos dois diâmetros ortogonais da base do tronco de cone de argamassa, após a deformação, sendo, a média aritmética dessas medidas, o chamado índice de consistência, expresso em milímetros.

3.3.4.3 Moldagem dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram moldados utilizando moldes cilíndricos com dimensões h x d de 5 cm x 10 cm. Antes da moldagem, as superfícies internas dos moldes foram untadas com óleo para facilitar a desmoldagem. O enchimento dos moldes deu-se em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais; para isto adotou-se uma medida padrão e cada camada de material recebeu trinta golpes uniformes, com soquete normal, distribuídos em toda a área transversal do molde, conforme recomenda a NBR-7215 (1982). A operação foi concluída com a regularização das superfícies dos topos dos corpos de prova, com auxílio de uma espátula num movimento de vai e vem.

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram identificados por uma letra maiúscula e dois números, conforme a amostra de material pozolânico ou de rejeito, sua área específica e a composição de cal-pozolânica.

Para cada área específica e composição, foram moldados 12 corpos de prova, totalizando 144 corpos de prova por amostra.

3.3.4.4 Cura

Os corpos de prova foram submetidos a períodos de cura de 7, 28 e 60d, tendo sido utilizados dois tipos de cura: cura aérea e cura imersa em água. A cura aérea foi realizada de forma que os corpos de prova ficassem expostos ao ar, colocados em um reservatório e umedecidos a partir do quinto dia, até que se completassem os sete primeiros dias de cura. A cura imersa em água, foi realizada em um reservatório cheio de água, saturada com 2% de cal, onde os corpos de prova foram submersos a partir do oitavo dia de cura (Vorobiev, 1965). O volume de água do reservatório foi determinado de maneira que o nível de água cobrisse totalmente a parte superior dos corpos de prova. A operação terminou quando foram completados os períodos de cura.

3.3.4.5 Resistência á Compressão Simples – RCS

Após completada a cura, os corpos de prova foram retirados do reservatório e capeados com mistura de enxofre com cimento. No caso daqueles imersos em água, os mesmos foram retirados do reservatório e secos ao ar, durante aproximadamente 7h, e então capeados. Foi utilizada uma prensa "Testop", composta por um anel de carga igual a 5000 kg e constante igual a 0.132. A velocidade de carregamento obedeceu à norma NBR-7215 (1982). A carga de ruptura foi a carga máxima média, em quilogramas força, dos valores indicados pelo equipamento, no instante da ruptura.

A RCS foi determinada em cada corpo de prova, através da multiplicação da deformação de ruptura, expressa em kgf, pela constante do anel.

Foi efetuada a média das resistências individuais obtidas, e calculado o desvio relativo máximo, de $\pm 10\%$, dos resultados dos quatro corpos de prova. Quando um dos valores de resistência diferia da média de $\pm 10\%$, este era automaticamente eliminado e calculada nova média dos três valores restantes.

Se mais de dois valores se afastavam de $\pm 10\%$ da média, abandonavam-se os três resultados e realizava-se nova moldagem dos corpos de prova.

Os resultados são apresentados em MPa, com aproximação de duas casas decimais.

3.3.5 Análise Estatística

Com os resultados obtidos para a área específica e para a RCS das argamassas estudadas, efetuou-se análises estatísticas, através de correlações lineares simples, verificando-se a interdependência entre os referidos parâmetros.

O tipo de ajustamento utilizado foi a regressão linear simples, cuja equação é a seguinte: $Y = A + BX$, onde X e Y são respectivamente as variáveis independente e dependente, "B" a inclinação da reta e "A" a ordenada da interseção com o eixo Y. A significância da correlação verificou-se através do coeficiente de correlação (R) e do nível de significância (α). O coeficiente de correlação expressa o grau de relacionamento entre as duas variáveis. Se não existe correlação entre as duas variáveis, o coeficiente de correlação é zero. Por outro lado, se existe a correlação perfeita, o coeficiente de correlação é igual a ± 1 . O nível de significância é o valor que representa o nível para o qual a relação entre duas variáveis é significativo. Um resultado é significativo se a probabilidade calculada é menor do que 0,05 ou 5% e, altamente significativo se a probabilidade calculada é menor do que 0,01 ou 1%.

O fluxograma representativo das etapas executadas na pesquisa é mostrado na Figura 4.

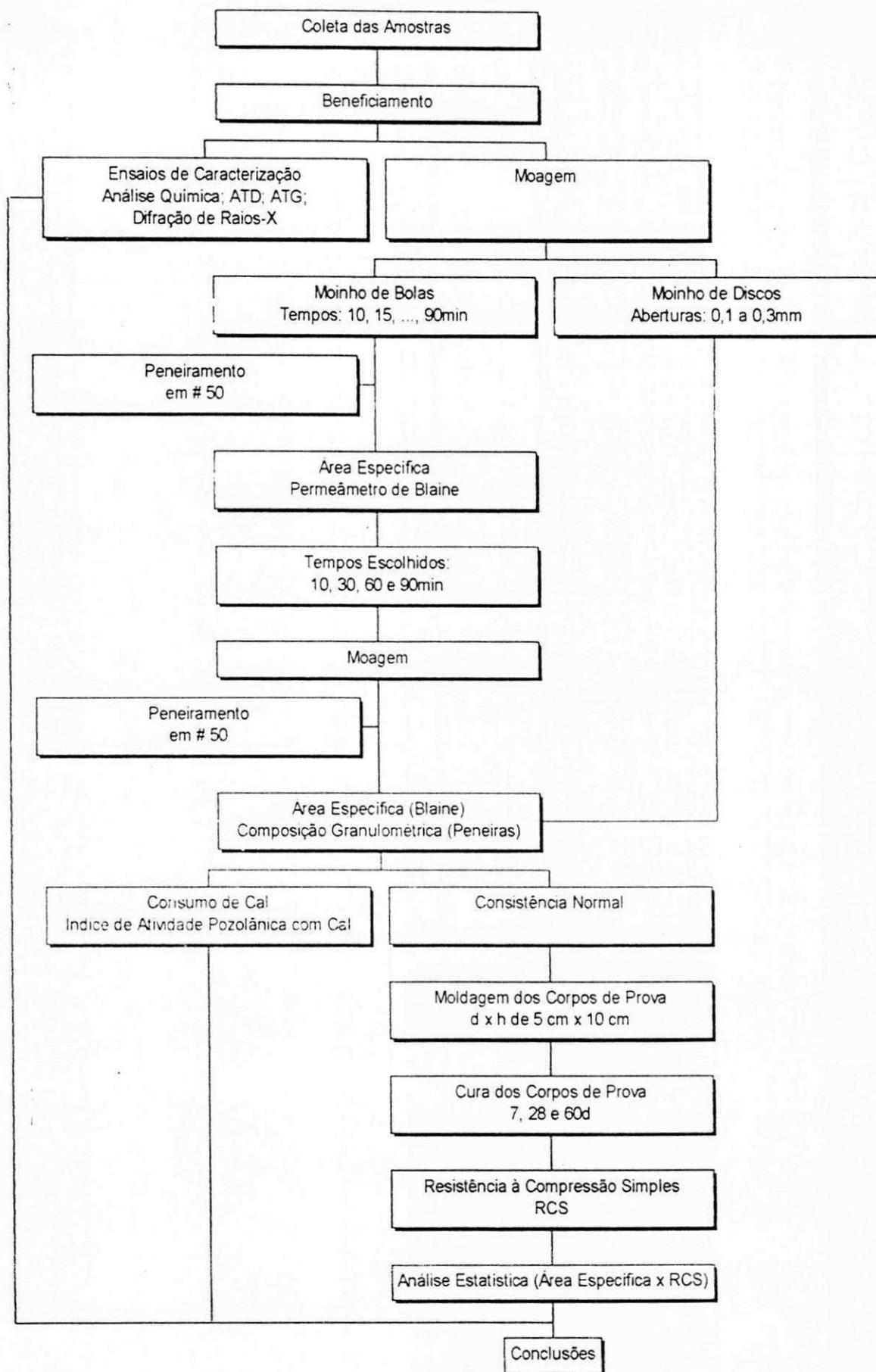


Figura 4 - Fluxograma Representativo das Etapas do Projeto de Dissertação.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no decorrer desta pesquisa. Inicialmente, serão analisados os resultados dos ensaios de caracterização, posteriormente, os dos ensaios tecnológicos, e, finalmente, os resultados obtidos através dos estudos estatísticos.

4.2 Ensaio de Caracterização

4.2.1 Caracterização Mineralógica

4.2.1.1 Análise Química

Na Tabela 1, são apresentadas as composições químicas das amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos.

Tabela 1 – Composição Química das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos.

Determinações (%)	Entulho 1	Entulho 2	Mistura	Pozolana
Perda ao Rubro (PR)	8,53	9,52	2,37	3,03
SiO ₂	58,09	62,92	58,58	80,00
Fe ₂ O ₃	5,30	3,75	8,20	0,72
Al ₂ O ₃	23,68	16,05	26,10	16,01
CaO	1,40	Nihil	Nihil	Nihil
MgO	Traços	2,18	Traços	Traços
Na ₂ O	0,57	0,68	1,22	Traços
K ₂ O	2,42	3,03	3,03	Traços
Dados Calculados (%)				
SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	87,07	82,42	92,88	96,73

As amostras Entulho 1, Entulho 2, Mistura e Pozolana, apresentam perda ao rubro (PR) de 8,53%, 9,52%, 2,37% e 3,03%, respectivamente, estando estes resultados dentro do limite máximo (10,0%) especificado pela ASTM C-618 (1998).

A soma dos percentuais de Si_2O , Fe_2O_3 e Al_2O_3 , é de 87,07%, 82,42%, 92,88% e 96,73%, para as amostras Entulho 1, Entulho 2, Mistura e Pozolana, respectivamente. Estes valores superam o valor mínimo de 70% (ASTM C-618, 1998). O percentual de MgO , apresentado pelas amostras, também satisfaz ao valor máximo de 5% exigido (ASTM C-618, 1998). Desta forma, estas amostras atendem às especificações químicas exigidas pela ASTM.

As amostras Entulho 1, Entulho 2 e Mistura, podem ser classificadas como silico-aluminosas, enquanto a Pozolana, como uma amostra, predominantemente, silicosa, quanto à composição química.

O teor de sílica (SiO_2) apresentado nas amostras é significativamente elevado. Este fato é desejável em materiais ativos e tem papel importante, pois, ao longo do tempo, tem-se reações que formam os silicatos hidratados, que são responsáveis pela resistência mecânica desenvolvida.

Podemos observar, ainda, pela Tabela 1, que as amostras Entulho 1, Entulho 2 e Mistura, apresentam teores de SiO_2 próximos. Neste caso, os teores de ferro (Fe_2O_3) e de alumina (Al_2O_3), podem diferenciar os resultados apresentados por elas, quando utilizadas na presença de hidróxido de cálcio (Cincotto et al, 1985).

Na Tabela 2, são apresentados as composições químicas das amostras de cais.

As amostras de cais, Carbomil e Megaó, apresentam teores de CaO de 69,44% e 42,92%, respectivamente. Para o teor de MgO , os resultados são: 4,03% para a cal Carbomil e 28,62% para a cal Megaó. São estes óxidos (CaO e MgO) os responsáveis pelo endurecimento da argamassa, que ocorre devido a sua carbonatação. Desse modo, a melhor cal é aquela mais rica em óxidos. A especificação brasileira (NBR-7175, 1992) estabelece como critério de qualidade (pureza da cal), um teor mínimo de 88% de óxidos totais. Segundo este critério, pode-se afirmar que as amostras de cais, aqui analisadas, são

consideradas de elevada pureza, com teores de óxidos totais de 98,47% para a cal Carbomil e de 95,31% para a cal Megaó.

Segundo a norma brasileira NBR – 6453 (1988), a cal Carbomil pode ser classificada como cal cálcica, por apresentar percentagem de CaO, em relação ao óxidos totais, maior que 90% (94,04%). A cal Megaó pode ser classificada como cal dolomítica, por apresentar percentagem de CaO, em relação ao óxidos totais, menor que 65% (57,30%).

A perda ao rubro (PR) determina o teor de constituintes voláteis, água combinada (H₂O) e anidrido carbônico (CO₂). A cal Carbomil apresentou teor de 25,39% e a cal Megaó de 24,94%.

O teor de anidrido carbônico (CO₂), por sua vez, indica se a calcinação foi bem conduzida. Neste caso, seu teor não deve ultrapassar 5% (NBR-7175, 1992). A cal Carbomil apresentou teor de CO₂ de aproximadamente 3,07%, podendo ser considerada como uma cal bem calcinada, enquanto a cal Megaó apresentou teor de aproximadamente 11,27%, indicando um processo de calcinação inadequado.

O teor de água combinada indica se a etapa de hidratação, do processo de fabricação, foi bem conduzida. Para a cal cálcica, este valor deve ser de aproximadamente 24%, e, para a cal dolomítica, 27% (NBR-7175, 1992). A cal Carbomil (cálcica) apresentou um teor de água combinada de aproximadamente 22,32%, podendo ser considerada como uma cal bem hidratada, enquanto a cal Megaó (dolomítica) apresentou referido teor de, apenas aproximadamente 13,66%, valor considerado baixo, sintomático de uma etapa de hidratação mal conduzida.

Diante os resultados obtidos através dos ensaios de análises químicas, as amostras Entulho 1, Entulho 2 e Mistura podem ser classificadas como sílico-aluminosas e a amostra Pozolana, como predominantemente silicosa. As amostras de cais Carbomil e Megaó, podem ser classificadas como cálcica e dolomítica, respectivamente.

Tabela 2 – Composição Química das Amostras de Cais.

Determinações (%)	Carbomil	Megaó
Perda ao Rubro (PR)	25,39	24,94
SiO ₂	0,37	3,36
Fe ₂ O ₃	Traços	Traços
Al ₂ O ₃	Traços	Traços
CaO	69,44	42,92
MgO	4,03	28,62
Na ₂ O	Traços	Traços
K ₂ O	Traços	Traços
Dados Calculados(%)		
Óxidos Totais	98,47	95,31
CaO / Óxidos Totais	94,04	57,30
Água Combinada (H ₂ O)*	22,32	13,66
Anidrido Carbônico (CO ₂)*	3,07	11,27

* Dados calculados estequiometricamente.

4.2.1.2 Análise Térmica Diferencial – ATD

Na Figura 5, encontram-se reproduzidos os termogramas das amostras de rejeitos, de materiais pozolânicos e das amostras de cais. Na Tabela 3, encontram-se a descrição e interpretação das reações caracterizadas nas análises termodiferencias.

Uma análise da curva termodiferencial da amostra Entulho 1 possibilita observar os picos característicos da perda de água adsorvida (142°C) e da transformação de quartzo α em quartzo β (581°C).

Na curva termodiferencial da amostra Entulho 2, são observados os picos característicos da perda de água adsorvida (127°C), da desidroxilação do portlandita (565°C), da transformação de quartzo α em quartzo β (578°C) e da decomposição da calcita (871°C). É observado, ainda, um pico mal definido, característico da nucleação de mulita (917°C).

Com relação à amostra Mistura, a curva termodiferencial apresenta os picos característicos da perda de água adsorvida (117°C), da transformação de quartzo α em quartzo β (579°C) e, um pico mal definido, referente a nucleação de mulita (908°C). A presença de núcleos de mulita, embora em pequena intensidade, revela que a queima dos tijolos e das telhas que compõem a

Tabela 3 - Descrição e Interpretação das Reações Caracterizadas nas Análises Termodiferenciais das Amostras de Rejeitos, de Materiais Pozolânicos e das Amostras de Cais.

Amostras	Temperaturas dos Picos (°C)	Naturezas das Reações	Interpretações
Entulho 1	142	Endotérmica	Perda de água adsorvida
	581	Endotérmica	Transformação de quartzo α em quartzo β
Entulho 2	127	Endotérmica	Perda de água adsorvida
	565	Endotérmica	Desidroxilação da portlandita (Ca(OH)_2)
	578	Endotérmica	Transformação de quartzo α em quartzo β
	871	Endotérmica	Decomposição da calcita (CaCO_3)
	917	Exotérmica	Nucleação da mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)
Mistura	117	Endotérmica	Perda de água adsorvida
	579	Endotérmica	Transformação de quartzo α em quartzo β
	908	Exotérmica	Nucleação da mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)
Pozolana	112	Endotérmica	Perda de água adsorvida
	570	Endotérmica	Transformação de quartzo α em quartzo β
	579	Endotérmica	Perda de hidroxilas da camada octaédrica
	984	Exotérmica	Nucleação de mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)
Cal Carbomil	117	Endotérmica	Perda de água adsorvida
	393	Endotérmica	Desidroxilação da brucita (Mg(OH)_2)
	570	Endotérmica	Desidroxilação da portlandita (Ca(OH)_2)
Cal Megaó	891	Endotérmica	Decomposição da calcita (CaCO_3)
	117	Endotérmica	Perda de água adsorvida
	414	Endotérmica	Desidroxilação da brucita (Mg(OH)_2)
	565	Endotérmica	Desidroxilação da portlandita (Ca(OH)_2)
	915	Endotérmica	Decomposição da calcita (CaCO_3)

amostra Mistura foi realizada a uma temperatura pouco abaixo da ideal (900°C a 1000°C) e com isto, é provável que esta amostra apresente em sua composição a metacaulinita que possui estrutura amorfa e é indicativo do caráter pozolânico nas amostras .

A amostra Entulho 2 também apresenta em pequena intensidade núcleos de mulita e, da mesma forma que na amostra Mistura, podemos dizer que sua presença aponta à existência da metacaulinita.

Uma análise da curva termodiferencial da amostra Pozolana mostra picos característicos da perda de água adsorvida (112°C), da transformação de quartzo α em quartzo β (570°C) e da desidroxilação da caulinita (579°C). Esta perda de hidroxilas destrói o arranjo atômico formando a metacaulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), substância sílico-aluminosa amorfa, que mantém a forma de placas hexagonais da caulinita original (Castro Sobrinho, 1970). A 984°C, observa-se um pico, bem definido, característico da nucleação de mulita, confirmando a presença da metacaulinita, indicativo das propriedades pozolânicas da amostra, como dito anteriormente.

Nas amostras de cais, Carbomil e Megaó, observam-se os picos endotérmicos, de desidroxilação e de dissociação, referentes aos hidróxidos e aos carbonatos, respectivamente. Estas reações de decomposição estão representadas abaixo:



A equação (a) representa a desidroxilação da brucita (Mg(OH)_2), a equação (b) representa a desidroxilação da portlandita (Ca(OH)_2), e a equação (c) representa a decomposição da calcita (CaCO_3). Embora a temperatura dos picos para cada uma dessas reações seja variável, eles são identificados nos seguintes intervalos de temperatura (Cincotto, 1977):

(a) 350°C a 450°C;

- (b) 480°C a 620°C, e,
(c) 850°C a 950°C, respectivamente.

O pico referente à calcita, observado nas amostras, pode ter a sua origem na carbonatação parcial do Ca(OH)_2 pelo CO_2 atmosférico, devido a um mau armazenamento, ou, ainda, a um processo de queima mal conduzido.

Os resultados da ATD confirmam os resultados obtidos através da análise química, mostrando a presença do MgO em grande quantidade na cal Megaó e em pequena quantidade na cal Carbomil.

Em resumo, segundo os ensaios de análise térmica diferencial, a amostra Entulho 1 é composta por quartzo, a amostra Entulho 2 por portlandita, quartzo, calcita e mulita, a amostra Mistura e a amostra Pozolana são compostas por quartzo e mulita e, as cais Carbomil e Megaó por brucita, portlandita e calcita.

4.2.1.3 Análise Termogravimétrica - ATG

Na Tabela 4, encontram-se a descrição e interpretação das reações caracterizadas nas análises termogravimétricas, das amostras de rejeitos, de materiais pozolânicos e das amostras de cais.

Nas Figuras 6 a 11, encontram-se reproduzidas as curvas termogravimétricas e suas derivadas, das amostras de Entulho 1, Entulho 2, Mistura, Pozolana, Cal Carbomil e Cal Megaó, respectivamente.

Uma análise da curva termogravimétrica da amostra de rejeito, Entulho 1, possibilita verificar uma inflexão entre aproximadamente 25°C e 600°C, correspondente a desidratação do próprio material, com perda de massa de 6%. Tem-se, ainda, uma inflexão nítida entre 608,45°C e 736,92°C, correspondente a decomposição da calcita, com perda de massa de 2,018%. Esta inflexão é característica do constituinte CO_2 , obtido a partir da reação de decomposição do CaCO_3 , como visto no item anterior. A perda de massa total foi de aproximadamente 8%.

Tabela 4 - Descrição e Interpretação das Reações Caracterizadas nas Análises Termogravimétricas das Amostras de Rejeitos, de Materiais Pozolânicos e das Amostras de Cais.

Amostras	Intervalos de Temperatura (°C)	Perdas de Massa (mg)	Perdas de Massa (%)	Interpretações
Entulho 1	608,45 - 736,92	0,467	2,018	Decomposição da calcita (CaCO_3)
	414,59 - 565,76	0,316	1,638	Desidroxilação da portlandita (Ca(OH)_2)
Entulho 2	565,76 - 752,79	0,722	3,739	Decomposição da calcita (CaCO_3)
Mistura	36,42 - 945,95	0,240	1,239	Perda de águas
Pozolana	452,98 - 572,84	0,251	0,923	Perda de hidroxilas
	389,20 - 512,35	2,159	17,588	Desidroxilação da portlandita (Ca(OH)_2)
Cal Carbomil	512,35 - 756,47	0,974	7,939	Decomposição da calcita (CaCO_3)
	296,03 - 415,02	1,517	8,201	Desidroxilação da brucita (Mg(OH)_2)
Cal Megaó	415,02 - 509,80	1,844	9,966	Desidroxilação da portlandita (Ca(OH)_2)
	509,80 - 787,80	1,291	6,981	Decomposição da calcita (CaCO_3)

Para a amostra Entulho 2, observou-se uma inflexão entre aproximadamente 25°C e 414°C, correspondente a perda de água, com 3% de perda de massa. Uma inflexão entre 414,59°C e 565,76°C, com perda de massa de 1,638%, correspondente a desidroxilação da portlandita. E, ainda, uma nítida inflexão entre 565,76°C e 752,79°C, correspondente a decomposição da calcita, com perda de massa de 3,739%. A perda de massa total foi de aproximadamente 9%.

Na amostra Mistura observou-se, apenas, uma leve inflexão correspondente a perdas de água, com perda de massa total equivalente a 1,239%; valor considerado baixo, e indicativo de um processo de queima dos tijolos e das telhas que compõem a amostra, bem conduzido.

A amostra Pozolana apresentou uma perda de massa de, aproximadamente, 1,3%, entre 30°C e 450°C, correspondente a desidratação do próprio material. Observou-se, também, uma inflexão entre 452,98°C e 572,84°C, com perda de massa de 0,923%, correspondente a perda de hidroxilas. A perda de massa total foi igual a 3,777%.

Uma análise da curva termogravimétrica da amostra de cal hidratada, Carbomil, possibilita verificar uma leve inclinação entre aproximadamente 330°C e 380°C, correspondente a desidroxilação da brucita, com perda de massa inferior a 1%. Tem-se, ainda, uma inflexão nítida entre 389,20°C e 512,35°C, correspondente a desidroxilação da portlandita, com perda de massa de 17,588%. Entre 512,35°C e 756,47°C, observa-se uma inflexão, menos acentuada, correspondente a dissociação da calcita. Como foi dito anteriormente, esta inflexão é característica do constituinte CO₂. A perda de massa total foi de aproximadamente 27%.

Com relação à curva termogravimétrica da amostra de cal hidratada, Megaó, tem-se uma primeira inflexão entre 296,03°C e 415,02°C, correspondente a desidroxilação da brucita, com perda de massa de 8,201%. A segunda inflexão, entre 415,02°C e 509,80°C, correspondente a desidroxilação da portlandita, com perda de massa de 9,966%. Entre 509,80°C e 787,64°C, tem-se uma terceira inflexão, correspondente a dissociação da calcita. A perda de massa total foi de aproximadamente 25%.

Com os dados obtidos a partir das curvas termogravimétricas foram calculados, com o auxílio das reações (a), (b) e (c), os teores de hidróxidos de cálcio e magnésio e, de carbonato de cálcio. A Tabela 5 apresenta estes teores.

Tabela 5 - Teores dos Hidróxidos e Carbonatos Obtidos da Termogravimetria das Amostras de Cais Hidratadas.

Amostras	Teores (%)		
	Ca(OH) ₂	Mg(OH) ₂	CaCO ₃
Cal Carbomil	72,31	Não Determinado	18,04
Cal Megaó	27,47	40,97	15,86

Em resumo, as perdas de massa sofridas pelas amostras de rejeitos, de materiais pozolânicos e de cais, são decorrentes das seguintes reações: decomposição da calcita (Entulho 1), desidroxilação da portlandita e decomposição da calcita (Entulho 2), perdas de água (Mistura), perda de hidroxilas (Pozolana), desidroxilação da portlandita e decomposição da calcita (cal Carbomil) e, desidroxilação da brucita e da portlandita e decomposição da calcita (cal Megaó).

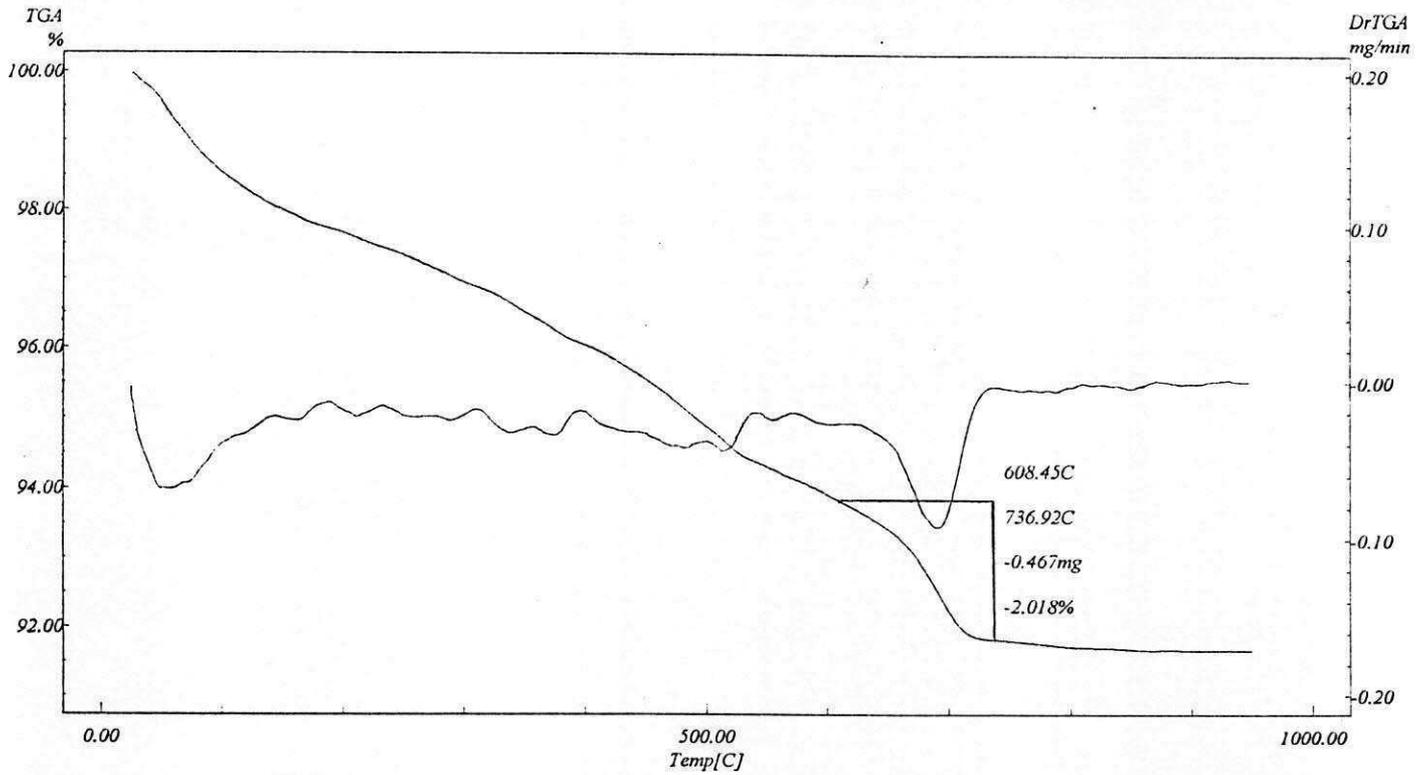


Figura 6 - Curva Termogravimétrica da Amostra Entulho 1.

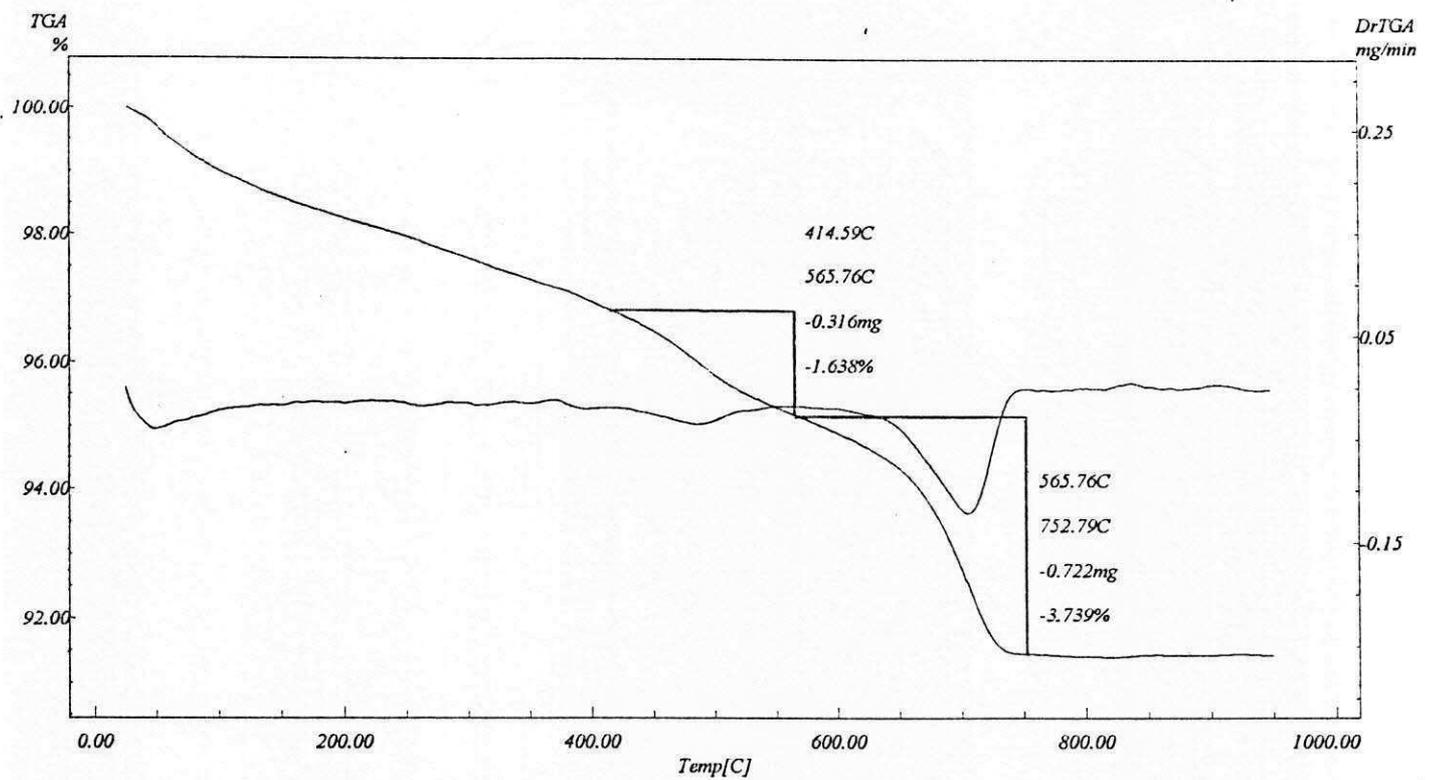


Figura 7 - Curva Termogravimétrica da Amostra Entulho 2.

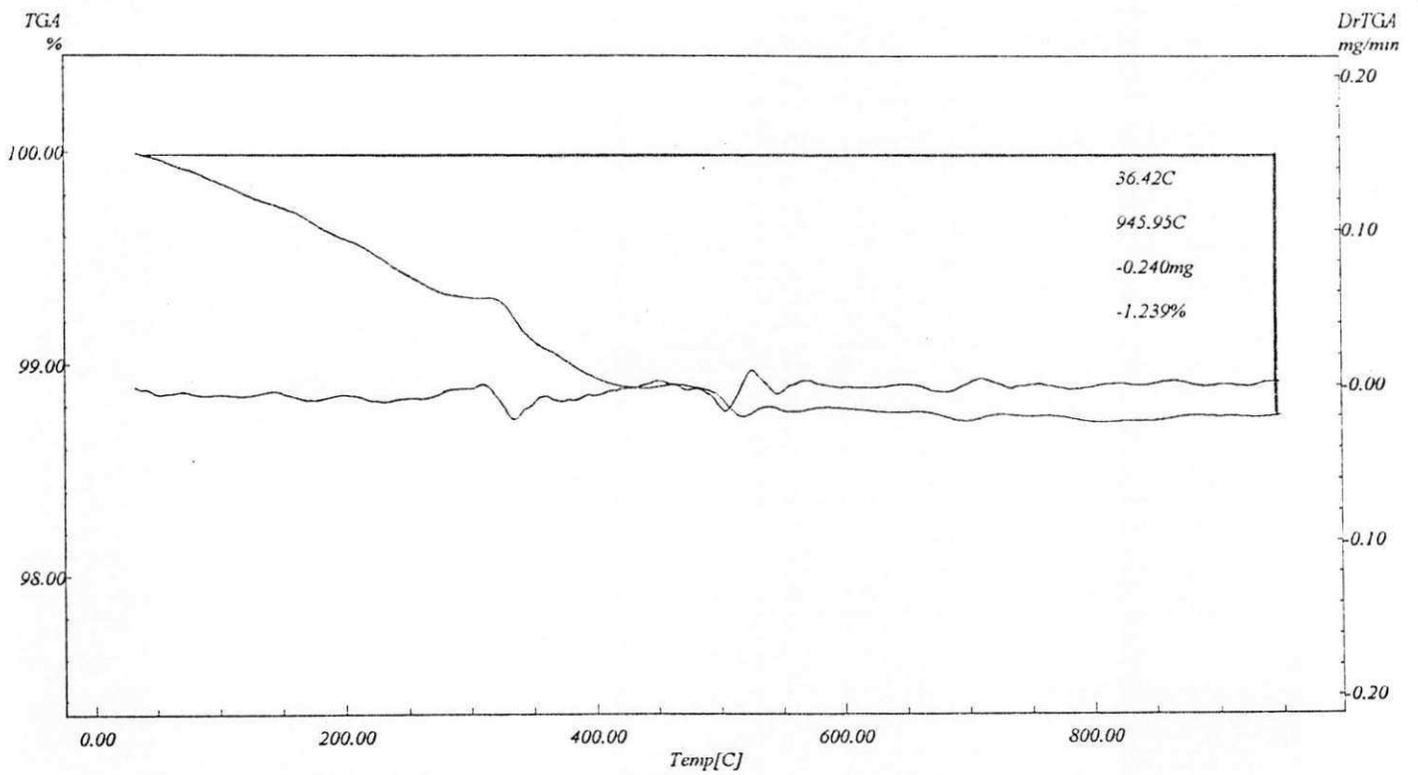


Figura 8 - Curva Termogravimétrica da Amostra Mistura.

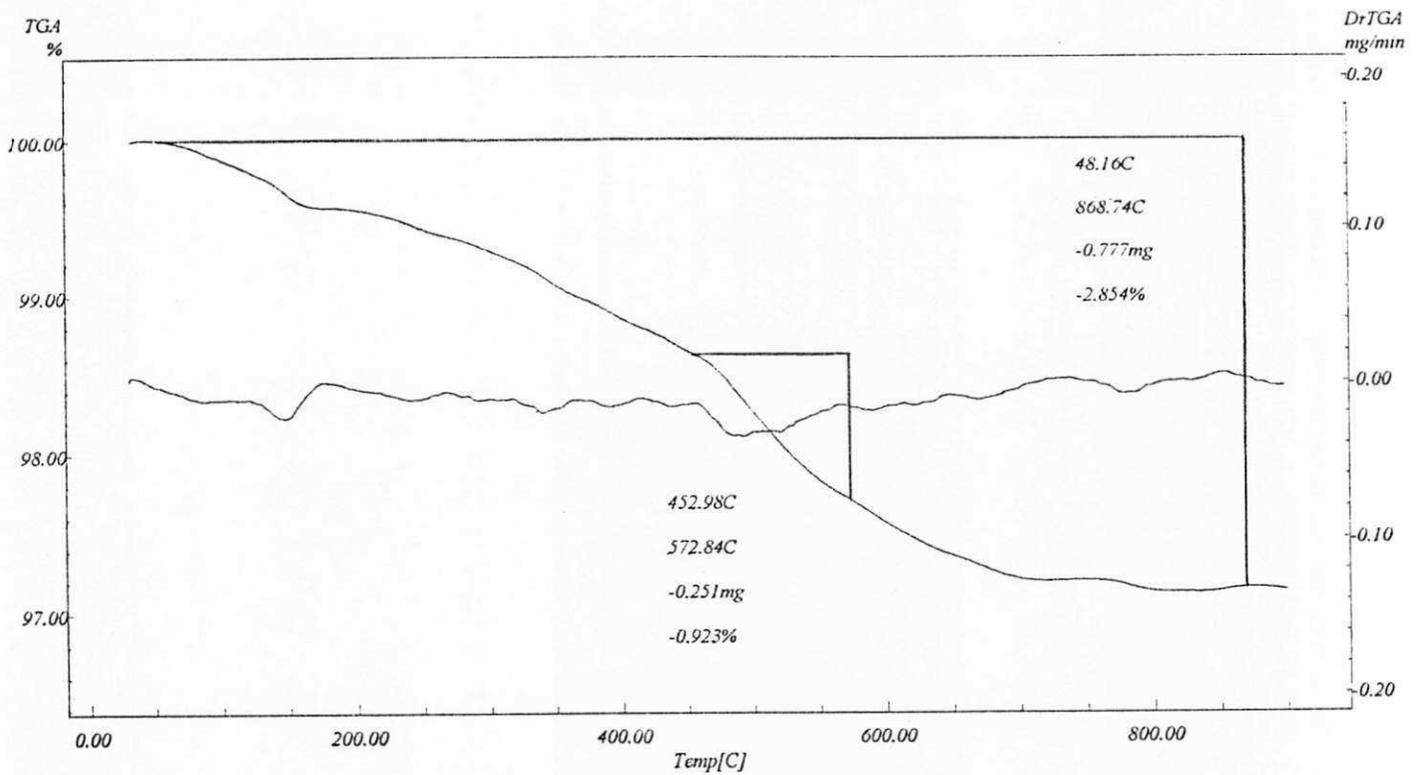


Figura 9 - Curva Termogravimétrica da Amostra Pozolana.

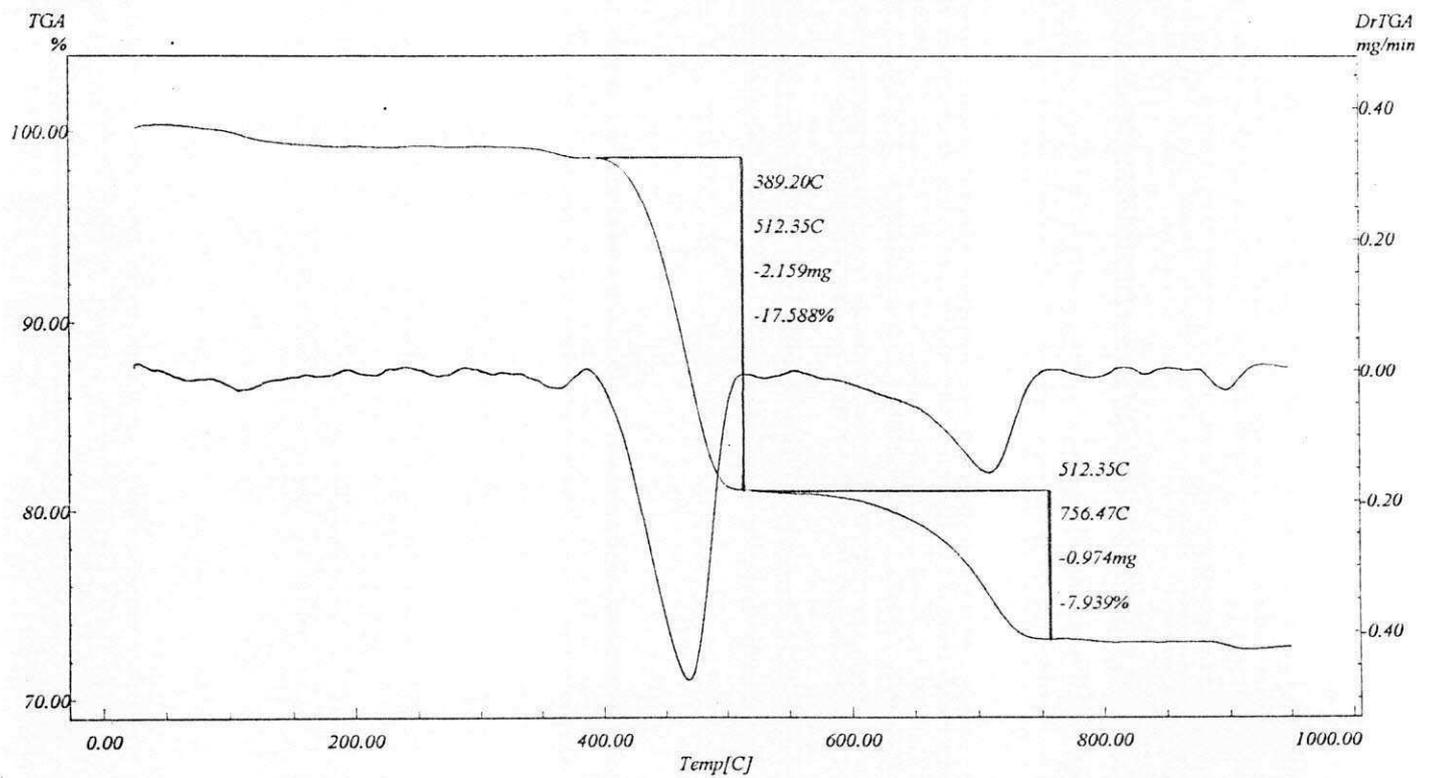


Figura 10 - Curva Termogravimétrica da Amostra de Çal Carbomil.

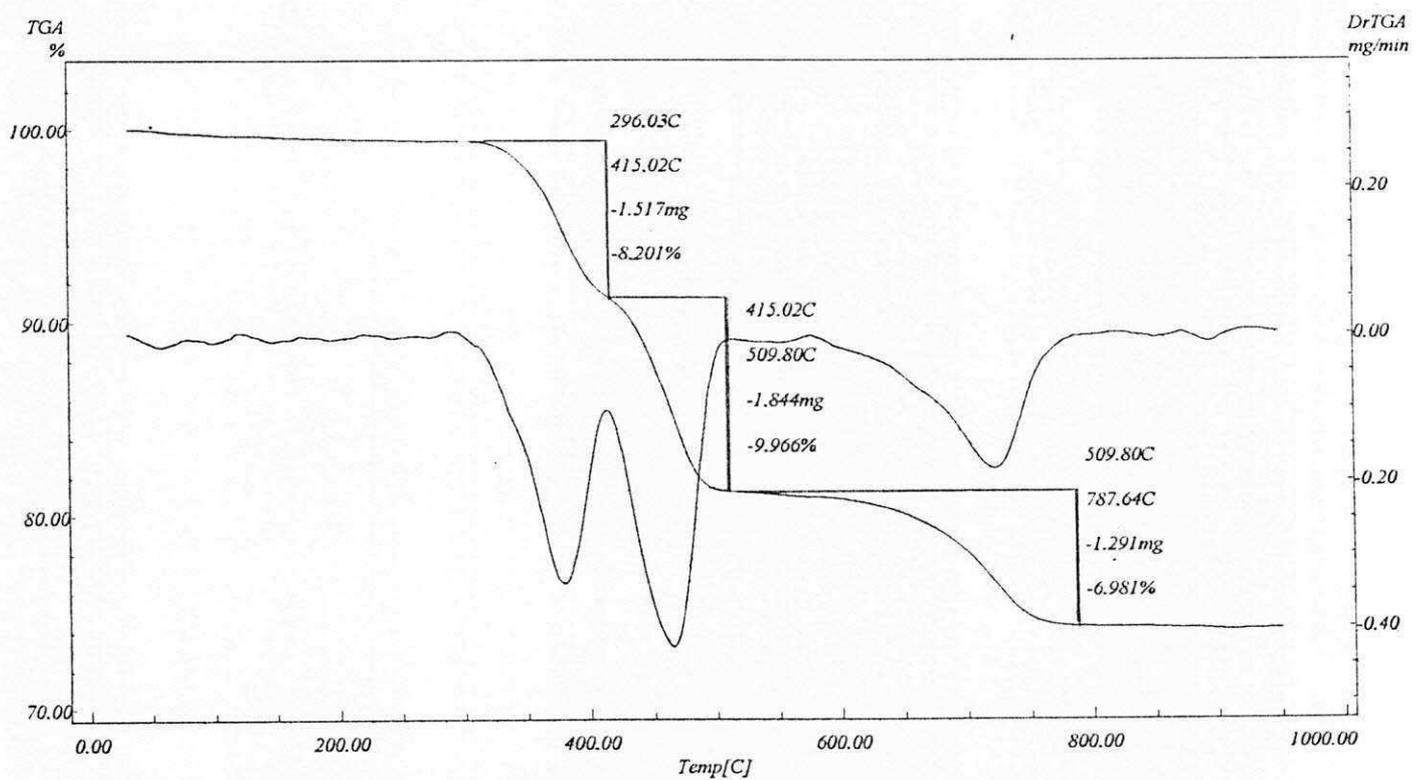


Figura 11 - Curva Termogravimétrica da Amostra de Cal Megaó.

4.2.1.4 Difração de Raios-X

Nas Figuras 12 a 17, encontram-se reproduzidos os difratogramas das amostras de rejeitos, de materiais pozolânicos e das amostras de cais. Na Tabela 6, encontram-se as distâncias interplanares e a interpretação dos compostos caracterizados nas análises por difração de raios-X.

Através do difratograma da amostra Entulho 1, são observados os seguintes compostos: quartzo (3,34Å, 1,81Å e 4,21Å) e calcita (3,03Å, 1,90Å e 1,87Å). Para amostra Entulho 2, os compostos observados são: quartzo (4,20Å, 3,34Å e 1,81Å), calcita (3,03Å, 1,90Å e 1,87Å) e mulita (3,46Å, 2,23Å e 1,53Å). A amostra Mistura é composta por quartzo (3,34Å, 1,81Å e 4,24Å), hematita (2,69Å, 2,51Å e 1,69Å) e mulita (3,46Å, 2,20Å e 1,53Å).

Nas amostras Entulho 2 e Mistura, são observados os picos característicos da mulita; provável indicativo do caráter pozolânico destas amostras, como foi explicado nos itens anteriores.

Com relação ao difratograma da amostra Pozolana, são observados os picos característicos da presença da caulinita (7,15Å, 3,52Å e 2,36Å), em teor pouco expressivo, do quartzo (4,25Å, 3,34Å e 1,81Å) e de uma discreta banda de amorfização, entre $15^\circ < 2\theta < 30^\circ$, indicando a presença e o caráter amorfo da metacaulinita; composto que confere ao material propriedades pozolânicas, como dito anteriormente.

Através dos difratogramas das amostras de cais, a cal Carbomil é composta por calcita (3,03Å, 1,92Å e 1,87Å), carbonato de magnésio (2,74Å, 2,10Å e 1,68Å) e óxido de magnésio (2,10Å, 1,48Å e 1,20Å), enquanto a cal Megaó, é composta por brucita (4,77Å, 2,37Å, e 1,18Å) e óxido de magnésio (2,10Å, 1,49Å e 1,20Å). Estes resultados estão de acordo com os obtidos através dos ensaios de análise química, ATD e ATG.

Em resumo, a composição mineralógica, apresentada pelas amostras de rejeitos, de materiais pozolânicos e de cais hidratadas, segundo os ensaios de difração de raios-X, é: quartzo e calcita (Entulho 1), quartzo, calcita e mulita (Entulho 2), quartzo, hematita e mulita (Mistura), caulinita, quartzo e

metacaulinita (Pozolana), calcita, carbonato de magnésio e óxido de magnésio (cal Carbomil) e brucita e óxido de magnésio (cal Megaó).

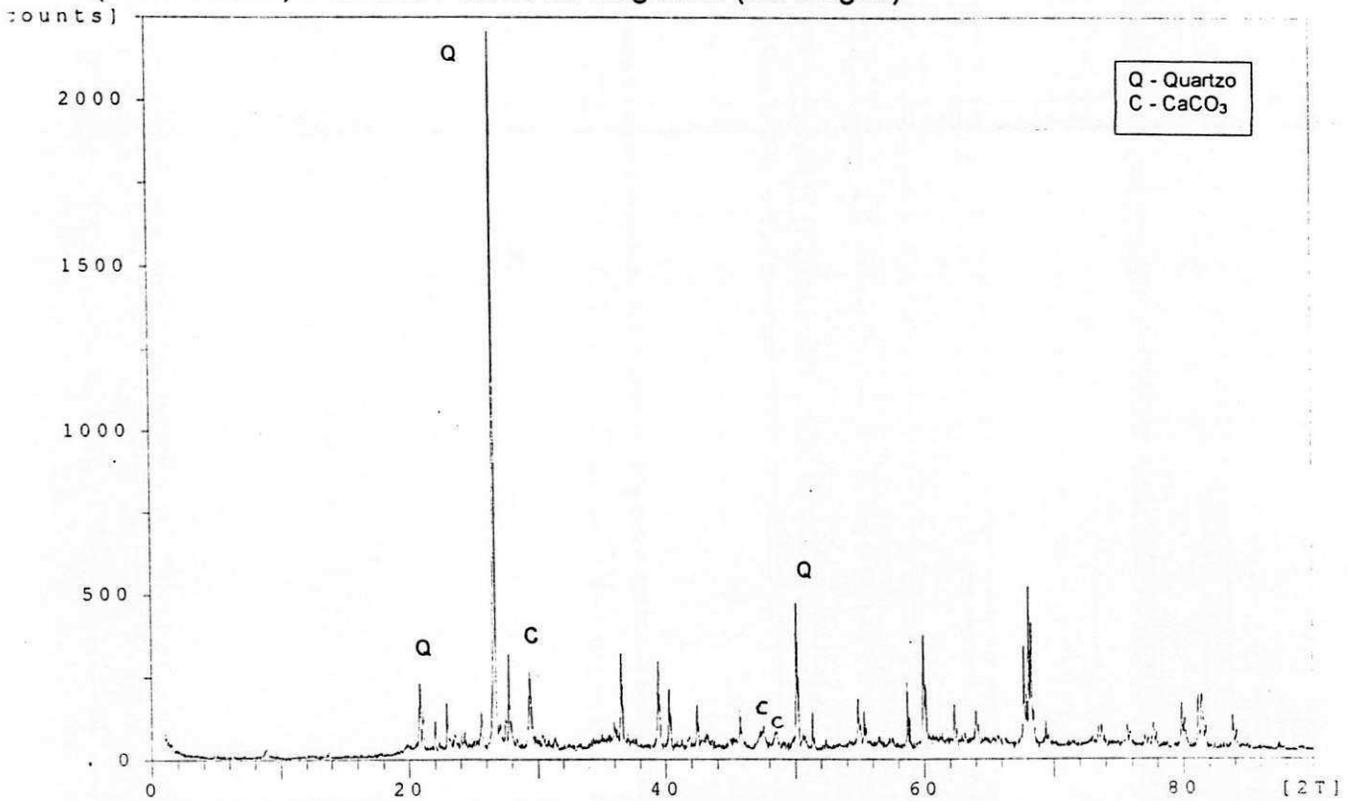


Figura 12 - Difratoograma de Raios-X da Amostra Entulho 1.

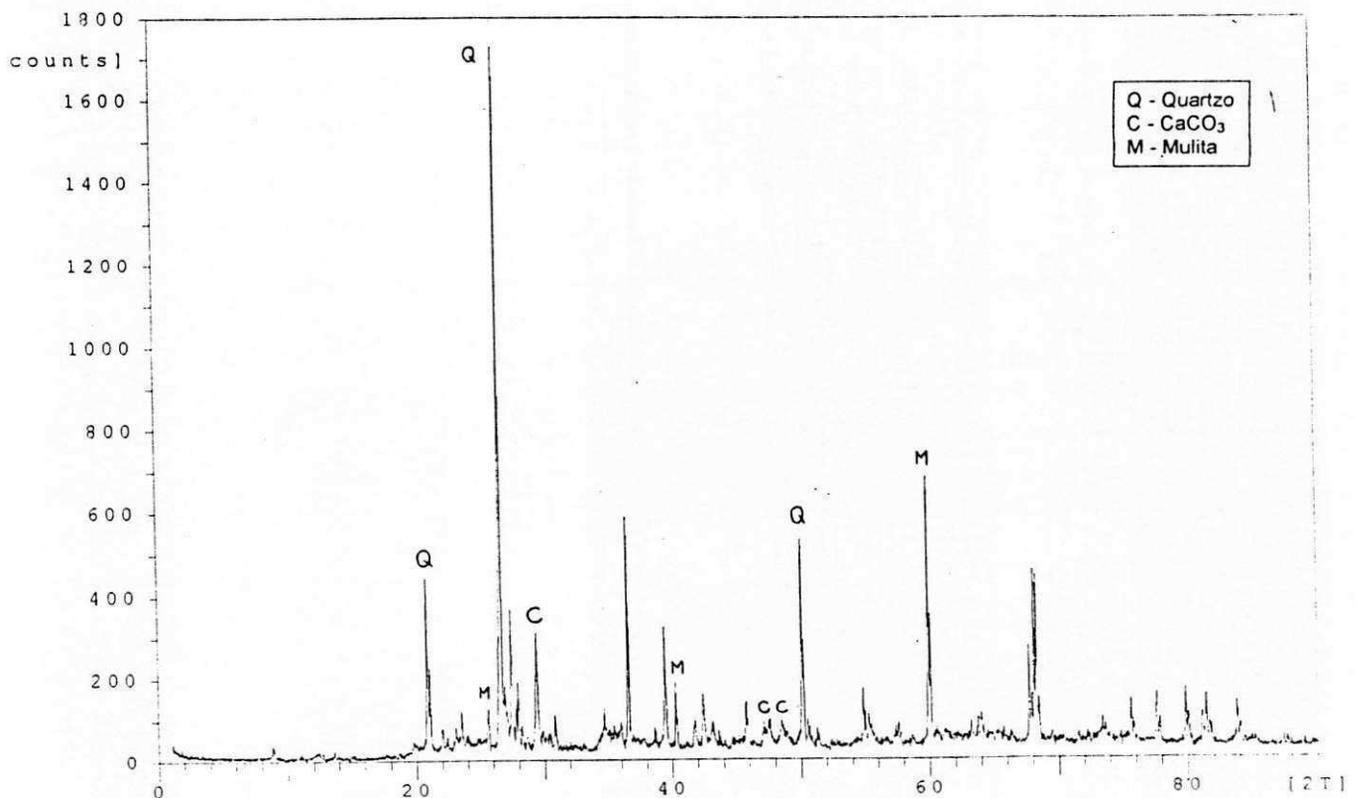


Figura 13 - Difratoograma de Raios-X da Amostra Entulho 2.

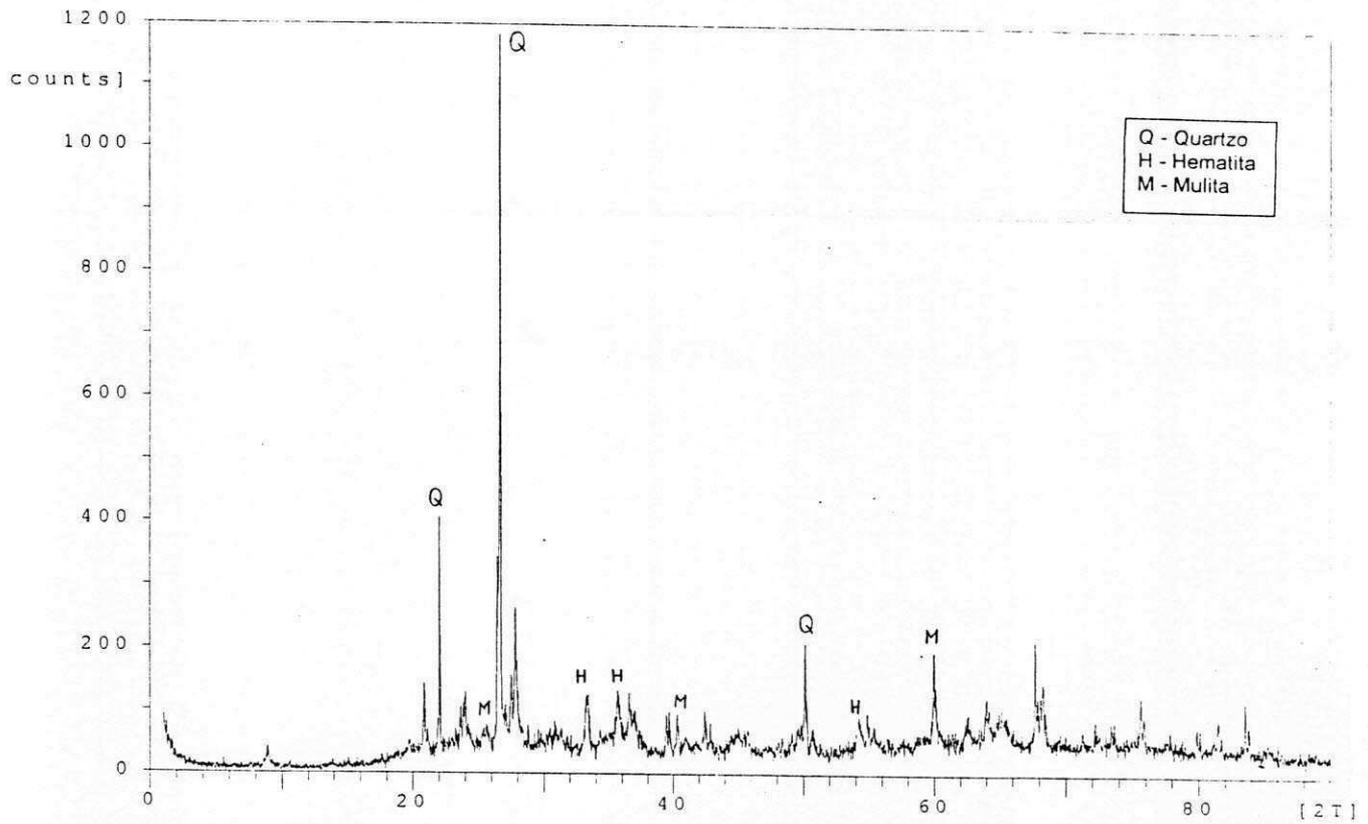


Figura 14 - Difratoograma de Raios-X da Amostra Mistura.

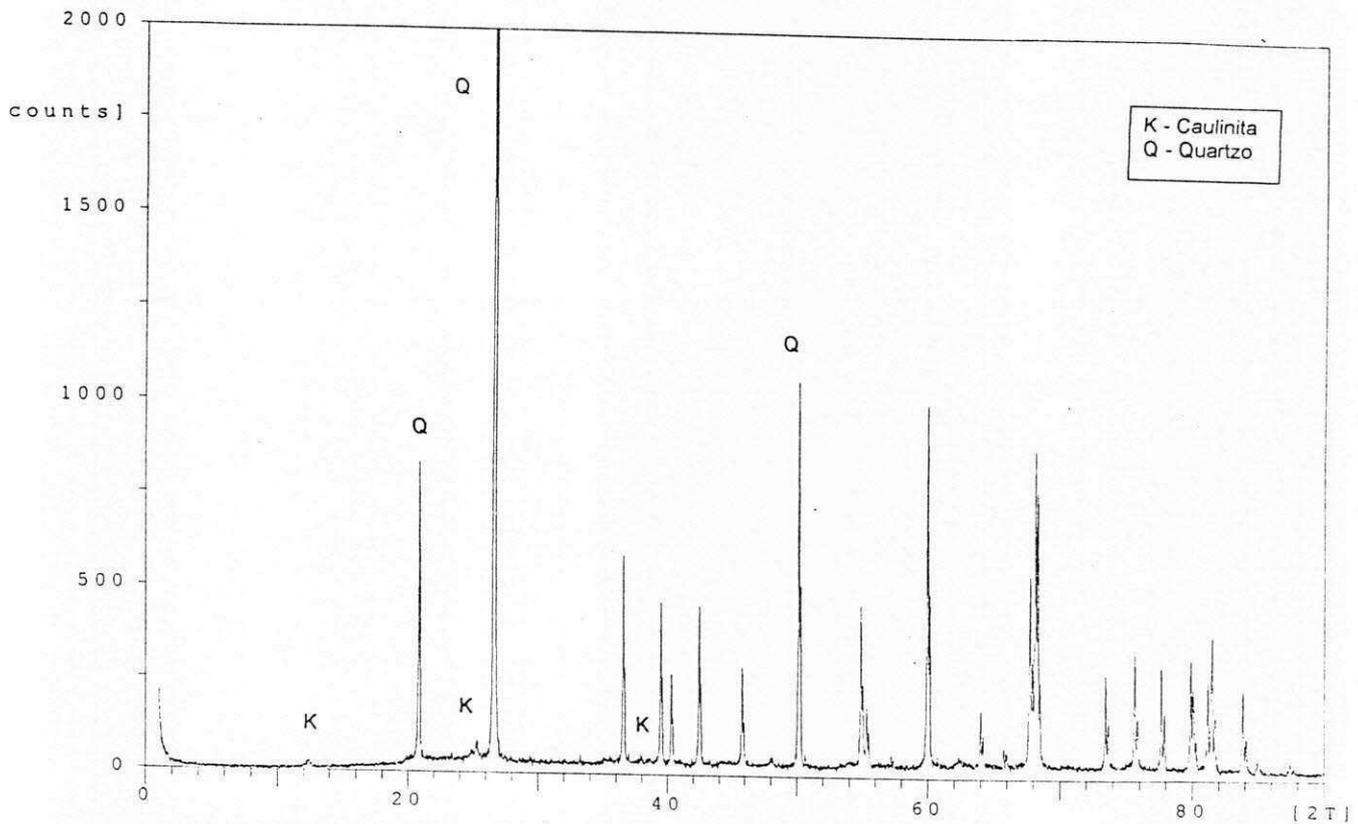


Figura 15 - Difratoograma de Raios-X da Amostra Pozzolana.

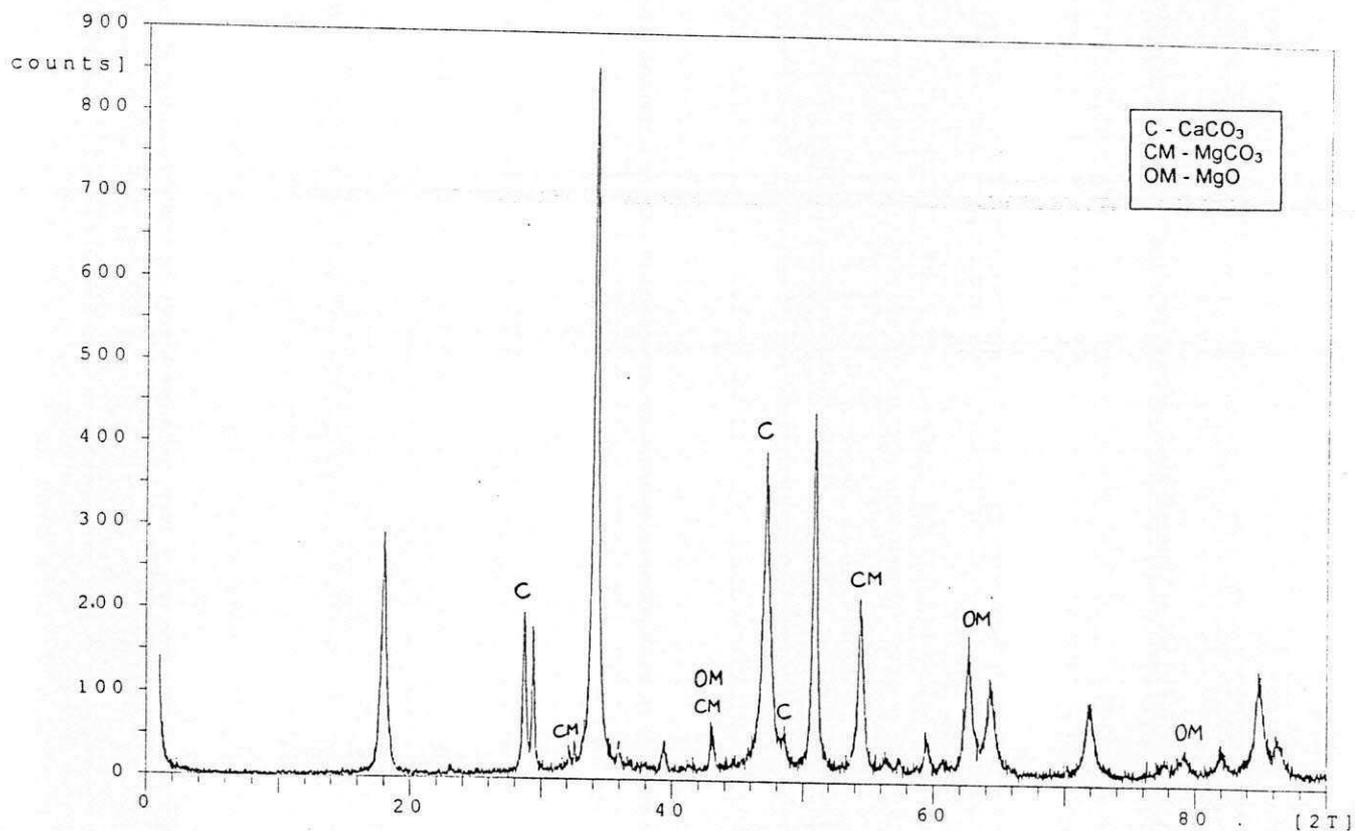


Figura 16 - Difratoograma de Raios-X da Amostra de Cal Carbomil.

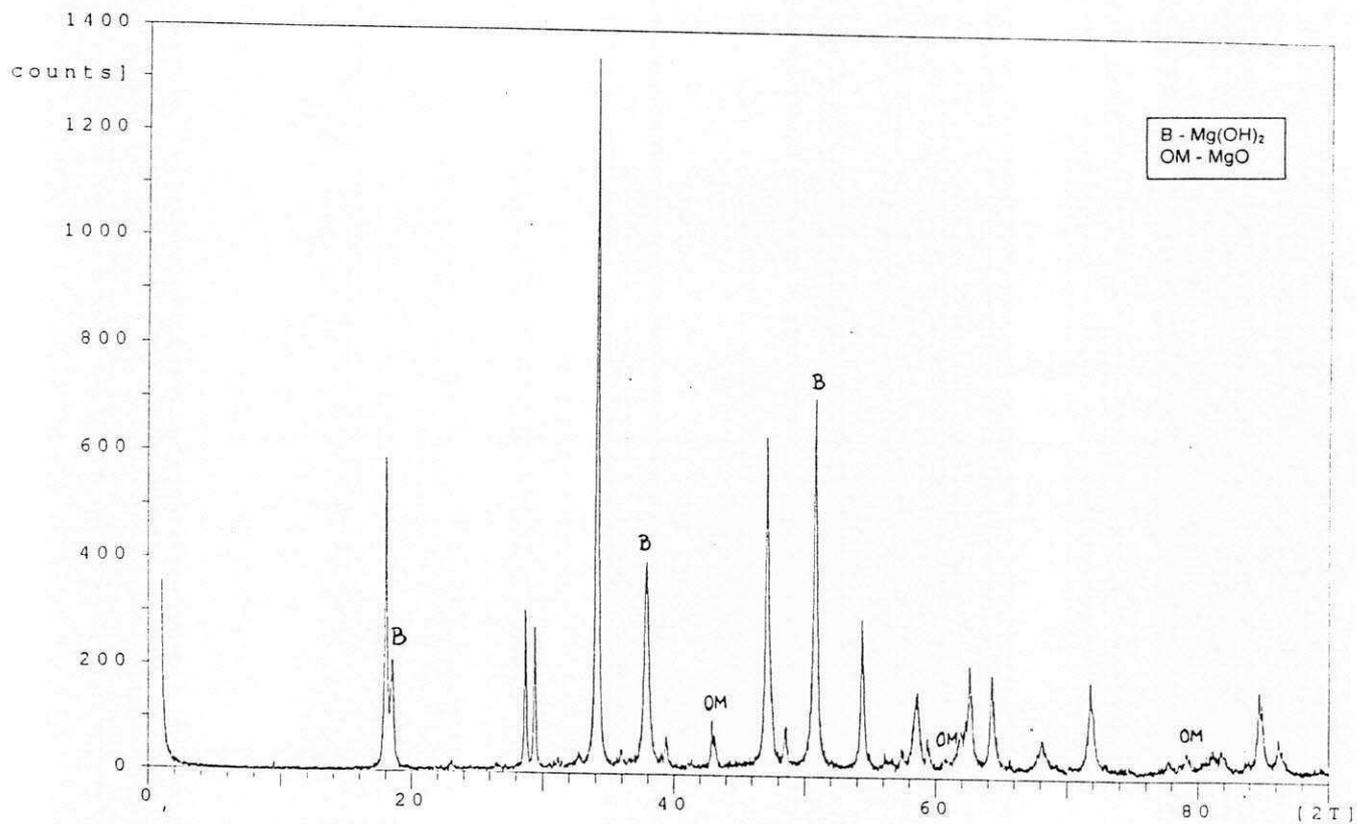


Figura 17 - Difratoograma de Raios-X da Amostra de Cal Megaó.

Tabela 6 - Descrição das Distâncias Interplanares e Interpretação dos Compostos obtidos pela Difração de Raios-X, das Amostras de Rejeitos, de Materiais Pozolânicos e das Amostras de Cais.

Amostras	Distâncias Interplanares (Å)	Interpretações
Entulho 1	3,34 - 1,81 - 4,21	Quartzo (SiO ₂)
	3,03 - 1,90 - 1,87	Calcita (CaCO ₃)
Entulho 2	4,20 - 3,34 - 1,81	Quartzo (SiO ₂)
	3,03 - 1,90 - 1,87	Calcita (CaCO ₃)
	3,46 - 2,23 - 1,53	Mulita (3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂)
Mistura	3,34 - 1,81 - 4,24	Quartzo (SiO ₂)
	2,69 - 2,51 - 1,69	Hematita (Fe ₂ O ₃)
	3,46 - 2,20 - 1,53	Mulita (3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂)
Pozolana	7,15 - 3,52 - 2,36	Caulinita (Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ .2H ₂ O)
	4,25 - 3,34 - 1,81	Quartzo (SiO ₂)
	Banda de Amorfização - 18° < 2θ < 30°	Metacaulinita (Al ₂ O ₃ .2SiO ₂)
Cal Carbomil	3,03 - 1,92 - 1,87	Calcita (CaCO ₃)
	2,72 - 2,10 - 1,68	Carbonato de Magnésio (MgCO ₃)
	2,10 - 1,48 - 1,20	Óxido de Magnésio (MgO)
Cal Megaó	4,77 - 2,37 - 1,18	Brucita (Mg(OH) ₂)
	2,10 - 1,49 - 1,20	Óxido de Magnésio (MgO)

Dos resultados apresentados pelos ensaios de caracterização mineralógica (análise química, ATD, ATG e difração de raios-X) adotou-se a cal Carbomil como amostra única para o desenvolvimento das demais etapas deste estudo. Esta escolha foi baseada no teor de MgO, que, na cal Megaó, apresenta-se em elevada quantidade, e sua presença resulta numa hidratação mais lenta, ocorrendo simultaneamente à carbonatação. Assim, a etapa de hidratação pode se dá de forma retardada, após a aplicação, causando um aumento de volume, que compromete a argamassa, através do surgimento de fissuras e desagregações (Guimarães e Cincotto, 1985).

4.2.2 Massa Específica Real

Os valores encontrados para as massas específicas reais das amostras de rejeitos, de materiais pozolânicos e da amostra de cal, estão contidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Massa Específica Real das Amostras de Rejeitos, de Materiais Pozolânicos e da Amostra de Cal.

Amostras	Massas Específicas Reais (g/cm ³)
Entulho 1	2,51
Entulho 2	2,36
Mistura	2,45
Pozolana	2,62
Cal Carbomil	2,23

Os resultados de massa específica real variaram de 2,36 g/cm³ (Entulho 2) a 2,62 g/cm³ (Pozolana). A amostra Entulho 1 apresentou massa específica real de 2,51 g/cm³ e a amostra Mistura de 2,45 g/cm³.

A cal Carbomil apresentou massa específica real de 2,23 g/cm³.

Os dados de massa específica real são dados secundários, necessários para a determinação da medida da área específica.

4.2.3 Área Específica

Nas Tabelas 8 e 9, e na Figura 18, estão apresentados os valores das áreas específicas, determinadas pelo método do Permeâmetro de Blaine, das amostras de rejeitos, Entulho 1 e Entulho 2, e de materiais pozolânicos, Mistura, correspondentes aos tempos de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 e 90min de moagem, em moinho de bolas.

Tabela 8 – Áreas Específicas das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos, Determinadas pelo Método do Permeâmetro de Blaine, para os Tempos de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50min de Moagem.

Amostras	Áreas Específicas (m ² /g)								
	Tempos de Moagem (min)								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Entulho 1	0,115	0,121	0,132	0,138	0,159	0,163	0,184	0,179	0,186
Entulho 2	0,125	0,129	0,134	0,161	0,170	0,173	0,173	0,188	0,189
Mistura	0,220	0,233	0,227	0,247	0,241	0,243	0,256	0,280	0,279

Tabela 9 - Áreas Específicas das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos, Determinadas pelo Método do Permeâmetro de Blaine, para os Tempos de 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 e 90min de Moagem.

Amostras	Áreas Específicas (m ² /g)							
	Tempos de Moagem (min)							
	55	60	65	70	75	80	85	90
Entulho 1	0,174	0,184	0,172	0,183	0,187	0,184	0,194	0,214
Entulho 2	0,202	0,202	0,222	0,216	0,236	0,240	0,245	0,249
Mistura	0,289	0,290	0,300	0,304	0,321	0,324	0,343	0,346

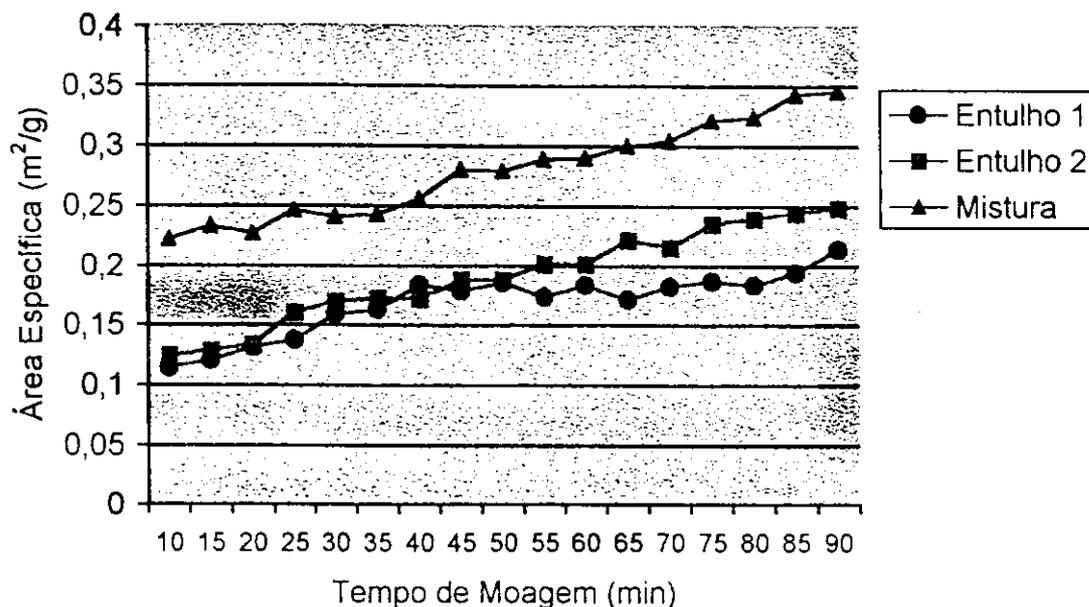


Figura 18 – Área Específica em Função do Tempo de Moagem, para as Amostras Entulho 1, Entulho 2 e Mistura.

As amostras Entulho 1 e Entulho 2 apresentaram uma variação na área específica, com o tempo de moagem, de $0,115 \text{ m}^2/\text{g}$ a $0,214 \text{ m}^2/\text{g}$ e de $0,125 \text{ m}^2/\text{g}$ a $0,249 \text{ m}^2/\text{g}$, respectivamente. A amostra Mistura apresentou uma variação de $0,222 \text{ m}^2/\text{g}$ a $0,346 \text{ m}^2/\text{g}$.

Mediante à análise dos resultados, observa-se que, com o aumento gradativo do tempo de moagem, tem-se um aumento nos valores de área específica, apresentando um maior valor aos 90min de moagem, para todas as amostras. Este resultado era esperado, pois através da moagem, tem-se uma redução no tamanho das partículas dos sólidos e, com o aumento do tempo de moagem esta redução torna-se cada vez maior, pois o maior tempo de contato do material com as bolas do moinho, confere, às partículas, uma subdivisão cada vez maior de suas dimensões.

Após uma análise dos resultados acima citados, foram escolhidas quatro áreas específicas, correspondentes a quatro tempos de moagem para cada amostra. O critério para esta escolha foi baseado na obtenção de áreas específicas com variação significativa em seus valores, para que, desta forma, possa ser verificada a influência da área específica na reatividade do sistema pozolana-cal. Com isto, as amostras foram moídas durante os tempos escolhidos (10, 30, 60 e 90min) e submetidas à ensaios de área específica,

para confirmar que os valores obtidos nesta segunda moagem, fossem os mesmos obtidos anteriormente.

Na Tabela 10, são apresentados os valores de área específica realizados com as amostras moídas durante os tempos escolhidos.

Tabela 10 – Áreas Específicas das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos, Determinadas pelo Método do Permeâmetro de Blaine, para os Tempos de 10, 30, 60 e 90min de Moagem.

Tempos de Moagem (min)	Áreas Específicas (m ² /g)		
	Entulho 1	Entulho 2	Mistura
10	0,117	0,127	0,227
30	0,153	0,171	0,265
60	0,185	0,206	0,311
90	0,220	0,239	0,340

Na Tabela 11, são apresentados os valores das áreas específicas, determinadas pelo método do Permeâmetro de Blaine, da amostra Pozolana, moída em moinho de discos.

Tabela 11 – Áreas Específicas da Amostra Pozolana, Determinadas pelo Método do Permeâmetro de Blaine.

Moinho de Discos	Áreas Específicas (m ² /g)
Aberturas entre os Discos	Pozolana
AB0	0,147
AB1	0,254
AB2	0,476
PM	0,638

AB0 – Abertura de 0,3mm entre os discos.

AB1 – Abertura de 0,2mm entre os discos.

AB2 – Material moído na abertura AB1 passado em peneira ABNT nº 200.

PM – Abertura de 0,1mm entre os discos.

A amostra Pozolana apresentou uma variação no valor da área específica, com as diferentes aberturas entre os discos, do moinho de discos, de 0,147 m²/g a 0,638 m²/g.

Comparando os resultados das Tabelas 10 e 11, com os valores das áreas específicas dos cimentos Portland CP II Z-25, CP II Z-32 e CP II Z-40, cujas áreas específicas são: 0,24 m²/g, 0,26 m²/g e 0,28 m²/g, respectivamente, observamos que as amostras Mistura e Pozolana, apresentam áreas específicas iguais, e, até mesmo, superiores, nos tempos de moagem de 60 e 90min (Mistura), e nas aberturas entre os discos de AB1, AB2 e PM (Pozolana).

Os resultados obtidos para as áreas específicas, citados acima, comprovam que a área específica é uma propriedade física que pode ser influenciada através de processos de desagregação, o que possibilita a obtenção de maiores superfícies de contato. No caso dos materiais pozolânicos, aqui estudados, estas variações/aumentos na superfície de contato, provavelmente, permitirão um aumento na sua atividade pozolânica e, quando utilizadas como aglomerantes, no desempenho mecânico das argamassas alternativas de cais pozolânicas.

Na Tabela 12, é apresentado o valor da área específica, determinada pelo método do Permeâmetro de Blaine, da amostra de cal.

Tabela 12 – Área Específica da Amostra de Cal, Determinada pelo Método do Permeâmetro de Blaine.

Amostra	Área Específica (m ² /g)
Cal Carbomil	1,222

4.2.3 Análise Granulométrica por Peneiras

Os resultados obtidos para as análises granulométricas das amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos, são apresentados na Tabela 13 e nas Figuras 19 a 22.

Tabela 13 - Composição Granulométrica das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos.

Amostras	Áreas Específicas (m ² /g)	% Acumulada que Passa da Amostra			
		Peneiras ABNT n ^{os}			
		400 (0,038mm)	325 (0,044mm)	200 (0,074mm)	100 (0,147mm)
Entulho 1	0,117	13,4	15,3	29,1	53,7
	0,153	16,3	18,6	33,2	58,4
	0,185	20,0	22,2	38,7	63,4
	0,220	23,0	25,1	42,8	67,1
Entulho 2	0,127	16,8	19,2	34,6	59,4
	0,171	21,0	23,1	40,4	65,5
	0,206	23,7	26,5	44,4	68,4
	0,239	26,6	29,1	47,9	71,1
Mistura	0,227	29,0	32,1	52,0	74,7
	0,265	31,7	35,2	56,1	79,3
	0,311	36,0	39,9	62,8	85,2
	0,340	38,8	42,7	65,5	87,3
Pozolana	0,147	22,2	24,6	45,1	73,8
	0,254	23,9	26,9	49,4	78,8
	0,476	47,5	54,8	100,0	100,0
	0,638	61,6	65,3	94,4	99,3

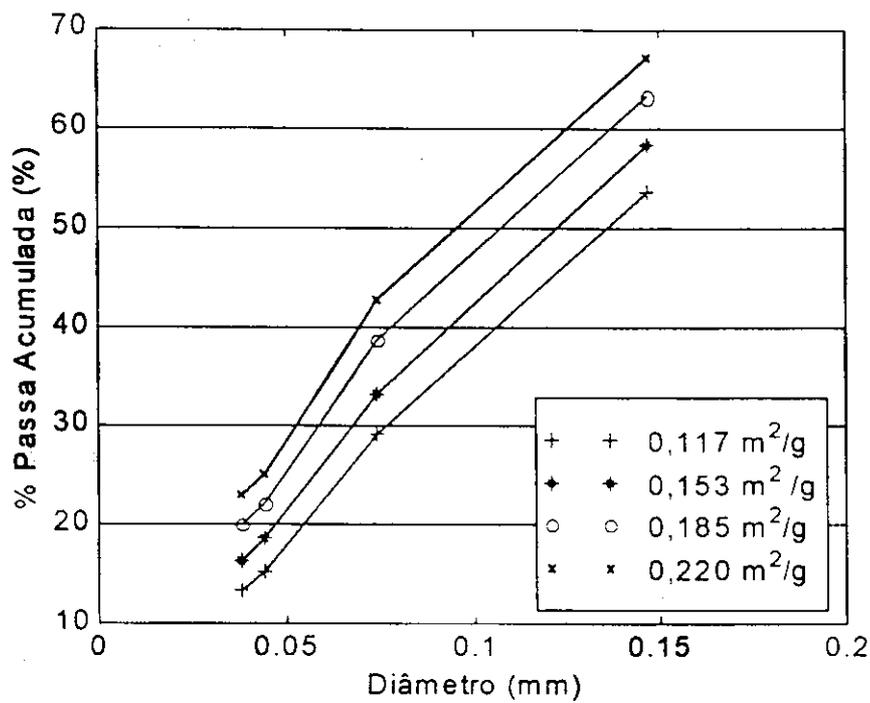


Figura 19 - Composições Granulométricas da Amostra Entulho 1 com Diferentes Áreas Específicas.

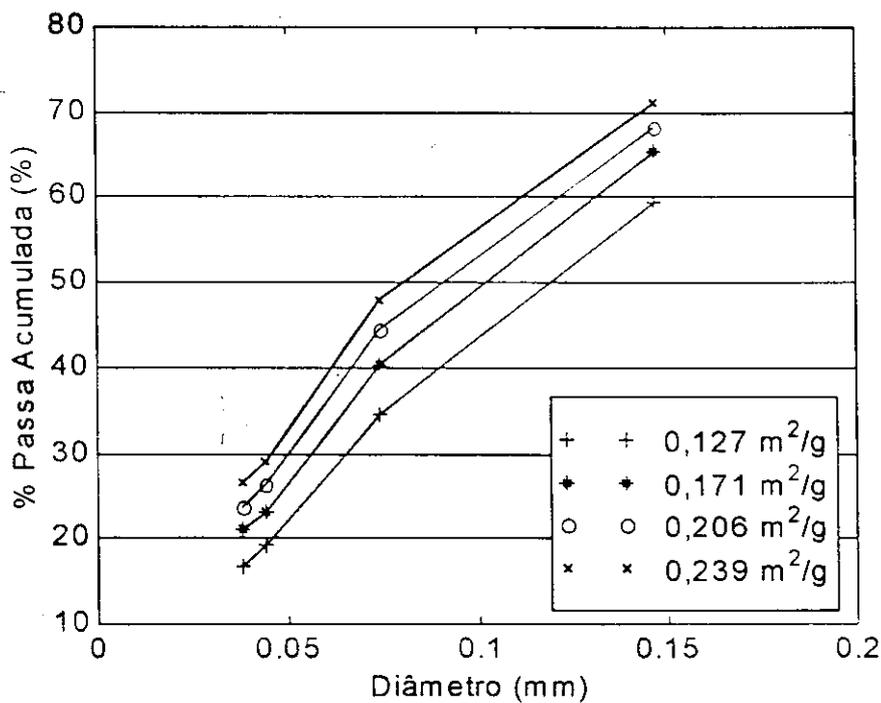


Figura 20 - Composições Granulométricas da Amostra Entulho 2 com Diferentes Áreas Específicas.

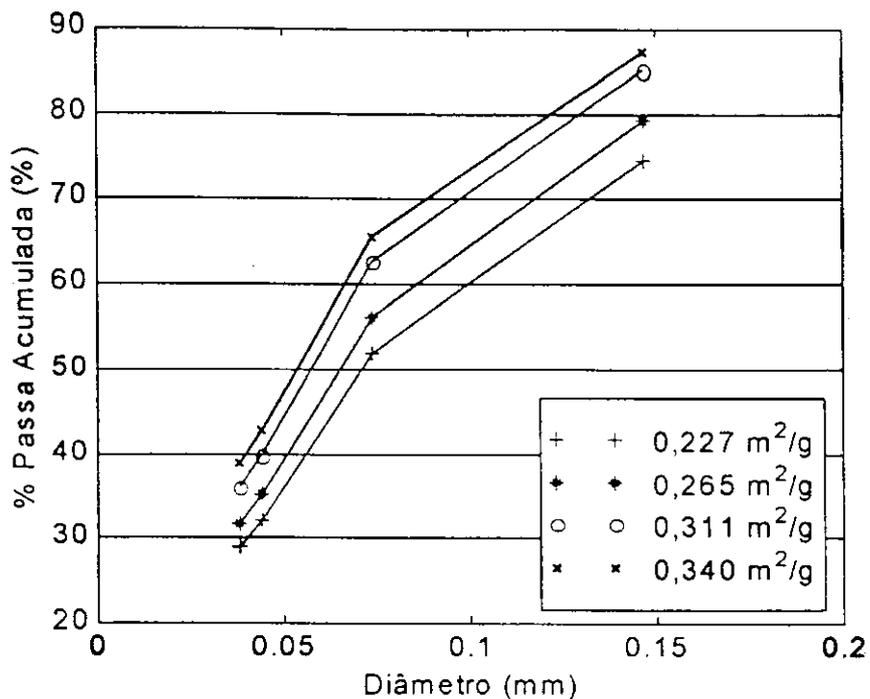


Figura 21 - Composições Granulométricas da Amostra Mistura com Diferentes Áreas Específicas.

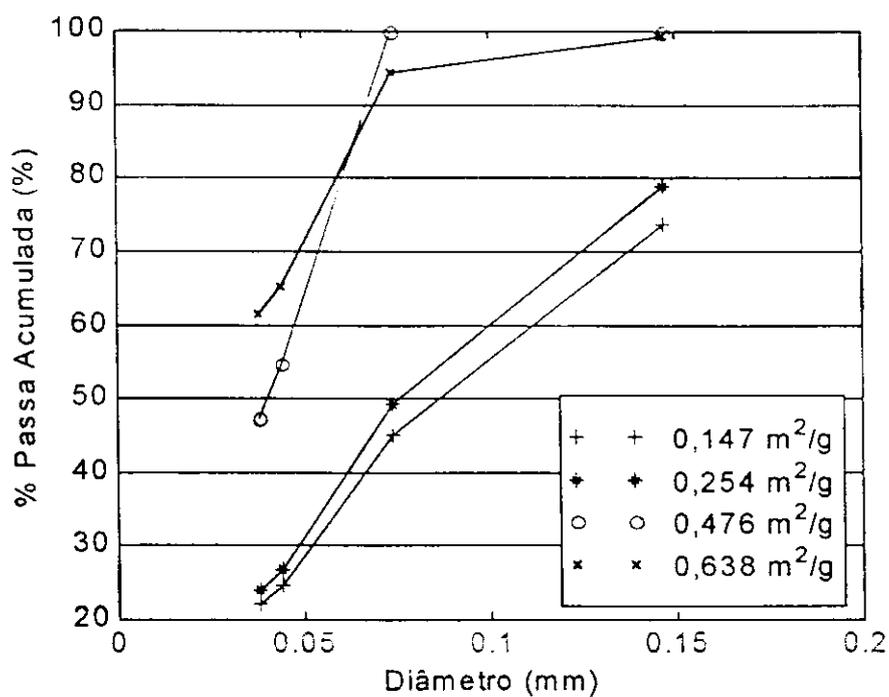


Figura 22 - Composições Granulométricas da Amostra Pozolana com Diferentes Áreas Específicas.

Mediante à análise conjunta dos resultados obtidos através dos ensaios de análise granulométrica por peneiras para as amostras Entulho 1, Entulho 2 e Mistura, moídas em moinho de bolas, observa-se que com o aumento da área específica das amostras tem-se maior quantidade de finos, representada em percentagem acumulada que passa nas peneiras.

Para a Pozolana, moída em moinho de discos, o mesmo comportamento é observado nas áreas específicas de 0,147 m²/g e 0,254 m²/g. Contudo, observa-se, na amostra com área específica de 0,476 m²/g, maior quantidade de finos na peneira ABNT nº 200 (0,074mm) e nº 100 (0,147mm) quando comparada com a área específica de 0,638 m²/g. Embora esta não seja a maior área específica encontrada, provavelmente deve-se ao fato de que no método de determinação de área específica Blaine a distribuição do tamanho de grãos não é considerada.

Em geral, observa-se que com o aumento no valor da área específica obtêm-se maiores quantidades de finos, fato importante para o sistema pozolana-cal.

4.2.4 Consumo de Cal

Na Tabela 14, são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de consumo de cal das amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos, nas diferentes áreas específicas.

Os resultados de consumo de cal obtidos para as amostras Entulho 1, Entulho 2, Mistura e Pozolana, nas diferentes áreas específicas, variaram de 92,9 mg CaO/g de amostra a 124,7 mg CaO/g de amostra, de 85,8 mg CaO/g de amostra a 95,6 mg CaO/g de amostra, de 115,6 mg CaO/g de amostra a 171,3 mg CaO/g de amostra e de 143,9 mg CaO/g de amostra a 301,9 mg CaO/g de amostra, respectivamente.

Para as amostras Entulho 1 e Mistura, observa-se um aumento do grau de pozolanicidade com o aumento de suas áreas específicas. Para a amostra Entulho 2, os resultados obtidos não apresentam o mesmo comportamento e,

para a amostra Pozolana, tem-se na área específica de 0,476 m²/g, o maior consumo de cal (301,9 mg CaO/g de amostra), mesmo não sendo esta a maior área específica estudada. Neste caso, o elevado índice de atividade pozolânica pode ser explicado pela homogeneidade na forma e tamanho das partículas da amostra, uma vez que esta foi passada em peneira ABNT nº 200 (0,074mm).

Relacionando estes resultados com a composição mineralógica das amostras e, sabendo que a capacidade de fixação da cal, depende, além da área específica, da presença de compostos amorfos ou estruturalmente desordenados nos materiais, observa-se que as amostras Mistura e Pozolana, caracterizaram-se por apresentarem maiores valores representativos do consumo de cal; nestas amostras foi observada a presença de compostos amorfos através da ATD e de banda de amorfização na difração de raios-X. A combinação do hidróxido de cálcio com o material pozolânico, leva à formação de compostos com propriedades cimentícias, proporcionando uma estrutura compacta e resistente química e mecanicamente.

Nas amostras Entulho 1 e Entulho 2 foram observados valores inferiores de consumo de cal; o que se justifica por serem estas amostras derivadas de misturas de diversos componentes, entre eles, materiais inertes à cal.

Comparando os resultados da Tabela 13 com os obtidos por Hamassaki et al (1996), em estudo desenvolvido com amostras de blocos cerâmicos, de tijolos e de blocos de concreto, cujos resultados de consumo de cal foram 137,1 mg CaO/g de amostra, 255,8 mg CaO/g de amostra e 53,6 mg CaO/g de amostra, respectivamente, observamos que para as maiores áreas específicas estudadas, as amostras Entulho 1 e Mistura, apresentam valores concordantes aos encontrados neste estudo. A amostra Entulho 2, em todas as áreas específicas, apresenta consumo de cal superior ao apresentado pela amostra de blocos de concreto acima citada, e, a amostra Pozolana, por ser uma pozolana artificial típica, apresenta atividade pozolânica, aqui representada pelos valores de consumo de cal, superior aos obtidos para as três amostras estudadas (blocos cerâmicos, tijolos e blocos de concreto).

Segundo Raverdy et al (1980), materiais com potencial aglomerante para apresentarem incremento de resistência, devida a reação pozolânica, devem apresentar um consumo mínimo de 330 mg CaO/g da amostra. Contudo, segundo Hamassaki et al (1996), este não é o único fator

determinante para explicar a atividade pozolânica. E ressalta, ainda, que não são suficientemente conhecidos os efeitos da granulometria e do teor de finos presentes nas argamassas com materiais reciclados.

Uma análise conjunta dos resultados mostra que com o aumento da área específica das amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos, obtêm-se maiores valores representativos do grau de pozolanicidade, bem como, que o beneficiamento do material em peneiras, de forma a se obter uma maior quantidade de finos e homogeneidade das partículas, garante, ao mesmo, maior atividade pozolânica.

Tabela 14 – Consumo de Cal das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos nas Diferentes Áreas Específicas.

Amostras	Áreas Específicas (m ² /g)	Consumos de Cal (mg CaO/g de amostra)
Entulho 1	0,117	92,2
	0,153	90,7
	0,185	120,2
	0,220	124,7
Entulho 2	0,127	92,1
	0,171	87,9
	0,206	85,8
	0,239	95,6
Mistura	0,227	115,6
	0,265	151,8
	0,311	157,4
	0,340	171,3
Pozolana	0,147	143,9
	0,254	169,0
	0,476	301,9
	0,638	267,9

4.2.5 Índice de Atividade Pozolânica com Cal

Na Tabela 15, são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de índice de atividade pozolânica com cal, das amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos, nas diferentes áreas específicas.

Os resultados do índice de atividade pozolânica com cal, obtidos para as amostras Entulho 1, Entulho 2, Mistura e Pozolana, nas diferentes áreas específicas, variaram de 1,46 MPa a 2,41 MPa, de 1,16 MPa a 1,91 MPa, de 3,89 MPa a 5,21 MPa e de 2,65 MPa a 8,38 MPa, respectivamente.

Para todas as amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos, Entulho 1, Entulho 2, Mistura e Pozolana, observa-se um aumento na atividade pozolânica com o aumento de suas áreas específicas. Este acréscimo é mais evidenciado na amostra Pozolana, que, em termos percentuais, apresenta incremento de até 216,2% no índice de atividade pozolânica com cal, levando-se em consideração o menor ($0,147 \text{ m}^2/\text{g}$) e o maior valor ($0,638 \text{ m}^2/\text{g}$) de área específica estudados. Para as amostras Entulho 1, Entulho 2 e Mistura, os acréscimos na atividade pozolânica, sob as mesmas condições, foram de: 65,0%, 64,6% e 33,9%, respectivamente.

Segundo Zampieri (1989), sob condições de cura acelerada (55°C), como é o caso deste ensaio, o composto formado entre a pozolana e o hidróxido de cálcio, é, geralmente, o aluminato de cálcio hidratado, cuja fórmula simplificada é C_3AH_6 . Este composto seria, portanto, responsável pela resistência adquirida pelas argamassas de cais pozolânicas.

As amostras Entulho 1 e Entulho 2, foram as que apresentaram menores valores representativos do índice de atividade pozolânica com cal; este comportamento justifica-se pela procedência das amostras, como foi dito em itens anteriores.

Segundo a Norma NBR-5751 (1992), são considerados pozolânicos os materiais que apresentarem resistência à compressão não inferior a 5,5 MPa. Conforme esta especificação, pode ser considerada pozolânica a amostra Pozolana com área específica de $0,638 \text{ m}^2/\text{g}$ (8,38 MPa). Contudo, as amostras Mistura, com área específica de $0,340 \text{ m}^2/\text{g}$ (5,21 MPa) e Pozolana,

com área específica de 0,476 m²/g (5,15 MPa), apresentam valores de resistência à compressão bastante próximos ao valor de referência, e com esta norma é designada à materiais pozolânicos que serão utilizados no preparo do cimento Portland pozolânico, o que não é o nosso, poderemos considerá-las também como material pozolânico.

Tabela 15 – Índice de Atividade Pozolânica com Cal das Amostras de Rejeitos e de Materiais Pozolânicos nas Diferentes Áreas Específicas.

Amostras	Áreas Específicas (m ² /g)	Índices de Atividade Pozolânica com Cal (MPa)
Entulho 1	0,117	1,46
	0,153	1,92
	0,185	2,01
	0,220	2,41
Entulho 2	0,127	1,16
	0,171	1,51
	0,206	1,93
	0,239	1,91
Mistura	0,227	3,89
	0,265	4,70
	0,311	4,79
	0,340	5,21
Pozolana	0,147	2,65
	0,254	2,97
	0,476	5,15
	0,638	8,38

Comparando os resultados obtidos neste ensaio (índice de atividade pozolânica com cal, Tabela 15) com os obtidos no ensaio de consumo de cal (Tabela 14) para a Pozolana com área específica de 0,476 m²/g, verifica-se que neste último tem-se um valor máximo de atividade pozolânica, ao contrário do que ocorreu no ensaio do índice de atividade pozolânica com cal. Tal

comportamento pode ser explicado pelo fato de que o consumo de cal é um ensaio em fase aquosa, enquanto que o índice de atividade pozolânica com cal é um ensaio em fase sólida, onde os mecanismos e os coeficientes de difusão, aliados à influência da granulometria, são menos pronunciados.

De maneira geral, o comportamento apresentado pelas amostras neste ensaio, foi similar ao observado no ensaio de consumo de cal mostrado anteriormente, com a amostra Pozolana apresentando o maior grau de pozolanicidade, e a amostra Mistura, como sendo a mais reativa entre os materiais reciclados. Os resultados evidenciam, portanto, que o aumento da área específica nos rejeitos e nos materiais pozolânicos implica em uma maior atividade pozolânica; isto ocorre pois, a reação entre a cal e o material pozolânico é favorecida pelo aumento da área de contato entre os seus grãos. Com isto, poderão ser esperados significativos benefícios que a área específica, ou o seu aumento, trará ao comportamento mecânico das argamassas de cals pozolânicas.

Uma síntese dos resultados obtidos através dos ensaios de caracterização das amostras estudadas, mostra que:

- 1) a amostra Entulho1 pode ser classificada com um material sílico-aluminoso, composta por quartzo e CaCO_3 , de baixa reatividade e grau de pozolanicidade como função da área específica;
- 2) a amostra Entulho 2 pode ser classificada com sílico-aluminosa, composta por quartzo, CaCO_3 , Ca(OH)_2 e mulita, de baixa reatividade e atividade pozolânica como função da área específica;
- 3) a amostra Mistura pode ser classificada como sílico-aluminosa, composta por quartzo, Fe_2O_3 e mulita e com satisfatória atividade pozolânica como função da área específica;
- 4) a amostra Pozolana é uma pozolana típica, oriunda de uma argila caulínica, com pequena quantidade de caulinita e impurezas de sílica na forma de quartzo, com boa atividade pozolânica também função da área específica, e,
- 5) a cal Carbomil é uma cal cálcica, enquanto a cal Megaó, uma cal dolomítica.

4.3 Ensaio Tecnológicos

4.3.1 Consistência Normal

Na Tabela 16 e na Figura 23, são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de consistência normal das argamassas com Entulho 1.

Na Tabela 17 e na Figura 24, são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de consistência normal das argamassas com Entulho 2.

Na Tabela 18 e na Figura 25, são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de consistência normal das argamassas com Mistura.

Na Tabela 19 e na Figura 26, são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de consistência normal das argamassas com Pozolana.

Os resultados obtidos para o fator água/aglomerante (f_a/a) das argamassas com Entulho 1, na composição de 30-70% de cal e pozolana, nas áreas específicas estudadas, variaram de 0,72 (0,185 m²/g) a 0,77 (0,117 m²/g). Na composição de 40-60% de cal e pozolana, variaram de 0,70 (0,185 m²/g) a 0,77 (0,117 m²/g), e na composição de 50-50% de cal e pozolana a variação foi de 0,72 (0,153 m²/g e 0,220 m²/g) a 0,75 (0,117 m²/g e 0,185 m²/g).

Para as argamassas com Entulho 2, na composição de 30-70% de cal e pozolana, nas áreas específicas estudadas, os resultados obtidos para o f_a/a variaram de 0,71 (0,239 m²/g) a 0,75 (0,127 m²/g). Nas composições de 40-60% e 50-50% de cal e pozolana, variaram de 0,71 (0,206 m²/g e 0,239 m²/g) a 0,72 (0,127 m²/g e 0,171 m²/g).

Para as argamassas com Mistura, na composição de 30-70% de cal e pozolana, nas áreas específicas estudadas, os resultados obtidos para o f_a/a variaram de 0,72 (0,340 m²/g) a 0,75 (0,227 m²/g e 0,265 m²/g). Na composição de 40-60% de cal e pozolana, variaram de 0,72 (0,340 m²/g) a 0,75 (0,227 m²/g), e na composição de 50-50% de cal e pozolana a variação foi de 0,72 (0,311 m²/g e 0,340 m²/g) a 0,75 (0,227 m²/g).

Os resultados obtidos para o f_a/a das argamassas com Pozolana, na composição de 30-70% de cal e pozolana, nas áreas específicas estudadas, variaram de 0,69 (0,638 m²/g) a 0,80 (0,476 m²/g). Na composição de 40-60%

de cal e pozolana, variaram de 0,72 (0,638 m²/g) a 0,77 (0,476 m²/g), e na composição de 50-50% de cal e pozolana a variação foi de 0,72 (0,265 m²/g) a 0,77 (0,147 m²/g e 0,311 m²/g).

Uma análise conjunta dos resultados citados acima, mostra que à medida que área específica das amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos (Entulho 1, Entulho 2, Mistura e Pozolana) aumenta, a quantidade de água requerida para que a argamassa atinja uma consistência normal, diminui. Este comportamento pode ser explicado pela presença de partículas com granulometria abaixo da peneira ABNT nº 100 (0,0147mm), que agem, provavelmente, como lubrificantes na mistura pozolana-cal-agregado, e que não necessitam ser molhadas de forma idêntica às partículas de maior dimensão. Isto justifica a redução do teor de água para que se atinja a consistência normal a medida que a área específica das amostras aumenta (Glanville et al, 1947).

É importante ressaltar que as argamassas estudadas foram preparadas com areia normal e cal pozolânica como aglomerante. Como a granulometria da areia é padronizada e a área específica da cal constante (1,222 m²/g), são os tamanhos das partículas dos rejeitos e dos materiais pozolânicos que variam. Esta variação proporciona maiores valores de área específica, e portanto, maior o teor de finos. O aumento no teor de finos também é obtido quando se aumenta a concentração de cal, material de elevada área específica, na composição da cal pozolânica, uma vez que foram estudadas três composições (30-70%, 40-60% e 50-50% de cal pozolânica), e segundo esta ótica, também verifica-se uma redução na quantidade de água com o acréscimo na quantidade de cal.

Segundo Neville (1982), aparentemente, é a área específica do agregado o fator importante na determinação da trabalhabilidade da mistura, que por sua vez, tem influência sobre a demanda de água. Entretanto, ainda não se chegou a uma conclusão sobre o verdadeiro papel desempenhado pelas partículas mais finas. Esta afirmação, embora direcionada aos agregados, pode ser aplicada aos aglomerantes estudados em nosso trabalho, já que o agregado utilizado, como dito anteriormente, apresenta granulometria padronizada.

Contudo, segundo Cincotto (1988), quanto maior a área específica maior o teor de água necessário para atingir a consistência normal, pois tem-se maior superfície a ser molhada. E acrescenta, ainda, que quanto maior o teor de cal presente na argamassa, maior deverá ser o fator água/aglomerante, para que o sistema passe de uma consistência mais seca a uma mais fluida. Deve ser mencionado que este comportamento, como foi dito, não observou-se neste trabalho.

Portanto, não há dúvida, de que a granulometria dos agregados e aglomerantes é fator importante na trabalhabilidade de uma argamassa, mas o verdadeiro papel desempenhado pelas partículas mais finas não é totalmente conhecido. Desta forma, estudos mais específicos devem ser realizados objetivando o melhor conhecimento da reologia de argamassas.

Tabela 16 – Índice de Consistência e Fator Água/Aglomerante para as Argamassas com Entulho 1 nas Áreas Específicas Estudadas e nas Composições de 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana.

Áreas Específicas (m ² /g)	Composições da Cal		Quantidades de	Índices de	Fatores
	Pozolânica (%)	Água (ml)	de	de	Água/Aglomerante f a/a
0,117	30-70	290		211	0,77
	40-60	290		213	0,77
	50-50	280		205	0,75
0,153	30-70	285		208	0,76
	40-60	280		212	0,75
	50-50	270		208	0,72
0,185	30-70	270		208	0,72
	40-60	265		205	0,70
	50-50	280		212	0,75
0,220	30-70	275		212	0,73
	40-60	270		212	0,72
	50-50	270		211	0,72

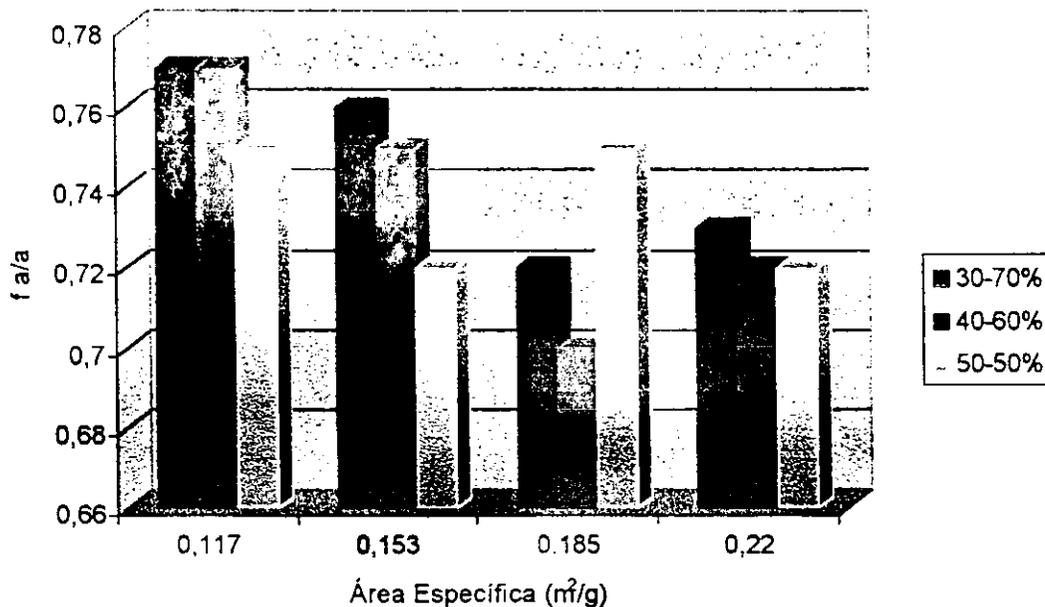


Figura 23 - Fator Água/Aglomerante para Consistência Normal em Função da Área Específica para as Argamassas com Entulho 1 nas Composições 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana.

Tabela 17 – Índice de Consistência e Fator Água/Aglomerante para as Argamassas com Entulho 2 nas Áreas Específicas Estudadas e nas Composições de 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana.

Áreas Específicas (m ² /g)	Composições da Cal	Quantidades de	Índices De	Fatores
	Pozolânica (%)	Água (ml)	Consistência (mm)	Água/Aglomerante f/a/a
0,127	30-70	280	210	0,75
	40-60	270	207	0,72
	50-50	270	208	0,72
0,171	30-70	270	210	0,72
	40-60	270	211	0,72
	50-50	270	206	0,72
0,206	30-70	270	205	0,72
	40-60	265	209	0,71
	50-50	265	207	0,71
0,239	30-70	265	212	0,71
	40-60	265	210	0,71
	50-50	265	209	0,71

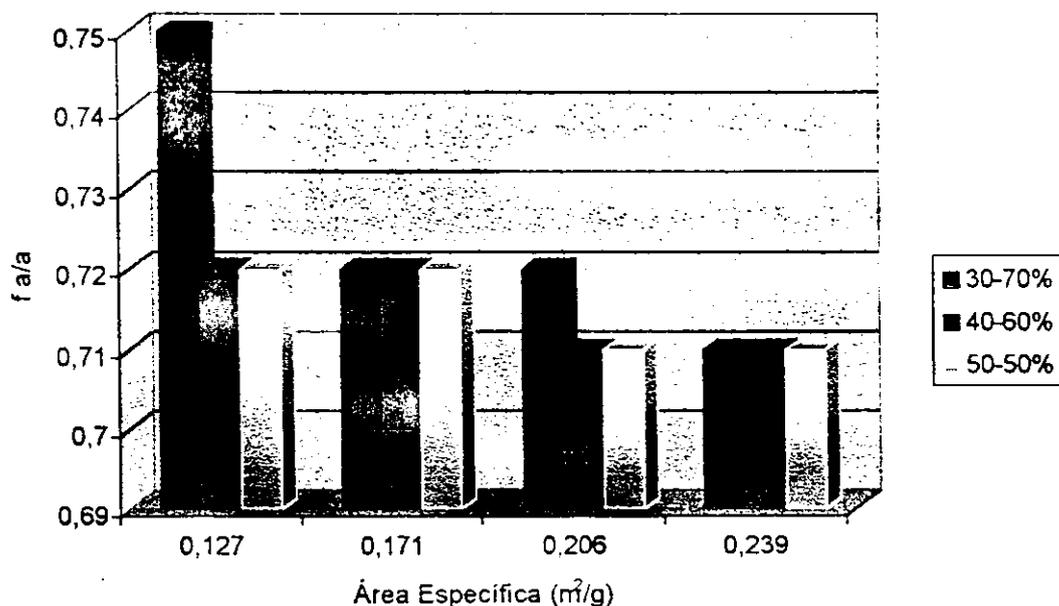


Figura 24 – Fator Água/Aglomerante para Consistência Normal em Função da Área Específica para as Argamassas com Entulho 2 nas Composições 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana.

Tabela 18 – Índice de Consistência e Fator Água/Aglomerante para as Argamassas com Mistura nas Áreas Específicas Estudadas e nas Composições de 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana.

Área Específica (m ² /g)	Composição		Quantidades de Água (ml)	Índice De Consistência (mm)	Fator Água/Aglomerante fa/a
	da Cal	Pozolânica (%)			
0,227		30-70	280	207	0,75
		40-60	280	209	0,75
		50-50	280	208	0,75
0,265		30-70	280	209	0,75
		40-60	275	205	0,73
		50-50	275	208	0,73
0,311		30-70	275	213	0,73
		40-60	275	212	0,73
		50-50	270	206	0,72
0,340		30-70	270	205	0,72
		40-60	270	211	0,72
		50-50	270	207	0,72

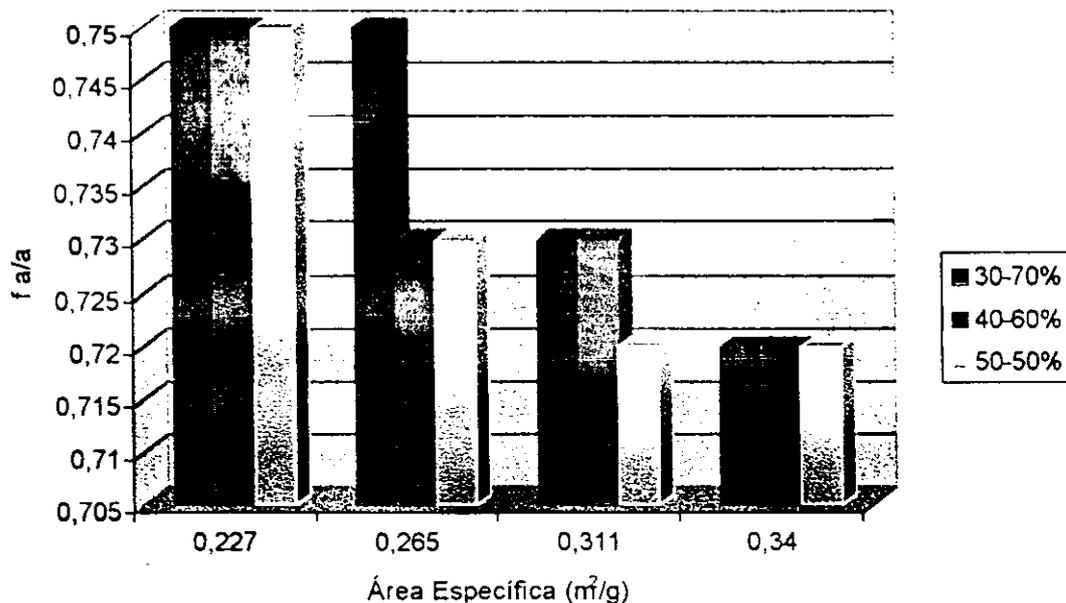


Figura 25 – Fator Água/Aglomerante para Consistência Normal em Função da Área Específica para a Argamassa com Mistura nas Composições 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana.

Tabela 19 – Índice de Consistência e Fator Água/Aglomerante para as Argamassas com Pozolana nas Áreas Específicas Estudadas e nas Composições de 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana.

Áreas Específicas (m ² /g)	Composições		Índices De Consistência (mm)	Fatores Água/Aglomerante fa/a
	da Cal Pozolânica (%)	Quantidades de Água (ml)		
0,147	30-70	290	208	0,77
	40-60	280	214	0,75
	50-50	290	212	0,77
0,254	30-70	280	210	0,75
	40-60	280	205	0,75
	50-50	270	210	0,72
0,476	30-70	300	208	0,80
	40-60	290	210	0,77
	50-50	290	206	0,77
0,638	30-70	260	205	0,69
	40-60	270	205	0,72
	50-50	280	211	0,75

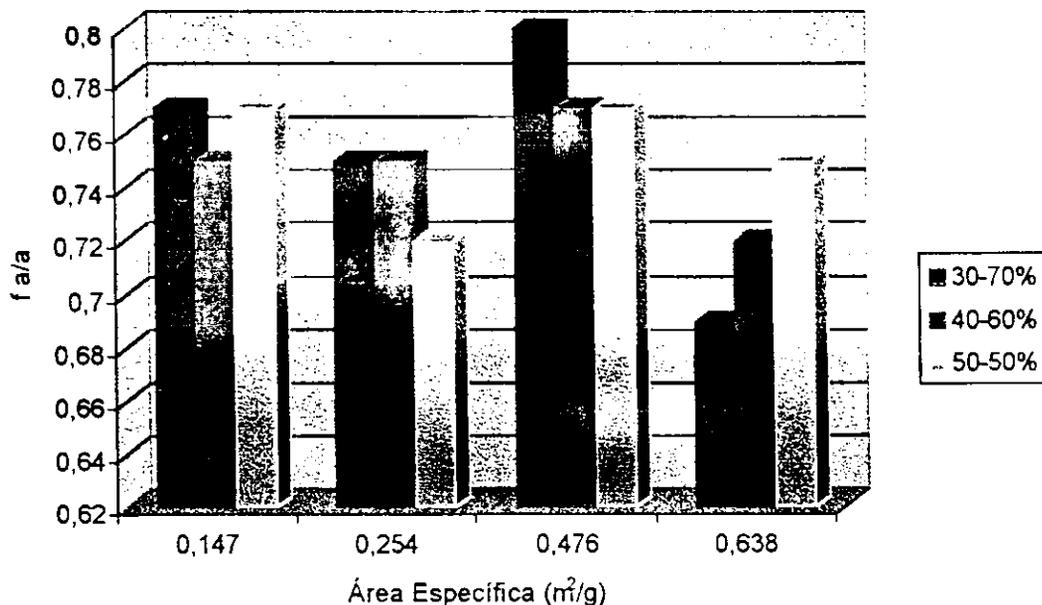


Figura 26 – Fator Água/Aglomerante para Consistência Normal em Função da Área Específica para a Argamassa com Pozolana nas Composições 30-70%, 40-60%, 50-50% de Cal e Pozolana.

4.2.2 Resistência à Compressão Simples – RCS

Na Tabela 20 e nas Figuras 27, 28 e 29, são apresentados os resultados de RCS, das argamassas com Entulho 1, nas composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de cal e pozolana, nos períodos de 7, 28 e 60d de cura.

Na Tabela 21 e nas Figuras 30, 31 e 32, são apresentados os resultados de RCS, das argamassas com Entulho 2, nas composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de cal e pozolana, nos períodos de 7, 28 e 60d de cura.

Na Tabela 22 e nas Figuras 33, 34 e 35, são apresentados os resultados de RCS das argamassas com Mistura, nas composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de cal e pozolana, nos períodos de 7, 28 e 60d de cura.

Na Tabela 23 e nas Figuras 36, 37 e 38, são apresentados os resultados de RCS, das argamassas com Pozolana, nas composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de cal e pozolana, nos períodos de 7, 28 e 60d de cura.

Tabela 20 – Resistência à Compressão Simples das Argamassas com Entulho 1, com Diferentes Áreas Específicas, nas Composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Áreas Específicas (m ² /g)	Períodos de Cura (d)	RCS (MPa)		
		30-70%	40-60%	50-50%
0,117	7	0,43	0,57	0,51
	28	1,58	1,28	1,00
	60	2,05	2,00	1,44
0,153	7	0,74	0,66	0,59
	28	1,56	1,43	1,33
	60	2,15	1,91	1,69
0,185	7	0,80	0,76	0,60
	28	1,94	1,53	1,33
	60	2,63	1,72	2,00
0,220	7	0,79	0,80	0,63
	28	1,70	1,66	1,29
	60	2,75	2,31	2,11

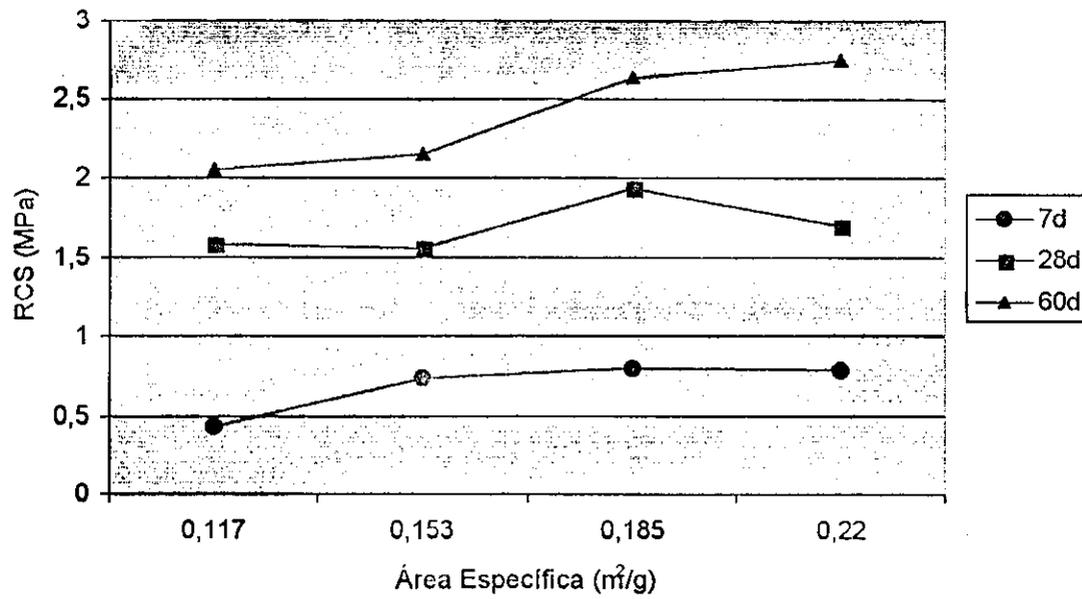


Figura 27 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 1, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

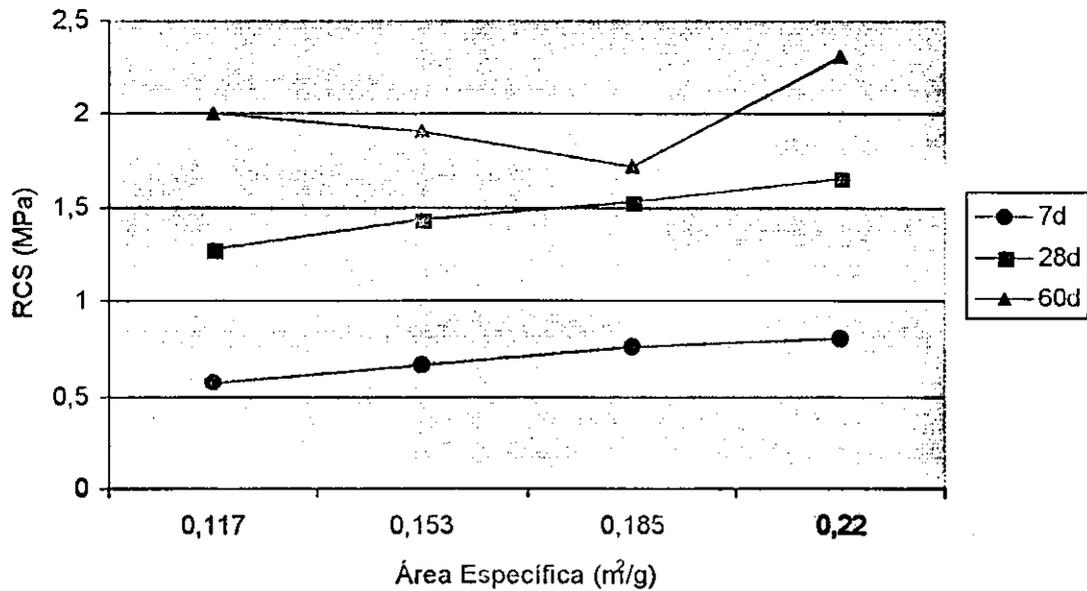


Figura 28 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 1, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

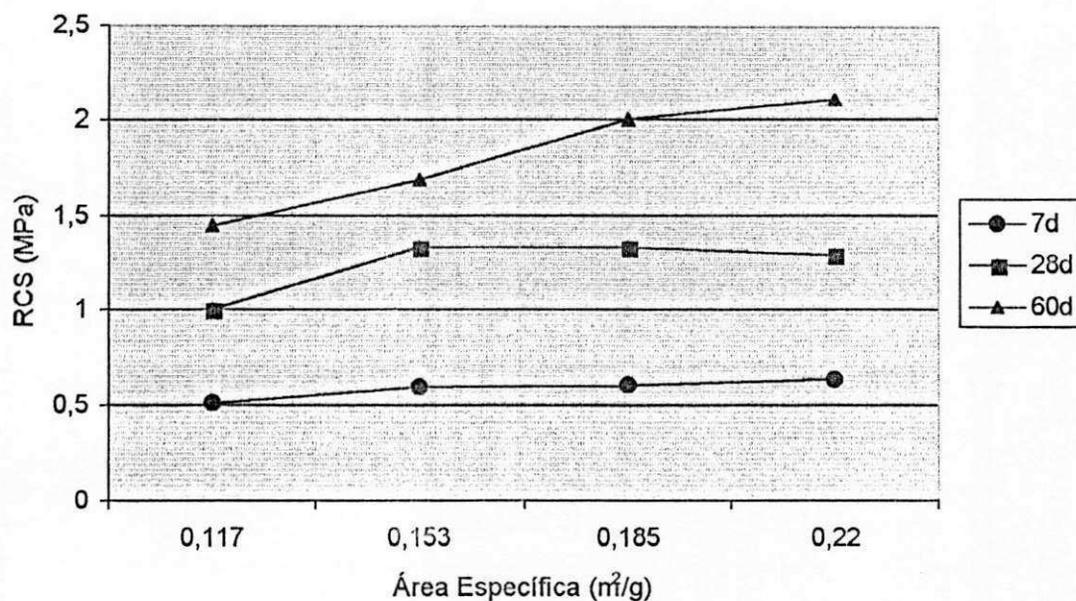


Figura 29 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 1, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Tabela 21 – Resistência à Compressão Simples das Argamassas com Entulho 2, com Diferentes Áreas Específicas, nas Composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Áreas Específicas (m²/g)	Períodos de Cura (d)	RCS (MPa)		
		30-70%	40-60%	50-50%
0,127	7	0,57	0,45	0,42
	28	1,37	1,25	0,93
	60	1,76	1,50	1,07
0,171	7	0,59	0,49	0,38
	28	1,56	1,40	1,21
	60	2,01	1,88	1,53
0,206	7	0,52	0,55	0,54
	28	1,73	1,58	1,34
	60	2,21	1,98	1,75
0,239	7	0,76	0,53	0,51
	28	1,96	1,55	1,32
	60	2,50	2,00	1,76

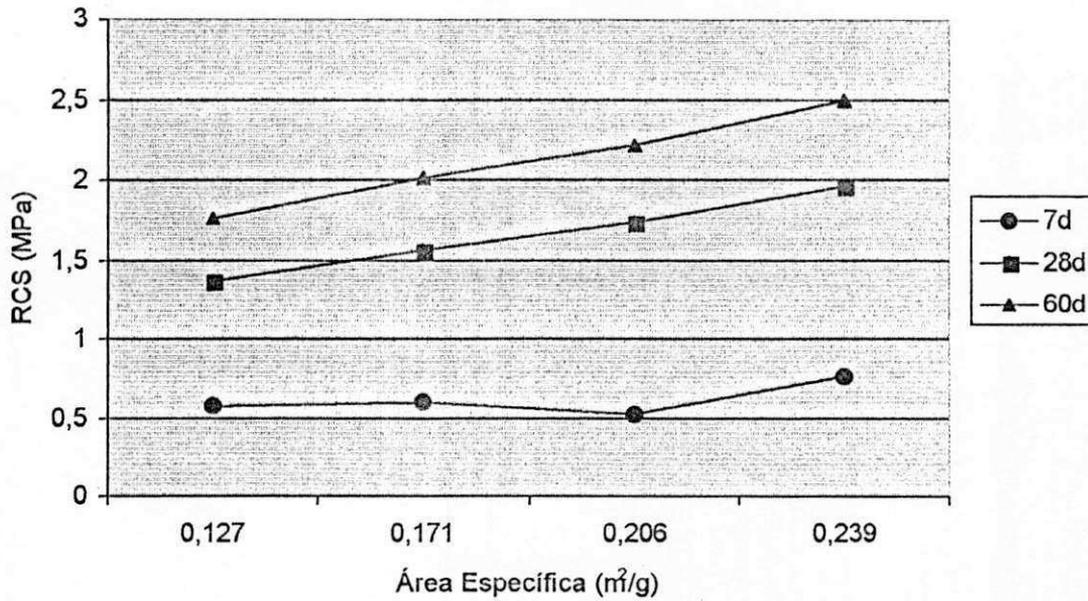


Figura 30 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 2, na Composição 30-70% de Cal e Pozzolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

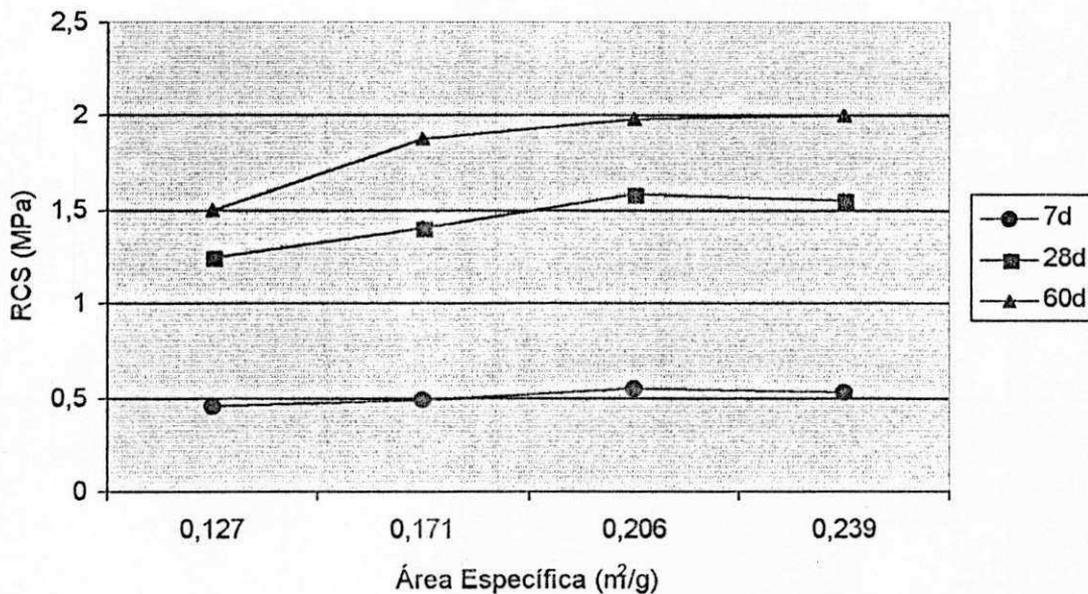


Figura 31 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 2, na Composição 40-60% de Cal Pozzolânica, Curados por Períodos de 7, 28 e 60d.

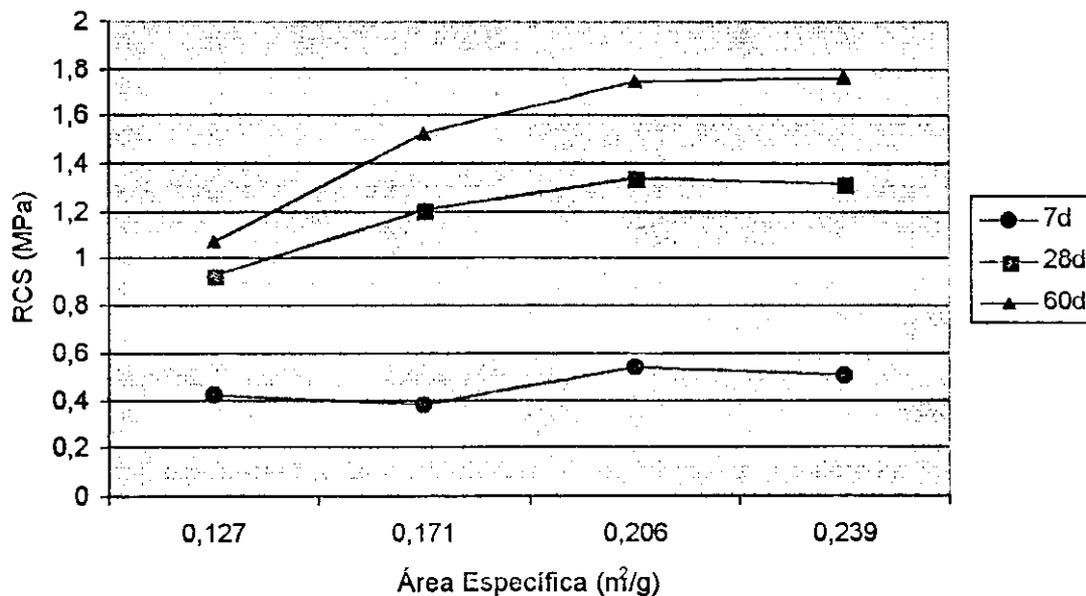


Figura 32 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Entulho 2, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Tabela 22 – Resistência à Compressão Simples das Argamassas com Mistura, com Diferentes Áreas Específicas, nas Composições de 30-70%, 40-60% e 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Áreas Específicas (m²/g)	Períodos de Cura (d)	RCS (MPa)		
		30-70%	40-60%	50-50%
0,227	7	1,08	0,84	0,77
	28	2,62	2,31	1,89
	60	3,82	3,36	3,31
0,265	7	1,23	1,12	0,81
	28	3,11	2,88	2,57
	60	4,80	4,14	3,90
0,311	7	1,09	0,95	0,78
	28	3,06	2,66	2,65
	60	4,95	4,07	3,92
0,340	7	1,07	0,97	0,80
	28	3,10	2,90	2,59
	60	5,13	4,51	3,77

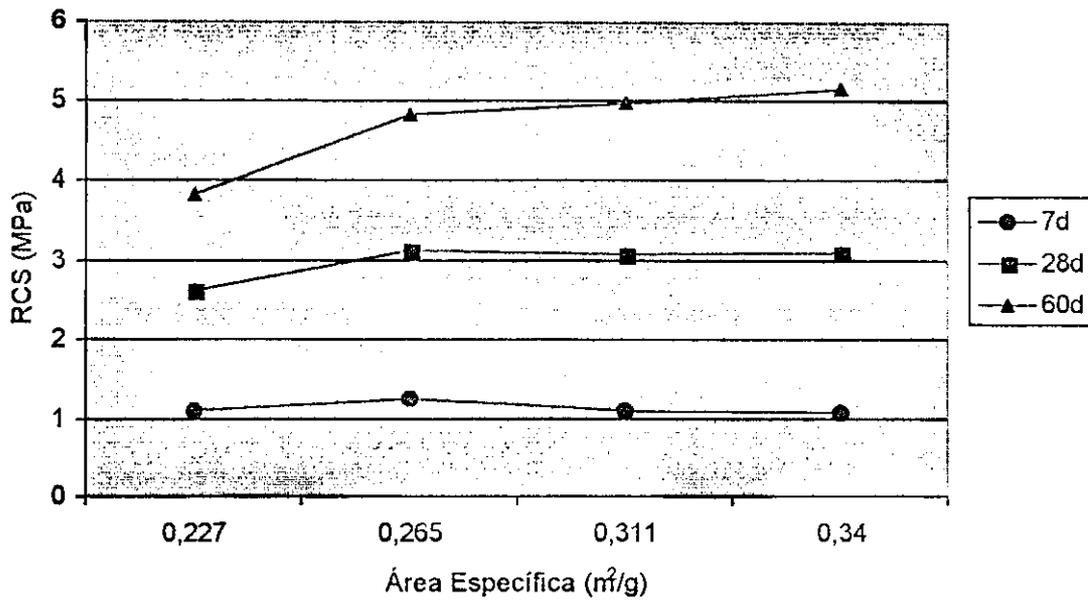


Figura 33 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Mistura, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

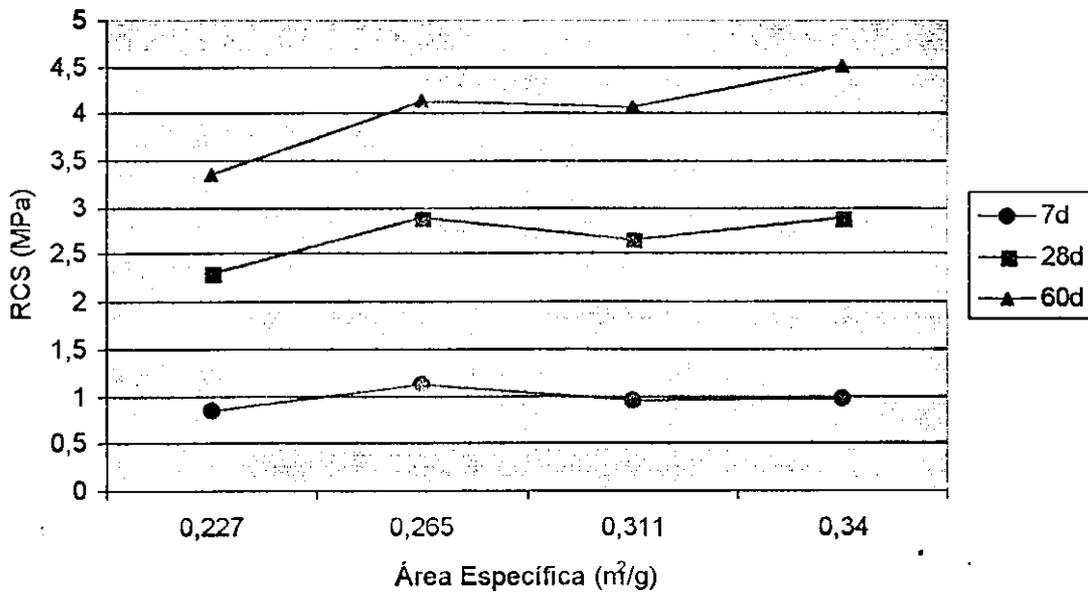


Figura 34 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Mistura, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

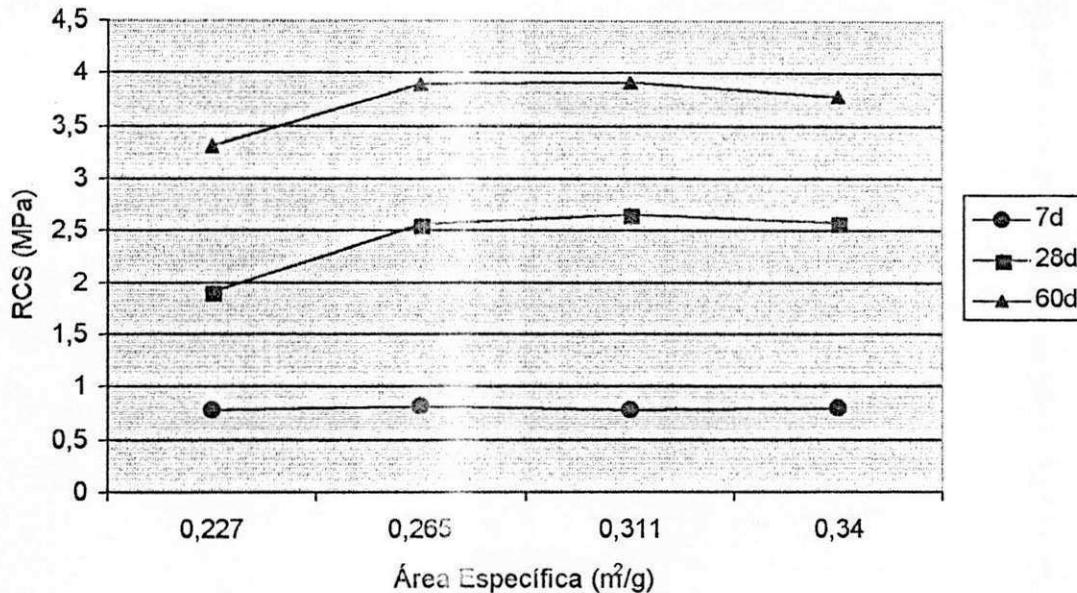


Figura 35 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Mistura, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Tabela 23 – Resistência à Compressão Simples das Argamassas com Pozolana, com Diferentes Áreas Específicas, nas Composições de 30-70%, 40-60% e 50-50%, de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Áreas Específicas (m²/g)	Períodos de Cura (d)	RCS (MPa)		
		30-70%	40-60%	50-50%
0,147	7	1,18	0,86	0,76
	28	2,49	1,68	1,25
	60	2,48	1,87	1,59
0,254	7	1,67	1,51	1,31
	28	2,98	2,29	1,90
	60	3,31	2,67	2,06
0,476	7	2,98	2,76	2,66
	28	6,77	5,01	4,66
	60	7,95	6,07	4,97
0,638	7	3,74	3,52	2,66
	28	5,31	4,38	3,60
	60	5,99	4,62	3,64

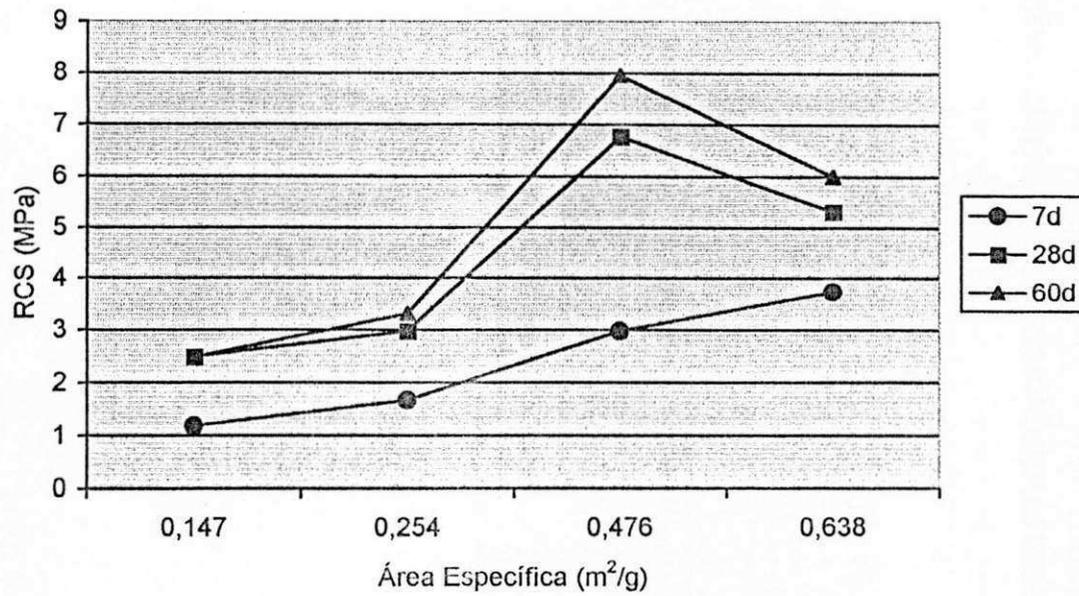


Figura 36 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Pozolana, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

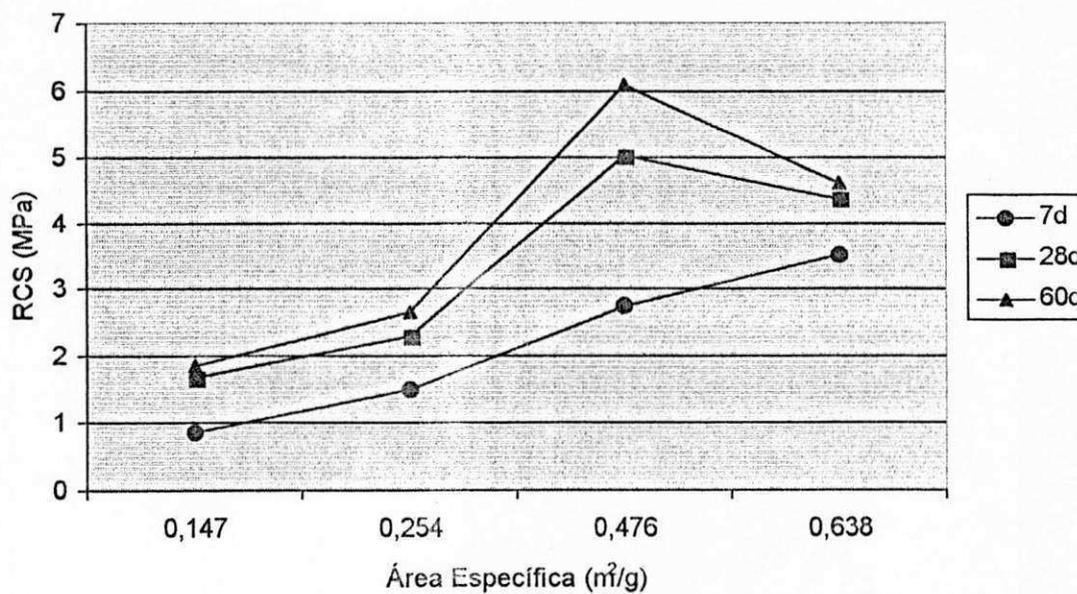


Figura 37 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Pozolana, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

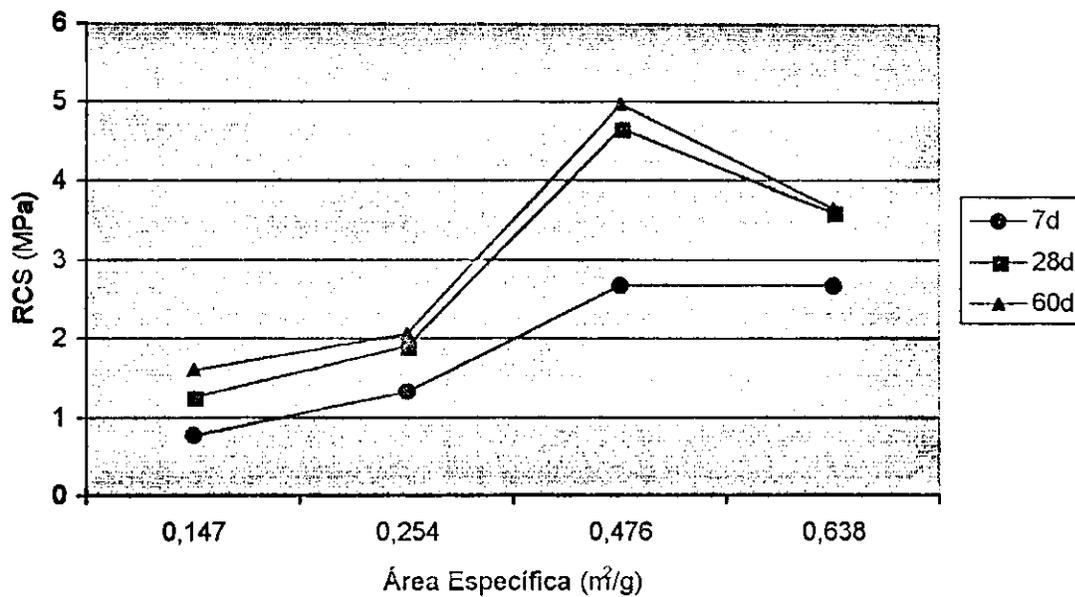


Figura 38 – Resistência à Compressão Simples em Função da Área Específica das Argamassas com Pozolana, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Os resultados obtidos para a RCS das argamassas com Entulho 1, nas composições 30-70%, 40-60% e 50-50% de cal e pozolana, nas diferentes áreas específicas e curadas por períodos de 7, 28 e 60d, variam de 0,43 MPa a 2,75 MPa, de 0,57 MPa a 2,31 MPa e de 0,51 MPa a 2,11 MPa, respectivamente.

Os resultados obtidos para a RCS das argamassas com Entulho 2, nas composições 30-70%, 40-60% e 50-50% de cal e pozolana, nas diferentes áreas específicas e curadas por períodos de 7, 28 e 60d, variam de 0,52 MPa a 2,50 MPa, de 0,45 MPa a 2,00 MPa e de 0,42 MPa a 1,76 MPa, respectivamente.

Mediante à análise dos resultados, observa-se que a medida que a área específica das amostras Entulho 1 e Entulho 2 aumenta, tem-se um aumento na RCS das argamassas, e que é evidente a evolução dos valores de resistência com a idade de cura. Para a amostra Entulho 1, na composição 30-70% de cal e pozolana, as argamassas apresentaram acréscimos de RCS equivalentes a 4,9%, 28,3% e 34,2%, com o aumento da área específica, aos 60d de cura. Na composição 40-60% de cal e pozolana, foi observado um acréscimo de RCS de 15,5%, referente ao aumento do valor da área específica

de 0,117 m²/g a 0,220 m²/g, aos 60d de cura. Para a composição 50-50% de cal e pozolana, os acréscimos foram de 17,4%, 38,9% e 46,5%, com o aumento da área específica, aos 60d de cura.

Para a amostra Entulho 2 os acréscimos de RCS das argamassas, obtidos com o aumento de sua área específica e aos 60d de cura, foram de: 14,2%, 25,6% e 42,0%, na composição 30-70% de cal e pozolana; 25,3%, 32,0% e 33,3%, na composição 40-60% de cal e pozolana, e, 43,0%, 63,6% e 64,5%, para a composição 50-50% de cal e pozolana.

Os maiores valores obtidos para as argamassas com Entulho 1 e com Entulho 2, foram de 2,75 MPa e de 2,50 MPa, atingidos aos 60d de cura, na composição 30-70% de cal e pozolana, com áreas específicas de 0,220 m²/g e de 0,239 m²/g, respectivamente.

Os resultados obtidos para a RCS das argamassas com Mistura, nas composições 30-70%, 40-60% e 50-50% de cal e pozolana, nas diferentes áreas específicas e curadas por períodos de 7, 28 e 60d, variam de 1,07 MPa a 5,13 MPa, de 0,84 MPa a 4,51 MPa e de 0,77 MPa a 3,92 MPa, respectivamente.

Mediante à análise dos resultados, observa-se um aumento na RCS das argamassas a medida que a área específica da Mistura aumenta, sendo este fato mais evidenciado na composição 30-70% de cal e pozolana. Nesta composição, as argamassas apresentaram acréscimos de RCS equivalentes a 25,7%, 29,6% e 34,3%. Na composição 40-60% de cal e pozolana os acréscimos foram de 23,2%, 21,1% e 34,2%. Para a composição 50-50% de cal e pozolana os acréscimos foram de 17,8%, 18,4% e 13,9%. Estes acréscimos foram obtidos aos 60d de cura tomando-se como base, a menor e maior área específica.

O maior valor obtido para as argamassas com Mistura foi de 5,13 MPa, atingido aos 60d de cura, na composição 30-70% de cal e pozolana, com área específica de 0,340 m²/g. Na composição 40-60% de cal e pozolana o valor máximo obtido foi de 4,51 MPa, atingido aos 60d de cura, com área específica de 0,340 m²/g. Na composição 50-50% de cal e pozolana o valor máximo de RCS obtido, foi de 3,92 MPa, atingido aos 60d de cura, com área específica de

0,311 m²/g. Embora este valor de área específica não seja o maior valor estudado, os demais valores de RCS obtidos, com as outras áreas específicas, apresentam-se praticamente estacionários, não apresentando nesta composição uma variação significativa com a área específica.

Se analisarmos cada área específica separadamente observamos uma evolução dos valores de resistência com a idade de cura, nas três composições estudadas.

Comparando os resultados de RCS, obtidos para as amostras Entulho 1, Entulho 2 e Mistura, com áreas específicas de 0,220 m²/g 0,239 m²/g e 0,227 m²/g respectivamente, observa-se que as argamassas com Mistura apresentaram resistências superiores àquelas oferecidas pelas argamassas com Entulho 1 e com Entulho 2. Este fato deve-se a geração da pozolana, oriunda da moagem dos tijolos e telhas, que compõem a amostra Mistura. Embora nas amostras de entulho (Entulho 1 e Entulho 2) também estejam presentes materiais reativos frente à cal, cimento e cal na forma pulverulenta, que ainda preservam parte de suas propriedades aglomerantes, este apresenta também, em sua composição, materiais inertes, que não participam das reações originárias dos compostos com poder aglomerante.

Comparando os resultados de RCS obtidos para as argamassas com Entulho 1, com Entulho 2 e com Mistura, aos 28d de cura, com a especificação da Norma NBR-13281 (1995), estas podem ser classificadas como argamassas do Tipo I, por atenderem ao limite de resistência entre 0,1 MPa e 4,0 MPa. Esta comparação foi feita considerando-se apenas os dados de RCS.

Comparando os resultados de RCS das argamassas com Mistura, com os obtidos por Cincotto (1988) em argamassas com resíduos cerâmicos, preparadas em condições similares, verifica-se que as argamassas aqui analisadas apresentam-se superiores com valor máximo de RCS de 5,13 MPa, contra 2,7 MPa, obtido aos 63d de cura.

Os resultados obtidos para a RCS das argamassas com Pozolana, nas composições 30-70%, 40-60% e 50-50% de cal e pozolana, nas diferentes

áreas específicas e curadas por períodos de 7, 28 e 60d, variam de 1,18 MPa a 7,95 MPa, de 0,86 MPa a 6,07 MPa e de 0,76 MPa a 4,97 MPa, respectivamente.

Mediante à análise dos resultados, observa-se um aumento na RCS das argamassas à medida que a área específica da amostra Pozolana aumenta, apresentando um maior valor de 7,95 MPa, na composição 30-70% de cal e pozolana, aos 60d de cura, com área específica de 0,476 m²/g. Este valor máximo de RCS não foi obtido com o maior valor de área específica estudado, como era de se esperar; isto porque, esta amostra, foi beneficiada em peneira ABNT n^o 200 (0,074mm), o que lhe conferiu maior homogeneidade nos tamanhos e formas das partículas e, principalmente, maior quantidade de finos, ou seja, maiores quantidades de partículas com dimensões inferiores a 0,147mm e 0,074mm, como pode ser visto no item 4.2.3 de análise granulométrica por peneiras.

Na composição 30-70% de cal e pozolana, as argamassas com Pozolana apresentaram acréscimos de RCS equivalentes a 33,5%, 220,6% e 141,5%. Na composição 40-60% de cal e pozolana, os acréscimos foram de 42,8%, 224,6% e 147,0%, e para a composição 50-50% de cal e pozolana, os acréscimos foram de 29,6%, 212,6% e 128,9%. Estes acréscimos foram obtidos tomando como base o menor e o maior valor de área específica, aos 60d de cura.

Observa-se, ainda, a nítida evolução, à medida que avança a idade de cura, nos valores representativos de RCS nas argamassas com Pozolana. Esta evolução é mais acentuada para a Pozolana passada em malha 200, ou seja, com área específica igual a 0,476m²/g, evidenciando a influência da concentração de finos, nas reações entre a cal e o material pozolânico, como também, a necessidade de idades de cura prolongadas (60d).

Comparando o desempenho das argamassas com Pozolana, com o das argamassas com Entulho 1, com Entulho 2 e com Mistura, constata-se valores de RCS bastante superiores. Este comportamento ocorre, pois, a Pozolana é uma amostra típica de pozolana; material que possui a propriedade de reagir com cal, na presença de umidade, para formar compostos com propriedades cimentícias.

Comparando os resultados de RCS obtidos para as argamassas com Pozolana, aos 28d de cura, nas composições 30-70%, 40-60% e 50-50% de cal e pozolana com área específica da pozolana de 0,476 m²/g e nas composições de 30-70% e 40-60% de cal e pozolana com área específica da pozolana de 0,638 m²/g, com a especificação da Norma NBR-13281 (1995), estas podem ser classificadas como argamassas do Tipo II, por atenderem ao limite de resistência entre 4,0 MPa e 8,0 MPa. Esta comparação foi feita considerando-se apenas os dados de RCS.

Em resumo, os resultados acima apresentados mostram os benefícios que o aumento da área específica dos rejeitos e dos materiais pozolânicos conferem às propriedades mecânicas das argamassas de cais pozolânicas, comprovando que quanto maior a área específica, maior a superfície disponível para as reações e, conseqüente aumento na resistência à compressão simples. Outro fato de importante observação é a idade de cura, que através dos valores obtidos de RCS, podemos afirmar que as reações entre a cal e a pozolana necessitam de períodos de cura mais prolongados (60d), uma vez que estas reações, geradoras de compostos com propriedades cimentantes, são lentas.

Podemos concluir, também que, as amostras Entulho 1, Entulho 2, Mistura e Pozolana, podem ser consideradas reativas, sendo a Pozolana considerada a mais reativa. e, entre os materiais reciclados, a Mistura encontra-se como a amostra de maior atividade pozolânica, bem como, que os ensaios mecânicos constituem em uma forma de avaliação bastante satisfatória da reatividade de materiais pozolânicos, pois a manifestação da resistência mecânica exige a formação dos compostos de poder aglomerante.

Outra constatação importante, é que a reciclagem de entulhos e rejeitos cerâmicos gerados pela indústria da construção civil é uma técnica bastante promissora, podendo gerar elementos de baixo custo, destinados à obras civis, e, mais que isto, seu aproveitamento implica na preservação do meio ambiente e na melhoria de vida da população em geral.

4.4 Análise Estatística

Os resultados obtidos pelas análises estatísticas, através de correlações lineares simples, entre as áreas específicas, determinadas pelo método de Blaine, das amostras Entulho 1, Entulho 2, Mistura e Pozolana, e a RCS das argamassas de cais pozolânicas, estão contidos nas Tabelas 24 a 35.

Tabela 24 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 1, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,84	0,15	$Y = 0,12 + 3,37X$
A.E. X RCS ₂₈	0,53	0,47	$Y = 1,34 + 2,12X$
A.E. X RCS ₆₀	0,96	0,04	$Y = 1,13 + 7,52X$

Tabela 25 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 1, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,98	0,010	$Y = 0,31 + 2,31X$
A.E. X RCS ₂₈	0,99	0,001	$Y = 0,86 + 3,64X$
A.E. X RCS ₆₀	0,39	0,600	$Y = 1,61 + 2,19X$

Tabela 26 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 1, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,94	0,06	$Y = 0,39 + 1,09X$
A.E. X RCS ₂₈	0,71	0,29	$Y = 0,80 + 2,58X$
A.E. X RCS ₆₀	0,98	0,02	$Y = 0,66 + 6,79X$

Tabela 27 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 2, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,59	0,410	$Y = 0,37 + 1,27X$
A.E. X RCS ₂₈	0,99	0,006	$Y = 0,69 + 5,19X$
A.E. X RCS ₆₀	0,99	0,006	$Y = 0,92 + 6,48X$

Tabela 28 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 2, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,89	0,11	$Y = 0,35 + 0,82X$
A.E. X RCS ₂₈	0,93	0,06	$Y = 0,89 + 2,96X$
A.E. X RCS ₆₀	0,91	0,08	$Y = 1,01 + 4,45X$

Tabela 29 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Entulho 2, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,72	0,28	$Y = 0,25 + 1,13X$
A.E. X RCS ₂₈	0,92	0,08	$Y = 0,53 + 3,61X$
A.E. X RCS ₆₀	0,94	0,06	$Y = 0,35 + 6,32X$

Tabela 30 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Mistura, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,30	0,69	$Y = 1,24 - 0,46X$
A.E. X RCS ₂₈	0,76	0,23	$Y = 1,94 + 3,62X$
A.E. X RCS ₆₀	0,90	0,09	$Y = 1,64 + 10,62X$

Tabela 31 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Mistura, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,23	0,77	$Y = 0,81 + 0,54X$
A.E. X RCS ₂₈	0,71	0,29	$Y = 1,57 + 3,89X$
A.E. X RCS ₆₀	0,89	0,11	$Y = 1,56 + 8,59X$

Tabela 32 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Mistura, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,38	0,62	$Y = 0,75 + 0,14X$
A.E. X RCS ₂₈	0,81	0,19	$Y = 0,77 + 5,77X$
A.E. X RCS ₆₀	0,66	0,34	$Y = 2,65 + 3,77X$

Tabela 33 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Pozolana, na Composição 30-70% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,99	0,001	$Y = 0,37 - 5,33X$
A.E. X RCS ₂₈	0,82	0,180	$Y = 1,57 + 7,44X$
A.E. X RCS ₆₀	0,81	0,190	$Y = 1,45 + 9,17X$

Tabela 34 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Pozolana, na Composição 40-60% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,99	0,001	$Y = 0,10 + 5,44X$
A.E. X RCS ₂₈	0,89	0,100	$Y = 0,88 + 6,49X$
A.E. X RCS ₆₀	0,81	0,190	$Y = 1,15 + 7,00X$

Tabela 35 – Correlações Lineares Simples entre a Área Específica e a RCS das Argamassas com Pozolana, na Composição 50-50% de Cal e Pozolana, Curadas por Períodos de 7, 28 e 60d.

Variáveis (X,Y)	Coefficientes de Correlação (R)	Níveis de Significância (α)	Equações ($Y = A + BX$)
A.E. X RCS ₇	0,95	0,05	$Y = 0,27 + 4,17X$
A.E. X RCS ₂₈	0,83	0,17	$Y = 0,62 + 5,89X$
A.E. X RCS ₆₀	0,78	0,21	$Y = 0,98 + 5,49X$

As correlações lineares simples realizadas entre os resultados de área específica (X), da amostra Entulho 1, e de RCS (Y), apresentaram resultados satisfatórios, com coeficientes de correlação (R) próximos da unidade. Os melhores resultados foram os obtidos na composição 40-60% de cal e pozolana, nos períodos de 7 e 28d de cura, nos quais os valores de R foram de 0,98 e 0,99, e os nível de significância (α) iguais a 0,010 e 0,001, respectivamente. Estas correlações podem ser consideradas altamente

significativas. As correlações obtidas com as argamassas na composição 30-70% e 50-50% de cal e pozolana, curadas durante 60d, apresentaram valores de R iguais a 0,96 e 0,98, e valores de α iguais a 0,04 e 0,02, respectivamente, sendo classificadas como significativas. A correlação com menor valor de R (0,39), foi obtida com as argamassas na composição 40-60% de cal e pozolana, curada por período de 60d.

As correlações lineares simples realizadas entre os resultados de área específica (X), da amostra Entulho 2, e de RCS (Y), apresentaram resultados bastante satisfatórios, uma vez que os coeficientes de correlação (R) aproximam-se da unidade. Os melhores resultados foram os obtidos na composição 30-70% de cal e pozolana, nos períodos de 28d e 60d de cura, onde o valores de R foram iguais a 0,99, e os níveis de significância (α) iguais a 0,006, abaixo, portanto, de 0,01. Estas correlações podem ser consideradas altamente significativas. As demais correlações também apresentaram valores de R bastante próximos da unidade, porém com α acima de 0,05, indicando uma correlação pouco significativa. A composição 30-70% de cal e pozolana, curada por período de 7d, apresentou o menor valor de R, 0,59.

As correlações lineares simples realizadas entre os resultados de área específica (X), da amostra Mistura, e de RCS (Y), apresentaram resultados satisfatórios, quanto aos coeficientes de correlação (R). Os valores obtidos para α encontram-se acima de 0,05, valor limite para uma correlação ser considerada significativa. Os melhores resultados foram os obtidos na composição 30-70% e 40-60% de cal e pozolana, no período de 60d de cura, com valores de R iguais a 0,90 e 0,89, e com valores de α iguais a 0,09 e 0,11, respectivamente. As correlações realizadas com o período de 7d de cura apresentaram valores de R considerados baixos, em torno de 0,30.

As correlações lineares simples realizadas entre os resultados de área específica (X), da amostra Pozolana, e de RCS (Y), apresentaram resultados satisfatórios, com coeficientes de correlação (R) próximos da unidade. Os melhores resultados foram os obtidos com as argamassas preparadas na composição 30-70% de cal e pozolana, curadas por período de 7d, (R = 0,99 e α = 0,001), e com as preparadas na composição 40-60% de cal e pozolana, curadas, também, durante 7d (R = 0,99 e α = 0,001). Estas correlações podem

ser classificadas como altamente significativas. A correlação classificada como significativa foi a obtida com as argamassas preparadas na composição 50-50% de cal e pozolana e curadas durante o período de 7d ($R = 0,95$ e $\alpha = 0,05$). As demais correlações, da mesma forma que as obtidas para a amostra Mistura, também apresentaram valores de R bastante próximos da unidade, porém com α acima de 0,05, o que indica uma correlação pouco significativa.

Uma análise conjunta dos resultados mostra que as correlações apresentaram resultados satisfatórios, sendo os melhores aqueles obtidos para as idades de cura mais avançadas (28 e 60d), comprovando a necessidade de curas prolongadas e que a área específica tem papel importante na reatividade dos materiais, pois, com o aumento da área específica tem-se uma melhoria nas propriedades mecânicas dos aglomerantes.

É importante ressaltar que as correlações lineares simples realizadas neste trabalho, são estatisticamente limitadas, em decorrência do pequeno número de pontos envolvidos no estudo e amostras ensaiadas.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões parciais referentes à caracterização mineralógica, à área específica, à atividade pozolânica das amostras estudadas e às análises estatísticas. A seguir será apresentada uma conclusão final, na qual estão confrontados os objetivos desta pesquisa e os resultados alcançados.

5.2 Conclusões Parciais

5.2.1 Caracterização Mineralógica

Segundo os ensaios de análise química, análise térmica diferencial, análise termogravimétrica e difração de raios-X, as amostras de rejeitos, de materiais pozolânicos e as amostras de cais hidratadas apresentam as seguintes composições mineralógicas.

5.2.1.1 Entulho 1

Material sílico-aluminoso, composto por quartzo (SiO_2) e calcita (CaCO_3).

5.2.1.2 Entulho 2

Material sílico-aluminoso, composto por portlandita (Ca(OH)_2), quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$).

5.2.1.3 Mistura

Material sílico-aluminoso, composto por quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3) e mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$).

5.2.1.4 Pozolana

Material predominantemente sílcico, composto por caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2), metacaulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) e mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$). Em síntese, é uma pozolana típica, oriunda de uma argila caulinitica, com pequena quantidade de caulinita e impurezas de sílica na forma de quartzo.

5.2.1.5 Cal Carbomil

Cal cálcica, de alto grau de pureza, composta por brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), calcita (CaCO_3), carbonato de magnésio (MgCO_3) e óxido de magnésio (MgO).

5.2.1.6 Cal Megaó

Cal dolomítica, composta por brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), calcita (CaCO_3) e óxido de magnésio (MgO).

5.2.2 Área Específica

Através dos resultados obtidos para as áreas específicas, determinadas pelo método de Blaine, foram possíveis as seguintes conclusões:

- com o aumento do tempo de moagem, em moinho de bolas, obteve-se um acréscimo no valor das áreas específicas das amostras de rejeitos da construção civil, Entulho 1 e Entulho 2, e de resíduos de cerâmica vermelha, Mistura, sendo os maiores valores de $0,220 \text{ m}^2/\text{g}$, $0,239 \text{ m}^2/\text{g}$ e $0,340 \text{ m}^2/\text{g}$, respectivamente, obtidos a 90min de moagem;
- a amostra Pozolana apresentou maior valor de $0,638 \text{ m}^2/\text{g}$, com abertura entre os discos do moinho de disco, de $0,1\text{mm}$;

- a cal Carbomil apresentou área específica de 1,222 m²/g.

5.2.3 Consumo de Cal

De acordo com os ensaios realizados de consumo de cal pode-se concluir que:

- o aumento da área específica das amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos, proporcionou maior grau de pozolanicidade;
- o beneficiamento do material em peneiras, de forma a obter-se uma maior quantidade de finos e homogeneidade das partículas, garantiu ao mesmo, maior atividade pozolânica;
- das amostras estudadas, a Pozolana foi a que apresentou maior atividade pozolânica e, entre as amostras de materiais reciclados (Entulho 1, Entulho 2 e Mistura), a Mistura apresentou maior grau de pozolanicidade.

5.2.4 Índice de Atividade Pozolânica com Cal

De acordo com os ensaios realizados de índice de atividade pozolânica com cal pode-se concluir que:

- o aumento da área específica das amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos, as torna mais reativas à cal;
- a amostra Mistura, entre as amostras de materiais reciclados, foi considerada a mais reativa, com índice de atividade pozolânica com cal de 5,21 MPa;
- a amostra Pozolana apresentou o maior índice de atividade pozolânica (8,38 MPa), sendo portanto, a de maior atividade pozolânica.

5.2.5 Consistência Normal

Através dos resultados obtidos para os ensaios de consistência normal realizados, foi possível concluir que:

- com o aumento da área específica das amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos obteve-se uma diminuição na quantidade de água requerida para que as argamassas atingissem a consistência normal;
- com o acréscimo na quantidade de cal e consequente diminuição da pozolana, a quantidade de água necessária para que as argamassas atingissem a consistência normal diminuiu ou não apresentou variação.

5.2.6 Resistência à Compressão Simples – RCS

Através dos resultados obtidos para a RCS foi possível alcançar as seguintes conclusões:

- todas as argamassas de cais pozolânicas, preparadas com as amostras de rejeitos e de materiais pozolânicos, como agente pozolânico, e com cal Carbomil, apresentaram aumento nos valores de RCS com o aumento da área específica das amostras Entulho 1, Entulho 2, Mistura e Pozolana;
- das composições estudadas, a composição de 30% de cal e 70% de pozolana, foi a que apresentou melhores resultados de RCS;
- o maior valor obtido para as argamassas com Entulho 1 foi de 2,75 MPa, com área específica do Entulho 1 de 0,220 m²/g, atingido aos 60d de cura, na composição 30-70% de cal e pozolana;
- para as argamassas com Entulho 2, o maior valor de RCS obtido foi de 2,50 MPa, com área específica do Entulho 2 de 0,239 m²/g, curadas por período de 60d, na composição de 30-70% de cal e pozolana;

- as argamassas com Mistura apresentaram maior valor de RCS de 5,13 MPa, com área específica da Mistura de 0,340 m²/g, curadas por período de 60d, na composição de 30-70% de cal e pozolana;
- para as argamassas com Pozolana, o maior valor de RCS obtido foi de 7,95 MPa, com área específica da Pozolana de 0,476 m²/g, curadas por período de 60d, na composição de 30-70% de cal e pozolana;

5.2.7 Análise Estatística

As correlações lineares simples ($Y = A + BX$) realizadas, evidenciaram que a RCS das argamassas de cais pozolânicas está relacionada com a área específica dos materiais utilizados como agente pozolânico, sendo a área específica um parâmetro de fundamental importância nas propriedades nos aglomerantes.

5.3 Conclusão Final

Foram estudados rejeitos da construção civil e de indústrias de cerâmica vermelha para obtenção de materiais pozolânicos com áreas específicas crescentes, visando verificar sua influência na atividade pozolânica e no comportamento mecânico de argamassas alternativas para uso na construção civil. Os resultados permitem concluir que a atividade pozolânica e o conseqüente comportamento mecânico dessas argamassas é uma função crescente de sua área específica, podendo ser obtidos materiais reciclados que conduzirão à argamassas de baixo custo e de grande utilidade em habitações populares.

Capítulo 6

Sugestões para Estudos Futuros

Abaixo, encontram-se relacionadas algumas perspectivas de estudos futuros, que se propõem como extensão deste trabalho de dissertação.

1. Estudo dos materiais pozolânicos, entre eles os entulhos e os resíduos cerâmicos da construção civil, moídos em outros tipos de moinho, como por exemplo o moinho de discos, martelos, etc.
2. Estudo das áreas específicas por outros métodos.
3. Estudo da influência de variações de área específica de materiais pozolânicos, com baixo resíduo na peneira ABNT nº 325 (0,044mm), na reatividade do sistema pozolana-cal.
4. Estudo da atividade pozolânica através de outros ensaios: atividade pozolânica com cimento e água requerida.
5. Avaliação do consumo de cal através de ATG de pastas de cais pozolânicas.
6. Acompanhamento dos compostos formados a partir das reações entre a cal e o material pozolânico, através dos ensaios de ATD, ATG e difração de raios-X.
7. Estudo da reologia das argamassas de cais pozolânicas.
8. Estudo de diferentes traços, utilizados comumente em obras civis, em argamassas de cais pozolânicas, preparadas com rejeitos sólidos reciclados.

9. Estudo de outras propriedades das argamassas de cais pozolânicas: teor de ar incorporado, retenção de água, permeabilidade, resistência à tração indireta e resistência de aderência à tração.
10. Estudo do envelhecimento das argamassas de cais pozolânicas, preparadas com materiais reciclados, utilizando dois processos de cura: cura acelerada em câmara climatizada e cura convencional.
11. Análise de custo das argamassas com rejeitos e de materiais pozolânicos, em relação às argamassas convencionais.

Capítulo 7

Referências Bibliográficas

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Areia Normal para Ensaio de Cimento, NBR – 7214, 1982.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Revestimentos de Paredes e Tetos com Argamassas - Materiais, Preparo Aplicação e Manutenção - Procedimento, NBR - 7200, 1982.

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

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Cal Hidratada para Argamassas - Determinação da Retenção de Água, NBR – 9290, 1986.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Agregado - Determinação da Composição Granulométrica, NBR – 7217, 1987.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Cal Virgem para Construção, Especificação, NBR - 6453, 1988.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Cimento Portland Composto - Especificação, EB – 2138, 1991.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Ensaio de Cimento Portland, NBR – 7215, 1991.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Cal Hidratada para Argamassas, NBR – 7175, 1992.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Materiais Pozolânicos – Determinação de Atividade Pozolânica – Índice de Atividade Pozolânica com Cal, NBR – 5751, 1992.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Materiais Pozolânicos - Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento Portland - Índice de Atividade Pozolânica com Cimento, NBR - 5752, 1992.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Área Específica, NBR – 7224, 1994.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Argamassa Industrializada para Assentamento de Paredes e Revestimentos de Paredes e Tetos, NBR - 13281, 1995.

Ambroise, J., Murat, M. e Pera, J., Hydration Reaction and Hardening of Calcined Clays and Related Minerals. IV - Experimental Conditions for Strength Improvement on Metakaolinite Minicylinders, Cement and Concrete Research, 15 (1), 83 (1995).

Ambroise, J., Murat, M. e Pera, J., Investigations on Synthetic Binders Obtained by Middle-Temperature Thermal Dissociation of Clays Minerals, Silicates Industriels, 51 (7/8), 99 (1986).

Amorim, L.V., Estabilização de Solos Vermelhos Tropicais com Cais Pozolânicos, Relatório de Iniciação Científica CNPq/PIBIC, UFPB, 1996.

Amorim, L.V., Neves, G.A. e Ferreira, H.C., Estudo Comparativo entre as Áreas Específicas de Solos Lateríticos Determinadas pelo Método do Sedígrafo de Raios-X e por Outros Métodos, Anais do 13º CBECIMAT, Curitiba, PR, p. 4561-4570, 1998.

Anônimo, Métodos de Análise Química de Argilas e Pozolanas. LAM/DMG/CCT/UFPB, 1994.

- Araújo, E.A., Neves, G.A. e Ferreira, H.C., Aproveitamento dos Resíduos da Construção Civil para Uso como Aglomerantes Pozolânicos em Argamassas, Anais do 42º Congresso Brasileiro de Cerâmica, julho de 1998. No Prelo.
- ASTM, American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw of Calcined Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Concrete, C-618, 1998.
- Blaine, R.L., A Simplified Air Permeability Fineness Apparatus, A.S.T.M. Bulletin, 1943.
- Bogue, R.H., The Chemistry of Portland Cement, New York, Reinhold, 1947.
- Brower, C.A. e Gschwend, F.B., Ethylene Glycol Retention by Soils as a Measure of Surface Area and Interlayer Swelling, Soils Science Society Proceed., Vol. 16, p. 342-345, 1952.
- Carter, D.M., Heilman, M.D. e Gonzales, C.L., Ethylene Glycol Ether for Determining Surface Areas of Silicate Minerals. Soil Science 100 (5), 356 (1965).
- Calleja, J., Las Puzolanas, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1958.
- Castro Sobrinho, J.F., Pozolana como Material de Construção – Sua Fabricação Artificial em Urubupungá, Centrais Elétricas de São Paulo, São Paulo, 1970.
- Cavani, G.R., Antunes, R.P.N. e John, V.M., Influência do Teor de Ar Incorporado na Trabalhabilidade das Argamassas Mistas. Anais do II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, 1997.

- Cincotto, M.A., Estudo da Composição Química da Cal Hidratada Produzida no Estado de São Paulo, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de São Paulo, 1977.
- Cincotto, M.A., Utilização de Subprodutos e Resíduos na Indústria da Construção Civil, Tecnologia de Edificações, p. 71-74, 1983.
- Cincotto, M.A., Estudo das Cales Hidratadas Comercializadas em Diversos Estados Brasileiros, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, São Paulo, 1986.
- Cincotto, M.A., Utilização de Suprodutos na Indústria da Construção Civil, Anais do II Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil – UFSC, Florianópolis, p.171-181, 1988.
- Cincotto, M.A., Marques, J.C. e Helene, P.R.L., Aproveitamento de Materiais Residuais na Produção de Cimento de Alvenaria - Metodologia, Seminário sobre Argamassas, Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, 1985.
- Cincotto, M.A., Silva, M.A.C. e Cascudo, H.C., Argamassas de Revestimento: Características, Propriedades e Métodos de Ensaio. IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT, Boletim 68, São Paulo, 1995.
- Ceolho, P.E. e Chaves, A.P., Reciclagem de Entulho - Uma Opção de Negócio Potencialmente Lucrativa e Ambientalmente Simpática, Areia & Brita, 5 (5) 31 (1998).
- Cooper, J.J., Particle Size Analysis, The British Research Association, Technical Note N° 278, 1973.
- Coutinho, A.S., Pozolanas, Betões com Pozolanas e Cimentos Pozolânicos, Lisboa, LNEC (Memória n° 136), 1958.

Davis, A.C., Portland Cement, Concrete Pub, London, 1934.

Ferreira, H.C. e Brito, L.P., Determinações de Áreas Específicas da Fração Fina de Solos Lateríticos da Região Nordeste do Brasil, *Cerâmica*, 30 (171), 69 (1984).

Ferreira H.C., Chen, T.J., Zandonadi, A.R. e Souza Santos, P., Correlações Lineares entre Áreas Específicas de Caulins Determinadas por Diversos Métodos – Aplicação a alguns do Nordeste Brasileiro (Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte), *Cerâmica*, 18 (71), 333 (1972).

Ferreira, H.C., Neves, G.A. e Topper, T.H., The Use of Specific Area to Evaluate Pozzolanic Activity in Red Tropical Soils, XII World Congress of the International Road Federation, p. 295-305, Madrid, Spain, 1993.

Ferreira, H.C., Neves, G.A. e Topper, T.H., Relationships Between Surface Areas of Red Tropical Soils Measured by Different Methods. *KONA* 13 (13), 91 (1995).

Ghorab, H., Ragai, J. e Antar, A., Surface and Bulk Properties of Ancient Egyptian Mortars. Part 1: X-Ray Diffraction Studies, *Cement and Concrete Research*, Elmsford, 16 (6), 813 (1986).

Gooding, P. e Halstead, P.E., The Early History of Cement in England, In: Proceedings of the International Symposium on the Chemistry of Cement, 3rd, London, p.1-29, 1952.

Guimarães, J.E.P. e Cincotto, M.A., A Cal Nas Construções Civis – Na Patologia das Argamassas, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 1985.

Hamassaki, L.T., Neto, C.S. e Florindo, M.C., Utilisation of Construction Waste in Rendering Mortar, *Concrete in the Service of Mankind - International*

Conference Concrete for Environment Enhancement and Protection, Editora Ravindra K. Dhir & Thomas D. Dyer, p. 485-494, 1996.

Hang, P.T. e Brindley, G.W., Methylene Blue Adsorption by Clay Minerals: Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities, Clay and Clay Minerals 18, p. 203-212, 1970.

Indian Standards Institution (IS), Specification for Burnt Clay Pozzolana, New Delhi, IS - 1344, 1968.

Kihara, Y., Contribuição ao Estudo de Pozolanas no Brasil, Cerâmica 28 (145), 15 (1982).

Kinter, E.B. e Diamond, D., Gravimetric Determination of Monolayer Glycol Complexes of Clay Minerals, NAS, NRS, Conference of Clay Minerals, Pub., 566, p. 318-347, 1968.

Lea, F.M., Pozzolanas and Pozzolanic Cements. The Chemistry of Cement and Concret, Edward Arnold (Publishers) Ltda. 3ª Ed. p. 414-453, 1970.

Levy, S.M. e Helene. P.R.L., Reciclagem de Entulhos na Construção Civil. A Solução Política e Ecologicamente Correta, Anais do I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Goiânia, p. 315-325, 1995.

Levy, S.M., Martinelli, F.A. e Helene. P.R.L., A Influência de Argamassas Endurecidas e Resíduos Cerâmicos, Finamente Moídos, nas Propriedades de Novas Argamassas, Anais do II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, BA, p. 50-63, 1997

Lima, J.B.M., Cais Pozzolânicas, Caracterização e Desempenho Mecânico, Dissertação de Mestrado, CCT/DEC/UFPB, 1993.

Lima, J.B., Neves, G. A., Ferreira, H. S. e Ferreira, H. C. - Estudo Comparativo do Comportamento Mecânico da Argamassas

Convencionais e Alternativas, Anais do 38º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Blumenau, 1994.

Machado, E. C. C. e Ferreira, H. C., Influência da Área Específica na Estabilização de Solos Lateríticos com Cal – Resultados Preliminares, 22ª Reunião Anual de Pavimentação, Maceió, 1987.

Makaoul, J.E., Moinho Faz Reciclagem e Aproveita Lixo de Obra – O Estado de São Paulo, Caderno Negócios e Oportunidades, São Paulo, 1992.

Massazza, F., Chimica delle Aggiunte Pozzolaniche e dei Cementi di Miscela, II Cemento, 73 (1), 3 (1976).

Mota, N.M.B., Cais Pozolânicas para Uso em Argamassas de Revestimentos e Alvenarias, Dissertação de Mestrado, CCT/DEC/UFPB, 1994.

Mota, N.M.B., Costa, C.R.V., Neves, G.A. e Ferreira, H.C., Argamassas Alternativas com Cais Pozolânicas para Uso em Construção Civil, 38º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Blumenau, 1994.

Murat. M., Hydration Reaction and Hardening of Calcined Clays and Related Minerals. I - Preliminary Investigation on Metakaolinite, Cement and Concrete Research 13 (2), 259 (1983a).

Murat, M., Hydration Reaction and Hardening of Calcined Clays and Related Minerals. II - Influence of Mineralogical Properties of the Raw-Kaolinite on the Reactivity Metakaolinite, Cement and Concrete Research 13 (4), 511 (1983b).

Natenzon, A., Moinho faz Reciclagem e Aproveita Lixo da Obra – O Estado de São Paulo, Caderno Negócios e Oportunidades, São Paulo, 1992.

- Neves, G.A. , Influência da Área Específica na Atividade Pozolânica do Sistema Solo Laterítico-Cal, Dissertação de Mestrado, CCT/DEQ/UFPB, 1989.
- Neves, G.A., Ferreira, H.C., Lucena, F.B., Estudos de Correlações entre Áreas Específicas e Atividade Pozolânica de Solos Lateríticos da Região Norte e Nordeste do Brasil, 23ª Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, 1988.
- Neville, A.M., Propriedades do Concreto, Editora PINI, São Paulo, 1982.
- Patrício, S.M.R., Morais, C.R.S., Neves, G.A., Brasileiro, F.E. e Pereira, E.C., Aproveitamento dos Resíduos na Construção Civil para Uso como Agregados em Argamassas, Projeto PATME – SEBRAE – UFPB, 1997.
- Pinto, T.P., Utilização de Resíduos de Construção – Estudo do Uso em Argamassas, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1986.
- Pinto, T.P., Minas de Entulho, *Téchne* 3 (15), 15 (1995).
- Pinto, T.P., Resultados da Gestão Diferenciada, *Téchne* 5 (31), 31 (1997).
- Petrucci, E.G.R., Concreto de Cimento Portland, Editora Globo, Porto Alegre, 1979.
- Rago, F. e Cincotto, M.A., A Reologia da Pasta de Cimento e a Influência da Cal, Anais do I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Goiânia, p. 25-32, 1995.
- Raverdy, M., Brivot, F., Paillère, A.M., Dron, R., *Appréciation de L'activité Pouzzolanique des Constituants Secondaires – 7e. Congrès International de La Chimie des Ciments* 4e. Volume III, 36, Paris, 1980.

Rosello, M.T.V., Morteros de Cemento para Albanileria, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1979.

Ruas, A.P.L., Produção de Pozolana Artificial, 25ª Reunião de Técnicos da Indústria de Cimento, ABCP, São Paulo, 1977.

Silva, C.R., Cais Aditivadas com Pozolana e Cimento Potland, Dissertação de Mestrado, CCT/DEQ/UFPB, Campina Grande-PB, 1992.

Silva, C.R. e Ferreira, H.C., Estudo Comparativo entre Misturas de Aglomerantes Pozolânicos, Anais do 10º CBECIMAT, Águas de Lindóia-SP, 1992a.

Silva, C.R. e Ferreira, H.C., Estudo Comparativo entre Cais Pozolânicas, Anais do Simpósio Franco - Brasileiro de Ciência dos Materiais, Ouro Preto-MG, 1992b.

Silva, A.S.R., Silva Filho, A.F., Azevedo, M.T., Mattos, E.G., Argamassa Inorgânica com o Emprego de Entulho Reciclado, Anais do II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, BA, p. 203-207, 1997.

Silveira, G.T.R., Metodologia de Caracterização dos Resíduos Sólidos, como Base para uma Gestão Ambiental. Estudo de Caso: Entulhos da Construção Civil em Campinas - SP. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas, SP, 1993.

Singer, F. e Singer, S., Industrial Ceramics, Ed. Chapman e Hall Ltda., 1971.

Souza Santos, P. e Cruz, P.E.N., Áreas Específicas de Algumas Argilas Plásticas Brasileiras Usadas em Cerâmica Branca, Cerâmica, 17 (66),162 (1971).

Souza Santos, P., Ciência e Tecnologia de Argilas, Volume I, Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo, 1989.

Souza Santos, P., Ciência e Tecnologia de Argilas, Volume II, Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo, 1992.

Tesuka, Y., Guia de Utilização de Cimentos Hidráulicos, Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, São Paulo, 1988.

Villari, A.C., Transformar Entulho em Material Útil Reduz o Custo da Construção – O Estado de São Paulo, Caderno Negócios e Oportunidades, São Paulo, 1992.

Vorobiev, V.A., Building Materials, Higher School Publis, House, Moscow, 1965.

Zampieri, V.A., Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcinadas, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geo-ciências da USP, São Paulo, 1989.

ANEXO I

Método de Ensaio - Consumo de Cal

Atividade Pozolânica: Método Chappelle Modificado - Consumo de Cal

1 - Objetivo

Este procedimento descreve o método para determinação da atividade pozolânica pelo método Chappelle Modificado.

2 - Reagentes

2.1 Água destilada ou dionizada

2.2 Acetona técnica

2.3 Ácido clorídrico (HCl) - d = 1,17 e 37%

2.4 Ácido clorídrico (HCl) padronizado - 0,1N

2.5 Álcool etílico p. a.

2.6 Carbonato de cálcio (CaCO₃) p. a.

2.7 Fenolftaleína p. a.

2.8 Indicador: solução 0,1% de fenolftaleína em etanol a 50%

2.9 Sacarose p. a.

2.10 Água isenta de CO₂ - Preparada por ebulição de água destilada ou deionizada, durante 30 min. Em seguida é resfriada na ausência de CO₂ atmosférico.

3 - Equipamento

3.1 Material necessário

- Dois conjuntos compostos de: um "erlenmeyer" de aço inox de 1000ml de capacidade, provido de tampa com rosca e o'ring para promover perfeita vedação; um bastão magnético; um termômetro; um bequer de 2 l; presilha para fixar o "erlenmeyer" ao bequer e um aquecedor-agitador magnético.
- Um bequer de 2 l utilizado como frasco nivelador de água entre os conjuntos, e tubos de ligação para manter nível de água nos três bequers.
- Um frasco com capacidade de 10 l e seu respectivo suporte para mantê-lo acima do nível da água dos bequers, e tubos de alimentação para prover de água os bequers.

3.2 Montagem

Montar os conjuntos segundo procedimento abaixo.

- Envolver os bequers do conjunto por um tecido de material isolante térmico, evitando-se assim dissipação de calor e mantendo-se a temperatura constante em uma faixa mais estreita de temperatura.
- Para evitar perda excessiva de água por evaporação, cobrir os bequers dos conjuntos com papel aluminizado ou outro material disponível.

4 - Preparação da Amostra

Moer a amostra até uma granulometria ao redor de 800 m²/kg ou que deixe resíduo máximo de 12% em peneira ABNT nº 325 (0,044mm).

5 - Procedimento

5.1 A aparelhagem é montada e regulada à temperatura de 90°C.

5.2 Pesar exatamente cerca de 1g de pozolana moída seca a 110°C e introduzir em um dos dois frascos "erlenmeyer" limpos e secos. Reservar um balão de 250ml aferido com água isenta de CO₂. Lavar a navícula de pesagem com uma pequena quantidade dessa água.

5.3 Juntar cerca de 1g de CaO exatamente pesado. Para isto, pesar 1,786g de CaCO₃ em cadinho de platina tarado, calcinar a 1000°C, durante 30 min, pesar. Calcinar de novo por 10 min, Verificar a massa constante.

5.4 Adicionar a totalidade de água que restava no balão de 250ml. Ajustar hermeticamente a tampa no "erlenmeyer" e fixá-lo ao conjunto, ligando o motor de agitação magnética, estando a água do bequer a 90°C.

5.5 Efetuar uma operação simétrica com o segundo frasco "erlenmeyer", mas sem a pozolana (ensaio em branco).

5.6 Manter a agitação durante 16 h a 90°C. A seguir retirar o "erlenmeyer" do conjunto e resfriar em água corrente, à temperatura ambiente.

5.7 Juntar em cada frasco 250ml de uma solução de sacarose recém-preparada (dissolver 60g de sacarose e transferir para o balão aferido de 250ml).

5.8 Fechar hermeticamente os "erlenmeyer" e agitar durante 15 min com agitador magnético. Filtrar aproximadamente 200ml em papel de filtro. Pipetar 50ml da solução com ajuda de uma pêra e titular com HCl 0,1N em presença do indicador fenolftaleína.

5.9 Efetuar as mesmas operações com o ensaio em branco.

6 - Expressão do Resultado

Calcular o teor de CaO fixado pela pozolana, em mg de CaO por grama de pozolana, por meio da seguinte equação:

$$\frac{28(V_1P_2 - V_2P_1)}{P_1P_2P}$$

Onde:

P_1 = massa de cal inicial do ensaio em branco, em gramas.

V_1 = volume de HCl 0,1N necessário para a dosagem de 50ml da solução final obtida no ensaio em branco, em mililitros.

P_2 = massa de cal inicial do ensaio com pozolana, em gramas.

V_2 = volume de HCl 0,1N necessário para a dosagem de 50ml da solução final obtida no ensaio com pozolana, em mililitros.

P = massa da amostra (pozolana) tomada para ensaio, em gramas.