

Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana  
-MESTRADO-

**POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE  
CAULIM PARAIBANO PARA O DESENVOLVIMENTO DE  
ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO**

**por**

**Aline Figueirêdo da Nóbrega**

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para  
obtenção do grau de Mestre.*

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana  
-MESTRADO-**

**POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE  
CAULIM PARAIBANO PARA O DESENVOLVIMENTO DE  
ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre.

Aline Figueirêdo da Nóbrega

ORIENTADOR: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa  
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Sandro Marden Torres

N754p

Nóbrega, Aline Figueirêdo da.  
Potencial de aproveitamento de resíduos de caulim paraibano para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso / Aline Figueirêdo da Nóbrega. - João Pessoa, 2007.  
117p.

Orientador: Normando Perazzo Barbosa.  
Dissertação (Mestrado)- UFPB/CT.

1. Caulim. 2. Resíduos industriais. 3. Argamassa.  
4. Tecnologia da pedra.

UFPB/BC

CDU 679.861(043)

POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE CAULIM  
PARAIBANO PARA O DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS DE  
MÚLTIPLO USO

Por

ALINE FIGUEIRÊDO DA NÓBREGA

Dissertação aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
Período letivo 2007.1

---

**Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa – UFPB**  
**Orientador**

---

**Prof. Dr. Sandro Marden Torres - UFPB**  
**Co-orientador**

---

**Prof. Dr. Alúcio Braz de Melo - UFPB**  
**Examinador interno**

---

**Prof. Dr. Antônio Farias Leal - UFCG**  
**Examinador externo**

**João Pessoa-PB, 2007**

*À minha Família, em especial aos  
meus pais Nelson e Tereza, por todo  
apoio e incentivo.*

*Ao meu esposo Givanildo Azeredo,  
pelo amor, compreensão e  
incentivo.*

*A todos meus amigos que  
acompanharam esta minha  
conquista.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus pela força constante.*

*Ao Prof. Dr. Normando Perazzo e Prof. Dr. Sandro Marden Torres pelo apoio, confiança e orientação neste trabalho.*

*Ao Prof. Dr. Silvio, pela ajuda na realização de ensaios de parte deste trabalho no laboratório de mecânica.*

*Aos professores e funcionários do curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, nas pessoas de Marluce, a secretária, e o coordenador Prof. Dr. Celso Augusto, pelas orientações deste programa de pós-graduação.*

*Ao LABEME (Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas), por ter sido cenário na idealização deste trabalho, nas pessoas de Delby Fernandes, Cláudio Mathias, Zito e em especial Ricardo que esteve sempre presente para a realização deste trabalho, sendo sempre meu braço direito.*

*À indústria de caulim, da região de Junco do Seridó, que forneceu os resíduos para a realização desta pesquisa.*

*Aos alunos de graduação, mestrado e doutorado que fazem ou fizeram parte do LABEME, em especial à Antônio Junior, Kaline Cibele, Marília Oliveira, e Philippe Hypólito, pela contribuição e apoio neste trabalho.*

*Aos meus amigos Alyne, Isabelly e Jorge Luís pela presença e incentivo durante o curso.*

*Ao CNPq, CAPES-PROCAD, FINEP-CTPETRO pelo apoio financeiro.*

*Enfim, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização e conclusão deste trabalho.*

## RESUMO

Na Paraíba, a indústria do beneficiamento do caulim, atividade de grande importância para o Estado e municípios produtores, é geradora de grandes quantidades de resíduos, que são depositados em aterros, causando impacto ao meio ambiente. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) tem atribuído a responsabilidade de gestão dos resíduos aos seus geradores. Este resíduo ainda não possui tecnologia de reciclagem reconhecidamente desenvolvida, sendo matéria de estudo na Universidade Federal da Paraíba. Desse modo, este trabalho objetiva avaliar alguns aspectos dos resíduos de caulim como agregado e filler em argamassas de múltiplo uso e como material pozolânico. Caracterizações físicas e mineralógicas dos resíduos foram realizadas através de DR-X qualitativo e quantitativo, análise por microscópio óptico, massa unitária e distribuição granulométrica. Várias misturas de argamassas foram estudadas, nas quais se combinaram os resíduos com cimento e/ou cal. A fim de se verificar a potencialidade do resíduo argiloso como material pozolânico, fez-se um beneficiamento desse resíduo através de moagem e calcinação (a 700° C) e se verificou o índice de atividade pozolânica e finura (método Blaine). No estado *in natura* o resíduo argiloso foi testado como material plastificante em argamassas de múltiplo uso, e o arenoso como agregado. O desempenho das argamassas foram avaliadas através da consistência e retenção de água, no estado fresco, resistência à compressão, resistência de aderência à tração, densidade de massa, índices físicos (absorção por imersão, massa específica e índice de vazios) e permeabilidade por capilaridade, no estado endurecido, comparando-se com uma argamassa de referência e outra industrializada obtida no mercado local. Foi feito também uma avaliação térmica dos resíduos nas argamassas, as quais foram calcinadas até 700°C, e depois dessa calcinação, avaliou-se a curva da tensão-deformação e módulo de elasticidade dessas argamassas. Os resíduos de caulim contém em sua composição quartzo, mica e caulinita, e podem ser classificados em arenoso (chamado localmente de birra) e argiloso (chamado localmente de borra), de acordo com o teor de caulinita. O argiloso apresentou cerca de 55% de caulinita e o arenoso cerca de 30%, além de 58,5% de quartzo. A lei de Abrams foi seguida para todas as argamassas, com e sem os resíduos. A redução da resistência nas argamassas com os resíduos se deu de forma mais significativa. Mudanças na mineralogia e na forma da partículas dos resíduos afetaram o empacotamento das mesmas. Quanto ao comportamento da curva tensão-deformação e módulo de elasticidade para a variação de temperatura, as argamassas com os resíduos se mostraram bem mais estáveis, porém valores mais baixos. Em geral, os resíduos de caulim paraibanos estudados neste trabalho, tem potencial para serem usados como materiais constituintes de argamassa de múltiplo uso, quanto às propriedades mecânicas avaliadas. A aplicação desses resíduos depende do teor de caulinita existente em sua composição.

**Palavras-Chave:** caulim, resíduos industriais, argamassas.

## ABSTRACT

The kaolin industry is an activity of great importance for the Brazilian state of Paraíba. It generates great amounts of waste due to low technological level of the process, which as an environmental impact as deposits are often placed alongside rivers and urban landfills. The National Environment Council has recently issued a law that attributes the responsibility for the waste management to its generators. However, the recycling and reuse technologies have been acknowledged as feasible solutions for the kaolin waste problem. Hence, this work aims to evaluate some aspects of the kaolin waste in order to be used as aggregate, filler and pozzolan in mortars for multiple use purposes. Mineralogical and physical characteristics of the wastes were performed by means of qualitative and quantitative X-ray diffraction, optical microscopy, density and particle size distribution. Several mix proportions were studied, in which the cementitious materials were either Portland cement or combined with lime, with or without kaolin waste pozzolan and fine aggregate. The pozzolanic index of the waste was investigated by grinding in a ball mill for up to 24h and heating at 700°C. The fineness of the ground powder was determined using the Blaine apparatus. The fine aggregates were sand type kaolin waste and siliceous sand, which was used as control. The mechanical performance of the mortars was evaluated by means of compressive strength, direct traction adherence, density and water permeability tests. In order to address the wastes potential for the development of thermal resistance mortars, mortar cylinders were heated at different temperatures up to 700°C. Its visual appearances were recorded and the mechanical performance assessed by means of compressive strength and elastic modulus. As far as phase composition is concerned, the kaolin waste contained quartz, kaolinite and mica, and it can be classified into two categories according to kaolinite content. The clay type waste (locally called borra) contained c.a 55,92% whereas the predominant phase in the sand type waste (locally called birra) was the quartz fraction that reached up to 58,5%, and the kaolinite fraction not more than 30%. Despite the presence or not of the waste, the compressive strength of the mortars followed the Abrams model, in which the greater the water to cement ratio, the lower the compressive strength. This reflects that the greater water demand observed in kaolin waste containing mortars were responsible to significantly reduce the compressive strength when compared to control mortars containing siliceous sand. It has also been observed that changes in mineralogy and particle shape throughout the particle size distribution affected the packing. As far as thermal resistance is concerned, mortars containing waste presented more stable compressive strength and elastic modulus than the siliceous aggregate containing mortars, despite their low values. In general, the use of kaolin waste can be used as a constituent material of multipurpose use mortars, as far as mechanical properties is concerned. The main application would depend on its kaolin content, in which it can either be used as pozzolan or as aggregate.

**Keywords:** Kaolin, Industrial Waste, Mortars.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Consumo setorial de caulim no Brasil e no mundo (Balanço Mineral Brasileiro, 2001) .....	20
Figura 2.2 Caulim bruto .....	23
Figura 2.3 Separação do caulim .....	23
Figura 2.4 Tanques de separação e sedimentação do caulim .....	24
Figura 2.5 Filtros-prensa .....	24
Figura 2.6 Tortas de caulim.....	25
Figura 2.7 Os dois tipos de resíduos de caulim gerados na fase do desareamento. ....	26
Figura 2.8 Resíduos de caulim jogados aleatoriamente na natureza .....	27
Figura 2.9 Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema com único tamanho de partículas (monodisperso); (b) máxima densidade de empacotamento; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas (OLIVEIRA et al., 2000). .....	35
Figura 2.10 Relação qualitativa existente entre a densidade relativa e o arredondamento relativo para empacotamento monodispersos aleatórios de partículas (OLIVEIRA et al., 2000). .....	36
Figura 2.11 Dependência da densidade relativa de empacotamento em função da composição, para misturas de formato esférico e irregular (OLIVEIRA et al., 2000). .....	36
Figura 2.12 Condições comparativas de determinação da retenção de água (NAKAKURA, 2003).....	39
Figura 3.1 Fluxograma do planejamento experimental .....	46
Figura 3.2 Mapa com a localização das jazidas de caulim no Estado da Paraíba. ....	49
Figura 3.3 Resíduo de caulim arenoso (Birra).....	49
Figura 3.4 Resíduo de caulim argiloso (Borra) .....	50
Figura 3.5 Dispositivos utilizados (esquerda) e execução do ensaio de retenção (direita) .....	57
Figura 3.6 Painel sem chapisco (esquerda) e painel com chapisco (direita) .....	58
Figura 3.7 Aplicação da argamassa no painel .....	58
Figura 3.8 Painel com as placas para ensaio de aderência. ....	58

Figura 3.9 Ensaio de absorção por capilaridade .....	59
Figura 3.10 Controle do nível da água no ensaio de absorção por capilaridade .....	60
Figura 4.1 Difratoograma do rejeito de caulim calcinado e <i>in natura</i> (sem calcinar).....	61
Figura 4.2 Difratoograma das Frações da Birra .....	62
Figura 4.3 Difratoograma da areia caxitú.....	62
Figura 4.4 Análise Quantitativa das Frações Granulométricas da Birra .....	63
Figura 4.5 Análise Quantitativa das Frações Granulométricas da Borra .....	63
Figura 4.6 Curvas Granulométricas: birra e areia caxitú.....	65
Figura 4.7 Curvas granulométricas teóricas geradas com a variação do Pr e da birra <i>in natura</i> .....	66
Figura 4.8 Massa Unitária <i>versus</i> Variação do Pr da birra.....	67
Figura 4.9 Massa unitária das frações retidas nas peneiras .....	67
Figura 4.10 Curva teórica monofásica para esferas.....	68
Figura 4.11 Massa unitária em função da variação do Pr (com finos e sem finos).....	69
Figura 4.12 Frações da birra e da areia vistas no microscópio óptico.....	70
Figura 4.13 Frações dos grãos retidos <i>versus</i> esfericidade do grão.....	71
Figura 4.14 Variação da finura da borra com o tempo de moagem .....	72
Figura 4.15 IAP com cal da borra e sua variação com a finura.....	73
Figura 4.16 Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias das argamassas de traço 1:2:8.....	75
Figura 4.17 Variação da resistência à compressão simples com a relação água/sólidos.....	75
Figura 4.18 Resistência à Compressão Simples das Argamassas com Cimento:Birra, variando a Proporção de Birra .....	77
Figura 4.19 Relação água/sólidos <i>versus</i> resistência à compressão simples quanto à variação da proporção de birra nas argamassas.....	78
Figura 4.20 Relação entre RCS e Densidade de massa no estado endurecido .....	79
Figura 4.21 Resistência à compressão simples das argamassas com cimento:birra, de traço 1:4 variando o Pr.....	81
Figura 4.22 Índice (Resistência relativa) <i>versus</i> relação água/sólidos das argamassas com birra 07; 08; 09 e areia 07; 08; 09 .....	82
Figura 4.23 Densidade aparente <i>versus</i> Resistência à Compressão Simples: (a) Birra e (b) Areia Caxitú.....	83
Figura 4.24 Capacidade de retenção de água das argamassas.....	85
Figura 4.25 Resistência à Compressão Simples das argamassas aos 7 e 28 dias .....	86

Figura 4.26 Resistência de Aderência à Tração aos 28 dias.....	86
Figura 4.27 Resistência à Compressão Simples <i>versus</i> Resistência de Aderência à Tração aos 28 dias. ....	87
Figura 4.28 Forma de ruptura da argamassa no ensaio de aderência. ....	88
Figura 4.29 Absorção e índice de vazios das argamassas .....	89
Figura 4.30 Densidade de massa aparente das argamassas aos 28 dias .....	90
Figura 4.31 Capilaridade das argamassas aos 7 dias de idade.....	91
Figura 4.32 Absorção por imersão e coeficiente de capilaridade.....	92
Figura 4.33 Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão aos 28 dias das argamassas. ....	93
Figura 4.34 Diferença da resistência à compressão real e a do modelo de Abrams em função da relação <i>a/c</i> das argamassas.....	94
Figura 4.35 Comparação da lei de Abrams com argamassas de cimento:cal:agregado e cimento:borra:agregado .....	95
Figura 4.36 Corpos de prova calcinados a 100°C e 200°C com birra e areia.....	97
Figura 4.37 Corpos de prova calcinados a 300°C e 400°C com birra e areia.....	98
Figura 4.38 Corpos de prova calcinados a 500°C e 600°C com birra e areia. ....	99
Figura 4.39 Corpos de prova calcinados a 700°C com birra e areia.....	100
Figura 4.40 Gráficos tensão x deformação das argamassas de birra e de areia nas temperaturas ambiente (28°C), 100°C, 200°C e 300 °C.....	101
Figura 4.41 Gráficos tensão x deformação das argamassas de birra e de areia nas temperaturas de 400°C, 500°C, 600°C e 700 °C).....	102
Figura 4.42 Variação da tensão de ruptura das argamassas de areia e de birra em função da temperatura .....	103
Figura 4.43 Variação do módulo de elasticidade tangente das argamassas de areia e de birra em função da temperatura .....	104
Figura 4.44 Variação do módulo de elasticidade tangente relativo das argamassas de areia e de birra em função da temperatura.....	104
Figura 4.45 Variação da deformação para uma tensão de 2MPa nas argamassas de birra e de areia em função da temperatura .....	105
Figura 4.46 Deformação relativa para uma tensão de 2MPa nas argamassas de birra e de areia em função da temperatura .....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Reserva de caulim mundial (Balanço Mineral Brasileiro, 2001) .....	19
Tabela 2.2 Reservas de caulim nos estados brasileiros indicada em tonelada. ....	21
Tabela 3.1 Objetivos específicos e ensaios correspondentes .....	45
Tabela 3.2 Características físicas do cimento Portland CP II Z 32 .....	47
Tabela 3.3 Características química do cimento Portland CP II Z 32 .....	48
Tabela 3.4 Carga de bolas de volume equivalente a 2% do volume interno do moinho	53
Tabela 3.5 Combinações dos traços .....	54
Tabela 3.6 Porcentagem retida em cada peneira .....	56
Tabela 3.7 Composições de traços estudados.....	56
Tabela 4.1 Massa específica e unitária dos resíduos .....	64
Tabela 4.2 Massa específica e área específica da borra in natura e em diversas rotações no processo de moagem.....	72
Tabela 4.3 Dados referentes às argamassas de traço 1:2:8.....	74
Tabela 4.4 Dados das argamassas com cimento e birra .....	77
Tabela 4.5 Dados das argamassas com a variação do PR .....	80
Tabela 4.6 Dados das argamassas contendo os dois resíduos de caulim.....	85
Tabela 4.7 Absorção, índices físicos e densidade de massa no estado endurecido das argamassas .....	88

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>19</b>
2.1	INDÚSTRIA DE CAULIM.....	19
2.1.1	<i>Caulim .....</i>	<i>19</i>
2.1.2	<i>Industrialização do Caulim .....</i>	<i>22</i>
2.1.3	<i>Impacto do resíduo de caulim no meio ambiente.....</i>	<i>25</i>
2.2	RESÍDUOS DE CAULIM NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	27
2.3	ARGAMASSAS.....	30
2.3.1	<i>Funções e classificação.....</i>	<i>30</i>
2.3.2	<i>Influência dos materiais constituintes.....</i>	<i>31</i>
2.3.2.1	Cimento Portland.....	31
2.3.2.2	Cal.....	32
2.3.2.3	Agregados.....	33
2.3.3	<i>Propriedades .....</i>	<i>37</i>
2.3.3.1	Consistência.....	37
2.3.3.2	Capacidade de Retenção de Água .....	38
2.3.3.3	Resistência Mecânica .....	40
2.3.3.4	Densidade de massa no estado endurecido.....	40
2.3.3.5	Permeabilidade por capilaridade .....	41
2.3.3.6	Resistência de Aderência.....	41
2.3.3.7	Módulo de Deformação.....	42
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>44</b>
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	46
3.2	MATERIAIS .....	47
3.2.1	<i>Cimento Portland .....</i>	<i>47</i>
3.2.2	<i>Agregado Miúdo.....</i>	<i>48</i>
3.2.3	<i>Resíduos da Indústria do Caulim .....</i>	<i>48</i>
3.2.4	<i>Argamassa Industrializada.....</i>	<i>50</i>
3.2.5	<i>Cal Hidratada.....</i>	<i>50</i>
3.2.6	<i>Água.....</i>	<i>51</i>

3.2.7	<i>Aditivo Plastificante</i> .....	51
3.3	<b>MÉTODOS</b> .....	51
3.3.1	<i>Caracterização dos materiais</i> .....	51
3.3.1.1	Resíduo de caulim arenoso (birra).....	51
3.3.1.2	Resíduo de caulim argiloso (borra) .....	52
3.3.2	<i>Preparação das argamassas</i> .....	54
3.3.3	<i>Ensaio nas argamassas</i> .....	56
3.3.3.1	Resistência à Compressão Simples.....	56
3.3.3.2	Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido .....	57
3.3.3.3	Retenção de Água.....	57
3.3.3.4	Resistência de Aderência à Tração.....	57
3.3.3.5	Ensaio de Absorção.....	58
3.3.3.6	Estudo do Potencial Térmico.....	60
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>61</b>
4.1	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CAULIM</b> .....	61
4.1.1	<i>Análise Mineralógica (DRX) e Quantitativa</i> .....	61
4.1.2	<i>Massa Específica e Massa Unitária</i> .....	64
4.1.3	<i>Análise Granulométrica</i> .....	64
4.2	<b>EFEITO DA VARIAÇÃO GRANULOMÉTRICA NO AGREGADO</b> .....	66
4.3	<b>EFEITO DO BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO ARGILOSO (BORRA) NA MASSA ESPECÍFICA, ÁREA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL</b> .....	71
4.3.1	<i>Massa Específica e Área Específica</i> .....	71
4.3.2	<i>Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com Cal</i> .....	73
4.4	<b>EFEITO DA COMBINAÇÃO DO RESÍDUO ARENOSO (BIRRA) E RESÍDUO ARGILOSO (BORRA) IN NATURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS ARGAMASSAS</b> .....	74
4.5	<b>INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA PROPORÇÃO DO RESÍDUO ARENOSO (BIRRA) NO DESEMPENHO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS</b> ....	76
4.5.1	<i>Resistência à Compressão Simples (RCS)</i> .....	76
4.5.2	<i>Densidade de Massa Aparente Seca no Estado Endurecido</i> .....	78
4.6	<b>EFEITO DA GRANULOMETRIA DO RESÍDUO ARENOSO (BIRRA) NO DESEMPENHO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS</b> .....	80

4.7	EFEITO DA COMBINAÇÃO DOS DOIS RESÍDUOS EM ARGAMASSAS COM TRAÇO (T.U.P) 1:4 (CIMENTO:BIRRA).....	84
4.7.1	<i>Retenção de água.....</i>	84
4.7.2	<i>Resistência à compressão simples e de aderência à tração.....</i>	86
4.7.3	<i>Absorção, Índices Físicos e Densidade de Massa no Estado Endurecido.....</i>	88
4.7.4	<i>Capilaridade.....</i>	91
4.8	INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO (A/C) NAS ARGAMASSAS.....	92
4.9	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS ARGAMASSAS CIMENTO:BIRRA E CIMENTO:AREIA - T.U.P: 1:4.....	96
4.9.1	<i>Efeito da Temperatura e do Tipo de Agregado no Módulo de Elasticidade (E) e da Tensão de Ruptura nas Argamassas.....</i>	103
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>107</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>110</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>111</b>

# 1 **INTRODUÇÃO**

---

Nos últimos anos, questões relacionadas ao impacto ambiental, causado por diversas fontes poluidoras, têm sido discutidas em todo o mundo. Entre elas a grande geração de resíduos urbanos e industriais são fontes de preocupação. Eles ocupam grandes espaços, tanto no meio urbano como na natureza, podendo gerar problemas ambientais.

Um dos maiores responsáveis pelas agressões ao ambiente nos dias de hoje são os resíduos industriais, os quais podem ser definidos como todos os produtos provenientes de um processo industrial de produção ou uso de um produto. Esses resíduos, quando reciclados, podem transformar-se em subprodutos com valor comercial. Neles podem estar incluídos produtos químicos (cianureto, pesticidas, solventes), metais (mercúrio, cádmio, chumbo) e solventes químicos que ameaçam os ciclos naturais onde são despejados.

O lixo gerado pelas atividades agrícolas e industriais é tecnicamente conhecido como resíduo, e segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) na sua resolução nº 313, as indústrias devem declarar ao órgão estadual correspondente informações sobre geração, características, armazenamento, transporte e destinação de seus resíduos sólidos.

O concreto feito com a mistura de cimento Portland, areia, brita e água, é o material mais utilizado na construção civil (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Segundo estes autores, nos EUA, em 1994, 63 milhões de toneladas de cimento foram convertidas em 500 milhões de toneladas de concreto, e, a nível mundial, cerca de três bilhões de toneladas o que torna o consumo de concreto maior do que qualquer outro insumo consumido pelo homem, à exceção apenas da água. Tendo em vista essa situação, o consumo anual de agregados naturais é

imenso. Agregados graúdos naturais e areia, devido a restrições ambientais, não são mais encontrados com facilidade na periferia das grandes cidades, como por exemplo, no Rio de Janeiro e em São Paulo – nesta última citada a areia natural, já procede de localidades situadas a distâncias superiores a 100 quilômetros (NETO, 2004).

A gestão adequada de resíduos implica na necessidade de se estudar mercados onde seu reaproveitamento seja possível. O setor da construção civil é potencialmente uma grande opção para a utilização de produtos reciclados e subprodutos industriais (JOHN, 1999). A construção civil é responsável por grande parte do consumo dos recursos naturais extraídos no planeta, chegando a 75% do total (JOHN, 2000). Além disto, o setor encontra-se envolvido em processos industriais altamente poluentes, tais como a fabricação do cimento, da cal e de produtos siderúrgicos em geral.

O emprego de resíduos na construção civil pode se tornar uma atividade de extrema importância e mais freqüente dada à diversidade e, principalmente, à quantidade disponível desses resíduos. É relevante que, quando se trata da utilização de subprodutos e resíduos (urbanos, metalúrgicos, industriais, agrícolas, etc.), necessariamente, verifica-se a possibilidade de minimização dos impactos ambientais (CINCOTTO e KAUPATEZ, 1988 apud LIMA, J., 2004), aliados as questões de serviçabilidade e durabilidade.

Em geral são diversos os resíduos descartados ou acumulados pelas indústrias, com potenciais variados no tocante à aplicação, sejam como adições minerais, ativadores químicos ou como agregados na produção de concretos e argamassas. Isto pode oferecer uma maior quantidade e variedade de materiais de construção. Assim, a importância da reciclagem tanto na preservação ambiental quanto no fator econômico e social está ligada à aquisição de produtos, com desempenhos satisfatórios a partir de materiais reciclados e alternativos (JOHN, 1996 apud LIMA, J., 2004).

O uso de subprodutos estaria plenamente justificado pelo critério do desenvolvimento sustentável, livrando o ambiente de toneladas de resíduos disposto de forma inadequada. Não se pode esquecer que, a utilização destes recursos pode se tornar uma atividade economicamente atraente e socialmente excelente, com a criação de empregos no processamento destes materiais.

No setor da construção civil, destaca-se a indústria de cimento que disponibiliza vários tipos cimentos com adições provenientes de subprodutos, tais como, a escória granulada de alto forno e as cinzas volantes. Também se tem a sílica ativa, resíduo proveniente das indústrias de silício-metálico e ferro-silício, para a produção de concreto de alto desempenho (CAD) (AITCIN, 2000).

Além dos mencionados anteriormente, outros subprodutos e resíduos estão sendo pesquisados com vistas a serem empregados na indústria de cimento e da Construção civil; como exemplo têm-se as cinzas de casca de arroz (FERREIRA, et al, 1997; SILVA, et al, 2003; DUART et al, 2006), lodos de esgotos sanitários incinerados e de estações de tratamento (GEYER et al 2000; FONTES, 2003), o resíduo do beneficiamento do caulim (BARATA e DAL MOLIN, 2002; SOUZA, 2003; LIMA, J., 2004), entre outros, sendo este último que será abordado neste trabalho.

No Brasil, a atividade minerária do caulim é de grande importância sócio-econômica. Sua produção no ano 2000 registrou um crescimento de 16,93% comparado ao ano anterior. Em relação à oferta mundial do caulim o Brasil ocupa a 2ª posição, destacando-se os estados do Amapá e do Pará, com 43,6% e 40,3%, respectivamente do total nacional, além de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Paraná e outros com menor produção (BALANÇO MINERAL, 2001).

Segundo o Balanço Mineral (2001) o Estado da Paraíba aparece na 15ª posição com reservas de caulim nacional, sendo Junco do Seridó e Juazeirinho os principais municípios produtores. Como resultado do beneficiamento do caulim, a indústria produz uma quantidade de resíduo muito elevada de dois tipos, um arenoso e outro argiloso. Esses resíduos de caulim em si, não agregam valor econômico algum. Por isso tenta-se reduzir os custos de manejo com seu transporte, pelo descarte o mais próximo possível da usina de beneficiamento. Depositados aleatoriamente no meio ambiente, muitas vezes os resíduos acabam ficando próximo a habitações urbanas também. Atualmente, esses resíduos constituem um problema para os municípios produtores. Além de precisar de grandes áreas para seu depósito, seus finos são transportados, pela ação do vento, a grandes distâncias, contaminando as populações vizinhas. Há indícios de que parte desses resíduos venham sendo usados como plastificante em argamassas, contudo sem a devida investigação do seu verdadeiro potencial.

Este trabalho, então, tem como principal objetivo estudar o potencial desses resíduos no desenvolvimento de argamassas de assentamento e de revestimento de paredes e tetos, comercialmente chamadas de múltiplo-uso.

Para isto um programa experimental foi definido com o objetivo de avaliar o potencial de uso dos resíduos da indústria de caulim paraibana. A abordagem experimental visou estudar aplicações do resíduo como material pozolânico e como plastificante e agregado na fabricação de argamassas de múltiplo uso. Desta forma alcançando os seguintes objetivos:

- a) Caracterizar qualitativamente e quantitativamente os parâmetros físicos e mineralógicos dos resíduos;
- b) Investigar o potencial pozolânico do resíduo argiloso;
- c) Avaliar o desempenho mecânico do resíduo arenoso como agregado miúdo e sua distribuição granulométrica no desempenho mecânico das argamassas;
- d) Estudar a eficiência do uso combinado dos resíduos de caulim no desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso;
- e) Correlacionar as argamassas a base de resíduos de caulim com aquelas usadas comumente na região de João Pessoa para assentamento e revestimento de alvenarias.

Portanto, o presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos.

O Capítulo I consta da presente introdução.

O Capítulo II traz a revisão bibliográfica, destacando informações sobre os resíduos do caulim, assim como também os parâmetros utilizados neste trabalho e identificando abordagens existentes sobre o assunto estudado.

No Capítulo III são apresentados todos os materiais e metodologia utilizados para conduzirem este trabalho.

O Capítulo IV mostra os resultados e discussões.

Por fim, as conclusões gerais originadas deste estudo encontram-se no Capítulo V.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

---

### **2.1 INDÚSTRIA DE CAULIM**

#### **2.1.1 Caulim**

O termo caulim ou “china clay” deriva da palavra chinesa Kauling (colina alta) e se refere a uma colina de Jauchau Fu, ao norte da China, onde o material é obtido há muito tempo (BALANÇO MINERAL BRASILEIRO/DNPM, 2001). Há mais de três mil anos os chineses já usavam o caulim para fazer porcelana e esse material é provavelmente um dos seis minerais mais abundantes do topo da crosta terrestre (profundidade até 10 metros) (ROSKILL, 1996 apud LUZ e CHAVES, 2000). É um material formado por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente caulinita e/ou heloisita (SANTOS, 1992).

As reservas mundiais de caulim são bastante abundantes e de ampla distribuição geográfica. Porém apenas quatro países detêm cerca de 95,0% de um total estimado de aproximadamente 14,2 bilhões de toneladas (BALANÇO MINERAL/DNPM – 2001) (Tabela 2.1).

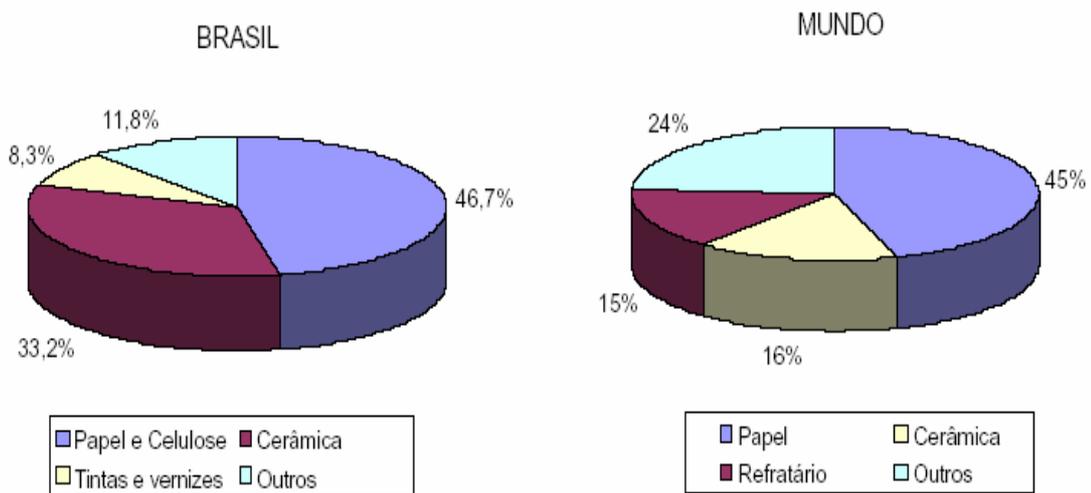
**Tabela 2.1 Reserva de caulim mundial (Balanço Mineral Brasileiro, 2001)**

Estados Unidos	53,0%
Brasil	28,0%
Ucrânia	7,0%
Índia	7,0%

Segundo Roskill (1996) apud Luz e Chaves (2000), em 1998, os principais produtores foram os Estados Unidos, seguindo-se o Reino Unido, a Coréia do Sul, a Alemanha, o Brasil e a China, que responderam por quase 73,0% de um total de 25,5 milhões de toneladas.

O caulim tem muitas aplicações industriais e novos usos estão constantemente sendo pesquisados e desenvolvidos. É um mineral industrial de custo mais baixo que a maioria dos materiais concorrentes (BALANÇO MINERAL, DNPM – 2001). Segundo o mesmo documento, suas principais aplicações atualmente são como agentes de enchimento (filler) no preparo de papel; como agente de cobertura (coating) para papel “couché” e na composição das pastas cerâmicas e em menor escala é usado na fabricação de materiais refratários, plásticos, borrachas, tintas, produtos farmacêuticos, etc.

No consumo mundial, em 1999, a Europa participou com cerca de 33,0% seguida da América do Norte 31,0% e Ásia 26,0%. A América do Sul consumiu apenas 3,0% do total no mercado (LUZ e CHAVES, 2000). O consumo setorial do caulim no mundo e no Brasil são apresentados Figura 2.1, segundo o Balanço Mineral (2001).



**Figura 2.1 Consumo setorial de caulim no Brasil e no mundo (Balanço Mineral Brasileiro, 2001)**

No Brasil o caulim produzido, é proveniente de vários Estados. Amapá, Pará, São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul são responsáveis por mais de 99,0% do caulim beneficiado. Em 2000, os Estados do Amapá e do Pará produziram 84% da oferta nacional (LUZ e CHAVES, 2000). De acordo com o Balanço Mineral de 2001, no período de 1988 a

2000, pode-se destacar o significativo incremento das reservas de caulim, ocorrido em 1996, passando de um patamar em torno de 1,6 bilhão de toneladas para 4,0 bilhões, face às descobertas do Estado do Amazonas, ainda não aproveitadas. A Tabela 2 mostra as reservas de caulim nos estados brasileiros no ano de 2000.

**Tabela 2.2 Reservas de caulim nos estados brasileiros indicada em tonelada.**

UF	Minério			Total
	Medida (t)	Indicada (t)	Inferida (t)	
AP	245.374.632	115.738.000	-	361.112.632
AM	1.586.500.400	995.273.000	-	2.581.773.400
BA	6.308.505	2.649.550	2.651.298	11.609.353
CE	138.065	-	-	138.065
GO	17.360.814	10.319.028	51.564.500	79.244.342
MG	9.070.104	4.439.714	2.731.318	16.241.136
PA	249.337.049	300.540.334	218.757.763	768.635.146
PB	194.275	144.000	19.000	357.275
PR	35.561.819	8.093.9.607.361	9.607.361	53.263.111
PE	1.514.427	-	-	1.514.427
PI	3.290.804	1.212.083	886.656	5.389.543
RJ	563.749	28.762	-	592.511
RN	987.128	727.000	-	1.714.128
RS	7.008.885	-	-	7.008.885
SC	59.461.018	17.144.805	6.057.480	76.605.823
SP	37.382.506	23.684.620	23.009.721	84.076.847
<b>Total</b>	<b>2.260.054.006</b>	<b>1.485.153.593</b>	<b>323.687.379</b>	<b>4.068.895.338</b>

Fonte: Balanço Mineral, 2001.

O Estado da Paraíba aparece na 15ª posição das reservas nacionais, de acordo com a Tabela 2.2. Apesar das reservas relativamente reduzidas, os caulins da Paraíba são de elevado rendimento, alvura e refletância pelo fato de serem constituídos por caulinita hexagonal (SANTOS, 1992). Segundo o Invetário dos resíduos sólidos industriais de estado da Paraíba realizado pela SUDEMA (Superintendência de Administração do meio Ambiente), em 2004 três municípios concentram as empresas que beneficiam caulim no estado da Paraíba:

Juazeirinho, Junco do Seridó e Tenório. A estimativa de produção de resíduos destas empresas é de 6820 toneladas/mês. Todo o resíduo é lançado no ecossistema sem nenhum processo para eliminar ou reduzir seus constituintes presentes.

No ramo da construção civil o caulim é usado em argamassas como adição mineral em algumas regiões do país, devido à sua finura. A atividade pozolânica do caulim já é conhecida. O primeiro uso de caulim para pozolana em concretos no mundo foi para a construção da barragem de Jupia, em 1960 (ZAMPIERI, 1989). Oliveira (2004) avaliou a potencialidade pozolânica do caulim paraibano, após passar por um processo de calcinação, e ele apresentou um grande potencial para o desenvolvimento de pozolanas na produção de concretos. O uso do caulim como material pozolânico no cimento Portland pode incrementar o mercado da mineração local e favorecer a economia das regiões produtoras, comumente dominadas pela pobreza (OLIVEIRA, 2004).

### **2.1.2 Industrialização do Caulim**

A industrialização do caulim envolve os processos de lavra e beneficiamento. A lavra pode ser feita de duas maneiras: descoberta e subterrânea. A lavra subterrânea é mais praticada nos locais de topografia acidentada sendo preferida pelos garimpeiros, por evitar a operação de capeamento, ou seja, a remoção da camada superficial (LUZ e CHAVES, 2000).

Os processos utilizados no beneficiamento do caulim variam de acordo com o uso a que se destina o produto. Existem dois processos: via seca e via úmida. No processo a seco ou de separação ao ar, o caulim bruto é levado à usina de beneficiamento em grandes pedaços, onde é fragmentado em moinhos de rolos desintegradores e em seguida alimenta um moinho de bolas com um separador de ar tipo ciclone. As partículas finas são recolhidas em um coletor e ensacadas enquanto que as mais grossas voltam ao moinho (LUZ e CHAVES, 2000).

Na Paraíba é utilizado o processo por via úmida, onde o caulim bruto (Figura 2.2) é desintegrado em batedor onde é adicionada água para a lavagem dos minerais acessórios de modo a retirar a fração de caulim agregada a eles (Figura 2.3). Em seguida, o material passa por tanques para a separação do caulim da areia e depois para tanques de sedimentação onde os flocos são precipitados (Figura 2.4).



**Figura 2.2 Caulim bruto**



**Figura 2.3 Separação do caulim**



**Figura 2.4** Tanques de separação e sedimentação do caulim

O caulim precipitado é bombeado para os filtros-prensa (Figura 2.5), nos quais é retirada a água em excesso, resultando na torta de caulim (Figura 2.6). A torta é seca ao ar ou em fornos-de-teto-quente no período chuvoso.



**Figura 2.5** Filtros-prensa



**Figura 2.6 Tortas de caulim**

Por fim as tortas de caulim são quebradas em vários pedaços, esses passam por um processo de moagem, para em seguida serem ensacados e comercializados.

### **2.1.3 Impacto do resíduo de caulim no meio ambiente**

Como resultado do beneficiamento do caulim, a indústria produz uma quantidade de resíduo muito elevado, constituído mineralogicamente de quartzo, mica e feldspato, com aproximadamente 7% de caulim (DANTAS, 1983 apud OLIVEIRA, 2004). Os resíduos apresentam-se em frações granulométricas distintas designadas como pedregulhos, resíduos das peneiras 21 $\mu$ m e 44 $\mu$ m e resíduos dos hidrociclones. O teor de caulim contido nos resíduos vai depender do tipo de tecnologia usada para o processo de beneficiamento do caulim. Contudo não se encontram na literatura estudos que estimem esse teor em função do tipo de processamento.

Nesse processo de beneficiamento são comumente gerados dois resíduos diferentes, após o processo de desareamento, sendo um de aparência bem arenosa, e o outro bem mais fino, como uma argila (Figura 2.7), são chamados popularmente na região de birra e borra, respectivamente.



**Figura 2.7** Os dois tipos de resíduos de caulim gerados na fase do desareciamento.

Esses resíduos caulíníticos, nos dias atuais, não têm valor econômico algum e nem destino de reutilização, por isso tenta-se reduzir os custos de manejo com seu transporte, pelo descarte mais próximo possível da usina de beneficiamento que acaba ficando cercada de grandes montes de material não aproveitado (Figura 2.8). Porém, existem alguns trabalhos que designam propostas de reaproveitamento do resíduo argiloso como matéria-prima na fabricação de cimentos e adições minerais para a produção de concretos (BARATA; DAL MOLIN, 2002; SOUZA, 2003), como ingrediente nas argamassas e em material cerâmico (ROLIM, 2003). Mas em relação ao resíduo arenoso pouco há sobre o aproveitamento deste, fazendo-se necessários estudos que o envolvam.



**Figura 2.8 Resíduos de caulim jogados aleatoriamente na natureza**

Algumas substâncias químicas usadas para melhorar as qualidades do caulim podem ser contaminantes de solo, ar ou água, dependendo da concentração no resíduo ou na lavagem do minério bruto, a exemplo do sulfato de alumínio (agente floculante), e hexametáfosfato de sódio, usado na dispersão (SOUSA, 1997). Para o branqueamento, em alguns países, é usado o ditionito de sódio ou hidrossulfito de zinco em pH ácido, mas este tratamento não é normalmente usado no Brasil (SANTOS, 1992).

No Estado da Paraíba, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos sobre potencial do resíduo da indústria do caulim paraibano para o aproveitamento na construção civil (ROCHA, 2005; LIMA, M., 2005; REZENDE et. al, 2006), mas há pouco sobre o real impacto causado ao meio ambiente por esses resíduos na região produtora do Estado.

## **2.2 Resíduos de caulim na construção civil**

Alguns estudos têm sido desenvolvidos sobre o aproveitamento dos resíduos provenientes da indústria do caulim no ramo da construção.

No estudo realizado por Flores (1998), mostra que resíduo de caulim é constituído basicamente pelo argilomineral caulinita com a presença de certos teores de algumas fases inertes como o quartzo, o ferro e o titânio, apresentando física uma distribuição granulométrica de extrema finura, com diâmetro médio de 0,5  $\mu\text{m}$ . Estas características

indicam que este material pode ser uma fonte alternativa para a obtenção de pozolanas, evitando deste modo agressão à natureza decorrente de seu acúmulo.

Barata (1998) em seus estudos mostrou que o resíduo de caulim por ser finamente dividido e constituído basicamente de caulinita, caracteriza-se como uma matéria-prima de excelente qualidade para a fabricação de uma metacaulinita de alta reatividade.

Dentre os primeiros trabalhos com este tipo de resíduo destaca-se o realizado por Pera e Amrouz (1998), que obteve excelente atividade pozolânica quando calcinou com temperaturas entre 700°C e 750°C, por um período de 2 a 5 horas. Neste trabalho foi verificado que o metacaulim obtido com o resíduo apresentou valores superiores de consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  em comparação com as que tinham disponíveis comercialmente.

No estudo de Souza (2003) foi utilizado o resíduo de caulim argiloso da região do Pará, onde foi realizado um processo de calcinação e moagem desse material e dessa forma conseguiu-se obter uma pozolana de alta reatividade para produção de concreto. Essa atividade pozolânica foi verificada segundo as normas NBR 5751 e 5752 (ABNT, 1992), onde os valores do índice de atividade pozolânica (I.A.P.) atingiram valores de resistência à compressão aos 7 dias de 16 MPa com a cal, o que pela NBR 5751 (ABNT, 1992) é exigido 6 MPa. Para o cimento o I.A.P atingiu um valor de 95% ficando superior ao valor mínimo de 75% exigido pela NBR 5752 (ABNT, 1992). Estes resultados são bastante surpreendentes, visto que uma metacaulinita, advinda de uma caulinita má cristalizada em Zampieri (1989), atingiu valores da ordem de 14 MPa.

Em um estudo de um solo concrecionado local (Estado da Paraíba) contendo aproximadamente 19% de caulinita, Torres et al. (1999) concluiu que a atividade pozolânica é predominantemente função do teor de caulinita, e no seu caso, se atingiu valores próximos a 7 MPa. Ainda no estudo do mesmo autor, o resíduo calcinado à 750°C foi moído em três tempos diferentes (90, 120 e 180 minutos) e foi verificada uma diminuição da superfície específica do resíduo (de 18.920 m<sup>2</sup>/g para 18.770 m<sup>2</sup>/g) para o maior tempo de moagem, o que pode indicar uma aglutinação nas partículas.

Em Barata e Dal Molin (2002) mostrou-se que as propriedades avaliadas dos concretos com a incorporação de metacaulinita obtida do resíduo de caulim, após um processo de

calcinação e moagem, foram significativamente superiores (em torno de 40%) às dos concretos de referência. Em comparação com os concretos compostos com sílica ativa as resistências à compressão e as taxas de absorção capilar foram similares. Porém, nem o teor de caulinita nem o dos outros minerais constituintes deste resíduo foram informados.

Há também estudos do aproveitamento do resíduo de caulim argiloso como filler em misturas asfálticas. Neto et al. (2004) em seu trabalho verificou que o resíduo como filler associado a um cimento asfáltico de petróleo apresentou uma interação razoável, melhorando a sua estabilidade sem, no entanto, torná-lo tão rígido quanto a cal o faz.

Em relação ao estudo do resíduo de caulim em argamassas apresenta-se o trabalho de Queiroz et al. (2005) que verificou o desempenho da argamassa constituída de areia com resíduo de caulim oriundo do beneficiamento do caulim da indústria do papel, comparando-a com outros tipos de argamassas. As argamassas contendo o resíduo, no estado fresco, apresentaram uma demanda de água maior e retenção de água semelhante em relação às outras. No estado endurecido, foi constatado que a resistência à compressão foi menor nas argamassas com o resíduo de caulim e a absorção de água foi superior em comparação com aquelas com areia.

A maioria destes estudos refere-se ao resíduo de caulim argiloso e indica o quanto este tem potencial para ser aplicado na indústria da construção como pozolana, mas passando sempre por um processo de beneficiamento, como a calcinação e moagem. Quanto ao resíduo arenoso, outro tipo do resíduo de caulim, pouco é mencionado sobre seu aproveitamento em concretos e argamassas. Na literatura são escassos estudos que tratam da caracterização do resíduo arenoso e do aproveitamento dos dois tipos dos resíduos de caulim na sua forma *in natura* na construção civil.

Este trabalho, então, objetiva suprir esta lacuna, fazendo o uso de ambos os tipos dos resíduos gerados pelo beneficiamento do caulim, como materiais constituintes em argamassas de múltiplo uso.

## 2.3 ARGAMASSAS

### 2.3.1 Funções e classificação

As funções das argamassas estão diretamente associadas ao fim que se destinam. Algumas dessas funções possíveis podem ser enumeradas segundo Paulo (2006):

- Unir com solidez elementos de alvenaria e ajudar a resistir a esforços horizontais, perpendiculares ou paralelos ao plano de uma parede;
- Absorver deformações que ocorrem naturalmente nas alvenarias;
- Selar as juntas contra infiltração de água;
- Colar materiais de revestimento;
- Dar acabamento em tetos e paredes, em regularização de pavimentos, na reparação de obras de concreto, etc.

As argamassas podem ser de cal, de cimento ou mistas de cal e cimento. As de cimento são utilizadas em alvenarias de alicerce, para chapisco, nos revestimentos ou em pisos de cimentos. Aquelas contendo a cal são utilizadas para emboço e reboco, devido a sua plasticidade, e também em alvenarias de vedação (FIORITO, 1994).

As argamassas são classificadas, segundo a sua finalidade, em:

- para assentamento: usadas para unir blocos ou tijolos das alvenarias. Também para a colocação de azulejos, tacos, ladrilhos e cerâmica para revestimento.
- para revestimento: usadas para revestir tetos, paredes etc., protegendo da umidade.

As argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos, especificadas pela NBR 13281 (ABNT 1995) hoje em dia, são chamadas comercialmente de argamassas de múltiplo uso.

## 2.3.2 Influência dos materiais constituintes

### 2.3.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é o principal responsável pela resistência mecânica das argamassas. No entanto, para argamassas de revestimento, não há necessidade de elevadas resistências mecânicas, principalmente pelo fato de isto levar à redução da capacidade de deformação, da resistência ao impacto e até mesmo da capacidade de aderência (TRISTÃO, 1995). As argamassas com elevados consumos de cimento apresentam tensões de tração nove a doze vezes maiores do que as apresentadas pelas argamassas pobres (que contém menores quantidades de aglomerantes), devido à retração, e maiores módulos de elasticidade (FIORITO, 1994).

A finura do cimento é uma das características que tem importante influência sobre as argamassas. Quanto mais fino é o cimento maior é a trabalhabilidade da argamassa, e mais rápido sua reação com água. Selmo (1989 apud MATTOS 2001), citando diversos autores, coloca que os aglomerantes, a princípio, contribuem de forma significativa para a retenção de água, devido à tensão superficial da pasta e maior superfície específica quando comparados à areia, exceto nas argamassas com elevados teores de argila na sua composição. Elevados teores de argila nas argamassas pode resultar numa maior demanda de água nas argamassas. Essa em excesso é perdida facilmente por sucção, afetando então sua capacidade de retenção.

Com relação à influência do tipo de cimento em argamassas, o trabalho de Bolorino e Cincotto (1997), que avaliou argamassas de cimento, cal e areia (1:1:6, em massa) para revestimento, constatou que as propriedades no estado fresco não foram afetadas de forma significativa, enquanto que, no estado endurecido, verificaram a influência da reatividade e da composição dos cimentos, principalmente nas resistências à compressão e à tração na flexão, na absorção de água por capilaridade e na retração por secagem e, de maneira menos acentuada, na resistência de aderência à tração do revestimento.

O fator água/cimento é determinante na resistência de argamassas e concretos. A lei de Abrams mostra que a resistência é inversamente proporcional ao valor desse fator. O aumento na quantidade de água na mistura aumenta a porosidade causando um enfraquecimento da

martriz de argamassa, conseqüentemente a diminuição da resistência (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O resíduo de caulim por apresentar em sua constituição teores de argila, tem bastante influência sobre esta propriedade nas argamassas. Sabe-se que cada tipo de mineral seus grãos apresentam diferentes potenciais de atração da água em função da sua área de superfície (OLIVEIRA et al., 2000). Se os grãos atraem mais água isso pode influenciar na zona de transição deixando ela fraca e, conseqüentemente, resultando em menor resistência.

### 2.3.2.2 Cal

É um aglomerante com funções importantes na argamassa. Ela melhora a trabalhabilidade e outras propriedades, porém causa a diminuição da resistência à compressão (SILVA, N. 2006). Pode-se destacar que a cal confere plasticidade às pastas e argamassas no estado fresco, permitindo maiores deformações no estado endurecido e sem fissuração, o que não ocorre, com freqüência, em caso de se empregar somente cimento Portland (CINCOTTO et al. 1995).

Segundo Tristão (1995) este aumento de plasticidade das argamassas tem influência direta na capacidade de espalhamento da argamassa sobre uma superfície, resultando numa melhora da extensão da aderência. Carasek et al (2001), afirma, que diversos estudos indicam que à medida que se aumenta a percentagem de hidróxido de magnésio na composição da cal, em relação ao hidróxido de cálcio, há também um aumento na capacidade de aderência da argamassa.

Sabbatini (1985 apud QUARCIONI e CINCOTTO 2005) faz uma descrição qualitativa da variação das propriedades de uma argamassa com a variação do teor relativo de cal, mantendo-se constante a proporção entre os aglomerantes e o agregado. O estudo indicou que existe uma interdependência das propriedades das argamassas, de forma que ao se melhorar algumas delas, como o módulo de deformação, outras propriedades serão prejudicadas, especialmente as resistências mecânicas.

Em várias regiões do país são utilizadas adições minerais naturais que são materiais inertes que possuem um teor de partículas de dimensões reduzidas, proporcionando elevada superfície específica que contribui para a melhoria da plasticidade e para o aumento da

retenção de água, resultando em argamassas mais trabalháveis (MATTOS, 2003). Ainda tem-se como exemplo os saibros, os solos finos beneficiados e o pó calcário, sendo que os dois primeiros materiais podem prejudicar outras propriedades no estado endurecido, quando utilizados sem critério algum, devido à natureza e às características de suas partículas mais finas, os argilominerais.

O resíduo de caulim argiloso também é um material fino e tem potencial para ser usado como adição mineral em argamassas, como será discutido neste estudo.

### 2.3.2.3 Agregados

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005), agregados miúdos são “agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150  $\mu$ m, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1”. Ainda segundo a norma os agregados podem ser de origem natural, já encontrados fragmentados ou resultantes de britagem de rochas.

O conhecimento de algumas propriedades dos agregados é de grande importância para se analisar o seu papel numa mistura, sejam argamassas ou concretos (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Segundo Carneiro e Cincontto (1999) a areia não contribui com as reações químicas do endurecimento da argamassa, mas influencia no estado fresco pela composição granulométrica; o formato dos grãos interfere na trabalhabilidade e na retenção de água; nas resistências mecânicas, na capacidade de deformação, na permeabilidade. Contudo sabe-se que a zona de transição pode ser afetada pela composição do agregado. Expansão e fissuração do concreto podem resultar de reações químicas envolvendo íons alcalinos silicosos que podem estar presentes no agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A forma e textura dos grãos dos agregados têm mais influência nas propriedades no estado fresco do que no estado endurecido. A forma dos grãos está relacionada com a geometria, que pode ser arredondada, angulosa, alongada ou achatada. A textura é definida quanto à superfície do agregado, lisa ou áspera. Uma textura mais áspera tende a favorecer a aderência entre a pasta de cimento e o agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994). No estudo realizado por Silva et al (2005) verificou-se que a areia, de grãos subarredondados e mais

esféricos, produziu argamassas com menores: exigência de água, absorção de água por capilaridade, retenção de água, densidades de massa e resistências mecânicas em comparação as argamassas produzidas com areia britada de rocha calcária calcitas. Neste estudo não verificou a mineralogia dos agregados estudados, que também influencia no desempenho do agregado nas argamassas.

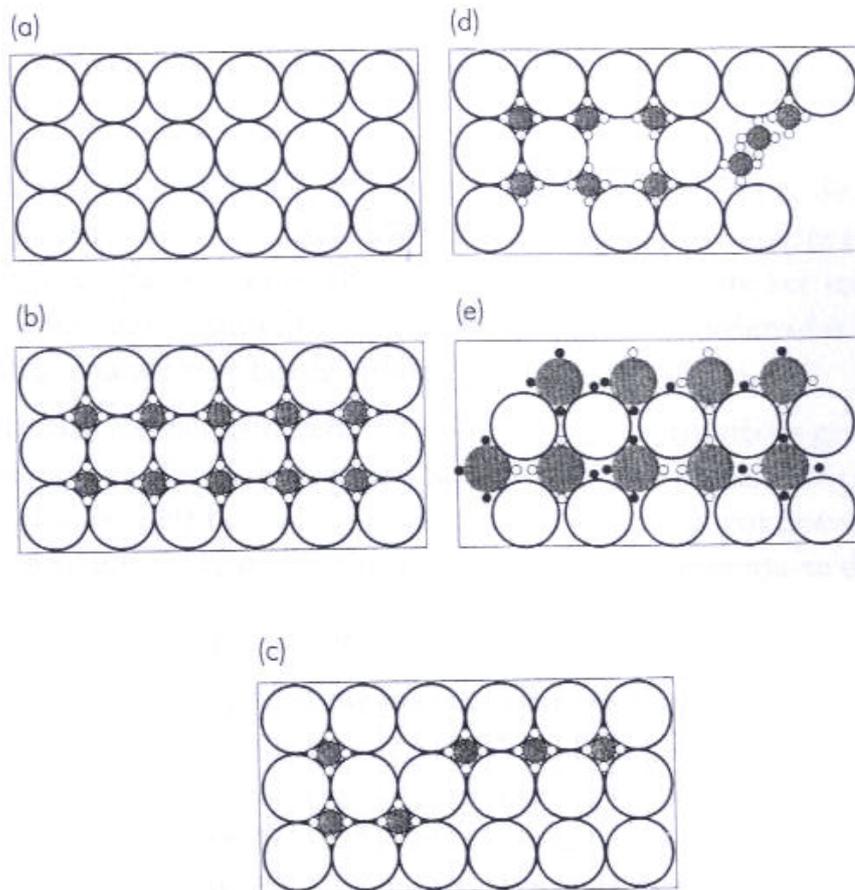
Com relação à influência da composição granulométrica do agregado nas argamassas existem alguns estudos relevantes como o de Tristão (1995) e Carneiro (1999). Carneiro (1999) cita que alguns trabalhos anteriores embasaram os estudos de influência de curvas granulométricas nas propriedades das argamassas, ressaltando-se que nestes estudos a dosagem do aglomerante e do agregado foi realizada a partir da curva granulométrica.

Tristão (1995) estudou a influência da composição granulométrica da areia, recomendada em diferentes especificações, nas propriedades de argamassas de revestimento. O autor concluiu que argamassas produzidas com areias muito uniformes possuem maior consumo de aglomerantes e de água de amassamento. O autor também relata que a distribuição granulométrica deve ser avaliada pelo módulo de finura em conjunto com o coeficiente de uniformidade, visando assim a utilização de areia com granulometria contínua. Carneiro (1999) em seu estudo coloca que a massa unitária e o índice de vazios calculado também são “indicadores relevantes” para a avaliação da compacidade das areias, ressaltando que em conjunto com o coeficiente de uniformidade, deve-se analisar também o perfil da curva granulométrica. No entanto, estas considerações foram feitas para materiais monofásicos ou com pouca variação mineralógica nas frações, o que não é o caso do resíduo de caulim.

Quanto às propriedades no estado endurecido das argamassas Tristão (1995) e Carneiro (1999) verificam que a continuidade da curva de distribuição granulométrica aumenta a resistência à compressão, devido ao melhor empacotamento. Esta afirmação não pode ser generalizada, pois há fatores como a forma do grão, a mineralogia e a razão de aberturas entre as peneiras que afetam essa condição de melhor empacotamento entre os grãos numa curva granulométrica mais contínua.

O estudo de empacotamento de partículas explica que a correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados é em função de se preencher os vazios

maiores com partículas menores, cujos vazios serão preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (Mc GEARY, 1961 apud OLIVEIRA et al., 2000) (Figura 2.9).



**Figura 2.9** Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema com único tamanho de partículas (monodisperso); (b) máxima densidade de empacotamento; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas (OLIVEIRA et al., 2000).

Outros fatores que afetam o empacotamento de partículas são morfologia, porosidade e densidade das mesmas. Se seu formato tender a ser menos esférico, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição granulométrica. (Figura 2.10). Através do controle da distribuição granulométrica é possível otimizar a densidade de empacotamento em sistemas compostos por partículas não esféricas. Geralmente a densidade se eleva com o valor do quociente entre os tamanhos (diâmetros) das partículas maiores e das menores (Figura 2.11) (OLIVEIRA et al. 2000).

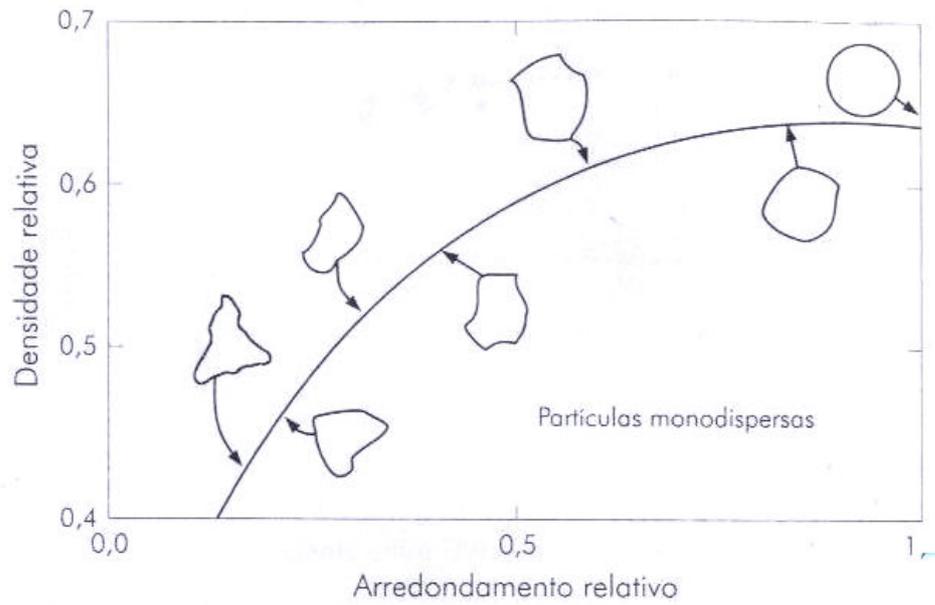


Figura 2.10 Relação qualitativa existente entre a densidade relativa e o arredondamento relativo para empacotamento monodispersos aleatórios de partículas (OLIVEIRA et al., 2000).

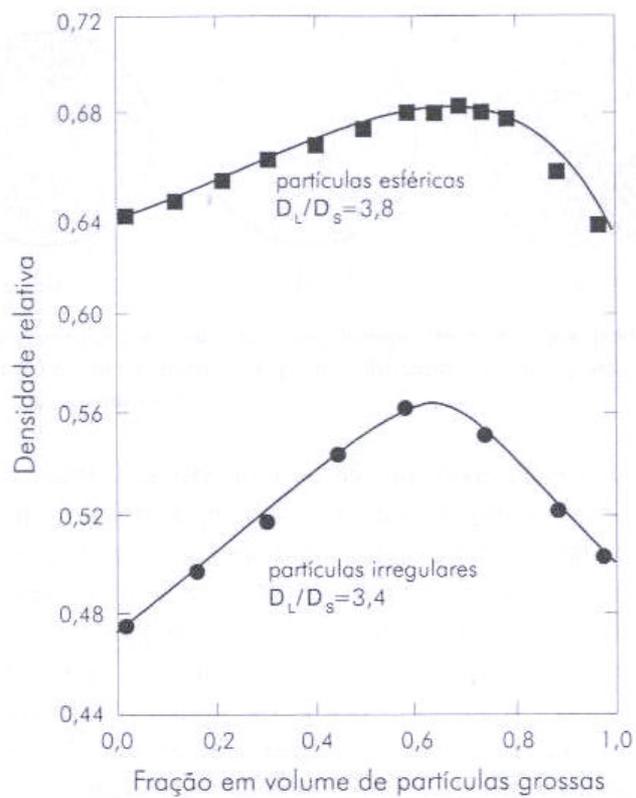


Figura 2.11 Dependência da densidade relativa de empacotamento em função da composição, para misturas de formato esférico e irregular (OLIVEIRA et al., 2000).

Devido à elevada quantidade possível de formatos de partículas e, da infinidade de combinações possíveis, é muito difícil desenvolver um sistema que possa prever o comportamento de misturas de partículas não esféricas. A única previsão é que à medida que as partículas tornam-se não esféricas, ocorrerá um decréscimo na densidade de empacotamento e de outras propriedades correlatas (OLIVEIRA et al., 2000)

Outra característica importante dos agregados são as suas propriedades térmicas que influenciam no desempenho do concreto e das argamassas. Segundo Neville (1997) o coeficiente de dilatação térmica de agregado tem influência sobre o mesmo coeficiente do concreto com o qual ele é preparado: quanto maior o do agregado maior o do concreto. Por exemplo, o quartzo sofre uma transformação a uma temperatura em torno de 574°C, uma expansão brusca de 0,85 %, afetando a estabilidade dimensional de argamassas e concretos. (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997). Além das transformações de fase e da decomposição térmica do agregado a resposta do concreto ao fogo é influenciada também pela mineralogia do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

### **2.3.3 Propriedades**

#### **2.3.3.1 Consistência**

Segundo Cincotto et al. (1995 apud SILVA, 2006) consistência é a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a resistir à deformação, não existindo uma unidade definida que a quantifique. No entanto, vários autores classificam as argamassas segundo esta propriedade, em argamassas secas, plásticas ou fluidas (CINCOTTO et al., 1995). A consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pelos seguintes fatores: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante (SILVA, 2006).

A consistência pode ser influenciada pelo tipo, forma e características texturais do agregado, apesar de não haver trabalhos conclusivos que quantifiquem tal influência (ARAÚJO, 2001 apud SILVA, 2006).

As características granulométricas, segundo Tristão (1995) e Carneiro (1999), influenciam nos volumes de vazios máximos e mínimos, causando uma variação na quantidade de aglomerante requerida na mistura. Quanto maior a continuidade na distribuição granulométrica do agregado, menor será o volume de vazio e menor a necessidade de pasta para uma dada consistência.

Para a avaliação da consistência da argamassa, utiliza-se tradicionalmente no Brasil, a mesa de consistência (*flow table*) prescrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996) e procedimentos de ensaio prescritos pela NBR 13276 (ABNT, 1995). Mas existem outros métodos utilizados para avaliar a consistência: o método da penetração do cone preconizado pela ASTM C 780 (1996); o método *vane test* (ensaio de palheta); ensaio de *dropping ball* (BS 4551), e mais recentemente, vem sendo empregado o “*squeeze flow*”, (equipamento usado inicialmente para avaliação de fluidos homogêneos) devido, principalmente, à grande sensibilidade às variações do comportamento reológico da argamassa (SILVA, 2006).

### 2.3.3.2 Capacidade de Retenção de Água

A retenção de água é a capacidade da argamassa no estado fresco de manter sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água por evaporação, sucção do substrato ou pela hidratação do cimento e carbonatação da cal (CINCOTTO et al, 1995).

Alguns fatores intervenientes na retenção de água das argamassas, sujeitas à perda de água por evaporação, citados por Détriché e Maso (1986 apud DO Ó, 2004), são:

- as condições climáticas para cura, as quais regulam o equilíbrio higrotérmico;
- a natureza física da mistura (proporção de aglomerantes e finura da fração de finos) o que determina a característica inicial dos microporos;
- a natureza química da mistura (especialmente dos aglomerantes, que será responsável pela cinética da evolução da rede de capilares);
- a espessura das camadas de revestimento.

Para a determinação da retenção de água propriedade existem dois procedimentos de ensaio: pela NBR 13277 (ABNT, 1995) e CSTB 2669-4: o primeiro, determina a quantificação da água absorvida em papel-filtro colocado sobre a argamassa fresca, sob uma dada pressão, comprimida por um peso assentado sobre o papel; no segundo submete-se argamassa fresca a uma sucção durante 15 minutos em um funil de filtração, equipamento especificado na norma ASTM C-91, sob pressão de 50 milímetros de coluna de mercúrio, onde a quantidade de água retida é determinada por diferença de massa da argamassa, antes e após a sucção (NAKAKURA, 2003). Na Figura 2.9 são ilustradas as duas condições de ensaio da retenção de água.

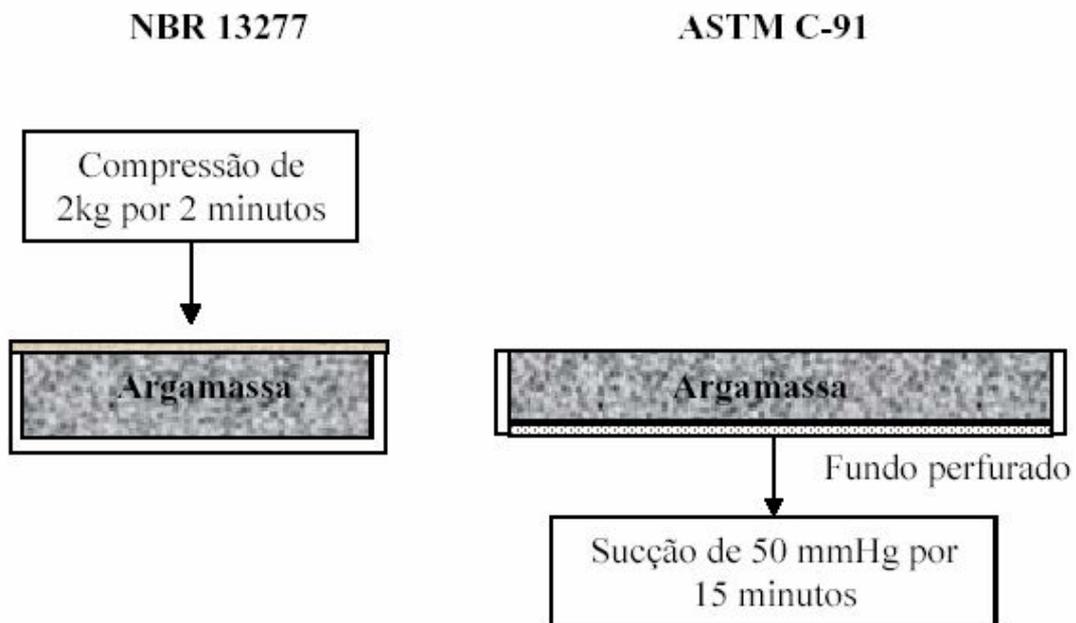


Figura 2.12 Condições comparativas de determinação da retenção de água (NAKAKURA, 2003)

A maioria das argamassas nacionais tem retenção de água acima de 90% determinada pela NBR 13277 (ABNT, 1995). O procedimento recomendado pelo CSTB é mais rigoroso e, talvez por isso mesmo, proporciona uma diferenciação entre as argamassas, obtendo-se valores mínimos de até 60% de retenção para as mesmas argamassas, analisadas pelos dois métodos (NAKAKURA, 2003). Sendo assim, depois de vários trabalhos que discutem sobre os dois métodos, a norma NBR 13277 já tem uma versão atualizada, onde o procedimento recomendado é baseado no da ASTM C-91. Mas nesse estudo como todos os parâmetros de normas analisados foram das versões de 1995, então o ensaio de retenção também foi seguido o da versão de 1995.

As normas NBR 7175 (ABNT, 1992) e NBR 13281 (ABNT, 1995) estabelecem limites de retenção de água para cal hidratada para argamassa e argamassas industrializadas para assentamento e revestimento de paredes e tetos respectivamente. A retenção de água é classificada como alta se for maior que 90%, e como normal se estiver compreendida no intervalo de 80% a 90%. Os valores de retenção segundo a NBR 13281/95 devem ser determinados de acordo com a NBR 13277 (ABNT, 1995).

### **2.3.3.3 Resistência Mecânica**

A resistência mecânica das argamassas está relacionada à sua capacidade de resistir a esforços de tração, compressão ou cisalhamento, decorrentes de cargas estáticas ou dinâmicas atuantes nas edificações, ou decorrentes de efeitos das condições ambientais (NAKAKURA, 2003). A mais comumente determinada é a resistência de compressão, tanto em argamassas de revestimento e assentamento.

Para efeito de avaliação do desempenho de argamassas de assentamento a resistência de compressão é a que é mais considerada, devido à forma como ela é solicitada no sistema de vedação. Nas argamassas de revestimento as solicitações maiores são as de tração e cisalhamento (NAKAKURA, 2003).

Os principais fatores que influenciam a resistência mecânica para os concretos, segundo Mehta e Monteiro (1994), são: o tipo de cimento, o agregado e a relação água/aglomerante. Analogamente pode-se dizer que ocorre o mesmo nas argamassas.

### **2.3.3.4 Densidade de massa no estado endurecido**

A densidade de massa no estado endurecido corresponde à relação entre a massa e o volume aparente da argamassa. Esta propriedade é um indicativo da compactidade, que vai resultar da proporção de agregado em relação ao aglomerante e também da distribuição granulométrica da mistura (NAKAKURA, 2003).

Com o valor da densidade de massa no estado endurecido pode-se determinar indiretamente o volume de vazios da argamassa. A NBR 13280 (ABNT 1995) prescreve os procedimentos para a determinação desta propriedade.

#### **2.3.3.5 Permeabilidade por capilaridade**

Os poros capilares de dimensões maiores que 50nm e as bolhas de ar incorporado de até 3mm têm influência na permeabilidade. Os capilares são os espaços que ainda não foram preenchidos pelos compostos endurecidos do aglomerante (CARNEIRO, 1999). Então isto implica que quanto mais idade tiver a argamassa, ou seja, mais endurecida, a permeabilidade será menor. Carneiro (1999) ainda cita que o tempo de amassamento, se prolongado, incorpora ar, e a continuidade da composição granulométrica, que favorece o empacotamento da argamassa, podem afetar essa propriedade.

Em Nakakura (2003) se explica que a existência de poros interligados ou não de diferentes diâmetros, faz que alguns contribuam para a permeabilidade e outros, não. Se a porosidade for elevada e os poros estiverem interligados, eles contribuem para o deslocamento de fluidos, de modo que a permeabilidade também pode ser alta. Por outro lado, se os poros forem descontínuos ou, de outro modo, ineficazes para o deslocamento de fluidos, a permeabilidade será baixa, mesmo com porosidade alta. Esta propriedade é avaliada pelo coeficiente de permeabilidade por capilaridade. O ensaio de capilaridade relaciona-se à permeabilidade enquanto o ensaio de absorção de água está ligado ao volume de vazios (poros).

A norma brasileira que trata da determinação dessa propriedade é a NBR 9779 (ABNT 1995), que foi a utilizada nesse trabalho.

#### **2.3.3.6 Resistência de Aderência**

Segundo Sabbatini (1984 apud SILVA, 2006), a aderência da argamassa ao substrato pode ser definida como sendo a capacidade que a interface substrato/argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se. Ainda, segundo o autor, não existe uma correspondência biunívoca entre um dado parâmetro e a

capacidade de aderência. Por exemplo, aumentando o teor relativo de cimento no aglomerante pode-se aumentar ou diminuir a capacidade de aderência, dependendo das características do substrato.

Cincotto et al. (1995 apud TRISTÃO, 1995) diz que a aderência é significativamente influenciada pelas condições da base, como porosidade e absorção da água, resistência mecânica, textura superficial e pelas próprias condições de execução.

De acordo com Gonçalves (2004) citado por Silva (2006), fatores como processo de execução do revestimento, materiais utilizados e condições climáticas respondem por uma variabilidade de até 33% nos resultados do ensaio de aderência. Ainda, segundo o autor, os resultados do ensaio de resistência de aderência à tração, devem ser analisados em relação ao tipo de ruptura ocorrido, visto que tanto o fato de romper na interface argamassa/substrato (aderência pura) quanto no interior dos materiais representam fraturas no sistema de revestimento.

A NBR 15258 da ABNT, vigente a partir de Outubro de 2005, propõe procedimentos de ensaio para determinação da resistência de aderência à tração, assim como na versão anterior. A atualizada trata de aderência potencial, estabelecendo um substrato-padrão para a aplicação das argamassas para que se minimize a influência da base na aderência. Nesse trabalho foi usada como base a versão anterior desta norma (NBR 15258, 1995), pelo fato da pesquisa ter começado antes da versão atual entrar em vigor.

### **2.3.3.7 Módulo de Deformação**

O módulo de deformação é definido como a capacidade da argamassa de dissipar tensões a que está submetida. Quanto menor o valor desse módulo, maior é a capacidade de se absorver deformações.

Em Selmo (1989 apud TRISTÃO, 1995) é comentado que as argamassas de revestimentos devem apresentar capacidade de deformação para se deformar sem ruptura ou através de microfissuras que não comprometam a aderência, estanqueidade e sua durabilidade.

Para expressar a ductilidade das argamassas para esforços de compressão mede-se o módulo de elasticidade, que pode ser obtido através do método estático ou dinâmico. O módulo dinâmico é mais adequado para análise de tensões de estruturas sujeitas a terremoto ou carga de impacto (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Porém, no I WORKSHOP para apresentação de resultados de pesquisas sobre módulo de elasticidade, realizado por pesquisadores do Consórcio Setorial para Inovação em Tecnologia de Revestimentos de Argamassa (CONSITRA) citado por Silva N. (2006), resolveu-se adotar o método dinâmico para a determinação do módulo de elasticidade pelo fato de que é um ensaio não destrutivo e de fácil execução, determinado através de ondas ultra-sônicas.

Mas ainda há muitas discussões sobre o método a ser adotado. Neste trabalho, usou-se o método estático que é dado pela declividade da reta tangente da curva tensão-deformação, cujo carregamento estático, foi o de compressão.

### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

---

A revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2 revelou alguns fatos a respeito de estudos sobre a utilização dos resíduos de caulim no desenvolvimento de argamassas e concretos.

- (i) grande número de pesquisas sobre o potencial do resíduo argiloso no desenvolvimento de pozolanas, porém pouco estudo sobre a variabilidade da composição destes resíduos;
- (ii) escassez de estudos envolvendo o resíduo arenoso da indústria do caulim;
- (iii) ausência de estudos que envolvam a combinação dos dois tipos de resíduo de caulim no desenvolvimento de argamassas.

Diante disto, esta pesquisa visa esclarecer algumas questões a respeito da potencialidade desses resíduos no uso de argamassas. A Tabela 3.1 apresenta os objetivos específicos utilizados neste trabalho com indicação dos ensaios relativos a cada um deles.

Tabela 3.1 Objetivos específicos e ensaios correspondentes

Objetivos	Ensaio e Procedimentos
Caracterizar qualitativamente e quantitativamente os parâmetros físicos e mineralógicos dos resíduos;	<ul style="list-style-type: none"> <li>- massa específica</li> <li>- área específica (Blaine)</li> <li>- massa unitária solta</li> <li>- análise granulométrica</li> <li>- análise de difração de raios-x</li> <li>- análise por microscópio óptico</li> </ul>
Investigar o potencial pozolânico do resíduo argiloso após beneficiamento (calcinação e moagem);	- índice de atividade pozolânica com cal
Avaliar o papel da distribuição granulométrica do resíduo arenoso como agregado miúdo no desempenho mecânico das argamassas;	<ul style="list-style-type: none"> <li>- resistência à compressão simples</li> <li>- densidade de massa aparente no estado endurecido</li> </ul>
Estudar a eficiência do uso combinado dos resíduos de caulim no desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso;	<ul style="list-style-type: none"> <li>- resistência à compressão simples</li> <li>- densidade de massa aparente seca no estado endurecido</li> </ul>
Correlacionar as argamassas a base de resíduos de caulim com uma de referência (cimento:cal:areia) e outra industriazida;	<ul style="list-style-type: none"> <li>- retenção de água</li> <li>- resistência de aderência à tração</li> <li>- absorção e índices de físicos</li> </ul>
Avaliar o potencial térmico do resíduo arenoso nas argamassas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- resistência à compressão simples</li> <li>- tensão <math>\times</math> deformação e módulo de elasticidade</li> </ul>

### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental adotado neste trabalho pode ser resumido como no fluxograma apresentado (Figura 3.1):

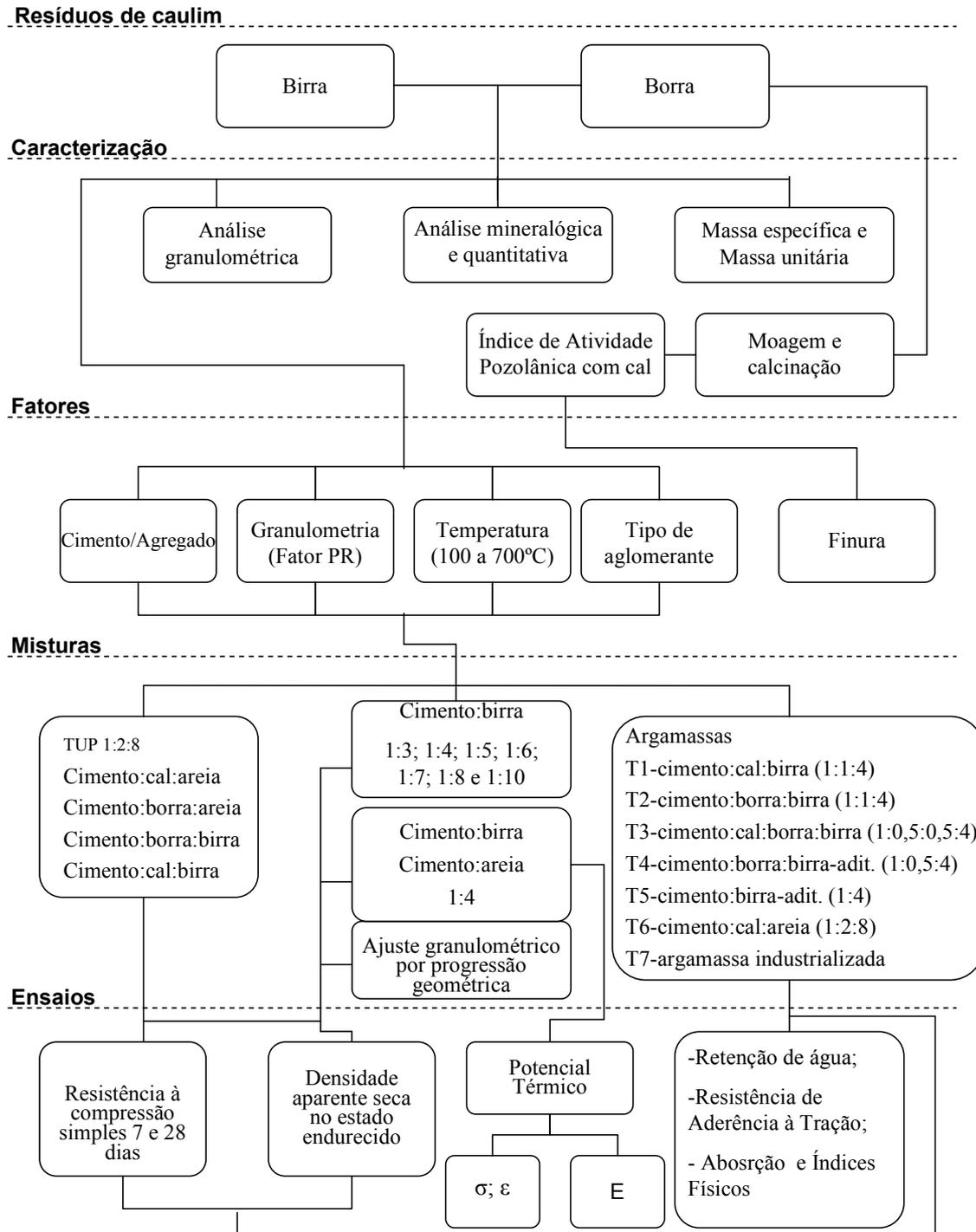


Figura 3.1 Fluxograma do planejamento experimental

## 3.2 MATERIAIS

### 3.2.1 Cimento Portland

Utilizou-se um cimento Portland CP II Z 32. No laboratório o cimento, foi acondicionado em sacos plásticos devidamente lacrados visando à manutenção das suas propriedades até o momento de sua utilização. Este cimento foi escolhido por ser um dos mais utilizados na região e mais facilmente disponível.

As características físicas obtidas em laboratório para este cimento encontram-se na Tabela 3.2:

**Tabela 3.2 Características físicas do cimento Portland CP II Z 32**

<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Área Específica (cm<sup>2</sup>/g)</b>
3,00	1,08	4.289,12

Na Tabela 3.3 é mostrado o resultado da análise química do cimento por efluorescência de Raio-X realizada em laboratório.

Tabela 3.3 Características química do cimento Portland CP II Z 32

Óxidos	%
CaO	84,46
SiO <sub>2</sub>	5,19
SO <sub>3</sub>	1,94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,41
K <sub>2</sub> O	1,46
MgO	0,61
SrO	0,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10
ZnO	0,06
Na <sub>2</sub> O	0,24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06
MnO	0,04
NiO	0,03

### 3.2.2 Agregado Miúdo

Foi utilizado o agregado miúdo de rio proveniente da região chamada de Caxitú no Município do Conde, Paraíba, disponível comercialmente. O referido material apresentou módulo de finura, massa unitária em estado solto e massa específica iguais a 1,91, 1,60g/cm<sup>3</sup> e 2,65g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, classificada como areia fina por ter módulo de finura menor que 2.

### 3.2.3 Resíduos da Indústria do Caulim

Os resíduos utilizados nesta pesquisa são provenientes de uma indústria de caulim localizada na região do Junco do Seridó e Juazeirinho (Figura 3.2), no Estado da Paraíba. Essa indústria em seu processo de beneficiamento do caulim gera dois tipos de resíduo, um na forma arenosa chamado popularmente de birra (Figura 3.3) e outro mais fino chamado popularmente de borra (Figura 3.4). Esses resíduos foram armazenados em containers fechados no laboratório até o momento de sua utilização.



Figura 3.2 Mapa com a localização das jazidas de caulim no Estado da Paraíba.

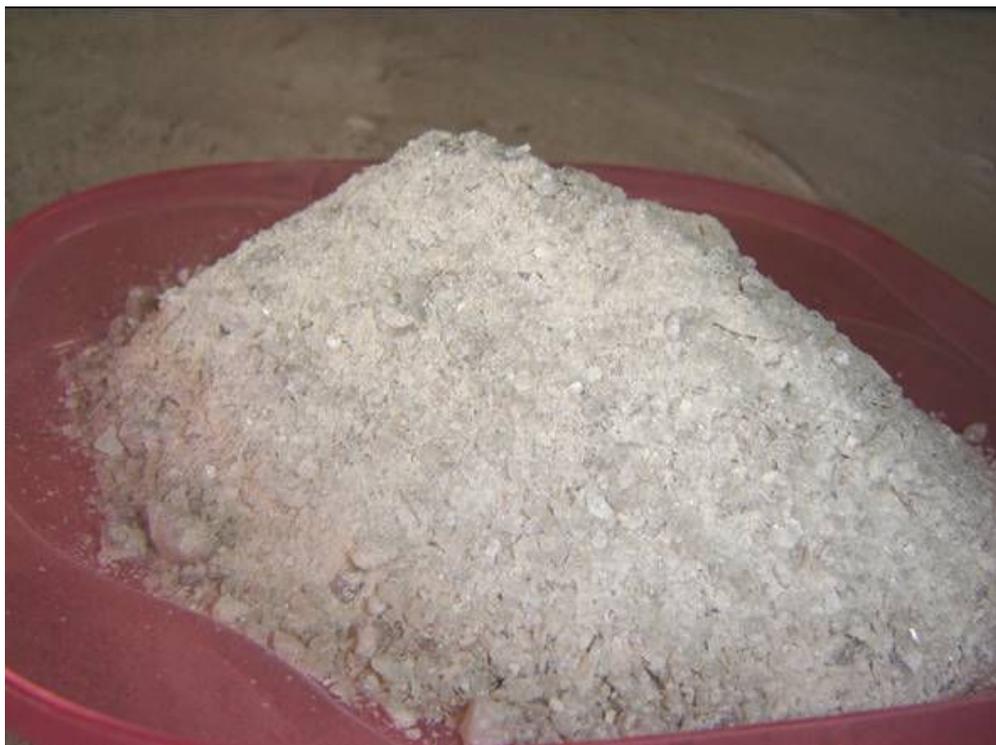


Figura 3.3 Resíduo de caulim arenoso (Birra)



**Figura 3.4** Resíduo de caulim argiloso (Borra)

### **3.2.4 Argamassa Industrializada**

Utilizou-se uma argamassa industrializada do tipo múltiplo uso, obtida no comércio local. Essa argamassa, segundo o fabricante, apresenta-se com as seguintes características de acordo com a NBR 13281 (ABNT 1995): tipo II – alta – c, que correspondem respectivamente a resistência à compressão simples aos 28 dias entre 4,0 e 8,0 MPa; capacidade de retenção de água maior 90% e teor de ar incorporado maior que 18%. A mesma se foi armazenada em saco plástico e lacrada até o momento de seu uso e apresentou os seguintes valores de massa específica e massa unitária obtidos em laboratório, respectivamente,  $2,74 \text{ g/cm}^3$  e  $1,67 \text{ g/cm}^3$ .

### **3.2.5 Cal Hidratada**

A cal utilizada foi do tipo CH-I, obtida no comércio local. Esta cal apresentou as seguintes características físicas determinadas em laboratório: massa específica de  $2,27 \text{ g/cm}^3$ , massa unitária de  $0,43 \text{ g/cm}^3$ .

### 3.2.6 Água

Foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento da UFPB.

### 3.2.7 Aditivo Plastificante

Foi utilizado aditivo plastificante concentrado para argamassas de assentamento e reboco contendo em sua composição básica resinas naturais e apresentando densidade de 1,01 g /cm<sup>3</sup>. A quantidade utilizada para as argamassas foi a recomendada pelo fabricante, de 100ml/50kg de cimento. Esse é um aditivo que já vem sendo bastante utilizado nas argamassas da região de João Pessoa.

## 3.3 MÉTODOS

### 3.3.1 Caracterização dos materiais

#### 3.3.1.1 Resíduo de caulim arenoso (birra)

Este resíduo foi caracterizado fisicamente e mineralogicamente, em sua forma *in natura*. Foram realizados os seguintes ensaios:

- Massa específica através do frasco de Chapman de acordo com a NBR 9776 (ABNT 1987);
- Massa unitária de acordo com a NBR 7251 (ABNT 1982);
- Análise granulométrica através de peneiramento de acordo com a NBR NM 248 (ABNT 2005).
- Análise mineralógica e quantitativa: foi feita uma análise por difração de raios-X, onde as amostras foram refinadas manualmente em um almofariz de porcelana, seguida de peneiramento forçado pela malha #0,038mm. Utilizou-se do difratômetro Siemens D5000, operando com radiação CuK $\alpha$ , 30kV e 30mA, com varredura entre 2 $\theta$  (15°) e 2 $\theta$  (110°). O ensaio foi realizado no Laboratório de Solidificação Rápida, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. A análise quantitativa seguiu a metodologia não-padronizada (ZEVIN L. S. e KIMMEL G., 1995) que

consiste em resolver a matriz de intensidades relativas pelo método dos mínimos quadrados (utilizou-se a ferramenta Solver do Microsoft Excel), com o segue:

$$L C = B, \quad (3.1)$$

Sendo: C – concentração da fase; L – intensidade relativa da fase e B – constante de calibração.

$$C_{IJ} = \sum_{s=1}^m \sum_{k=1}^n [L^T L]_{jk}^{-1} [L^T]_{ks} \quad (3.2)$$

Sendo: s, t – amostras; j – fase cristalina.

$$L_{sj}^t = (I_s)_j / (I_t)_j \quad (3.3)$$

$$B_{ts} = (I_{s,ST})_j / (I_{t,ST})_j \quad (3.4)$$

Sendo: ST - referência analítica interna; I – intensidade de difração de fase

### 3.3.1.2 Resíduo de caulim argiloso (borra)

Esse resíduo foi utilizado de duas formas: *in natura* e passado por um processo de moagem e calcinação. Essa moagem foi realizada em um Moinho de Bolas modelo SONNEX I-4205, fabricado pela CONTENCO, disponível no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas – LABEME da UFPB, no qual foram colocadas 20kg de material seco ao ar para posterior moagens. A carga de bolas usada para moagem do resíduo foi baseado em Alves (2002) que nos seus experimentos utilizou a carga de bolas especificada na Tabela 3.4, visando um melhor desempenho da moagem, essa mesma carga de bolas foi utilizada em tempos equivalentes a 4.500 (72 min), 20.000 (322 min), 40.000 (645 min), 60.000 (968 min) e 80.000 (1290 min) rotações, num total de 5 amostras.

Tabela 3.4 Carga de bolas de volume equivalente a 2% do volume interno do moinho

<b>Diâmetro das Bolas (mm)</b>	<b>Quantidade de Bolas (unid.)</b>
40	3
30	10
25	24
20	108

Após a moagem, cada amostra foi queimada em um forno elétrico a uma temperatura de 700°C, visto que anteriormente acharam-se temperaturas ótimas entre 700°C e 900°C (SANTOS, 1992). O tempo de residência considerado após atingir a temperatura estabelecida foi de duas horas. O aquecimento do forno não se dava de forma precisa e linear. Após atingir a temperatura máxima definida, esta era mantida constante. Em seguida, o forno era desligado e as amostras retiradas, sendo acondicionadas em sacos plásticos etiquetados e lacradas.

Para a caracterização do resíduo *in natura* foram realizados os seguintes ensaios:

- Massa específica pelo frasco de Le Chatelier de acordo com a NBR 6474 (ABNT 1984);
- Massa Unitária conforme NBR 7251 (ABNT 1982);
- Análise granulométrica por peneiramento;
- Caracterização mineralógica de acordo com o descrito no subitem 3.3.1.1;

Quanto ao resíduo beneficiado (moído e calcinado) foram estudadas as seguintes características:

- Massa específica (NBR 6474, 1984);
- Área específica (Finura Blaine) de acordo com a NBR NM 76 (ABNT 1998);
- Índice de Atividade pozolânica com cal de acordo com a NBR 5751 (ABNT 1992).

### 3.3.2 Preparação das argamassas

Para se verificar o potencial desses resíduos como materiais constituintes em argamassas de múltiplo uso, foram preparadas várias combinações de argamassas utilizando traços unitários em peso (T.U.P). Os materiais foram misturados a seco manualmente e depois se adicionou água para se atingir uma consistência pré-estabelecida de 255 mm ( $\pm 1$  mm), verificada na mesa de espalhamento, conforme NBR 13276 (ABNT 1995).

Primeiramente testou-se como base o traço em massa 1:2:8 com as combinações descritas na Tabela 3.5:

**Tabela 3.5 Combinações dos traços**

<b>Traço (TUP)</b>	<b>Materiais</b>
1 : 2 : 8	cimento : borra : areia
	cimento : borra : birra
	cimento : cal : birra
	cimento : cal : areia (referência)

Depois foram feitos traços em massa de cimento e birra, nas relações de 1:3; 1:4; 1:5, 1:6, 1:7, 1:8 e 1:10 e a quantidade de água foi a que conduzia à consistência padrão (NBR 13276, ABNT 1995).

Dentre essas composições estudadas com cimento e birra escolheu-se o traço em que se atingiu uma resistência mínima de 2 MPa (valor baseado na norma americana ASTM C 270-82), e fez-se um estudo quanto à composição granulométrica da birra, tomando como base o estudo de Carneiro (1999). Este propõe um modelo matemático para se obterem curvas granulométricas teóricas. Essas curvas se apresentam com uma distribuição granulométrica contínua, a fim de se obter máxima compactidade, levando em conta a trabalhabilidade. Para gerar as curvas granulométricas, Carneiro (1999) adotou a equação do somatório de uma progressão geométrica (P.G), equação 3.5:

$$S_n = A(1 - P_r^n) / (1 - P_r) \quad (3.5)$$

Sendo:

- **A** é o primeiro termo do somatório, correspondente à quantidade de material retido na peneira de abertura máxima, logo abaixo da peneira de abertura máxima característica; a dimensão máxima característica da Birra foi de 2,4mm, então **A** corresponde a porcentagem retida na peneira de malha 1,2mm.
- **Pr** é a razão entre as quantidades em massa retidas em cada peneira. O valor de **Pr** nunca poderá ser igual a 1;
- **n** é o número de termos, ou de constituintes da P.G. Neste trabalho considera-se cada fração granulométrica do agregado como um constituinte da argamassa.

O primeiro termo do somatório é calculado a partir da Equação 3.5, admitindo-se  $S_n = 100$ ; logo, substituindo-se na Equação 3.5 tem-se a Equação 3.6:

$$A = 100 (1 - Pr)/(1 - Pr^n) \quad (3.6)$$

Por definição, os próximos termos da série geométrica correspondentes aos valores de porcentagem de material retido nas peneiras subseqüentes são obtidos através da Equação 3.7:

$$A_{n+1} = A_n \times Pr, \text{ com } Pr < 1 \quad (3.7)$$

No estudo realizado por Carneiro (1999), através de tentativas de cálculo, a partir da equação (3.5), concluiu-se que é possível obterem-se curvas com distribuição contínua para valores de  $Pr$  acima de 0,7. Quanto mais próximo de 1 for o valor de  $Pr$ , maior será a compacidade na argamassa e a continuidade no perfil da curva granulométrica.

Neste trabalho foram usadas quatro frações de agregado retidas nas peneiras de malhas 1,2mm; 0,6mm; 0,3mm; 0,15mm e uma de aglomerante, e adotou-se para  $n$  o valor igual ao número de frações usado, 4. Para o fator  $Pr$ , adotou-se analisar três valores, 0,7; 0,8 e 0,9. Na Tabela 3.6 é mostrada a distribuição granulométrica, gerada pelas equações, para cada valor de  $Pr$ . A parte que se refere ao fundo foi desprezada neste estudo. As três combinações de Birra compostas de acordo com a Tabela 3.6 foram denominadas nesse trabalho de Birra 07, Birra08 e Birra09.

Tabela 3.6 Porcentagem retida em cada peneira

Peneiras	Birra 0,7	Birra 0,8	Birra 0,9
2,40	0,00	0,00	0,00
1,20	39,98	33,88	29,08
0,60	27,64	27,10	26,17
0,30	19,34	21,68	23,55
0,15	13,54	17,34	21,20
fundo	0	0	0

Ainda para avaliar o potencial desses resíduos nas argamassas de múltiplo uso, estudaram-se composições de traços de argamassa, com base no traço mais adequado. As composições estudadas foram as seguintes (Tabela 3.7):

Tabela 3.7 Composições de traços estudados

Nome	Traços (TUP)	Materiais
T1	1 : 1 : 4	Cimento:cal:birra
T2		Cimento:borra:birra
T3	1 : 0,5 : 0,5 : 4	Cimento:cal:borra:birra
T4	1 : 0,5 : 4	Cimento:borra:birra + aditivo
T5	1 : 4	Cimento: Birra + aditivo

### 3.3.3 Ensaio nas argamassas

#### 3.3.3.1 Resistência à Compressão Simples

O ensaio resistência à compressão simples foi feito em conformidade com a NBR 7215 (ABNT 1994) nas idades de 7 e 28 dias. As argamassas foram moldadas em moldes cilíndricos de 5x10 cm. A cura se deu por imersão em água à temperatura ambiente (cerca de 28°C).

### 3.3.3.2 Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido

A densidade de massa aparente foi obtida conforme a norma NBR 13280 (ABNT 1995).

### 3.3.3.3 Retenção de Água

A retenção de água foi determinada conforme o prescrito na NBR 13277 (ABNT 1995) (Figura 3.5).



Figura 3.5 Dispositivos utilizados (esquerda) e execução do ensaio de retenção (direita)

### 3.3.3.4 Resistência de Aderência à Tração

A resistência de aderência à tração foi avaliada nas argamassas em painéis de alvenaria cerâmica com dimensões de 60x60cm (Figura 3.6), que foram revestidos por uma camada de argamassa de chapisco no traço 1:4 – cimento:areia em volume antes de se revestir com a argamassa em estudo (Figura 3.7). A determinação da resistência de aderência se deu conforme NBR 13528 (ABNT 1995), Figura 3.8.



Figura 3.6 Painel sem chapisco (esquerda) e painel com chapisco (direita)



Figura 3.7 Aplicação da argamassa no painel



Figura 3.8 Painel com as placas para ensaio de aderência.

### 3.3.3.5 Ensaio de Absorção

Os ensaios de absorção foram executados por capilaridade e por imersão total. As amostras foram obtidas em moldes cilíndricos de 5x10cm e curadas em água a temperatura ambiente ( $23^{\circ} \pm 2$ ) até a idade de 7 dias. A cura nas primeiras 24 horas foi efetuada em

ambiente de laboratório (ao ar e em temperatura ambiente - cerca de 28°C) ainda nos próprios moldes. Foram moldados 28 corpos de prova, sendo 14 para o ensaio por capilaridade e 14 para o ensaio por imersão total, duas amostras por mistura.

A determinação da absorção por capilaridade obedeceu aos critérios da NBR 9779 (ABNT 1995). Para a absorção por imersão foram seguidos os critérios da NBR 9778 (ABNT 1987), que também permite a determinação do índice de vazios e da massa específica real. Neste ensaio as amostras, após o tempo de cura, foram secas em estufas ( $105^{\circ} \pm 5$ ) e depois imersas em água a temperatura ambiente por 72 horas.

As Figuras 3.9 e 3.10 referem-se à realização do ensaio por capilaridade nas amostras de argamassas estudadas. Além das argamassas listadas na Tabela 3.7 do subitem 3.3.2, todos esses ensaios expostos no subitem 3.3.3, foram estudados também para uma argamassa usual de traço 1:2:8 – cimento:cal:areia, chamada neste trabalho de T6 e uma industrializada, chamada de T7.



**Figura 3.9** Ensaio de absorção por capilaridade



Figura 3.10 Controle do nível da água no ensaio de absorção por capilaridade

### 3.3.3.6 Estudo do Potencial Térmico

Para uma avaliação preliminar de um possível potencial térmico do resíduo de caulim arenoso (birra) visando a sua utilização em argamassas térmicas, foram estudadas argamassas contendo cimento:birra e cimento:areia na proporção em massa de 1:4. Moldaram-se corpos de prova cilíndricos de 5x10cm e esses corpos de provas foram submetidos à cura submersa em água durante 28 dias e depois, à um processo de calcinação em sete temperaturas diferentes (100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C e 700°C). Para isto foi utilizado um forno elétrico da marca Elektro Therm. O aquecimento do forno não se dava de forma precisa e linear, porém, após atingir a temperatura máxima definida, esta era mantida constante por um período de duas horas. Os corpos de prova eram resfriados com a câmara aberta até a temperatura ambiente e depois eram retirados para os ensaios de carregamento e ruptura.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CAULIM

#### 4.1.1 Análise Mineralógica (DRX) e Quantitativa

A Figura 4.1 mostra o DRX do resíduo argiloso (Borra) *in natura* e após calcinado à 700° C por 2 horas.

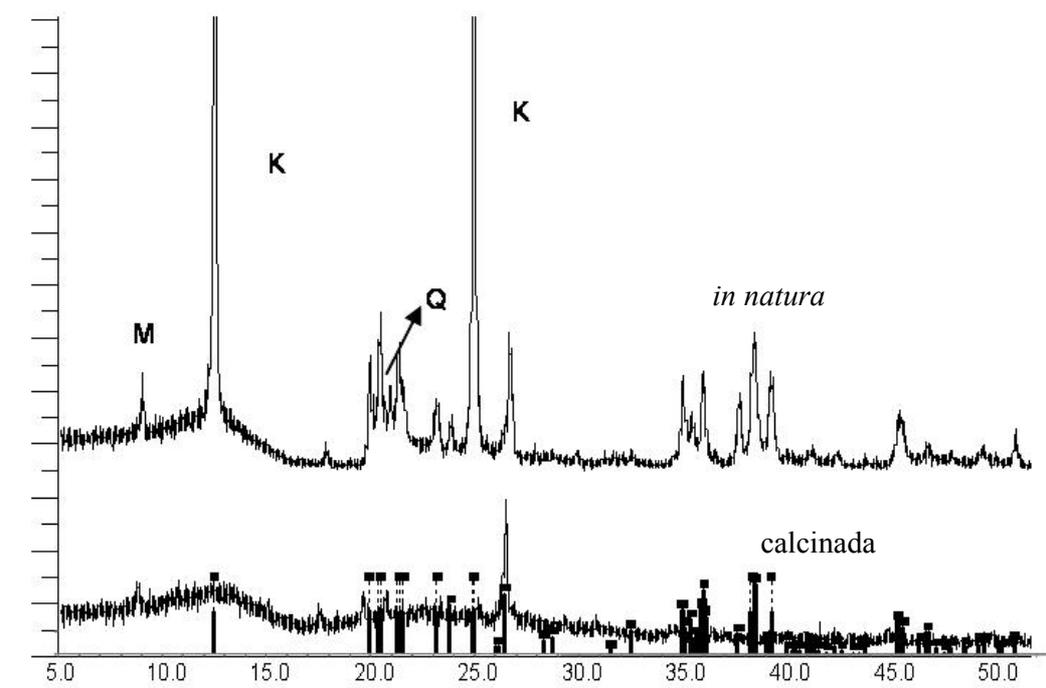


Figura 4.1 Difratograma do rejeito de caulim calcinado e *in natura* (sem calcinar).

O DRX revelou que o resíduo argiloso (Borra) contém caulinita (K), quartzo (Q), mica (M) e calcita. Após a calcinação, os picos de caulinita desapareceram devido à formação de

metacaulinita, como esperado. Isto indica que este rejeito pode ter propriedades pozolânicas relacionadas com a presença desta fase amorfa.

Na Figura 4.2 mostra-se o padrão difratométrico das frações da birra e na Figura 4.3 o da areia.

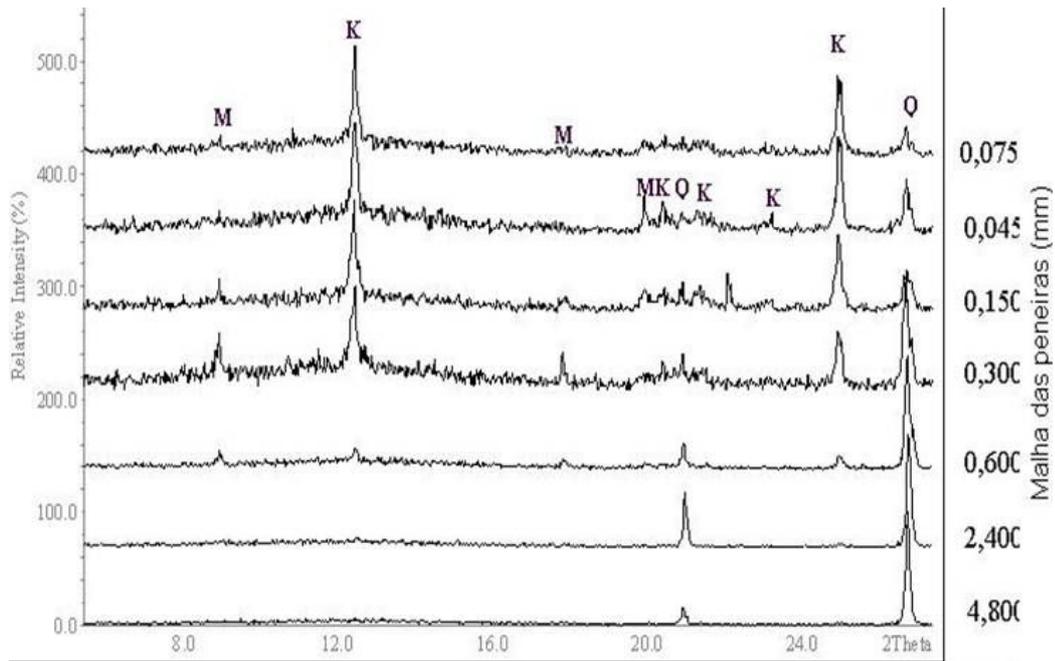


Figura 4.2 Difratoograma das Frações da Birra

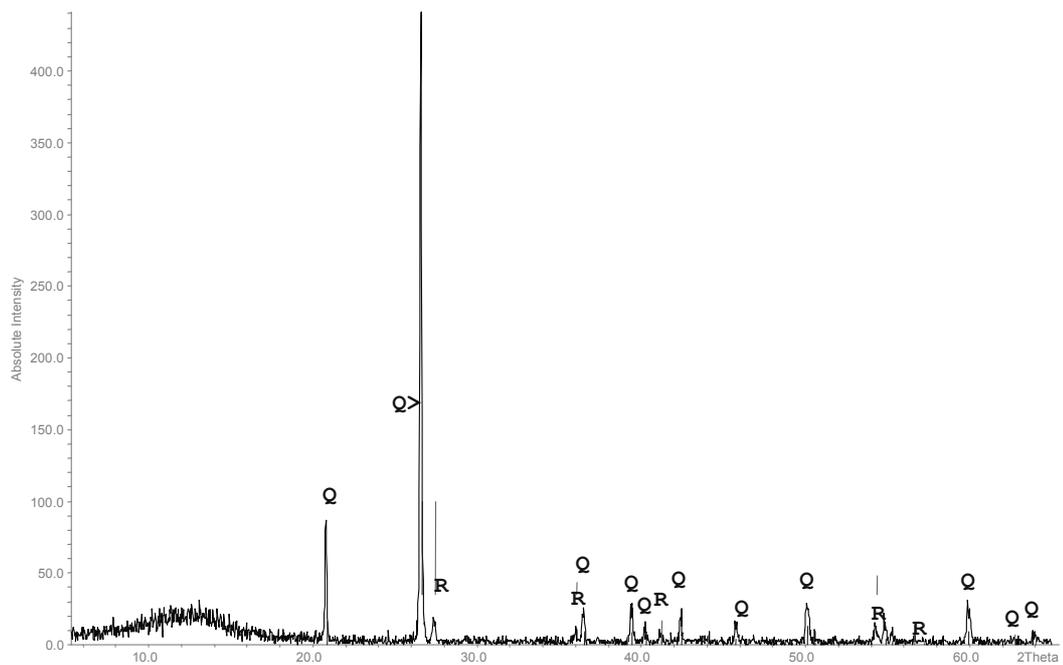


Figura 4.3 Difratoograma da areia caxitú

O DRX da areia, (Figura 4.3) revelou a presença predominante de quartzo em toda sua mineralogia. Para a birra observou-se a presença de caulinita (K), quartzo (Q), mica (M) e traços de calcita (C). Também houve uma variação mineralógica com as frações granulométrica, onde a concentração de quartzo prevaleceu sobre a caulinita e a mica nas frações mais grossas e nas as frações mais finas, menores de que 1,2mm ocorre o inverso no caso da caulinita (R – referência interna de rutilo). No entanto, uma análise quantitativa indica que a concentração de cada fase cristalina variou com a fração granulométrica, como pode ser observado nas Figuras 4.4 e 4.5.

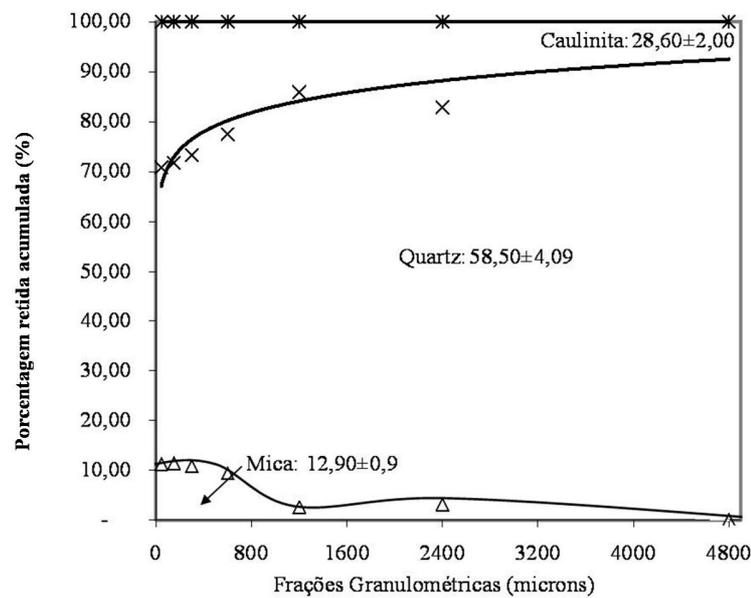


Figura 4.4 Análise Quantitativa das Frações Granulométricas da Birra

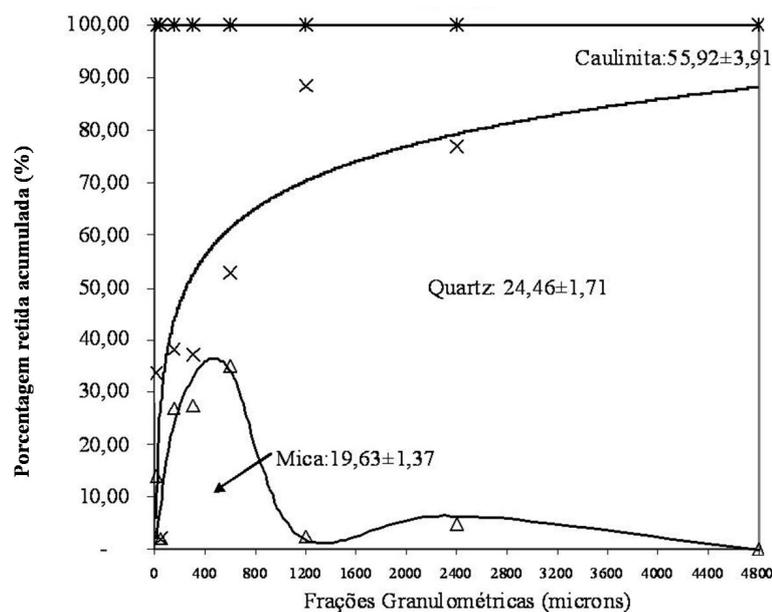


Figura 4.5 Análise Quantitativa das Frações Granulométricas da Borra

Enquanto o quartzo predominou nas frações mais grossas, a concentração de caulinita prevaleceu nas frações mais finas em ambos os tipos de resíduos. A predominância de caulinita foi observada na borra (Figura 4.5), enquanto que o quartzo teve maior concentração na birra (Figura 4.4).

#### 4.1.2 Massa Específica e Massa Unitária

Os valores de massa específica e massa unitária dos dois resíduos de caulim (Birra e Borra) estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Massa específica e unitária dos resíduos

<b>Materiais</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Birra	2,64	1,300
Borra	2,58	0,660

Observa-se que a massa específica da birra é semelhante à do agregado miúdo (areia caxitú), que é da ordem de 2,650 g/cm<sup>3</sup>. Com relação à massa unitária, vê-se que a Birra é um material mais leve, pois sua massa unitária se apresenta inferior ao da areia caxitú, que é de 1,60 g/cm<sup>3</sup>. Com relação à borra tanto os valores de massa específica e massa unitária se apresentam diferentes daqueles da cal, que são na ordem de 2,27 g/cm<sup>3</sup> e 0,43 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

#### 4.1.3 Análise Granulométrica

As curvas granulométricas do resíduo arenoso de caulim e da areia caxitú encontram-se na Figura 4.6.

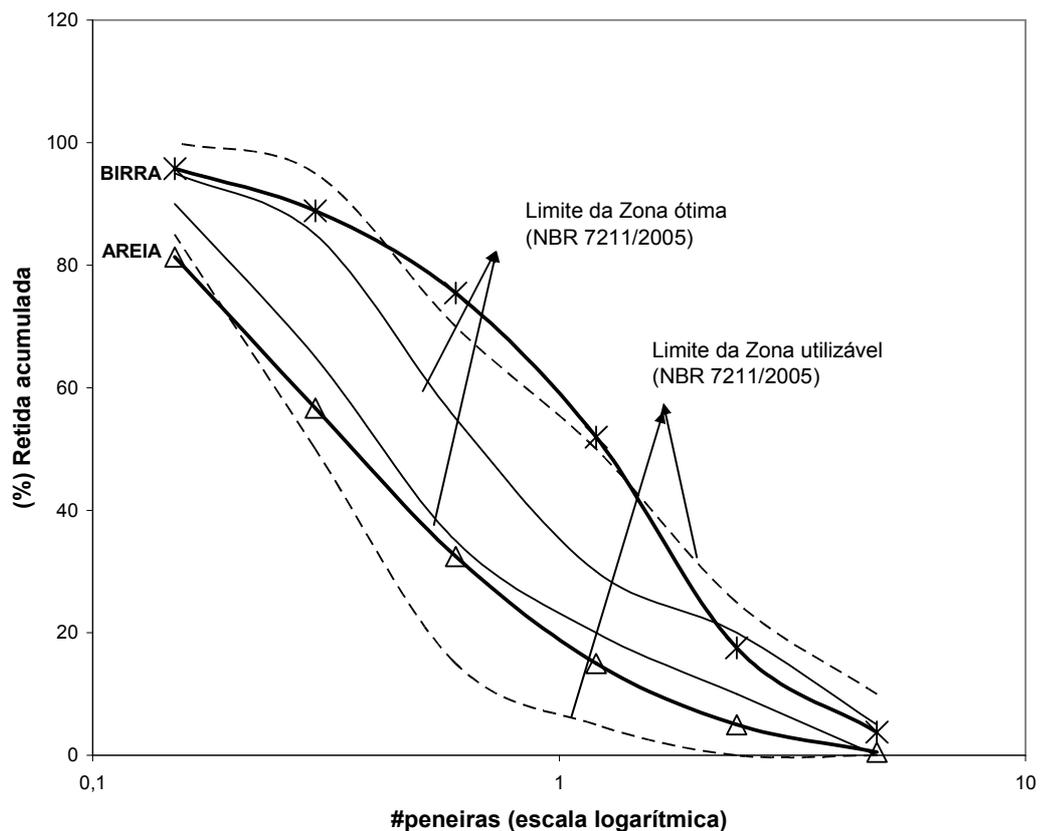
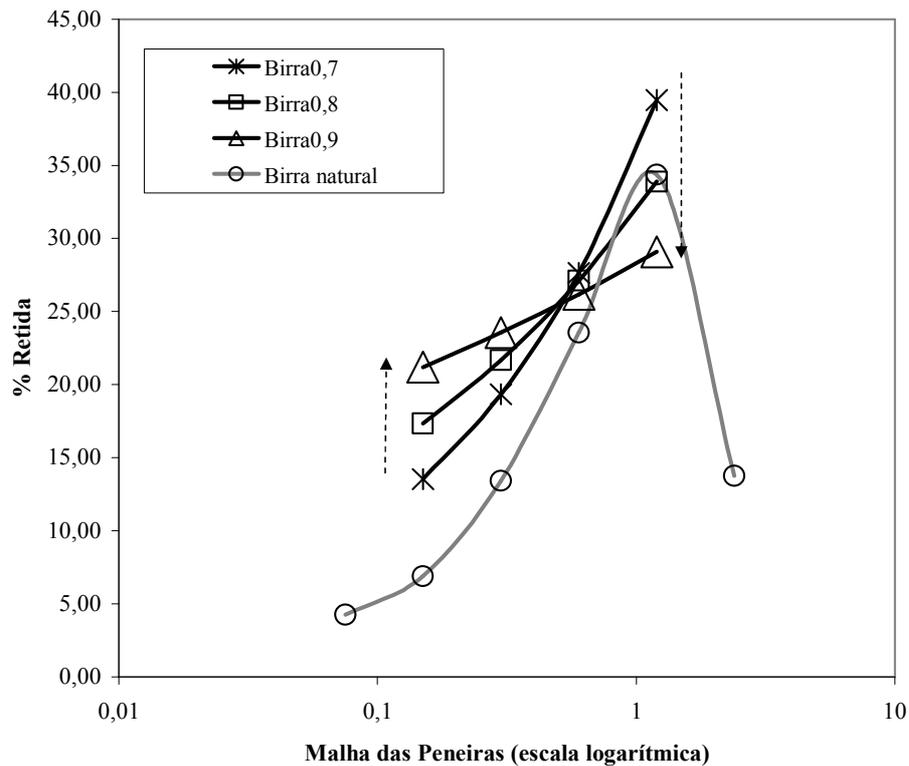


Figura 4.6 Curvas Granulométricas: birra e areia caxitú.

Esta distribuição granulométrica condiz com o que pode ser percebido macroscopicamente nos materiais, visto que a birra apresenta bem mais material fino que a areia, cujo material fino assemelha-se ao caulim beneficiado, com exceção da presença de um material brilhante, possivelmente micáceo. De acordo com os limites de curvas granulométricas da NBR 7211 (ABNT 2005), a curva da birra se apresentou próximo da região superior da zona utilizável, enquanto que a curva da areia foi próxima da região inferior. Na análise granulométrica, pode-se observar que para o mesmo intervalo de peneiras, entre as malhas 1,20mm; 0,60mm; 0,30mm e 0,15mm, a birra apresenta uma maior quantidade de finos em relação à areia Caxitú. Enquanto os finos da areia Caxitú são constituído basicamente de quartzo, os finos da Birra são predominantemente constituídos de caulinita e mica.

## 4.2 EFEITO DA VARIAÇÃO GRANULOMÉTRICA NO AGREGADO

Na Figura 4.7 estão representadas tanto as curvas granulométricas referentes à Birra quanto às curvas geradas pelas equações do Capítulo 3 do subitem 3.3.2 com a variação do Pr.



**Figura 4.7** Curvas granulométricas teóricas geradas com a variação do Pr e da birra *in natura*

Pode-se observar que para um maior valor de Pr as quantidades de finos aumentam e têm efeito contrário na fração mais grossa. A curva da Birra *in natura* aparece mais próxima da curva da Birra 07.

Na Figura 4.8 é mostrada a variação da massa unitária da birra depois de ajustada sua granulometria de acordo com a Figura 4.7 em relação à variação do valor de Pr. E na Figura 4.9 pode ser vista uma comparação das massas unitárias das frações da birra e da areia.

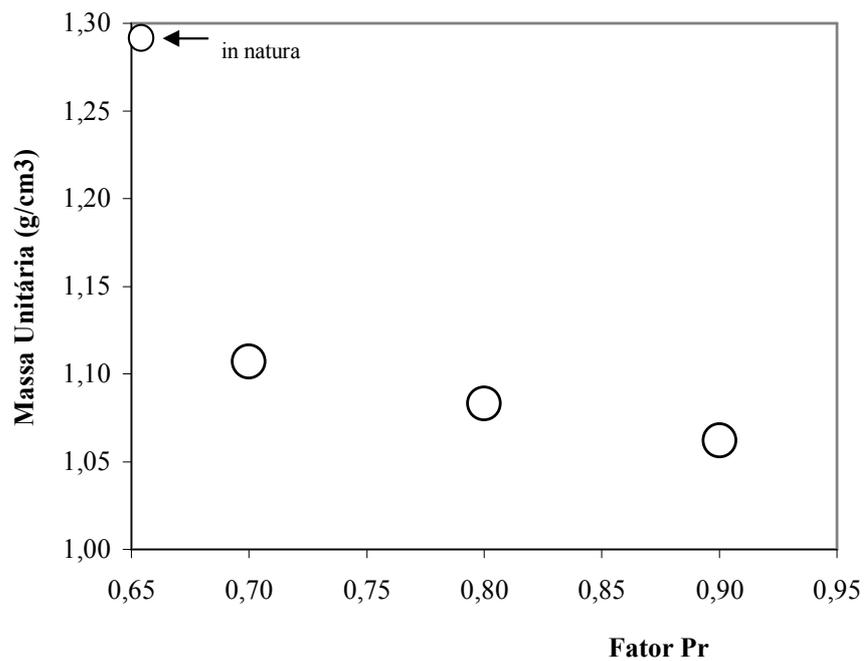


Figura 4.8 Massa Unitária versus Variação do Pr da birra

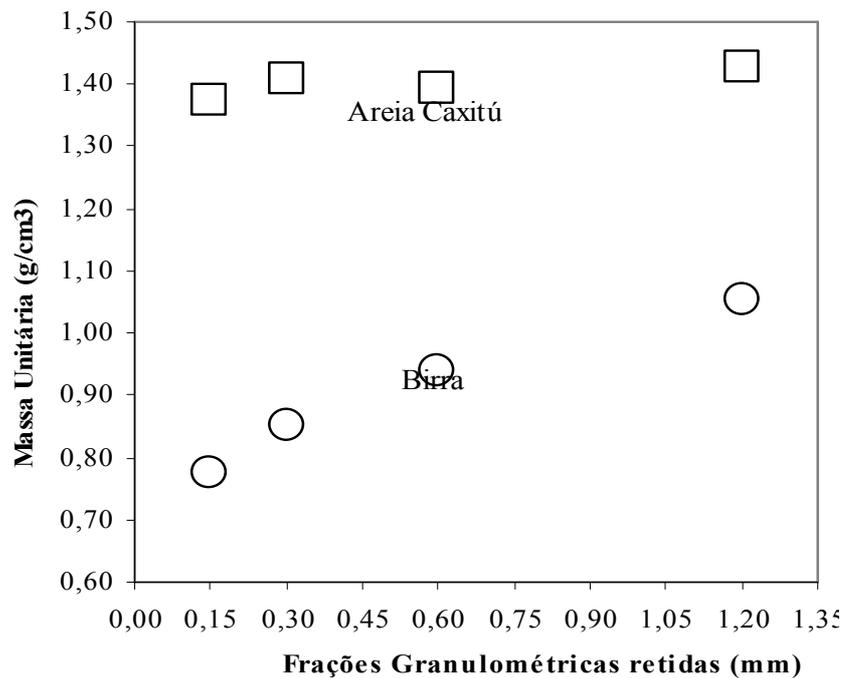


Figura 4.9 Massa unitária das frações retidas nas peneiras

Como pode ser visto na Figura 4.8, o valor da massa unitária da birra diminuiu significativamente com o aumento do Pr. Certamente, o efeito oposto do Pr nas frações extremas da curva granulométrica favorece o aumento de partículas finas, cujas massas aparentes apresentaram valores bem inferiores de massa unitária (Figura 4.8). Embora a

redução da massa unitária com o aumento do Pr também já tenha sido observada em estudos com areias quartzosas (CARNEIRO, 1999), a taxa desta variação apresentou-se bem mais acentuada na Birra do que na areia quartzosa (Figura 4.7). Isto pode ser explicado pela maior concentração de materiais argilosos nas frações finas, afetando o empacotamento dos agregados (OLIVEIRA et al., 2000). Uma menor massa unitária e maior concentração de materiais argilosos podem conferir melhores desempenho de argamassas destinadas ao desenvolvimento de refratários (OLIVEIRA et al., 2000). Existem, no entanto, outros fatores que afetam a massa unitária como, por exemplo, o fator de empacotamento e esfericidade dos agregados.

A Figura 4.10 mostra uma curva teórica monofásica, que quer dizer de mesmo diâmetro, para esferas em função da massa unitária e fração granulométrica, na qual se vê que teoricamente ocorre uma situação contrária ao que acontece na prática com a birra composta nas três granulometrias diferentes (Figura 4.7), a massa unitária diminuiu. Em Oliveira et al (2000) é explicado que misturas de partículas com baixas concentrações de partículas não esféricas, não apresentam redução acentuada na densidade. Para aquelas misturas com maior concentração de partículas não esféricas, a estrutura de empacotamento é destruída e ocorre a diminuição da densidade.

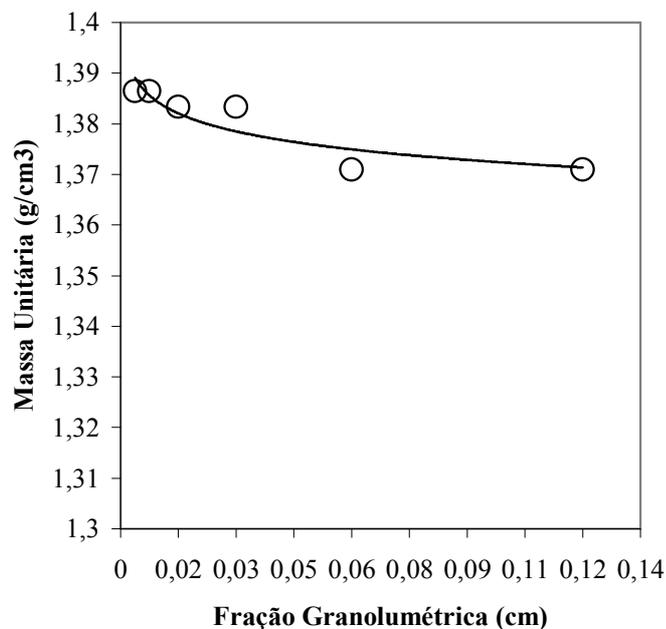
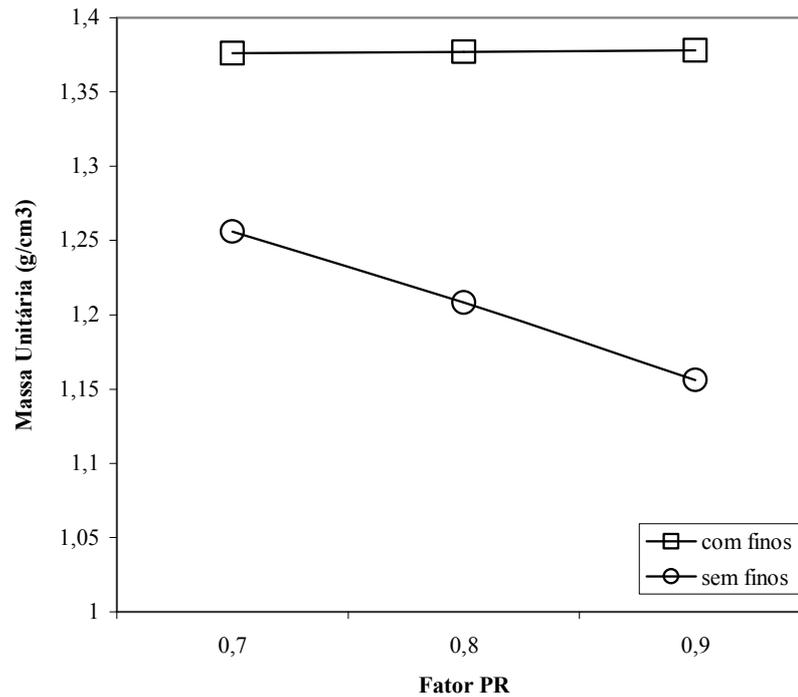


Figura 4.10 Curva teórica monofásica para esferas

Outro fator que influenciou numa acentuada redução da massa unitária da birra com fator Pr07, Pr08 e Pr09 foi a quantidade de finos. Na Figura 4.11 vê-se a variação da massa

unitária de uma mistura contendo os finos e outra sem os finos em função do valor do Pr. Observa-se que quando há uma presença maior de material mais fino a massa unitária também tende a não diminuir, diferentemente de quando não se tem essa fração mais fina. Como para a composição dessas granulometrias da birra foi desprezada a fração mais fina, ou seja, aquela que passa na peneira 100 da ABNT (#0,15mm), então essa menor quantidade de finos na mistura explica porque a redução da massa unitária é mais acentuada.



**Figura 4.11** Massa unitária em função da variação do Pr (com finos e sem finos)

A birra apresenta em sua composição grandes quantidades de partículas não esféricas, além de uma variação na mineralogia, como mostrada anteriormente na Figura 4.5. Na Figura 4.12 é apresentada uma comparação microscópica do formato dos grãos de cada fração usada da birra e da areia, à medida que a finura aumenta. Também é possível observar que apenas as frações inferiores a 0,60mm da birra conseguiram ser focadas na sua superfície, enquanto que isto não ocorre em nenhuma fração de areia. Isto evidencia que as partículas finas da birra se aproximam de uma estrutura lamelar semelhante ao grão de caulinita.

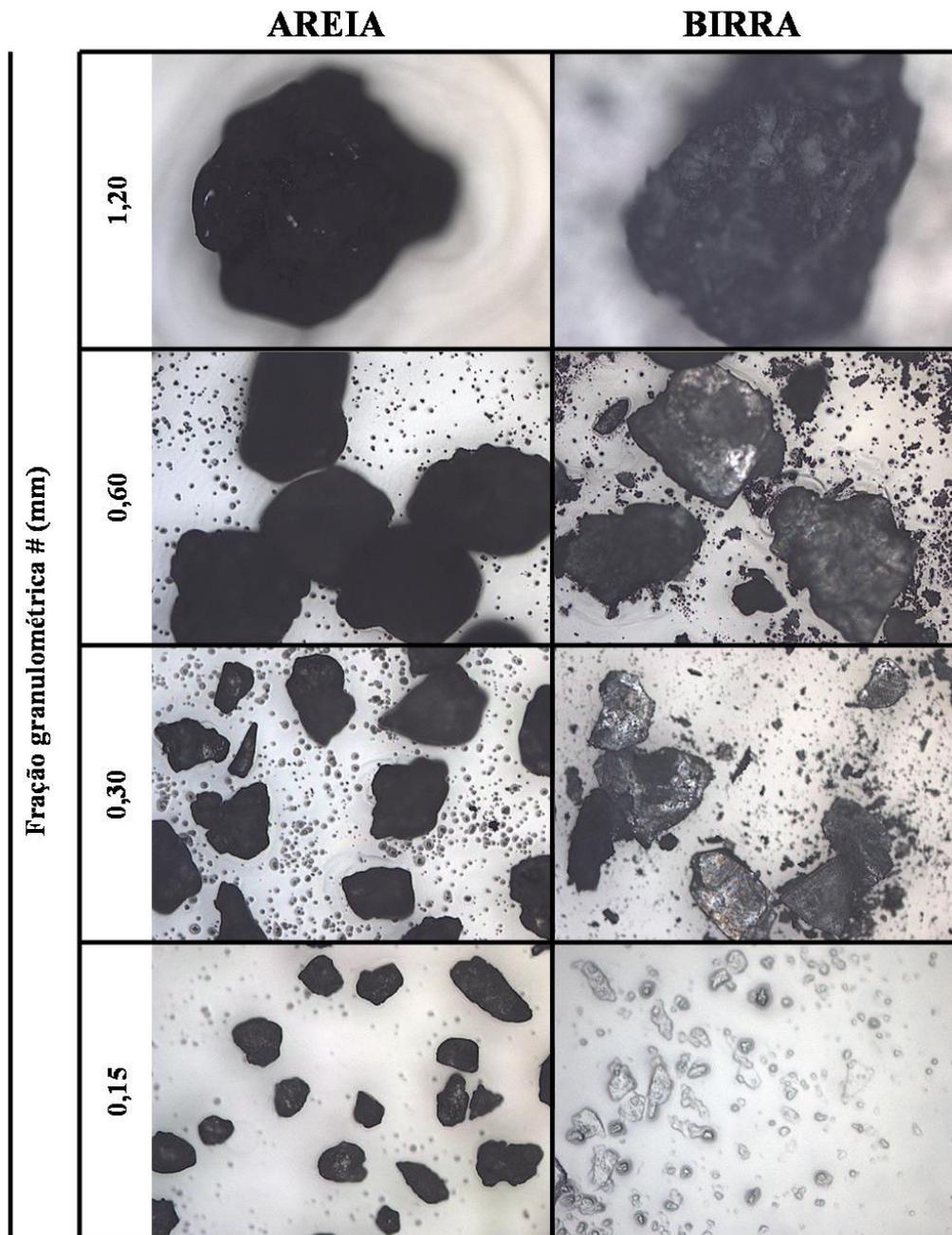


Figura 4.12 Frações da birra e da areia vistas no microscópio óptico.

Quanto à esfericidade da birra e da areia, na Figura 4.13 é apresentada uma relação dos diâmetros das partículas de cada fração em função da fração granulométrica. Vê-se que na quanto mais finas as partículas, menos esféricas elas são, sendo que a birra se apresenta mais distante da forma esférica em relação à areia. Isto é comprovado na Figura 4.13.

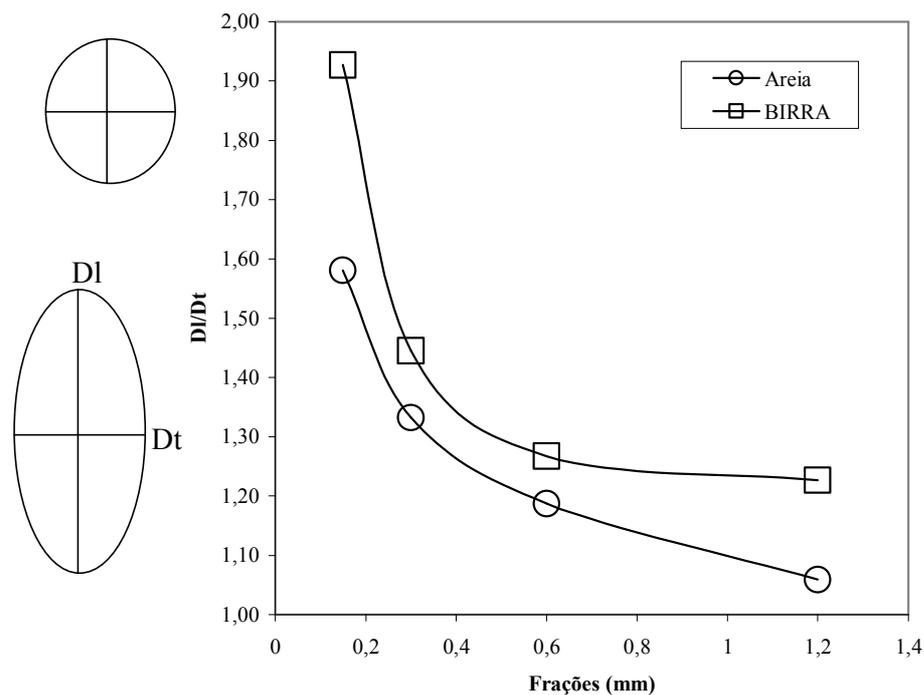


Figura 4.13 Frações dos grãos retidos *versus* esfericidade do grão

Devido às condições instaladas no microscópio óptico, a esfericidade, como mostrada na Figura 4.13, refere-se apenas à relação do diâmetro máximo sobre o diâmetro mínimo de cada partícula na fração.

### 4.3 EFEITO DO BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO ARGILOSO (BORRA) NA MASSA ESPECÍFICA, ÁREA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL

#### 4.3.1 Massa Específica e Área Específica

Os resultados obtidos de massa específica e área específica da borra em função do aumento de rotações do moinho podem ser observados na Tabela 4.2. A massa específica da borra não foi significativamente alterada com o aumento das rotações como esperado o que indica a ausência de transformações de fases durante o processo de moagem.

Tabela 4.2 Massa específica e área específica da borra in natura e em diversas rotações no processo de moagem

	Rotações	Tempo de moagem (min)	Temperatura de calcinação	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Área Específica (cm <sup>2</sup> /g)
Borra <i>in natura</i>	-	-	-	2,58	2.819,50
Borra calcinada e moída	4.500	72	700° C	2,49	6.839,00
	20.000	322		2,50	8.428,00
	40.000	645		2,51	10.269,00
	60.000	968		2,50	12.089,00
	80.000	1290		2,50	12.164,00

A variação da superfície específica (Finura Blaine) da borra calcinada devido às rotações da moagem já estabelecidas pode ser visto na Figura 4.14.

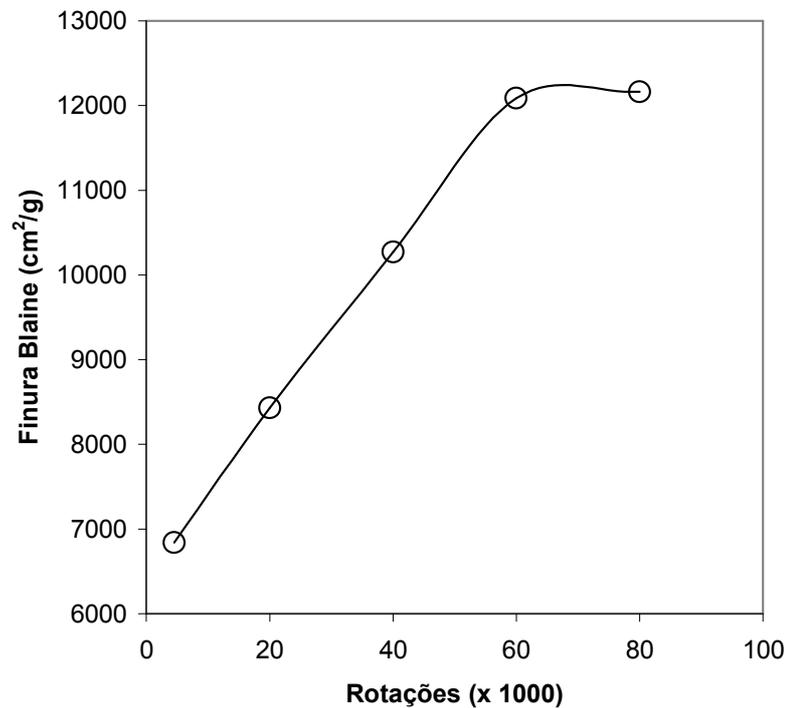


Figura 4.14 Variação da finura da borra com o tempo de moagem

Como pode ser observado, o aumento das rotações no processo de cominuição resultou num aumento da superfície específica do material como esperado. Porém, este refinamento ocorreu de forma quase linear até cerca de 60 000 rotações. Esta tendência foi

também observada para caulinitas puras (SOUZA, 2003) que para maiores tempos de moagem houve uma diminuição na superfície específica, ou seja, obteve-se um material menos fino. Isto pode estar relacionado com uma possível aglutinação das partículas da argila caulínica. Depois de muito tempo no moinho, as partículas pequenas são unidas novamente pelo choque com as bolas do moinho, impedindo a progressão do processo de cominuição.

#### 4.3.2 Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com Cal

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de índice de atividade pozolânica (IAP) em argamassas contendo cal, em função da finura da borra calcinada obtida com o processo de moagem em diversas rotações, encontram-se apresentados na Figura 4.15.

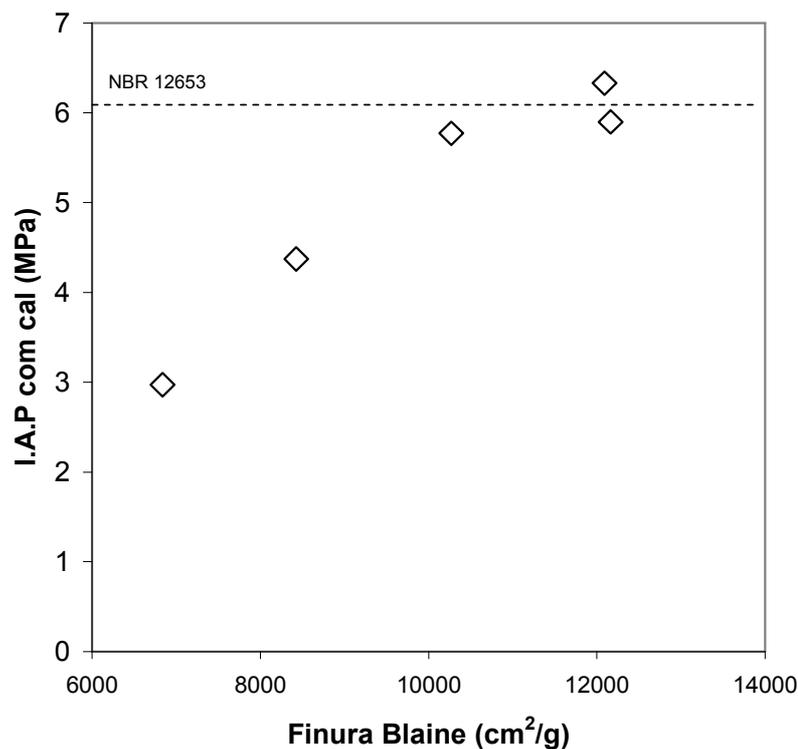


Figura 4.15 IAP com cal da borra e sua variação com a finura

De acordo com Nóbrega et al (2005), o resíduo caulínico Borra, *in natura*, apresentou valores inferiores aos prescritos pela NBR 12653 (ABNT 1992), mesmo com ativação térmica. No entanto, foi constatado que o refinamento da borra através da moagem e calcinação levou a um incremento no IAP, embora o valor normativo mínimo de 6 MPa somente tenha sido atingindo para finuras superiores a 10.000 cm<sup>2</sup>/g. Outros estudos (SOUZA

2003; BARATA e DAL MOLIN, 2002) mostraram que o resíduo de caulim da região do Pará, passando por processo de beneficiamento semelhante, tem alto potencial pozolânico, porém, estes estudos não mencionam a composição mineralógica quantitativa. Embora o IAP tenha aumentado com a finura, este aumento não foi linear. Isto também já foi constatado por Vieira (2005) no estudo do resíduo da cerâmica vermelha cuja composição contém caulinita calcinada. Em Souza (2003) observou-se um aumento na fração granulométrica maior com o aumento do tempo de moagem, possivelmente devido a uma aglutinação da argila caulinitica, diminuindo a superfície específica e, conseqüentemente, comprometendo o aumento da atividade pozolânica (MASSAZZA, 1993).

#### 4.4 EFEITO DA COMBINAÇÃO DO RESÍDUO ARENOSO (BIRRA) E RESÍDUO ARGILOSO (BORRA) *IN NATURA* NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS ARGAMASSAS

Na Tabela 4.3 são apresentados os dados referentes às argamassas de traço 1:2:8 utilizando a borra in natura e a birra em sua composição. Na Figura 4.16 estão representados os resultados referentes ao desempenho das argamassas quanto à sua resistência à compressão simples nas idades de 7 e 28 dias e na Figura 4.17 vê-se a correlação da relação água/sólidos com a resistência à compressão simples.

Tabela 4.3 Dados referentes às argamassas de traço 1:2:8

Mistura	T.U.P	Consistência (cm)	Fator água/ sólidos	Fator água/ cimento	Resistência à compressão (MPa)	
					7 dias	28dias
Cimento/cal/birra	1:2:8	24,50	0,28	3,09	0,62	0,66
Cimento/borra/ birra	1:2:8	25,00	0,30	3,27	0,53	0,67
Cimento/borra/areia	1:2:8	26,50	0,22	2,41	1,09	1,43
Cimento/cal/areia	1:2:8	26,00	0,19	2,09	1,66	2,07

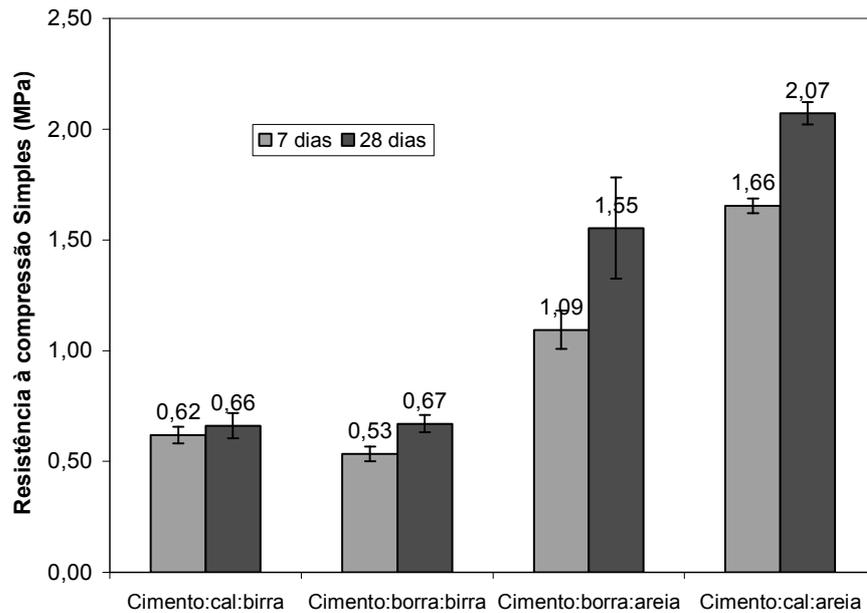


Figura 4.16 Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias das argamassas de traço 1:2:8

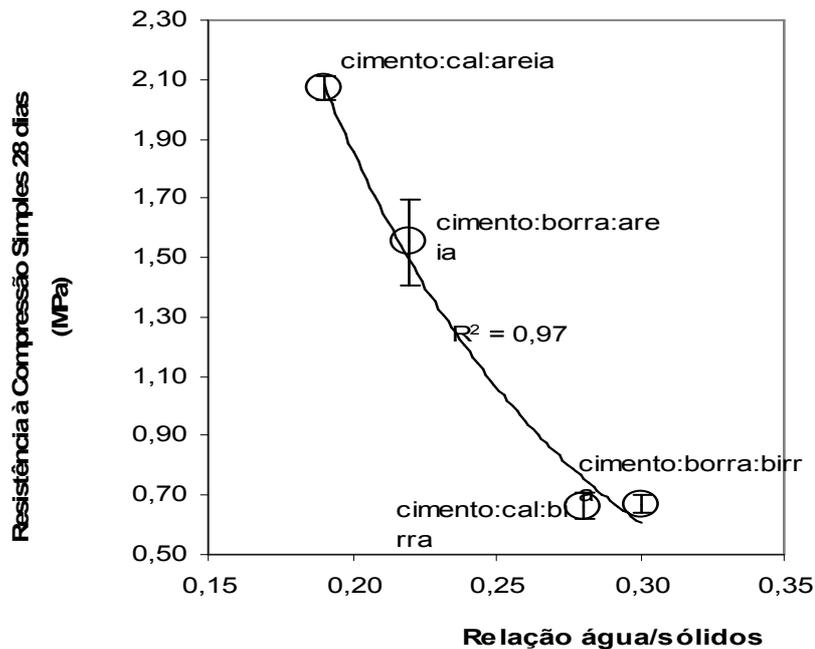


Figura 4.17 Variação da resistência à compressão simples com a relação água/sólidos

As argamassas contendo a birra apresentaram um fator água/sólidos maior, possivelmente devido à presença de uma quantidade elevada de finos em relação à areia caxitú que a birra possui. Conseqüentemente as resistências dessas argamassas também foram menores. O maior ganho de resistência ao longo do tempo ocorreu para argamassas contendo areia caxitú como agregado. No entanto, apenas as argamassas de traço convencional, contendo cal e areia caxitú, alcançaram resistência mínima de 2MPa (valor baseado na norma

americana ASTM C 270-82) aos 28 dias. Nota-se que na argamassa que contém borra e areia a diminuição da resistência não foi tão significativa em comparação com a tradicional (cimento:cal:areia), quanto àquelas que continham a birra em sua composição. Também o aumento da relação água/sólidos foi mais significativo nas que continha a birra. Isto leva a crer que além dos finos que a birra apresenta em maior quantidade que a areia, a presença de certa quantidade de mica possa ter causado esse mau desempenho mecânico. Sabe-se então que a forma e textura do agregado têm influência no desempenho de pastas cimentícias e que minerais micáceos com seu arranjo em estrutura lamelar, são responsáveis por tendência à fratura em finas lâminas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Tendo em vista os resultados dessa análise, fez-se necessário verificar a proporção de cimento:birra cuja resistência mecânica da argamassa (assunto do próximo capítulo) fosse apropriada para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso.

#### **4.5 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA PROPORÇÃO DO RESÍDUO ARENOSO (BIRRA) NO DESEMPENHO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS**

##### **4.5.1 Resistência à Compressão Simples (RCS)**

Na Tabela 4.4 estão apresentados os dados referentes às argamassas e na Figura 4.18 o desempenho da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura e a variação da proporção de birra no traço da argamassa. Na Figura 4.19 temos a correlação da resistência e relação água/sólidos.

Para as maiores relações cimento:birra (1:8 e 1:10 – Figura 4.18) pouca variação foi observada na resistência entre os 7 e 28 dias de cura. Nos outros traços com proporções menores houve um ganho de resistência aos 28 dias. Apenas nas proporções que variaram de 1:3 a 1:5 se verificou resistências superiores a 2MPa. Para este estudo então, o traço escolhido foi de 1:4 tendo em vista se trabalhar com certa margem de segurança para o valor mínimo de 2MPa. Mesmo a birra apresentando uma composição mineralógica variada nas suas frações, como mostrado na Figura 4.4, é possível obter bom desempenho nessas proporções, na argamassa. Quanto à Figura 4.19 percebe-se que houve aumento da relação água/cimento em relação à variação da proporção de birra no traço, conseqüentemente contribuindo para uma

diminuição tão significativa da resistência entre essas argamassas, já que o cimento a fração aglomerante da composição.

Tabela 4.4 Dados das argamassas com cimento e birra

Mistura	TUP	Consistência (cm)	Água/sólidos	Água/cimento
<b>Cimento:birra</b>	1:3	24,50	0,25	1,01
	1:4	25,83	0,24	1,18
	1:5	24,50	0,24	1,47
	1:6	24,66	0,26	1,79
	1:7	24,50	0,26	2,05
	1:8	25,25	0,27	2,98
	1:10	25,50	0,29	3,15

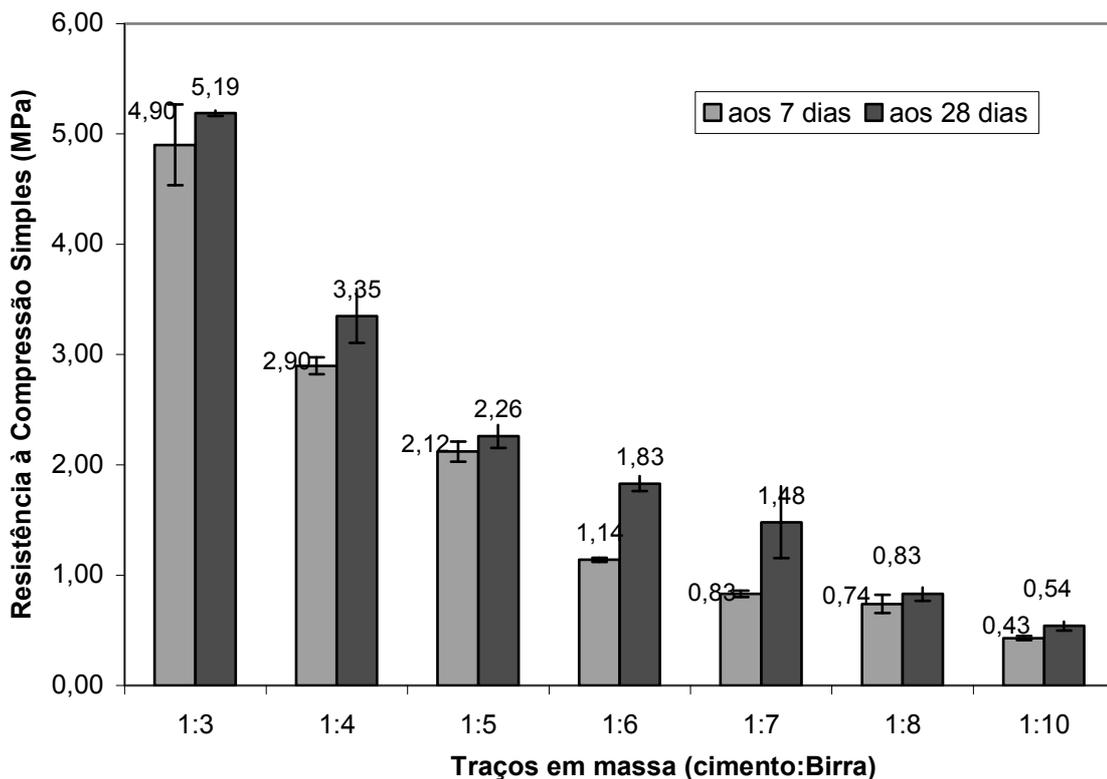


Figura 4.18 Resistência à Compressão Simples das Argamassas com Cimento: Birra, variando a Proporção de Birra

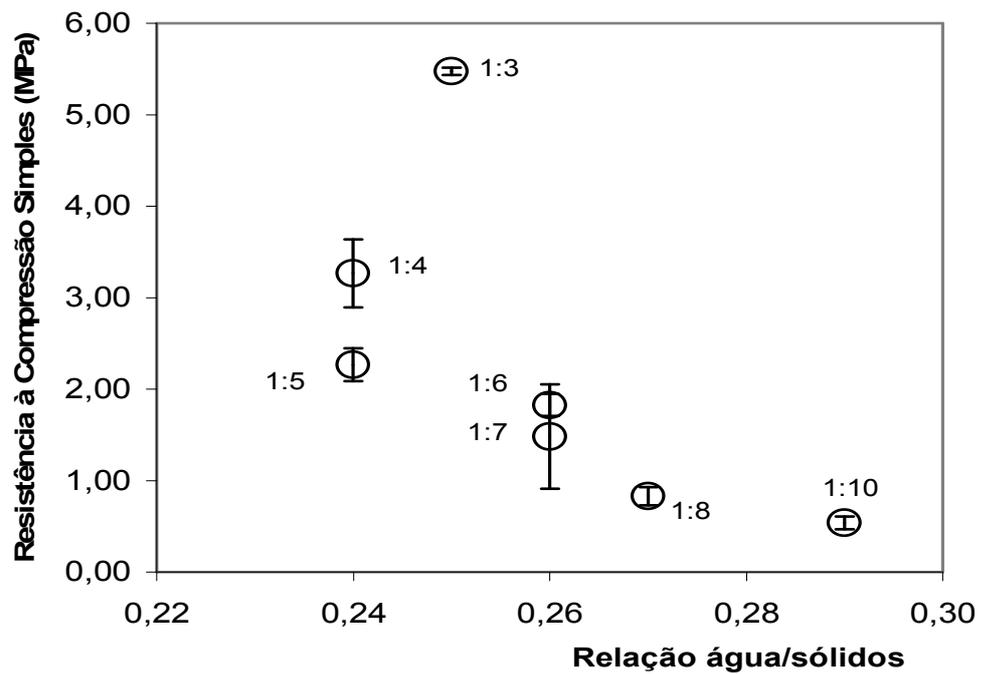


Figura 4.19 Relação água/sólidos *versus* resistência à compressão simples quanto à variação da proporção de birra nas argamassas

#### 4.5.2 Densidade de Massa Aparente Seca no Estado Endurecido

Na Figura 4.20 é apresentada a correlação de resistência à compressão simples com a densidade de massa no estado endurecido das argamassas contendo cimento:birra de traços: 1:4; 1:5; 1:6; 1:7.

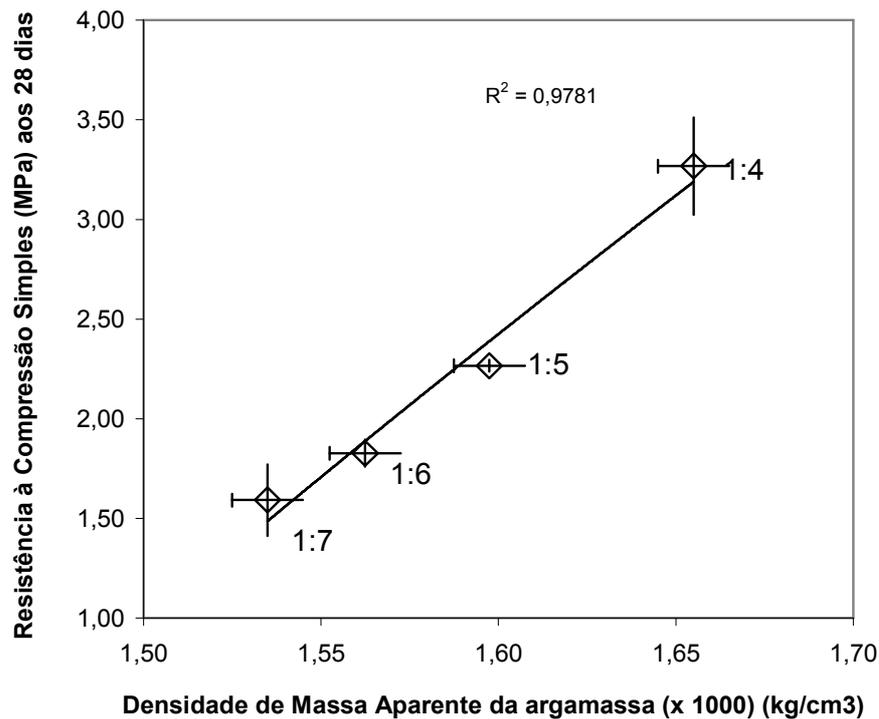


Figura 4.20 Relação entre RCS e Densidade de massa no estado endurecido

Os valores obtidos de densidade de massa para estas argamassas se apresentaram próximos aos valores obtidos para as argamassas industrializadas de múltiplo-uso, estudadas por Nakakura (2003), que foram da ordem de  $1500 \text{ kg/m}^3$ .

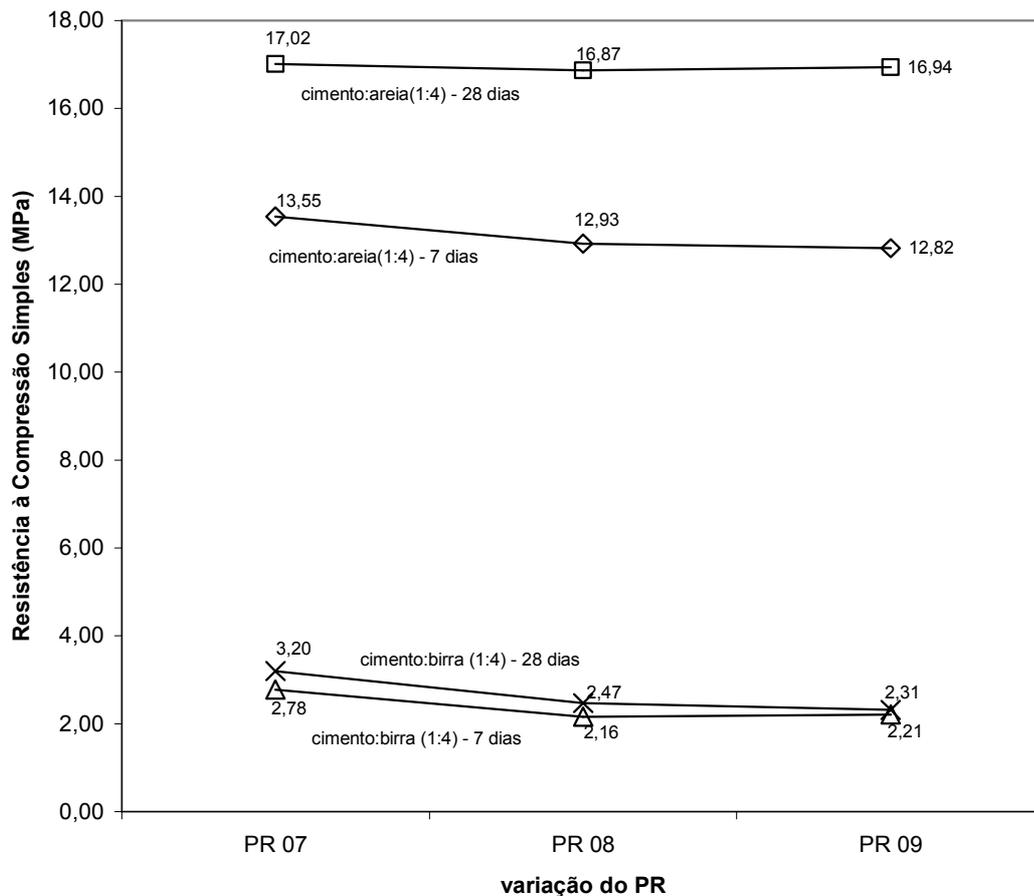
Nota-se que a densidade de massa apresentou uma correlação quase linear com a resistência à compressão simples. Para densidades maiores, resistências maiores. Com o aumento da proporção do resíduo na argamassa, a quantidade de água requerida também foi maior. Devido a isto, nas argamassas com maiores proporções de birra a quantidade de vazios deixados pela água no estado endurecido é maior, o que implica numa menor compacidade da argamassa, conseqüentemente menores resistências. Além disto, a birra se apresenta com uma variação mineralógica em suas frações. Tendo em vista essa variação fez-se importante estudar se um ajuste na curva granulométrica desse resíduo teria um papel significativo no melhoramento das propriedades das argamassas.

#### 4.6 EFEITO DA GRANULOMETRIA DO RESÍDUO ARENOSO (BIRRA) NO DESEMPENHO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS

Na Tabela 4.5 estão apresentados os dados referentes às argamassas contendo birra e areia com ajuste granulométrico (variação do PR) e na Figura 4.21 o desempenho da resistência à compressão simples das argamassas com areia e birra e variação do PR nas duas idades de cura.

Tabela 4.5 Dados das argamassas com a variação do PR

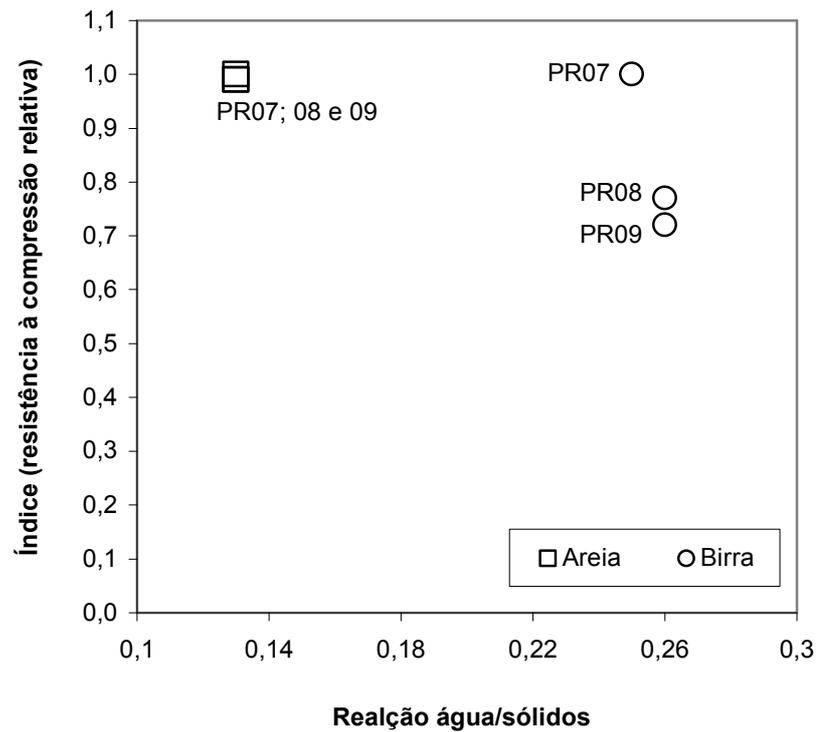
Misturas	Valor de Pr	T.U.P.	Consistência (cm)	Fator a/s	Fator a/c
Cimento:areia	0,7	1:4	25,66	0,13	0,64
	0,8		24,67	0,13	0,66
	0,9		24,50	0,13	0,64
Cimento:birra	0,7		24,66	0,25	1,26
	0,8		25,83	0,26	1,28
	0,9		25,5	0,26	1,31



**Figura 4.21 Resistência à compressão simples das argamassas com cimento:birra, de traço 1:4 variando o Pr**

No tocante à variação do valor de Pr com as argamassas contendo birra (Figura 4.21), observou-se que o seu aumento contribuiu para menores resistências aos 28 dias, mesmo sem grande variação do fator água/sólidos. Isto indica que uma maior quantidade de finos do resíduo de caulim (Figura 4.21) teve influência no desempenho da resistência à compressão simples. Naquelas contendo areia, não houve uma variação sensível no desempenho mecânico.

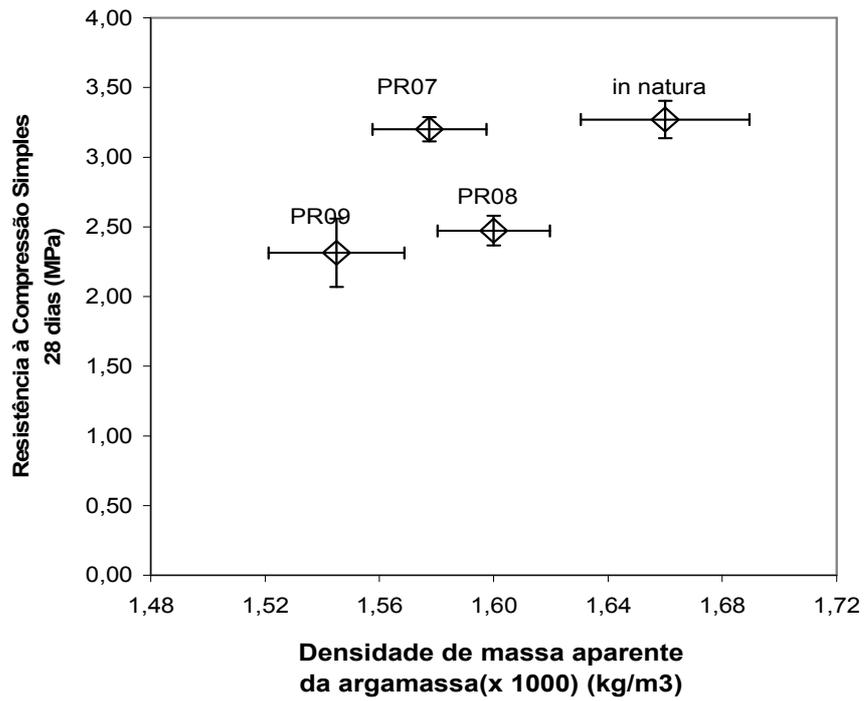
A Figura 4.22 apresenta o índice (I) de resistência à compressão simples (R) relativa aos 28 dias das argamassas com birra e areia quanto à variação água/sólidos. Onde  $I = R_i/R_{m\acute{a}x}$ ,  $R_i$  = resistência da amostra e  $R_{m\acute{a}x}$  = resistência máxima.



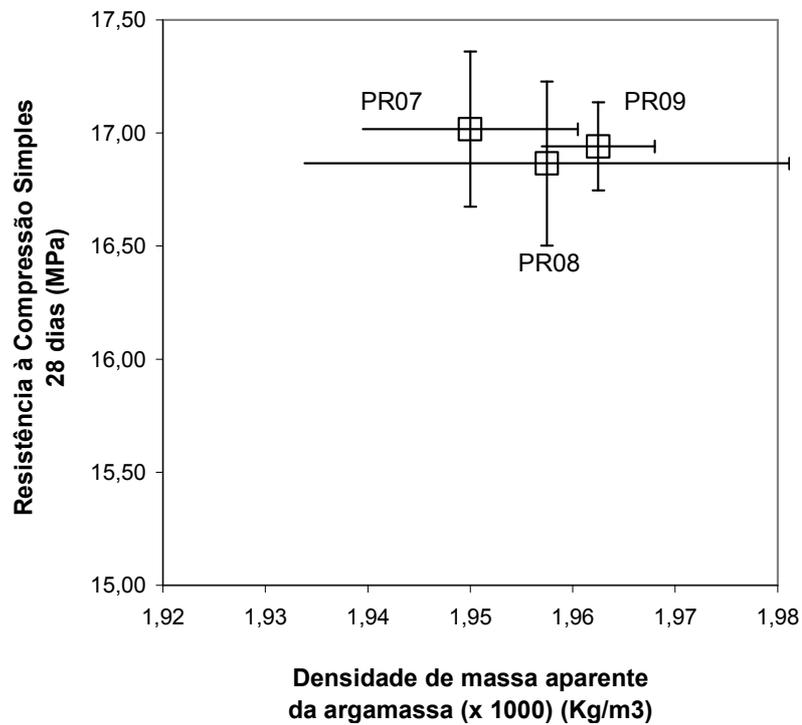
**Figura 4.22** Índice (Resistência relativa) *versus* relação água/sólidos das argamassas com birra 07; 08; 09 e areia 07; 08; 09

Pode-se observar que embora a variação do PR tenha tido pouca influência quanto à relação água/sólidos tanto nas argamassas com areia e com birra, a resistência à compressão de argamassas com birra apresentou uma sensível variação com o aumento do valor de PR, o que não ocorreu nas argamassas com areia. Pode-se, portanto dizer que um dos fatores principais que causam esse efeito é o fato da birra se apresentar com mineralogia diferenciada para cada fração, enquanto que para areia isso não acontece.

Nas Figuras 4.23 (a) e 4.23 (b) é mostrado a correlação da resistência à compressão simples com a densidade de massa aparente seca no estado endurecido das argamassas contendo birra e areia, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 4.23 Densidade aparente *versus* Resistência à Compressão Simples: (a) Birra e (b) Areia Caxitú

Observa-se que para as argamassas contendo areia pouco teve influência na variação do PR na densidade de massa aparente seca no estado endurecido e para aquelas contendo birra vê-se uma tendência de diminuição dessa propriedade, assim como também na resistência. Isto pode ser explicado devido ao fato da birra apresentar em suas frações mais finas valores de massas unitárias menores e que, para um aumento do valor de PR, a quantidade de finos também é maior como mostrado anteriormente (Figura 4.14). Então esse ajuste granulométrico não se mostrou adequado para essas argamassas, o que fez levar em conta a proporção adequada de birra para o estudo de outras composições e propriedades nas argamassas.

#### **4.7 EFEITO DA COMBINAÇÃO DOS DOIS RESÍDUOS NAS ARGAMASSAS COM TRAÇO (T.U.P) 1:4 (CIMENTO:BIRRA)**

##### **4.7.1 Retenção de água**

Os dados referentes às argamassas testadas contendo os resíduos de caulim em várias combinações encontram-se apresentados na Tabela 4.6. Na Figura 4.24 pode ser visto o desempenho dessas argamassas no estado fresco quanto à capacidade de retenção de água.

A NBR 13281 (ABNT 1995) classifica as argamassas quanto à capacidade de retenção de água em alta ( $> 90\%$ ) e normal ( $\geq 80\%$  e  $\leq 90\%$ ). Na Figura 4.24 vê-se que todas as argamassas apresentaram valores maiores que 90%. As argamassas contendo o resíduo de caulim (T1 a T5) obtiveram praticamente o mesmo desempenho, no que se refere a essa propriedade, que as de referência (T6 e T7). Pode-se então dizer que os resíduos de caulim são capazes de reter a água, ficando todos eles dentro dos valores definidos por norma. A argamassa deve apresentar retenção de água máxima, compatível com a trabalhabilidade que forneça coesão, plasticidade e consistência necessárias para garantir que, após o lançamento sobre o substrato, a mesma tenha uma adesão inicial suficiente para se manter aderida (DO Ò, 2004).

Tabela 4.6 Dados das argamassas contendo os dois resíduos de caulim

Mistura	Constituintes	TUP	Consistência (cm)	Relação a/s	Relação a/c
T1	Cimento:cal:birra	1:1:4	24,75	0,28	1,68
T2	Cimento:borra:birra	1:1:4	24,83	0,26	1,56
T3	Cimento:cal:borra:birra	1:0,5:0,5:4	24,83	0,26	1,32
T4	Cimento:borra:birra + adt.	1:0,5:4	26,5	0,26	1,41
T5	Cimento:birra + aditivo	1:4	26,5	0,21	1,06
T6	Cimento:cal:areia	1:2:8	25,33	0,21	2,28
T7	Industrializada	-	24,66	0,15	-

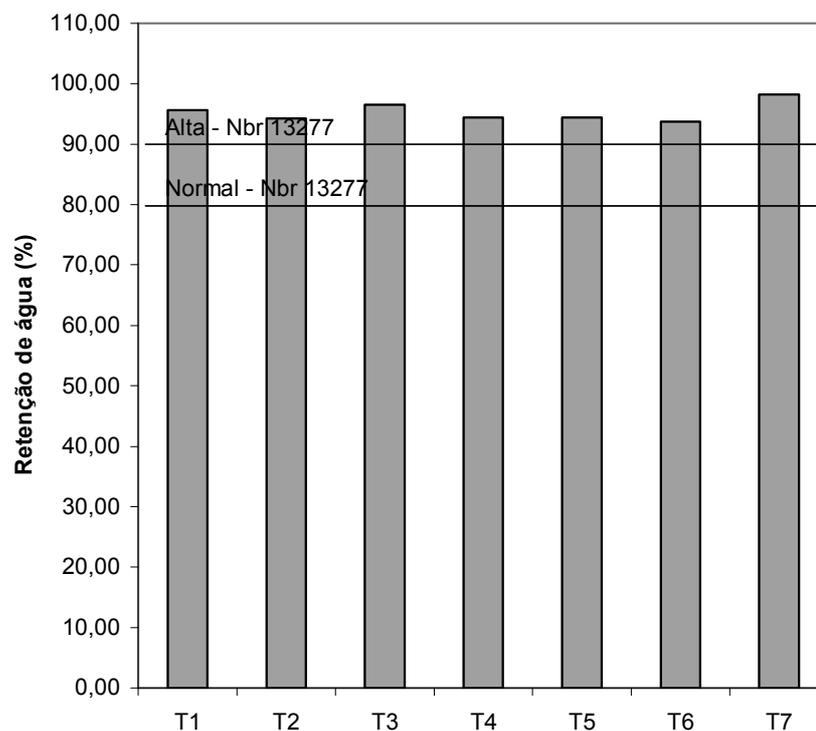


Figura 4.24 Capacidade de retenção de água das argamassas

Teoricamente argamassas que apresentam grande capacidade de retenção de água, tendem a apresentar melhores desempenho quanto à resistência de aderência. Estudos afirmaram que argamassas com elevada capacidade de retenção de água promovem extensão e resistência de aderência satisfatória principalmente em substratos com elevado potencial de sucção (BOYNTON & GUTSCHIK, 1964 apud DO Ò, 2004).

#### 4.7.2 Resistência à compressão simples e de aderência à tração

O desempenho mecânico dessas argamassas quanto à resistência a compressão simples ao longo do tempo e à aderência à tração pode ser visto nas Figuras 4.25 e 4.26, respectivamente. E na Figura 4.27 é mostrada a correlação dessas duas propriedades.

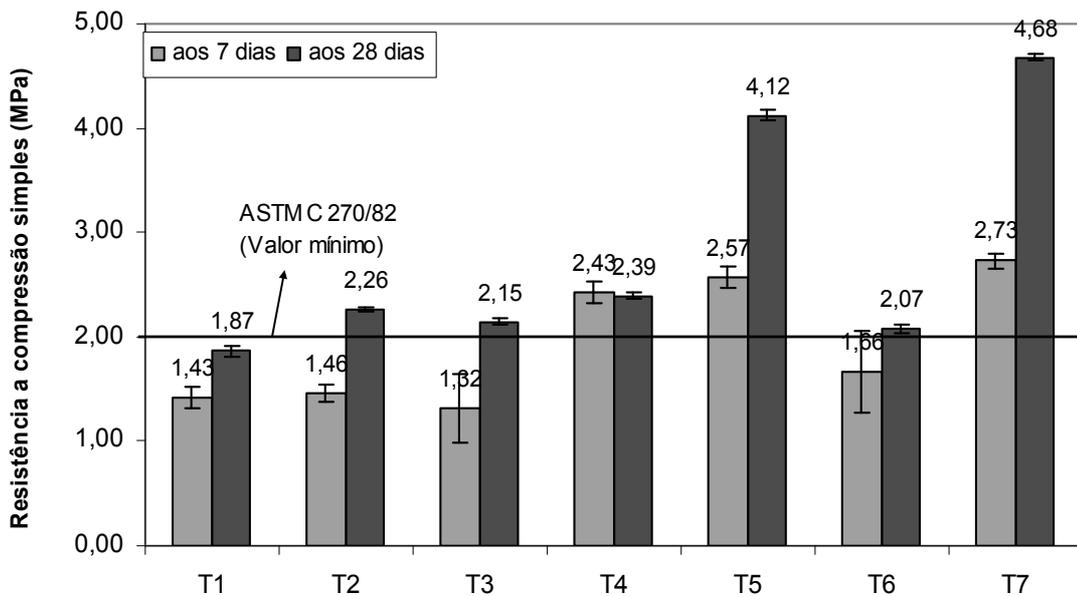


Figura 4.25 Resistência à Compressão Simples das argamassas aos 7 e 28 dias

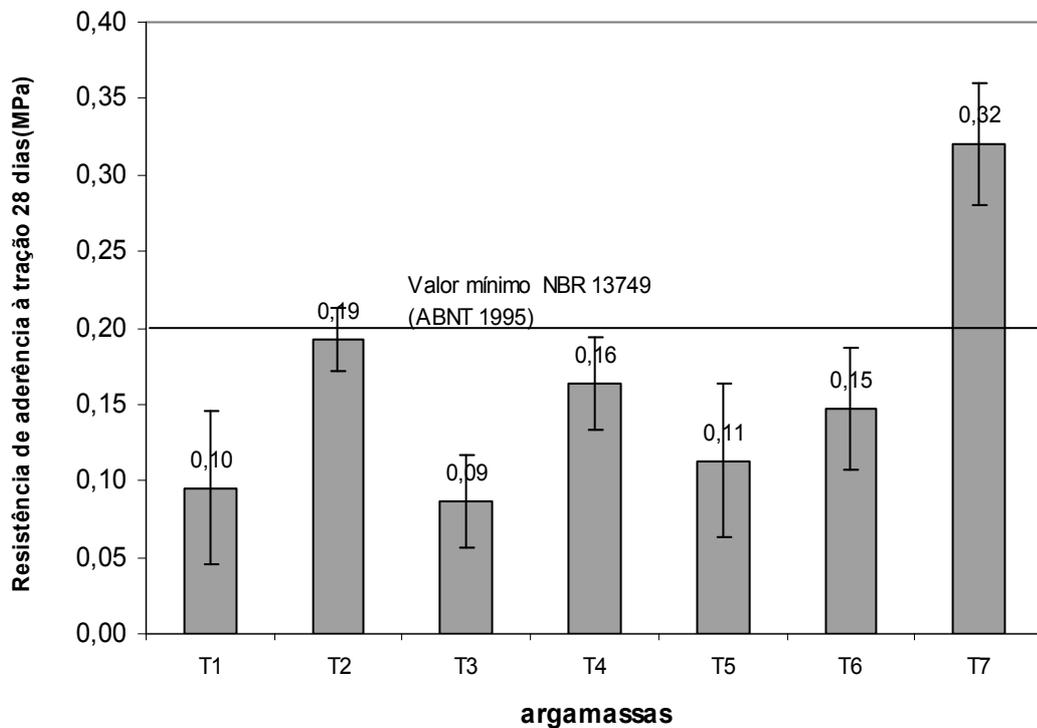


Figura 4.26 Resistência de Aderência à Tração aos 28 dias

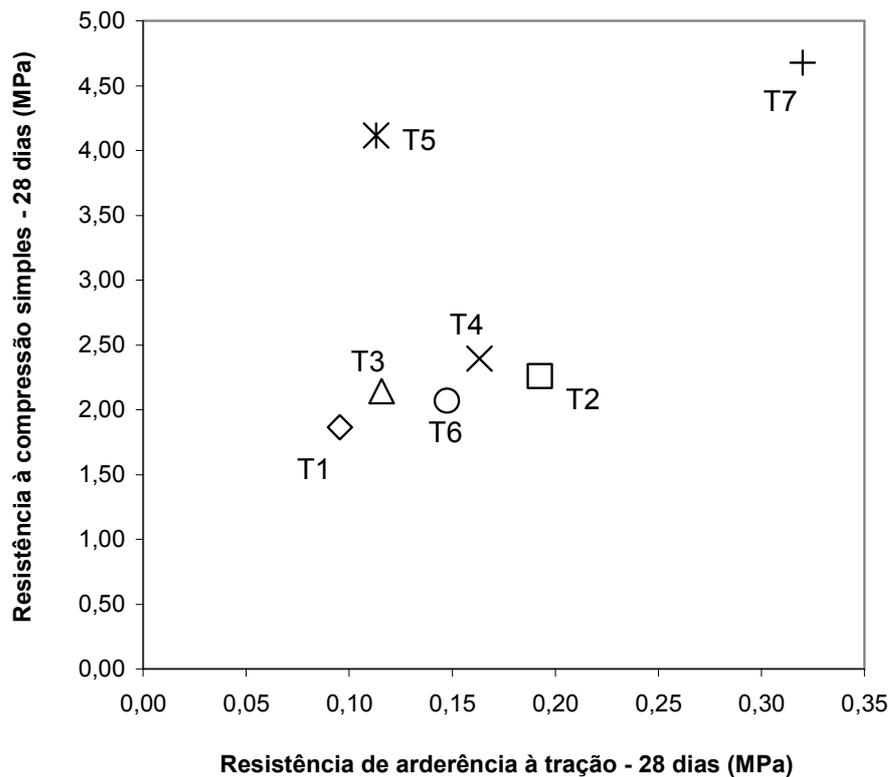


Figura 4.27 Resistência à Compressão Simples *versus* Resistência de Aderência à Tração aos 28 dias.

No tocante à resistência a compressão simples apenas a argamassa T1 não apresentou valor de resistência maior que 2MPa aos 28 dias de idade. Pode-se dizer então, como ela não continha o resíduo argiloso (borra) como plastificante, e sim a cal, que os finos da cal influenciaram numa resistência menor, em relação as que continham a borra. Não houve uma boa interação da cal com a birra. Quanto ao desempenho ao longo do tempo as argamassas T2, T3, T5 e T7 (industrializada), foram as que obtiveram maior ganho de resistência, o que não ocorreu para a argamassa de referência (T6). Em T2 e T3 o fato de conterem a borra em sua composição pode ter influenciado nesse ganho, enquanto que para T5 o uso de aditivo é que foi significativo, sendo esses ganhos de 54%, 63%, 60% e 71% para T2, T3, T5 e T7 respectivamente.

Quanto à resistência de aderência à tração, apenas a argamassa T2, daquelas que continham os resíduos, atingiu praticamente a resistência mínima exigida pela NBR 13749 (ABNT 1996). Em relação às de referência (T6 e T7), apenas T7 superou o valor mínimo por norma. A ruptura dessas argamassas ocorreu na própria argamassa de revestimento, como mostra a Figura 4.28. Apenas em T7 ocorreu em alguns pontos com ruptura na interface revestimento/substrato.



Figura 4.28 Forma de ruptura da argamassa no ensaio de aderência.

Na Figura 4.27 pode ser observado que não há uma correlação direta entre essas duas propriedades nas argamassas. Em T2 temos uma resistência à compressão menor que em T5, mas por outro lado T2 foi a que se apresentou com melhor desempenho na aderência. Para T7 ocorreu uma relação mais direta, onde esta se apresentou com maior resistência à compressão e também de aderência. No que diz respeito a essas duas propriedades a argamassa T2 foi a que atingiu os limites exigidos por norma. Isto evidencia a necessidade de se avaliar as zonas de transição a nível microestrutural.

#### 4.7.3 Absorção, Índices Físicos e Densidade de Massa no Estado Endurecido

A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos para absorção por imersão, índice de vazios e massa específica das argamassas no estado saturado, após 7 dias de cura submersa em água a temperatura ambiente (28°C).

Tabela 4.7 Absorção, índices físicos e densidade de massa no estado endurecido das argamassas

Mistura	Absorção por imersão (%)	Índices de Vazios (%)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade de Massa (kg/m <sup>3</sup> )
T1	23,57	35,98	2,38	1,46
T2	22,48	33,71	2,26	1,53
T3	21,71	33,87	2,36	1,54
T4	19,53	30,62	2,26	1,50
T5	18,32	28,99	2,23	1,66
T6	18,30	30,68	2,42	1,72
T7	12,94	21,45	2,11	1,69

De acordo com os dados obtidos pode-se observar que as argamassas T1, T3 e T6 apresentaram valores semelhantes de massa específica entre si, assim como T2, T4 e T5 que também apresentaram valores próximos entre si, porém menores que o primeiro grupo citado. O primeiro grupo citado dessas argamassas contém cal e/ou borra na sua mistura, enquanto que o outro grupo contém só a borra e/ou aditivo. Isto leva a crer que a cal pode ter tido influência no tocante à variação dos valores de massa específica.

A Figura 4.29 representa melhor o dado referente ao desempenho das argamassas no que se refere à absorção por imersão e índice de vazios.

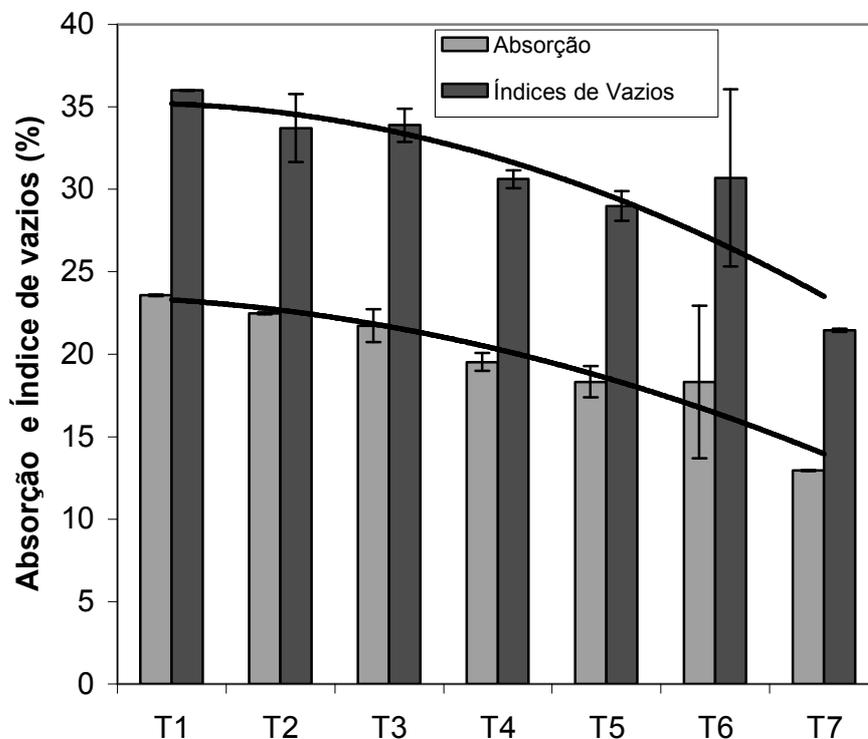


Figura 4.29 Absorção e índice de vazios das argamassas

As argamassas que apresentaram maior índice de vazios foram as que apresentaram maiores valores de absorção, como era esperado. Vê-se que para T1, T2 e T3 não houve grande variação de valores quanto a essas duas características, porém o gráfico mostra uma tendência de diminuição desses valores nas argamassas com os resíduos. Pode-se observar que a presença da borra e/ou aditivo nas argamassas T2, T3, T4 e T5 podem ter tido influência nessas propriedades. Também pode dizer que o aditivo influenciou na diminuição desses

índices, como pode ser visto nas argamassas T4 e T5, que contém o aditivo em sua composição.

Comparando o desempenho quanto a esses índices entre uma argamassa contendo o resíduo e um de referência, cimento:cal:areia (T6), vê-se que a argamassa T4 foi a que se apresentou comportamento bastante semelhante. Isto pode indicar a viabilidade do uso desses resíduos em argamassas quanto a estas propriedades.

A Figura 4.30 apresenta o desempenho das argamassas quanto à densidade de massa aparente no estado endurecido. Os valores variaram de 1460 a 1720 ( $\text{kg/m}^3$ ) e as maiores densidades foram obtidas nas argamassas T5, T6 e T7.

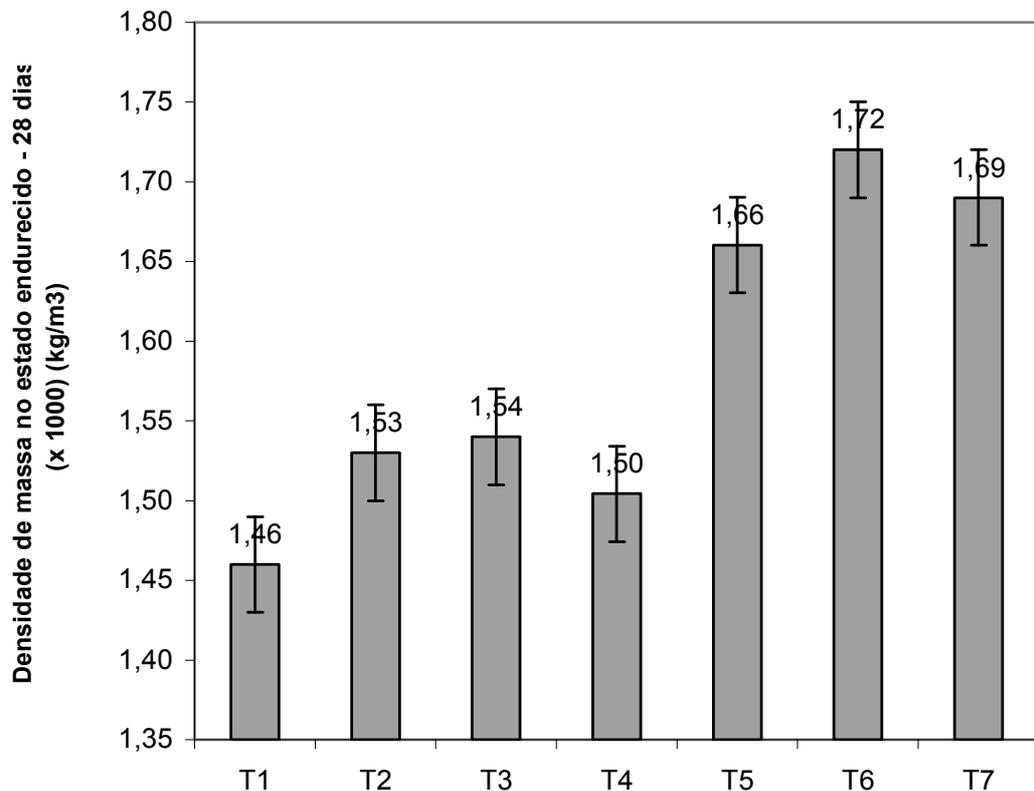


Figura 4.30 Densidade de massa aparente das argamassas aos 28 dias

Observa-se que as argamassas contendo a borra em sua composição (T2, T3, e T4) obtiveram valores semelhantes e pouco maiores que aquela contendo apenas cal como plastificante (T1). Isto leva a crer que os finos da borra junto com os finos da birra melhoraram a compacidade da argamassa, conseqüentemente aumentando a densidade e que o aditivo não teve influencia na argamassa, visto que T4 teve desempenho semelhante à T2 e

T3. Em T5 também há aditivo e seu valor de densidade não modificou em relação ao obtido com a mistura sem aditivo, apresentado no item 4.4.2. A argamassa T5 se apresentou com valores semelhantes a T6 e T7, que se referem à argamassa comumente usada na região e a industrializada, respectivamente. Este fato pode indicar que, em relação à densidade de massa, apenas os finos da birra já seriam suficientes para se obter uma melhor compacidade da argamassa. O aditivo teve a função de melhorar a trabalhabilidade para uma determinada consistência com um consumo de água menor, implicando assim, em resistências maiores.

#### 4.7.4 Capilaridade

Na Figura 4.31 é mostrado o desempenho dessas argamassas quanto à capilaridade em função do tempo. A relação entre a absorção por capilaridade e por imersão é mostrada na Figura 4.32.

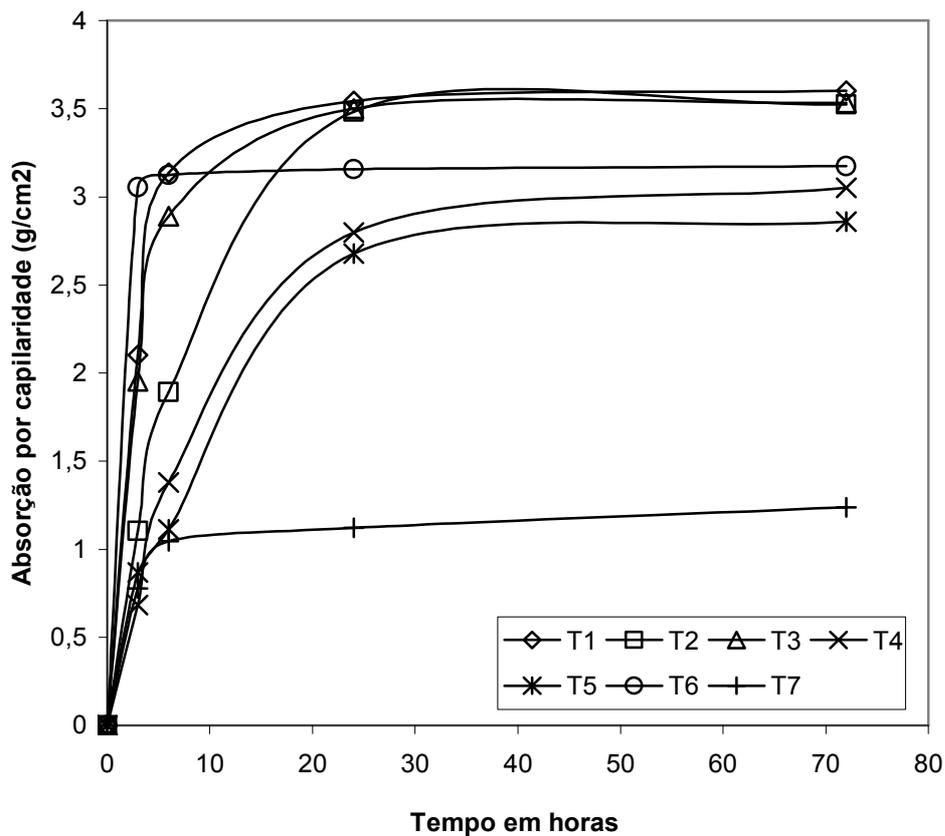
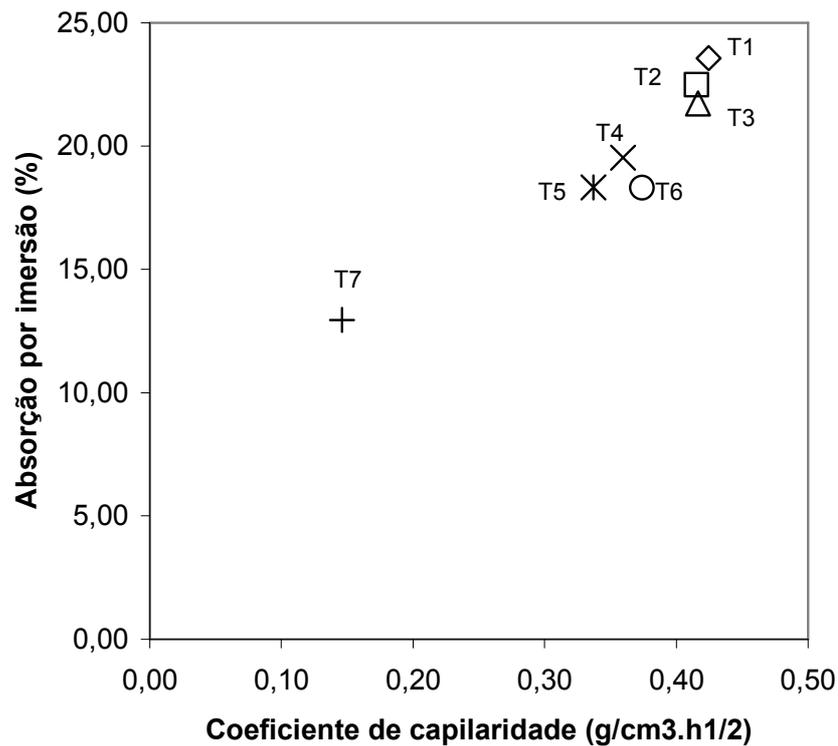


Figura 4.31 Capilaridade das argamassas aos 7 dias de idade



**Figura 4.32** Absorção por imersão e coeficiente de capilaridade

Observa-se que apenas a argamassa industrializada (T7) apresentou uma menor absorção, tanto nas primeiras horas como ao longo do tempo, todas as outras obtiveram valores maiores. A argamassa de referência (T6) apresentou um comportamento semelhante quanto àquelas contendo os resíduos, absorvendo uma maior quantidade de água para as primeiras horas e depois se manteve constante. Dentre as argamassas contendo os resíduos, T4 e T5 foram aquelas que apresentaram menores valores de absorção, o que leva a crer que o aditivo é um dos responsáveis por esse fator. O coeficiente de capilaridade e a absorção por imersão das argamassas apresentam correlação linear, onde se observa que as argamassas com maiores coeficientes de capilaridade tiveram maiores valores de absorção.

#### 4.8 INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO (A/C) NAS ARGAMASSAS

A influência do fator água/cimento em todas as argamassas na resistência à compressão aos 28 dias, comparando-se com a lei de Abrams encontra-se na Figura 4.33.

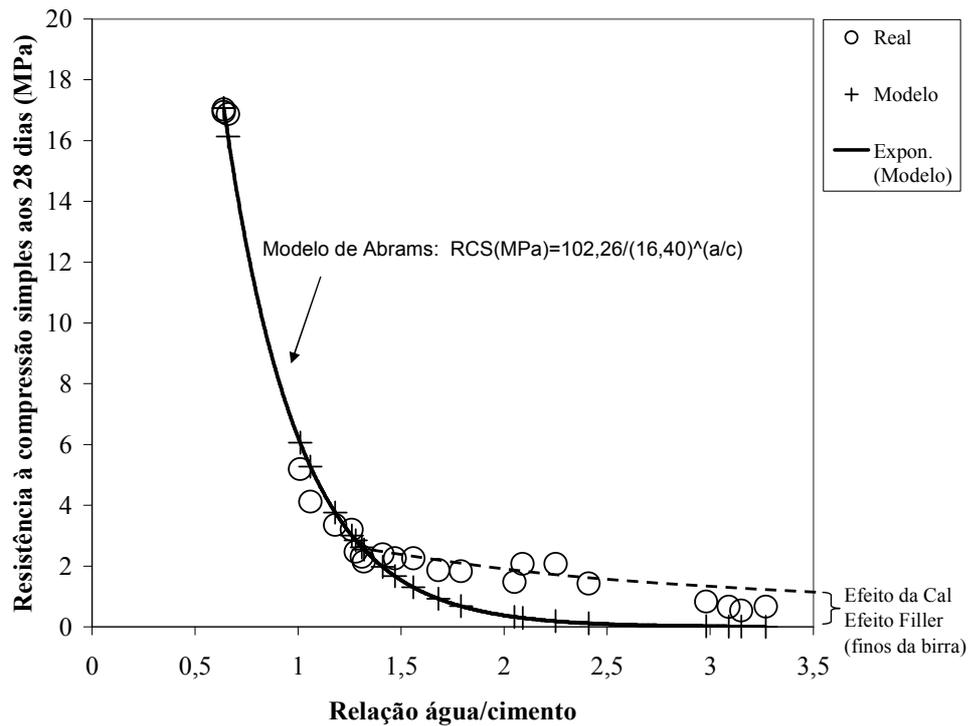
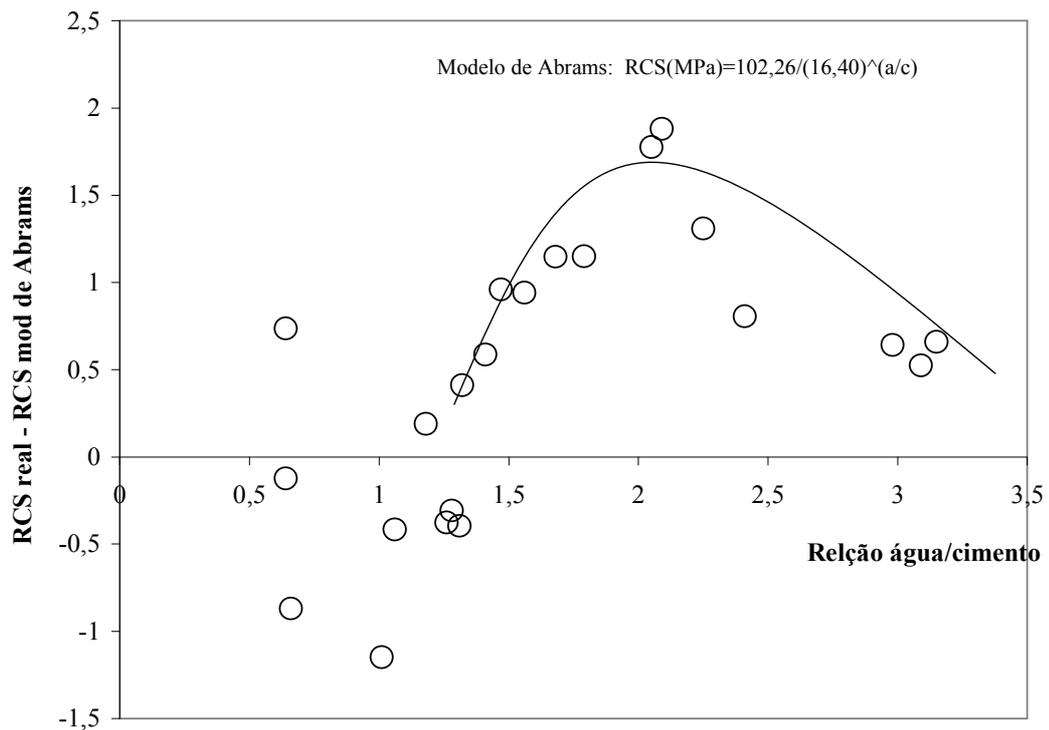


Figura 4.33 Relação a/c versus resistência à compressão aos 28 dias das argamassas.

Pode ser observado que, em geral, a redução da resistência à compressão simples (RCS) ocorreu com o aumento do fator a/c, independentemente do sistema utilizado, semelhante à lei de Abrams, que segue a relação  $RCS = K_1 / K_2^{(a/c)}$ , onde  $K_1$  e  $K_2$  são constantes do cimento e a/c relação água cimento. As argamassas contendo os resíduos demandaram mais água como visto nas Tabelas 4.3, 4.5 e 4.6. que indica que os finos dos resíduos requereram bem mais água que os finos da areia. Isto pode ser explicado devido ao potencial de atração de água que varia em função da superfície do grão e do tipo de mineral.

Na Figura 4.34 é mostrada diferença entre a resistência à compressão real e a do modelo de Abrams das argamassas em função da variação da relação a/c.



**Figura 4.34** Diferença da resistência à compressão real e a do modelo de Abrams em função da relação a/c das argamassas.

Para valores de relação a/c menores que 1,5 a dispersão dos resultados ocorre de forma aleatória, enquanto que para valores maiores vê-se uma tendência parabólica. Os sistemas que apresentaram esse comportamento aleatório são em função apenas da presença do cimento como material responsável pelo ganho de resistência. Porém o comportamento parabólico ocorre para misturas que contém mais de um aglomerante, além do cimento, como por exemplo, a cal.

O fato de se obter uma tendência nos resultados de dispersão indica que outros fatores além da relação a/c podem estar envolvidos, como por exemplo, a presença da cal como aglomerante. O comportamento da curva de resistência em função da relação a/c das argamassas do tipo cimento:plastificante (borra ou cal):agregado acontece semelhante à lei de Abrams, para coeficientes da curva com valores diferentes daqueles considerando apenas o cimento puro como responsável pela resistência. (Figura 4.35). Neste caso, por exemplo, considerando um mistura totalmente adensada, o coeficiente  $K_1$  teriam valores de 16,19 a 20,91, bem inferiores aos valores para o cimento puro, onde  $K_1 = 102,26$ .

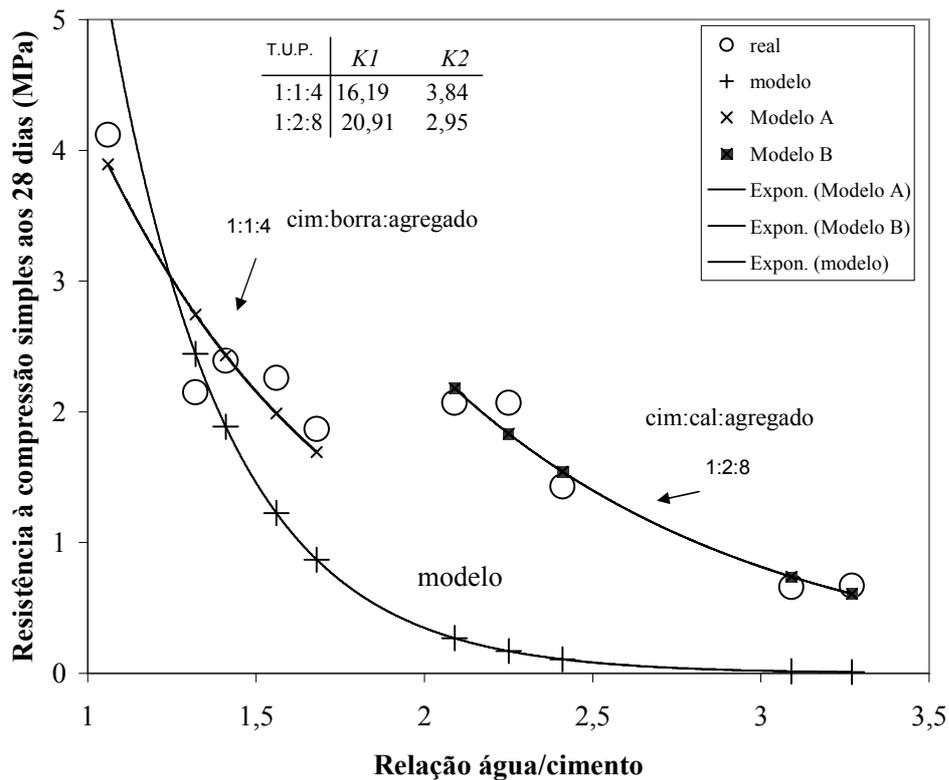


Figura 4.35 Comparação da lei de Abrams com argamassas de cimento:cal:agregado e cimento:borra:agregado

Os sistemas contendo os resíduos se apresentaram com resistência maiores em relação aos de cal. A diminuição da resistência em função da variação do fator a/c ocorreu de forma mais intensa para as argamassas contendo os resíduos, que pode indicar o papel aglomerante da cal, enquanto que a birra aparenta ter se comportado como material filler.

Diante do exposto é possível dizer que os finos do resíduo causaram um efeito filler nas argamassas, onde as resistências não diminuíram tão significativamente com o aumento da relação a/c como ocorreria se fosse apenas o cimento puro responsável pela resistência. A cal nas argamassas age também como aglomerante, ela participa das reações. Apesar dos sistemas contendo os resíduos apresentarem resistências maiores à compressão, a diminuição da resistência em função do fator a/c ocorreu de forma mais intensa quando em relação aos sistemas com cal. Ambos os sistemas, sem resíduos e com resíduos, apresentam comportamentos diferentes entre si, no que se refere à curva de resistência  $\times$  relação a/c, assim como também diferentes da tendência proposta por Abrams. A forma dos grãos também tem influência no comportamento dessas argamassas.

#### **4.9 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS ARGAMASSAS CIMENTO:BIRRA E CIMENTO:AREIA - T.U.P: 1:4**

As argamassas de areia e birra quando queimadas nas temperaturas de 100 a 400 °C, não apresentaram, visualmente, nenhuma modificação em seu aspecto visual, como pode ser visto nas Figuras 4.36 e 4.37. Para as temperaturas de 500 °C, 600 °C (Figura 4.38) e 700 °C (Figura 4.39) os corpos de prova tanto com a birra como com a areia apresentaram fissuras bem visíveis. Nas argamassas contendo a birra, essas fissuras foram menos acentuadas e em menor quantidade que naquelas com areia, à medida que a temperatura aumentou.

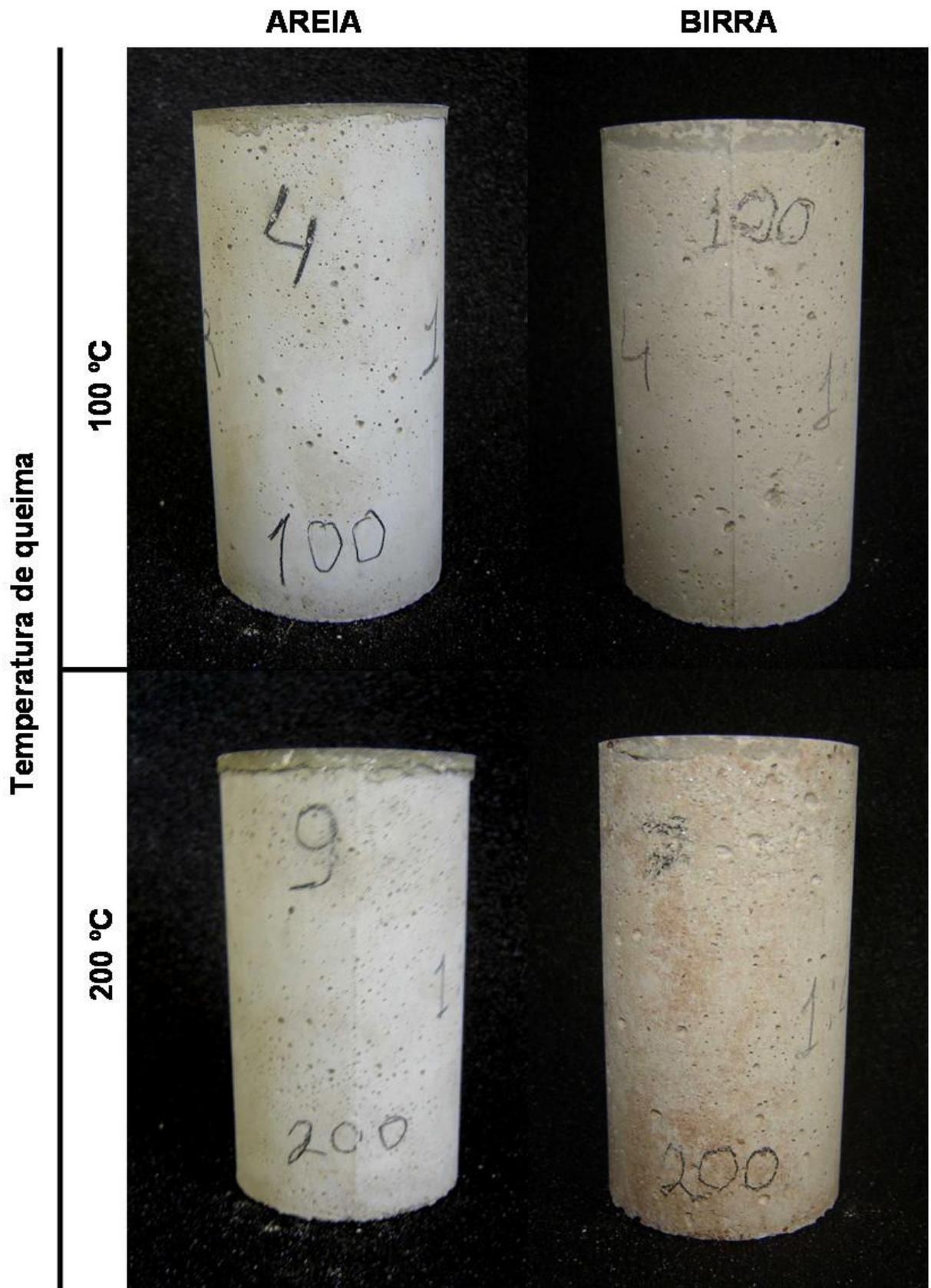


Figura 4.36 Corpos de prova calcinados a 100°C e 200°C com birra e areia

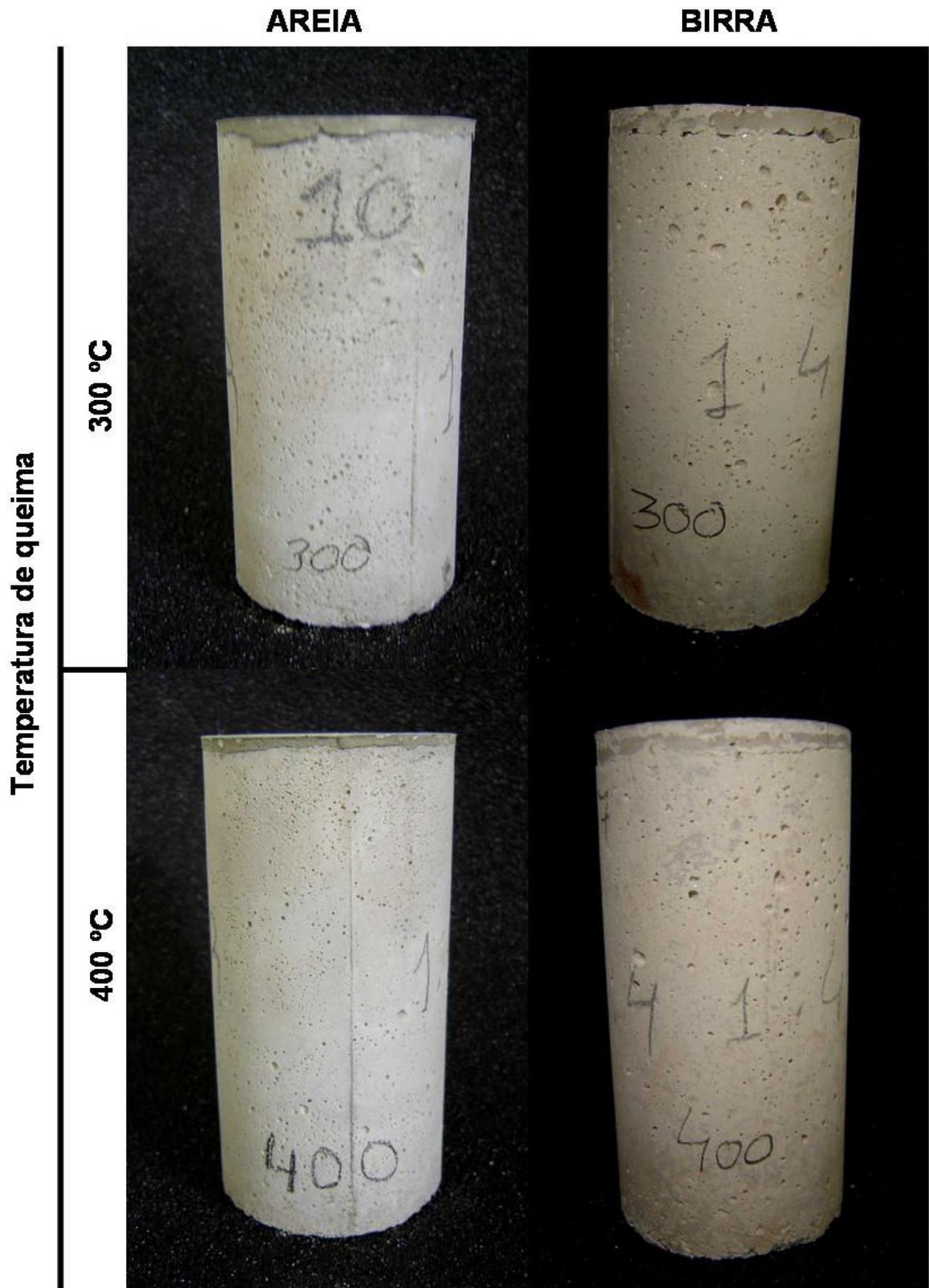


Figura 4.37 Corpos de prova calcinados a 300°C e 400°C com birra e areia

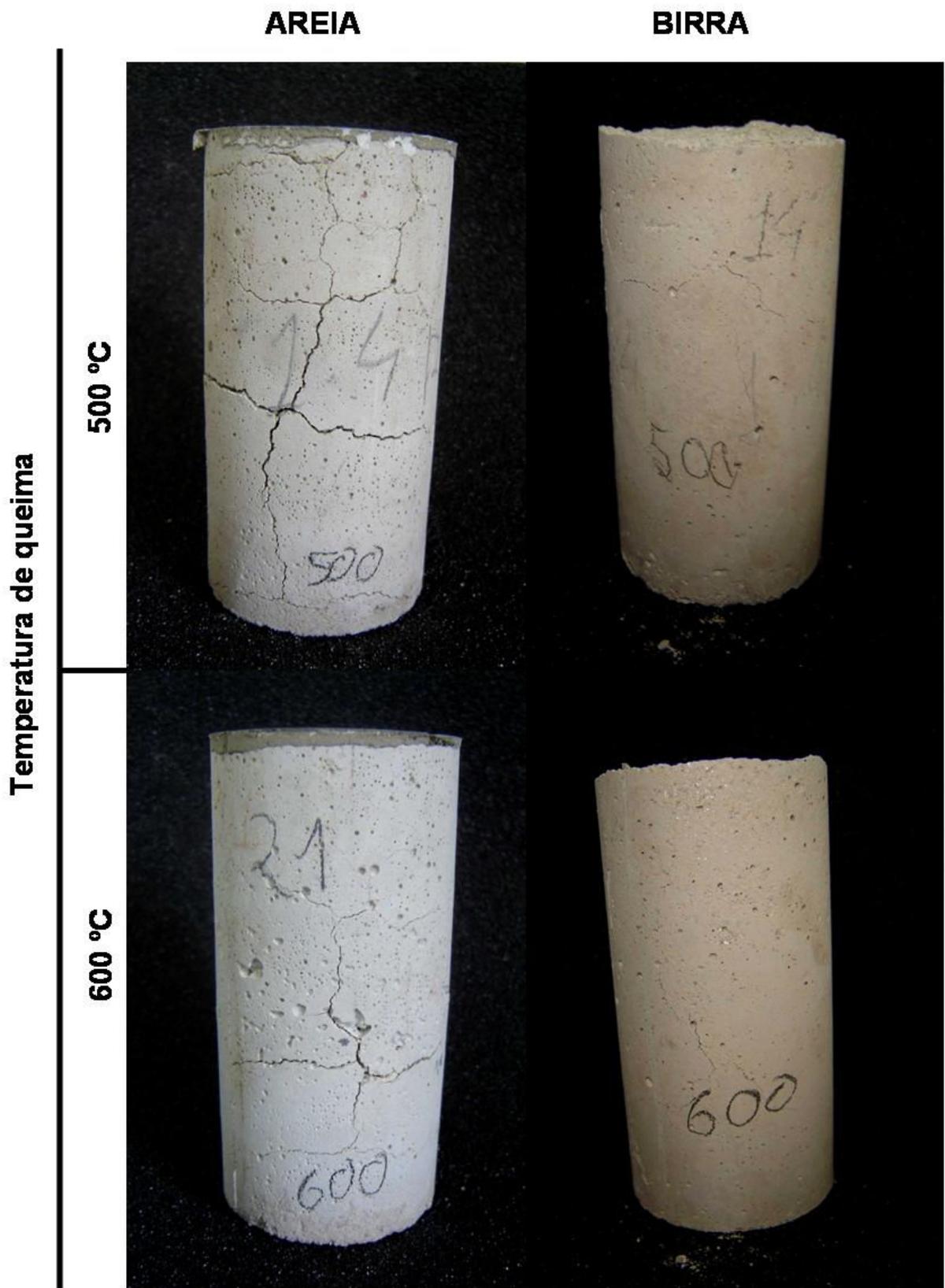


Figura 4.38 Corpos de prova calcinados a 500°C e 600°C com birra e areia.

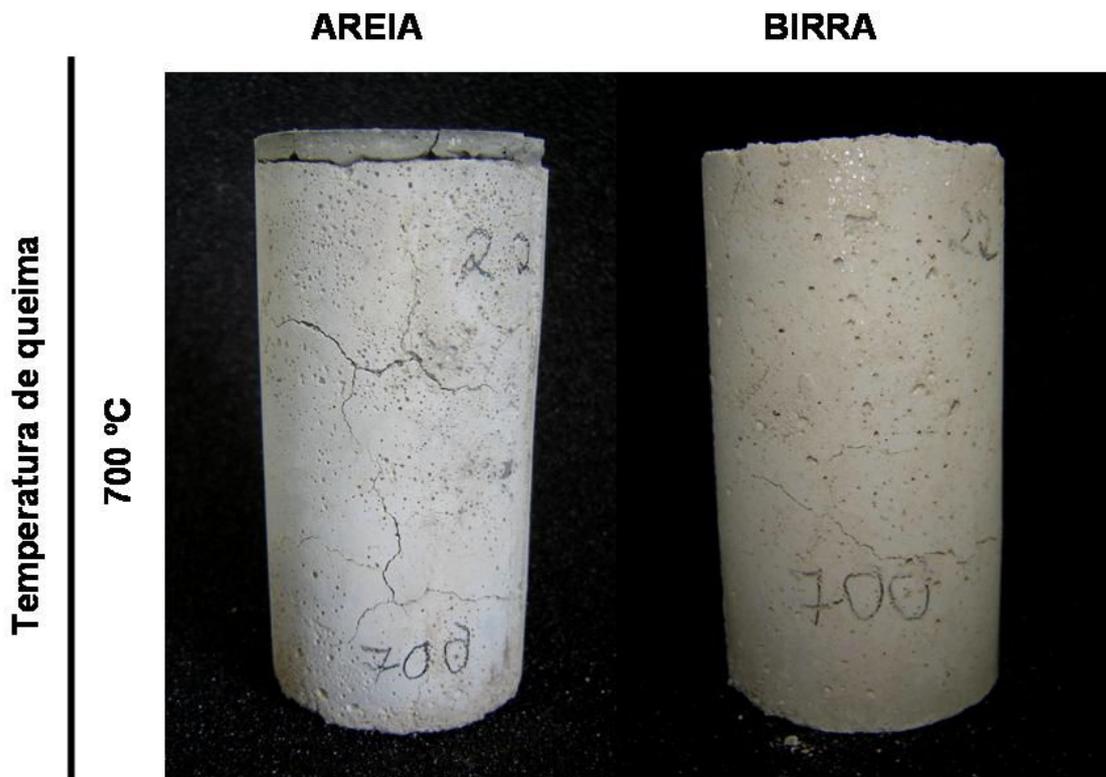


Figura 4.39 Corpos de prova calcinados a 700°C com birra e areia

Os agregados ao serem aquecidos sofrem expansões que, dependendo da taxa de aquecimento e tamanho do agregado podem ser destrutivas para o concreto. A composição mineralógica dos agregados influencia bastante a dilatação térmica diferencial entre a pasta e os agregados e conseqüentemente, a resistência última da zona de transição (METHA e MONTEIRO, 1994). Aparentemente, os sistemas com birra sofrem menos expansões, embora também contenham cerca de 58% de quartzo em sua composição, sendo mais estáveis no tocante à variação dimensional que aquelas contendo areia.

As Figuras 4.40 e 4.41 mostram o comportamento da curva tensão-deformação dessas argamassas para cada temperatura. Pode – se observar que nas argamassas contendo areia o comportamento do gráfico não mudou praticamente com a variação da temperatura de 28 °C (ambiente) a 400 °C. Para as temperaturas maiores que 500 °C as tensões tiveram uma grande diminuição e a deformação aumentou. Quanto à tensão de ruptura, as argamassas contendo areia se apresentaram com valores sempre maiores que aquelas contendo birra, em todas as temperaturas estudadas. Para as temperaturas de 500°C, 600°C e 700°C houve uma diminuição considerável da tensão de ruptura, enquanto que nas que continha birra isso não ocorreu.

Em relação à deformação, vê-se que as argamassas de birra são muito mais dúcteis que aquelas com areia, porém a tensão de ruptura é menor. Para o intervalo de 28°C (ambiente) a 400°C naquelas que continha areia se mostraram muito mais frágeis em comparação às que contendo birra. Quando se têm as temperaturas variando de 500°C a 700°C, as de areia apresentaram um comportamento mais dúctil que nas temperaturas menores que 500°C, mas praticamente constante para esse intervalo de temperaturas. Nas que continha a birra, para o mesmo intervalo de temperatura, as argamassas tiveram um aumento na ductilidade do material, para 700°C mais elástica a argamassa.

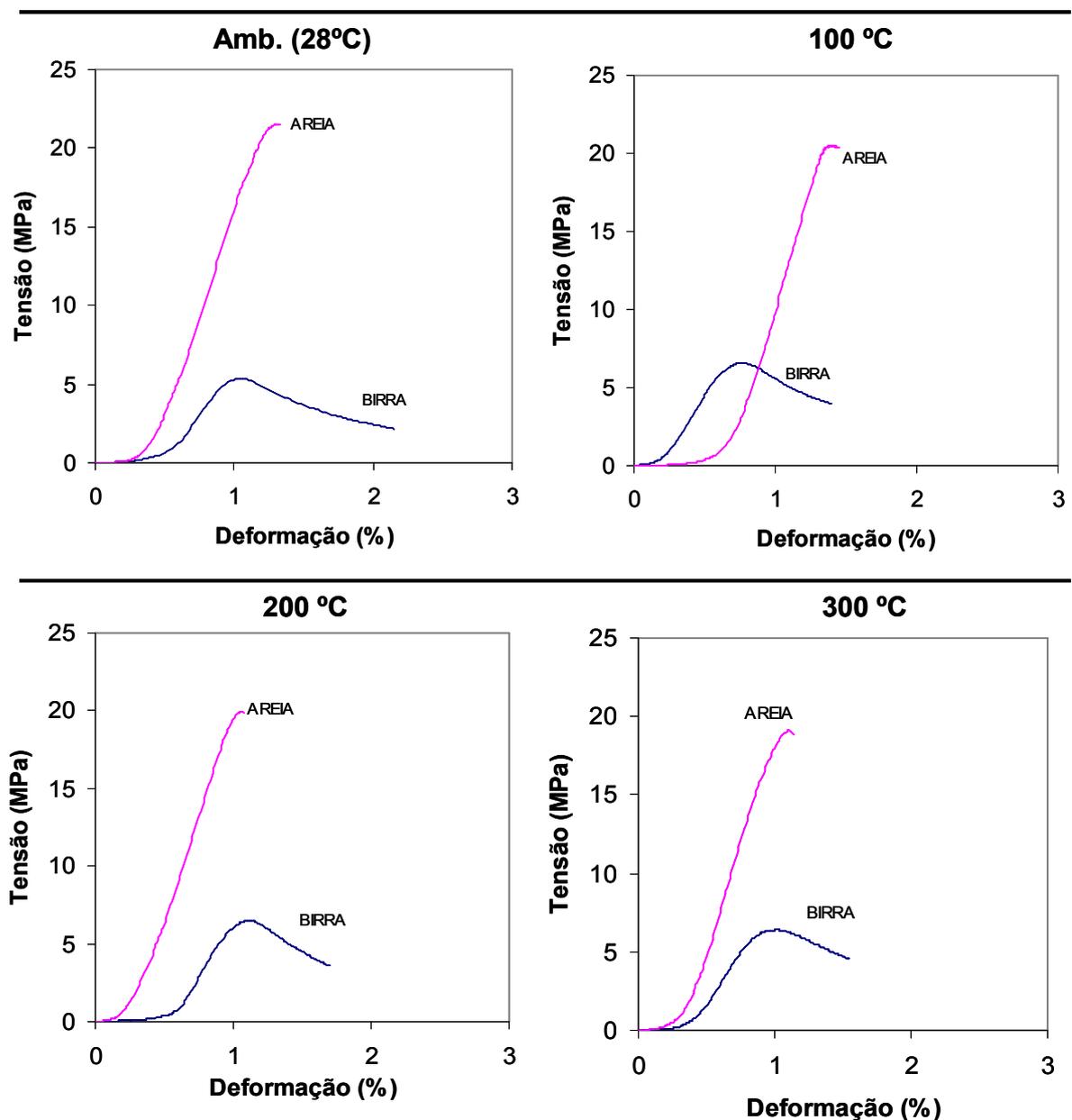


Figura 4.40 Gráficos tensão  $\times$  deformação das argamassas de birra e de areia nas temperaturas ambiente (28°C), 100°C, 200°C e 300 °C

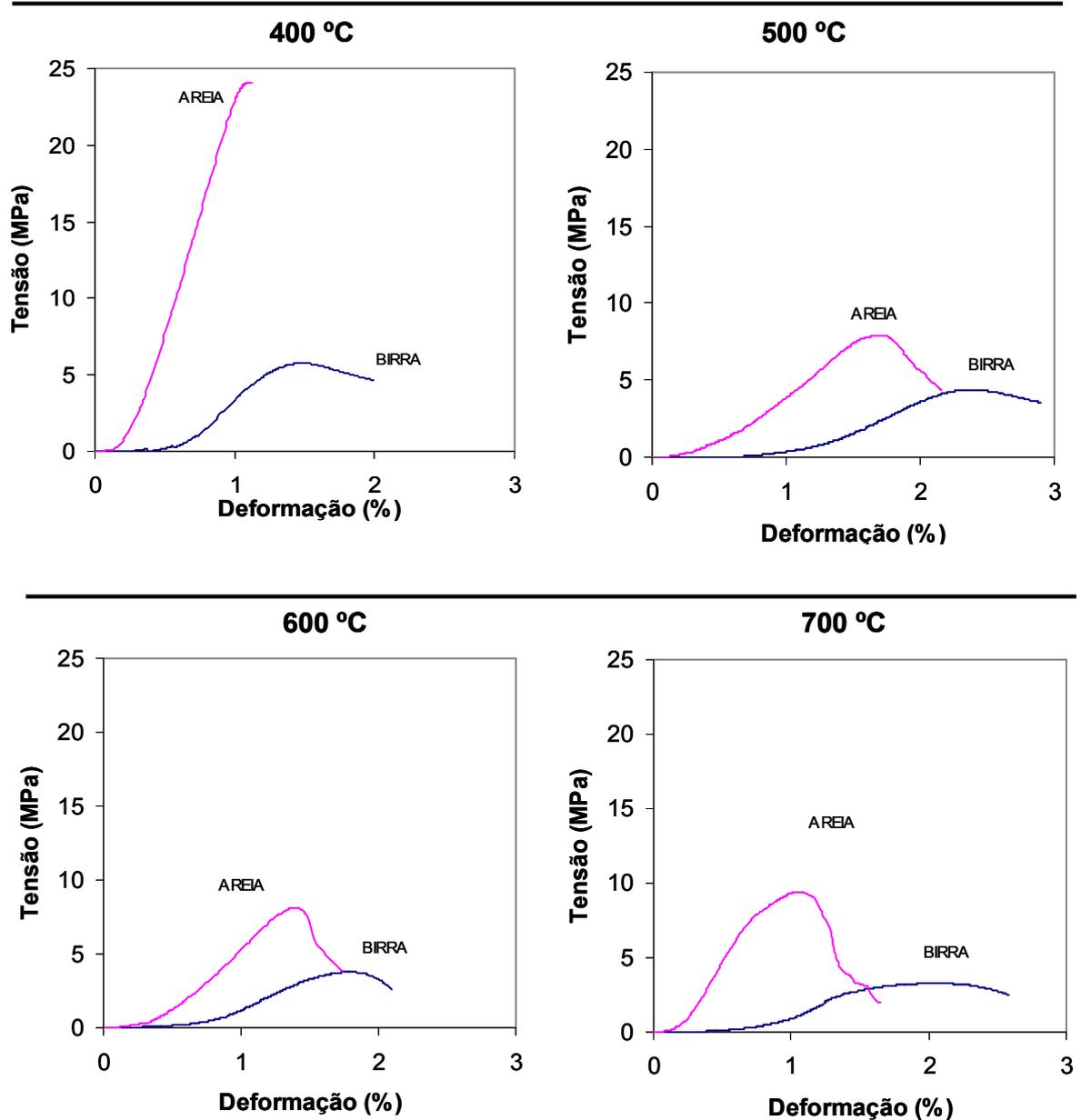


Figura 4.41 Gráficos tensão x deformação das argamassas de birra e de areia nas temperaturas de 400°C, 500°C, 600°C e 700 °C)

Propriedades do agregado como a dimensão máxima, a forma, a textura superficial, a granulometria e a composição mineralógica podem influenciar na forma da curva tensão-deformação (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Em Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997) recomenda-se que a presença de mais de 15% de partículas alongadas no agregado é considerada indesejável. Quanto a textura, um agregado com textura mais áspera parece ser mais favorável devido o possível aumento da aderência entre as partículas e a pasta de cimento.

A birra se apresenta com uma forma mais lamelar, como mostrado no item 4.5. Também em sua composição apresenta a presença de mica que possui uma textura mais lisa. Isto pode explicar o fato das argamassas de birra apresentar tensão de ruptura mais baixas. Em relação ao comportamento das curvas tensão-deformação, nas argamassas de birra percebe-se uma maior ductilidade. Essa propriedade pode indicar que provavelmente as argamassas de birra se apresentam mais porosas, o que diminuiria a rigidez das argamassas. Também é importante ressaltar os estudos de Beaudoin (1983), onde a mica foi estudada como fibra mineral. Se este mineral estaria atuando como fibra nos sistemas estudados, ainda demanda maiores estudos.

#### 4.9.1 Efeito da Temperatura e do Tipo de Agregado no Módulo de Elasticidade (E) e da Tensão de Ruptura nas Argamassas

A Figura 4.42 mostra o desempenho da tensão de ruptura em função da temperatura nas argamassas contendo areia e birra. Observa-se que nos dois tipos de argamassa a tensão diminui à medida que se aumenta a temperatura como já observado nas curvas tensão-deformação. No caso das argamassas contendo areia essa diminuição ocorreu de forma mais acentuada, o que pode indicar que na argamassa com birra possa ter um potencial refratário.

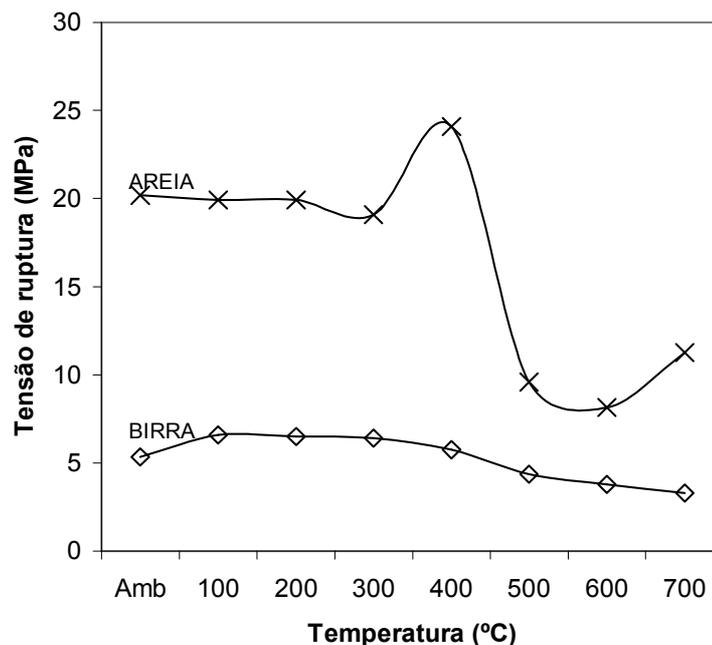


Figura 4.42 Variação da tensão de ruptura das argamassas de areia e de birra em função da temperatura

A variação do módulo de elasticidade tangente absoluto e relativo em função da temperatura pode ser visto nas Figuras 4.43 e 4.44, respectivamente. Vê-se que quanto maior as temperaturas, menor o módulo de elasticidade, ou seja, as argamassas se apresentam mais dúcteis, tanto com areia quanto com birra.

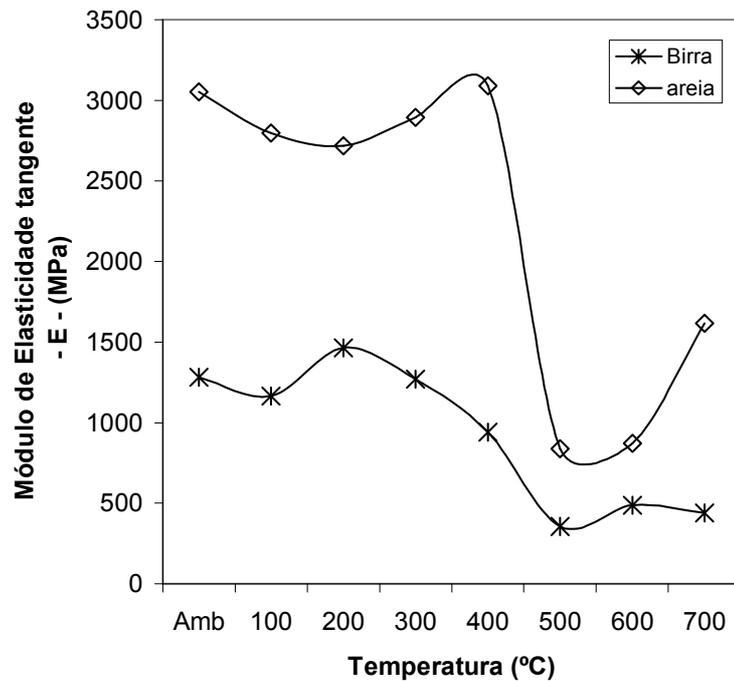


Figura 4.43 Variação do módulo de elasticidade tangente das argamassas de areia e de birra em função da temperatura

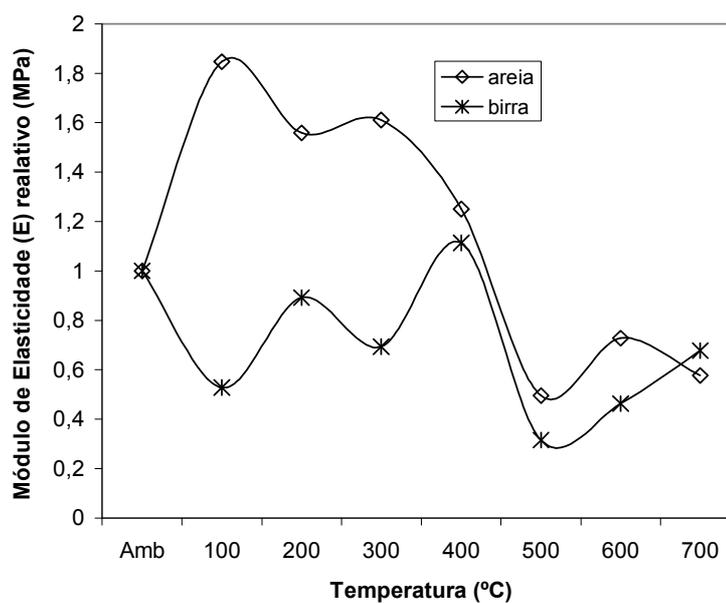


Figura 4.44 Variação do módulo de elasticidade tangente relativo das argamassas de areia e de birra em função da temperatura

Para as argamassas de areia não há variação significativa do valor do módulo de elasticidade no intervalo de temperatura que varia de 28°C a 400°C, havendo uma diminuição acentuada desse valor após 400°C. Nas temperaturas maiores os valores se apresentaram próximos para ambos. O comportamento no gráfico em função da temperatura em ambos foi semelhante, porém as argamassas contendo birra se mostraram ser mais uma vez uniforme.

O comportamento da deformação para uma tensão constante de 2MPa (absoluto e relativo) em função da temperatura pode ser visto nas Figuras 4.45 e 446.

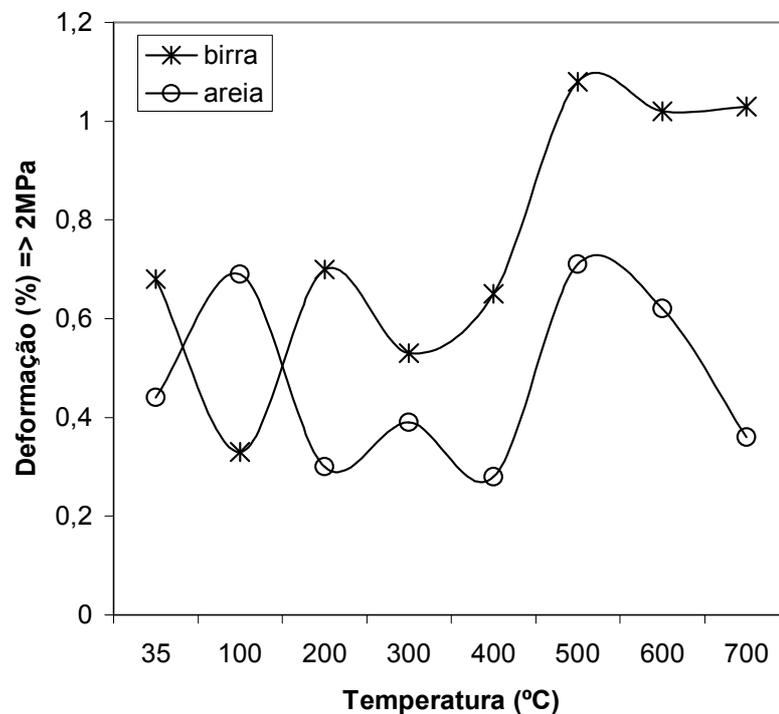
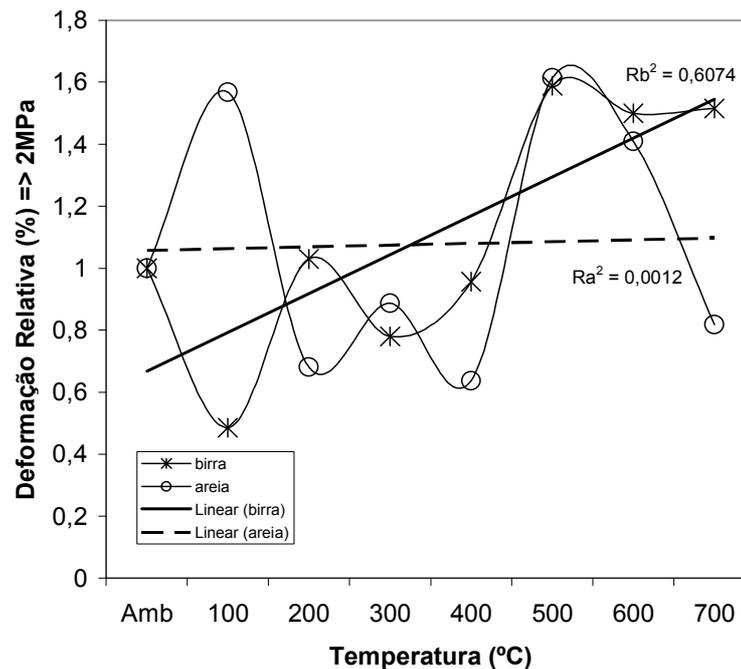


Figura 4.45 Variação da deformação para uma tensão de 2MPa nas argamassas de birra e de areia em função da temperatura



**Figura 4.46** Deformação relativa para uma tensão de 2MPa nas argamassas de birra e de areia em função da temperatura

Quanto à variação da deformação para a tensão constante de 2MPa (resistência à compressão mínima exigida neste trabalho), observa-se que a argamassa contendo birra apresenta deformação maior em relação à argamassa de areia como já discutido antes, em função do aumento da temperatura. Essa deformação se manteve praticamente constante para temperaturas entre 500°C e 700°C na que continha a birra como agregado para uma tensão constante. Obviamente o aumento do módulo de elasticidade proporcionou o aumento de deformação nas argamassas.

Agregados silicosos, contendo grande quantidade de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) como granito, arenito e alguns xistos, podem causar danos ao concreto submetidos a temperaturas de 573 °C, a partir da qual os cristais de quartzo- $\alpha$  transformam em quartzo- $\beta$ , com variação dimensional (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Em geral a resistência e módulo de elasticidade variam da mesma forma com a temperatura. O valor do módulo diminui com o aumento da temperatura (NEVILLE, 1997). Cada tipo de agregado tem coeficientes de dilatação e de condutividade térmicas diferentes. E uma das características que influenciam esses coeficientes é a mineralogia do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A birra contém mais argila e parece ser mais estável, porém apresenta valores de resistência inferiores ao da areia.

## 5 CONCLUSÕES

---

O presente trabalho procurou investigar o potencial do uso dos resíduos do processo de beneficiamento do caulim do Estado da Paraíba como materiais constituintes em argamassas de múltiplo uso. Diante do conteúdo exposto neste trabalho, pode-se concluir:

### 1. Caracterização Física e Mineralógica dos Resíduos.

A variação acentuada da esfericidade das partículas da birra afetou o empacotamento dos sistemas de argamassas, de maneira que a densidade aparente foi cerca de 20% menor do que nas argamassas com a areia de referência. A pouca variação na esfericidade das partículas observada, por microscópio óptico, para a areia de referência está associada a sua homogeneidade na mineralogia. Enquanto a morfologia das frações grossas da birra se aproximou daquela da areia silicosa de referência, as frações mais finas apresentaram morfologia lamelar, com acentuado desvio de esfericidade.

Os resíduos da indústria de caulim podem ser caracterizados pelo teor de caulinita: a borra, com cerca de 55% caulinita, 25% de quartzo e 20% de mica; a birra, com cerca de 30% de caulinita, 60% de quartzo e 10% de mica. As concentrações de caulinita aumentaram com a diminuição da fração granulométrica e podem chegar a 30% na birra e 70% na borra para as frações inferiores a malha 400 microns. Esta composição pode variar de acordo com a eficiência do processo de beneficiamento utilizado.

## 2. Processo de Beneficiamento por Moagem e Calcinação do Resíduo Argiloso

Mesmo com um alto teor de caulinita (55,92%), a borra no seu estado *in natura* (sem calcinação e moagem) não apresentou índice de atividade pozolânica satisfatório como preconiza a norma NBR 12653 (ABNT, 1992). Após passar por um processo de calcinação e cominuição, o índice de atividade pozolânica (I.A.P.) apresentou valores superiores a 6 MPa quando material atingiu finuras superiores a 10.000 cm<sup>2</sup>/g, prestando-se, portanto, para uso como pozolana.

## 3. Processo de Beneficiamento por Otimização Granulométrica do Resíduo Arenoso

Do ponto de vista granulométrico, a birra se aproximou do limite superior da zona utilizável da curva referente a agregados miúdo da norma brasileira (NBR 7211, 2005). A contribuição do beneficiamento da granulometria do resíduo arenoso (birra), nas propriedades mecânicas das argamassas e características físicas, está associada à variação da morfologia das partículas. O beneficiamento granulométrico do resíduo de caulim trouxe pouca contribuição para o aumento da resistência à compressão, possivelmente devido ao menor empacotamento das partículas. Isso pode também ser correlacionado com a variação da mineralogia. Quanto às correções granulométricas usando uma progressão geométrica para otimização do empacotamento de agregados, propostas para a correção de areias quartzosas, não tiveram efeito com este resíduo, haja vista as variações mineralógicas e morfológicas significativas ao longo da redução das frações, como é o caso dos resíduos do caulim.

## 4. Uso Combinado dos Resíduos Arenosos e Argilosos em Argamassas

A resistência mecânica das argamassas foi consideravelmente prejudicada, em função do aumento da proporção de birra para um traço em massa de 1:X – cimento:birra. O aumento da proporção de birra no traço em massa acarretou uma maior demanda de água, devido a maior quantidade de finos presentes nos grãos da birra. Isto resultou na diminuição da resistência mecânica que se deu em conformidade com curva de Abrams, cujo aumento da demanda de água resulta em diminuição da resistência exponencialmente. Para proporções de 1:3, 1:4 e 1:5 (cimento:birra) foi possível atingir resistências à compressão maiores que 2 MPa. A melhor proporção dos resíduos para um

traço de argamassa de múltiplo uso encontrada neste trabalho foi de 1:1:4 (cimento:borra:birra). As argamassas de traço 1:2:8, contendo os resíduos, apresentaram altos fatores de água/sólidos. Estas argamassas não atingiram a resistência mínima (2 MPa) requerida neste trabalho aos 28 dias. Na proporção em massa de 1:4 (cimento:birra), o resíduo birra em seu estado natural, proporcionou resultados satisfatórios quanto a resistência à compressão simples e à retenção de água de argamassas do ponto de vista de assentamento de alvenarias, semelhantes aos obtidos para as argamassas de referência (1:2:8 - cimento:cal:areia e a industrializada).

#### 5. Potencial Térmico de Argamassas Contendo Resíduo Arenoso como Agregado

Os resíduos de caulim ainda mostraram ter potencial para suportar variações de temperaturas (de 100°C a 700°C). O desempenho das argamassas contendo material residual de caulim foi mais estável do que o da argamassa de referência contendo areia silicosa com aumento da temperatura. A estabilidade do sistema com birra pôde ser observada através da pequena variação na tensão de ruptura e no módulo de elasticidade tangente. Ambos os sistemas contendo birra e areia quartzosa aparentaram ter estabilidade até a temperatura de 400°C, quando nenhuma fissura foi visível a olho nu. Com o aumento da temperatura, o número e a abertura de fissura foram bem menores no sistema com birra do que com o agregado silicoso. Os sistemas com areia quartzosa tiveram uma variação mais significativa a partir de temperaturas superiores à 400°C, possivelmente devido à conversão do quartzo, e que nos sistema com birra não foi tão evidente.

#### 6. Considerações Finais

Há evidências de que os resíduos da indústria de caulim paraibano têm potencial de serem usados como pozolanas, plastificantes e agregados em argamassas destinadas ao assentamento de alvenarias, revestimentos de paredes e tetos, em sua forma *in natura*. Contudo, é importante avaliar outros aspectos referentes à durabilidade e variação dos parâmetros mecânicos ao longo tempo, visando a consolidação de tecnologia alternativa com uso destes tipos de materiais residuais. Importante também se faz o estudo das variações das composições dos resíduos em função da jazida e processo de beneficiamento, que podem interferir no desenvolvimento das argamassas.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- ✓ Mapear a disposição, composição mineralógica e química de resíduos de caulim Paraibanos;
- ✓ Avaliar o comportamento mecânico e aspectos da durabilidade destes resíduos levando-se em consideração sua composição visando aperfeiçoar traços aplicáveis a tecnologias de construção;
- ✓ Estudar processos alternativos de exploração do resíduo visando melhorar a extração de minerais nobres, como a caulinita;
- ✓ Avaliar o potencial de uso de resíduos do caulim no tocante ao desenvolvimento de materiais refratários.

## 7 **REFERÊNCIAS**

---

AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1 ed. São Paulo, Pini, 2000.

ALVES, S M. **Desenvolvimento de compósitos duráveis e resistentes através da substituição parcial do cimento por resíduo da indústria cerâmica**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C 270** – Mortar for Unit Masonry. EUA, 1982.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Specification for Masonry Cement. **ASTM C 91**. EUA. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7211**: Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**. Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de Chapman, Rio de Janeiro 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749**: Revestimento de parede e Tetos de Argamassas Inorgânicas – Especificações. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276** - Argamassa para assentamento de paredes e tetos - Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão. Rio de Janeiro 1995;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos –determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281** – Argamassas de assentamento e revestimento: requisitos. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751** - Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752** - Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6474** - Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215** -Cimento Portland Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**. Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro 1982;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassas e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76** - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine). Rio de Janeiro 1998;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248** Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro 2003;

BALANÇO MINERAL BRASILEIRO. DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br> > acesso em 15 Out. 2005.

BARATA, M. S. DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. **Ambiente Construído**, v. 2. nº 1, ANTAC, Porto Alegre, 2002.

BARATA, M.S. **Concreto de alto desempenho no Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim**. 1998. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 1998.

BEAUDOIN J. J. Properties of Portland cement paste reinforced with mica flakes. **Cement and Concrete Research**, v. 13, 1983.

BOLORINO, H.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo de cimento nas argamassas**. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 1997, Salvador. **Anais...** 1997, CD-ROM.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa**. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2001, Brasília. **Anais...** Brasília: ANTAC, 2001.

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

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

CONAMA – Resolução 313 de 29 de outubro de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res31302.htm>>, acesso em nov de 2006.

DO Ó, S. W. **Análise da Retenção de água em argamassas de revestimento aditivadas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) UnB, Brasília, 2004.

DUART, M. A.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; CERVO, T. C.; HOPPE, A. E.; PEDROZO, E. C. **Concretos convencionais com adição de cinza de casca de arroz sem controle de queima e sem moagem como substituto parcial de cimento**. In: 48º Congresso Brasileiro do Concreto, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...IBRACON**, 2006, CD-ROM.

FERREIRA, A. A.; SILVEIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. C. **A cinza da casca de arroz : possibilidades de utilização como insumo na produção de materiais de construção**. In: Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1997, Porto Alegre, RS. **Anais...** p. 293-298, 1997.

FIORITO, A. J. S. **Manual de argamassas de revestimento: estudos e procedimentos de execução**. 1 ed. São Paulo, Pini, 1994.

FONTES, C. M. A. **Potencialidades da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

GEYER, A.; DAL MOLIN, D.; CONSOLI, N. **Potencialidades química, física e morfológica das cinzas de lodos de esgotos sanitários de Porto Alegre serem aproveitadas como adição ao concreto**. In: 42º Congresso Brasileiro do Concreto, 2000, Fortaleza. **Anais...** IBRACON, 2000, CD-ROM.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

JOHN, V. M. **Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. II Seminário sobre desenvolvimento sustentável e reciclagem na construção civil**. In: 41º Congresso Brasileiro do Concreto, 1999, São Paulo. **Anais...** IBRACON, 1999, CD-ROM.

LIMA, J. M. **Estudo de aproveitamento do resíduo do beneficiamento de caulim como matéria prima na produção de pozolanas para cimentos compostos e pozolânicos.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil), UFPA, Belém - PA, 2004.

LIMA, M. S. **Utilização do Resíduo de Caulim para Uso em Blocos de Concreto sem Função Estrutural.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil), UFCG, Campina Grande – PB, 2005.

MASSAZZA, F. Pozzolanic Cements. **Cement & Concrete Composites**, v. 15, 1993.

MATTOS, L. R. DA S. de. **Identificação e caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas na cidade de Belém-PA.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) UFPA, Belém – PA, 2003.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1 ed. São Paulo: PINI, 1994.

NAKAKURA, E. H. **Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a Meruc.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), USP, São Paulo, 2003.

NETO P. N. de S.; RODRIGUES J. K. G.; SILVA JÚNIOR F. ALVES DA; GUIMARÃES L. C. **Utilização do resíduo com origem no processamento do caulim como filler em misturas asfálticas.** In 35<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** 2004, CD-ROM.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Trad. Salvador E. Giammuso, São Paulo 2 ed., 1997.

NÓBREGA, AF, DANTAS, K.C.B., OLIVEIRA, M.P., TORRES, S.M., BARBOSA, N.P. **Avaliação do desempenho de argamassas com o uso de rejeito de caulim industrial como material de substituição do cimento Portland.** In: Conferência Interamericana sobre Materiais e Tecnologias não-convencionais na Construção Ecológica e Sustentável, 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, IAC-NOCMAT, 2005 – CD-ROM.

OLIVEIRA, M.P. **Estudo de um caulim calcinado do estado da Paraíba como material de substituição parcial do cimento Portland.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), UFCG, Campina Grande, 2004.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo, 2 ed., 2000.

PAULO, R. S. V. M. N. **Caracterização de argamassas industriais**. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos), Universidade de Aveiro, Aveiro – Portugal, 2006.

PERA, J.; AMROUZ A. **Development of Highly Reactive Metakaolin from Paper Sludge**. *Advanced Cement Based Materials*, v. 7, 1998.

QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. **Influência da cal em propriedades mecânicas de argamassas**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005, Florianópolis. *Anais...* 2005, CD-ROM.

QUEIROZ, V. DO S. O. de ; PIMENTEL, S. R. DE O.; MARTINS, M. L.; SOUZA, P. S. L. **Avaliação comparativa do desempenho da argamassa de cimento e areia com resíduo da indústria de beneficiamento do caulim**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005, Florianópolis. *Anais...* 2005, CD-ROM.

REZENDE, M. L. de S.; ARAÚJO, I. F. de; NEVES, G. A.; NASCIMENTO, J. W. B.; SILVA, W. R da. **Gerência de resíduos de caulim: estudo de viabilidade na produção industrial de blocos de concreto**. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 2006, Bauru, SP. *Anais...*2006, CD-ROM.

ROLIM, H.O. **Potencial de uso agrícola do rejeito de caulim**. Dissertação (Mestrado em Agronomia), UFPB, Areia, 2003.

ROCHA, A. K. A. da. **Incorporação de Resíduo de Caulim em Argamassa de Alvenaria**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil), Campina Grande –PB, 2005.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de argilas**, 2. ed. rev. amp., São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

SILVA, C. A. R. DA; AKASAKI, J. L.; TASHIMA, M. M.; MANFRIM, S. T. **Influência do superplastificante nas argamassas com adição de cinza de casca de arroz**. In: Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2003, São Carlos. *Anais...* 2003, CD-ROM.

SILVA, N. G. da. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), UFPR, Curitiba, 2006.

SILVA, N. G. DA; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. – **Argamassas com areia britada: influencia dos finos e da forma das partículas**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005, Florianópolis. **Anais...2005**, CD-ROM.

SOUSA, J.B.M. **Ocorrência, distribuição e variabilidade granulométrica da argila caulim nos pegmatitos das regiões de Equador e Junco do Seridó-PB**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Centro de Ciências e Tecnologia, UFPB, Campina Grande, 1997.

SOUZA, P.S.L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) UFRG, Porto Alegre, 2003.

SUDEMA – Superintendência de Administração do Meio Ambiente. **Inventário de resíduos sólidos industriais do estado da Paraíba**. João Pessoa, 2004.

VIEIRA, A.A.P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), UFPB, João Pessoa, 2005.

TORRES, S. M. **Concreções lateríticas como material de substituição do cimento: estudo de algumas propriedades mecânicas e caracterização por difração de raios x, análise térmica diferencial e termogravimétrica**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFPB, João Pessoa, 1999.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFSC, Florianópolis, 1995.

ZAMPIERI, V.A. **Mineralogia e Mecanismo de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. 1989. Dissertação (Mestrado em Geociências), USP, São Paulo, 1989.

ZEVIN L. S., KIMMEL G. **Quantitative X-ray Diffractometry**. Springer verlog, New York, Inc., 1999.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)