

# Programa de Pós-Graduação em **Engenharia Civil e Ambiental**

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
Departamento de Engenharia Civil

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM  
EM SOLO-CIMENTO PARA CONSTRUÇÕES CIVIS**

**SIDCLEY FERREIRA CASTRO**

**Campina Grande**

**Data: AGOSTO / 2008**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
ÁREA DE GEOTECNIA**

**SIDCLEY FERREIRA CASTRO**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM  
EM SOLO-CIMENTO PARA CONSTRUÇÕES CIVIS**

**Orientadores:**

**Prof. PhD. João Batista Queiroz de Carvalho**

**Prof. PhD. Roberto Jorge Câmara Cardoso**

Campina Grande - PB  
AGOSTO/2008

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
ÁREA DE GEOTECNIA**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM  
EM SOLO-CIMENTO PARA CONSTRUÇÕES CIVIS**

Sidcley Ferreira Castro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental Unidade Acadêmica de Engenharia Civil como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Orientador: Prof. PhD. João Batista Queiroz de Carvalho

Co-Orientador: Prof. PhD. Roberto Jorge Câmara Cardoso

Campina Grande - PB  
AGOSTO/2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
(Biblioteca da UFCG)

C355i Castro, Sidcley Ferreira.  
Incorporação de resíduos de caulim em solo-cimento para construções civis/ Sidcley Ferreira Castro. – Campina Grande, 2008.  
112 f.il.  
Dissertação ( Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande, Cento de Tecnologia e Recursos Naturais.  
Referências.  
Orientadores: Prof. João Batista Queiroz de Carvalho, PhD, Prof. Roberto Jorge Câmara Cardoso, PhD.  
1. Solo-cimento. 2. Resíduo de caulim. 3. Construção civil.  
I. Título.

CDU-693.542(043)

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha amada esposa, Weyne Almeida de Melo Castro, a qual tanto me orgulho e admiro, e que, com seu amor e companheirismo, não só à esta conquista, mas a tantas outras realizações já alcançadas por mim, vem me apoiando incondicionalmente.*


**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM  
EM SOLO-CIMENTO PARA CONSTRUÇÕES CIVIS**

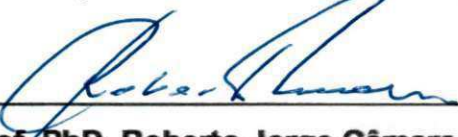
**SIDCLEY FERREIRA CASTRO**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande como parte  
dos Requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil e Ambiental.**


**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – GEOTECNIA.**

**DISSERTAÇÃO APROVADA POR:**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. PhD. João Batista Queiroz de Carvalho**  
**(Orientador – UAEC/UF CG)**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. PhD. Roberto Jorge Câmara Cardoso**  
**(Orientador – MEAU/UFBA)**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. D.Sc. Gelmires de Araújo Neves**  
**(Examinador – UAEMat/UF CG)**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. D.Sc. Soahd Arruda Rached Farias**  
**(Examinadora – UAEAg/UF CG)**

Campina Grande - PB  
julho/2008

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por iluminar meus caminhos, para que eu alcançasse mais esta importante conquista em minha vida e por me abençoar no desenvolvimento da minha profissão de engenheiro civil, não deixando faltar oportunidades de trabalho desde quando me mudei para a cidade de Salvador.

A minha esposa Weyne Castro pelo apoio e dedicação indispensáveis na realização da minha pesquisa.

Aos meus pais Nicolau e Vilani, que mesmo distantes, em Campina Grande, torcem pelo meu sucesso, e que se sacrificaram para que eu tivesse um futuro digno e honrado.

Aos meus orientadores, Professor João Batista Queiroz de Carvalho e Professor Roberto Jorge Câmara Cardoso, pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis e pela orientação neste trabalho científico.

Ao meu, amigo, padrinho, conselheiro master e eterno orientador Professor Edson Pereira, que me apóia e incentiva desde a minha graduação.

Ao Prof. Luis Edmundo Prado de Campos, Diretor da Escola Politécnica da UFBA e Coordenador do Laboratório de Geotecnia e ao Prof, Paulo Cesar Burgos, pela parceria, apoio estrutural e colaboração na elaboração do meu trabalho.

A professora e amiga, Soahd Arruda Farias Rached, pela ajuda e dedicação no desenvolvimento da minha linha de pesquisa e ao Professor Gelmires Neves pelo apoio com os ensaios dos resíduos de caulim.

A professora Vanessa Silveira Silva pelo apoio no desenvolvimento do estágio docência.

Aos técnicos e funcionários dos laboratórios de Estrutura e Geotecnia da Escola Politécnica/UFBA, pela dedicação, apoio e companheirismo na realização dos ensaios.

A UFCG e ao PPGECA pela base da minha formação acadêmica, e a funcionária da Pós-graduação Josete de Sousa Barros, que junto com os funcionários da graduação Maria José e Armando fazem a diferença, e são um dos pilares fundamentais para manter a universidade erguida.

A Indústria CAULISA e a Jazida do Cajá pelos materiais doados (resíduo de caulim e solo), objetos da minha pesquisa.

A CAPES, grande incentivadora de desenvolvimento de pesquisas acadêmicas e financiadora deste trabalho.

**Muito Obrigado**

## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
ÍNDICE DE TABELAS .....	vii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	viii
RESUMO.....	x
ABSTRACT .....	xi
<b>CAPÍTULO I</b>	
1.1. Introdução .....	12
1.2. Objetivos .....	13
1.2.1. Objetivo geral .....	13
1.2.2. Objetivos específicos.....	13
<b>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	
2.1. Solo-cimento .....	14
2.1.1. Histórico do solo-cimento .....	17
2.1.2. Composição do solo-cimento .....	18
2.1.2.1. Solo .....	18
2.1.2.2. Cimento .....	21
2.1.3. Estabilização de solo com cimento .....	23
2.1.4. Métodos de dosagem da mistura solo-cimento .....	24
2.1.5. Fatores que influenciam na qualidade do solo-cimento .....	26
2.1.6. Utilização do solo-cimento.....	29
2.1.7. Vantagens da utilização do solo-cimento .....	35
2.1.8. Solo-cimento com resíduos .....	36
2.1.8.1. Solo-cimento com resíduos cerâmicos.....	37
2.1.8.2. Solo-cimento com bagaço de cana de açúcar.....	37
2.1.8.3. Solo-cimento com casca de arroz .....	38
2.1.8.4. Solo-cimento com montículo de capim.....	39
2.2. Caulim .....	40
2.2.1. Depósitos e mercado de caulim .....	42
2.2.2. Processo de beneficiamento do caulim .....	46
2.2.2.1. Desagregação e peneiramento .....	49
2.2.2.2. Decantação .....	50



2.2.2.3. Filtração.....	51
2.2.2.4. Secagem e moagem .....	52
2.2.3. Resíduo de caulim.....	54
<b>CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS</b>	
3.1. Materiais.....	58
3.1.1. Solo .....	59
3.1.2. Resíduos de caulim.....	60
3.1.2.1. Resíduo grosso de caulim (RGC).....	60
3.1.2.2. Resíduo fino de caulim (RFC) .....	60
3.1.3. Cimento.....	61
3.1.4. Água.....	62
3.2. Métodos.....	62
3.2.1. Caracterização dos resíduos de caulim.....	64
3.2.1.1. Caracterização ambiental.....	64
3.2.1.1.1. Análise do extrato lixiviado .....	64
3.2.1.1.2. Análise do extrato solubilizado .....	64
3.2.1.2. Caracterização físico-química e mineralógica dos resíduos de caulim .....	65
3.2.1.2.1. Massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ).....	65
3.2.1.2.2. Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação .....	65
3.2.1.2.3. Limites de Atterberg .....	65
3.2.1.2.4. Análise química .....	65
3.2.1.2.5. Difração de raios-X (DRX).....	65
3.2.2. Índice de atividade pozolânica com resíduo de caulim .....	66
3.2.3. Composição da mistura solo-resíduos de caulim ( $SR_{caulim}$ ) .....	66
3.2.4. Caracterização físico-química e mineralógica das amostras de solo e mistura $SR_{caulim}$ .....	66
3.2.4.1. Massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ).....	66
3.2.4.2. Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação.....	66
3.2.4.3. Limites de Atterberg .....	67
3.2.4.4. Compactação .....	67
3.2.4.5. Determinação do pH.....	67
3.2.4.6. Ensaio de adsorção de azul de metileno.....	68
3.2.5. Experimentação .....	69
3.2.5.1. Composição do traço solo-cimento e $SCR_{caulim}$ .....	69

3.2.5.2. Preparação dos corpos-de-prova .....	70
3.2.5.3. Moldagem e cura dos corpos-de-prova .....	71
3.2.5.4. Ensaio de resistência à compressão simples (RCS) .....	72
3.2.5.5. Determinação da absorção d'água por imersão .....	74
<b>CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	
4.1. Caracterização ambiental dos $R_{caulim}$ .....	76
4.2. Caracterização químico-mineralógica dos $R_{caulim}$ .....	78
4.3. Caracterização física e mineralógica das amostras de solo e da mistura $SR_{caulim}$ .....	79
4.3.1. Massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ) .....	79
4.3.2. Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação .....	79
4.3.3. Limites de Atterberg .....	83
4.3.4. Compactação .....	84
4.3.5. Determinação do pH .....	84
4.3.6. Ensaio com adsorção de azul de metileno .....	85
4.4. Atividade pozolânica .....	86
4.5. Resistência à compressão simples (RCS) .....	87
4.6. Determinação da absorção d'água por imersão .....	92
<b>CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b>	
5.1. Conclusões .....	97
5.2. Sugestões para futuras pesquisas .....	99
<b>CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	
Referências Bibliográficas .....	100
<b>ANEXO</b>	
ANEXO – Experimento com acréscimo de uma mistura de 50% de $R_{caulim}$ passado na peneira #200 .....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Base estabilizada com solo-cimento .....	30
Figura 2.2: Proteção de taludes com solo-cimento-ensacado.....	31
Figura 2.3: Confecção de parede monolítica de solo-cimento .....	32
Figura 2.4: Tijolo de solo-cimento .....	33
Figura 2.5: Tijolo de solo-cimento servindo de forma para a estrutura da edificação .....	34
Figura 2.6: Passagem de instalações hidráulicas no tijolo de solo-cimento.....	34
Figura 2.7: Casa construída com tijolos de solo-cimento .....	35
Figura 2.8: Diagrama para o beneficiamento de caulim por via úmida da Indústria CAULISA .....	48
Figura 2.9: (a) Lavagem do caulim bruto, (b) Separação do resíduo grosso do caulim, (c) Transporte em meio líquido por gravidade do primeiro processo de separação do caulim, (d) Cobertura para o peneiramento na peneira ABNT nº. 200 .....	49
Figura 2.9: (e) Seqüência de peneiramento a úmido na ABNT nº. 200, (f) Separação do material grosso “borra” que fica retido na peneira ABNT nº. 200 .....	50
Figura 2.10: Seqüência de tanques de decantação .....	51
Figura 2.11: (a) Seqüência em paralelo com bombas de recalque para filtração através de filtro-prensa, (b) Retirada dos blocos de caulim para estocagem se secagem, (c) Armazenagem em pilhas dos blocos de caulim para secagem prévia .....	52
Figura 2.12: (a) Disposição dos blocos de caulim, destorroados, nos fornos para a secagem prévia ao ar, para posteriormente serem secadas com o calor dos fornos, (b) Chegada de material para abastecimento dos fornos de secagem do caulim..	53
Figura 2.13: (a) Moagem e ensacamento do caulim para a comercialização, (b) Estocagem do caulim em pilas com sacos de 20kg e em big bag’s .....	53
Figura 2.14: Depósito de resíduo de caulim sobre vegetação .....	55
Figura 3.1: Imagem via satélite da localização da Jazida do Cajá – BA e do Depósito de Resíduos de Caulim, CAULISA – PB. ....	58
Figura 3.2: Heterogeneidade do solo na Jazida do Cajá.....	59

Figura 3.3: Deposição do resíduo grosso do caulim .....	60
Figura 3.4: Deposição do resíduo fino do caulim .....	61
Figura 3.5: Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa .....	63
Figura 3.6: (a) Amostras para o ensaio de pH, (b) Equipamento utilizado no ensaio de pH.....	67
Figura 3.7: Equipamentos utilizados na execução do ensaio de azul de metileno pelo método da mancha (FABBRI,1994) .....	69
Figura 3.8 Materiais para as misturas de solo-cimento e $SCR_{caulim}$ .....	70
Figura 3.9: (a) Amostras para o ensaio de compactação, (b) Homogeneização das misturas.....	71
Figura 3.10: (a) Molde cilíndrico, (b) Ensaio de compactação, (c) Acondicionamento e cura dos corpos-de-prova.....	72
Figura 3.11: Corpo-de-prova pronto para ensaio de RCS.....	73
Figura 3.12: (a) Prensa "WPN", (b) Corpo-de-prova na prensa para o ensaio de RCS c) Corpo-de-prova após rompimento.....	73
Figura 3.13: (a) Corpos-de-prova colocados na estufa, (b) Corpos-de-prova imersos no tanque, (c) Balança utilizada no ensaio.....	74
Figura 4.1: Padrão de difração de raios-X dos resíduos de caulim .....	78
Figura 4.2: Distribuição granulométrica do tamanho das partículas do Solo.....	80
Figura 4.3: Distribuição do tamanho de partículas do resíduo fino de caulim (RFC) .....	81
Figura 4.4: Distribuição granulométrica do tamanho de partículas do resíduo grosso de caulim (RGC).....	81
Figura 4.5: Distribuição do tamanho de partículas da mistura de solo com incorporação de 10% de resíduo de caulim ( $SR_{caulim-10\%}$ ).....	82
Figura 4.6: Distribuição do tamanho de partículas da mistura de solo com incorporação de 20% de resíduo de caulim ( $SR_{caulim-20\%}$ ).....	82
Figura 4.7: Distribuição do tamanho de partículas da mistura de solo com incorporação de 30% de resíduo de caulim ( $SR_{caulim-30\%}$ ).....	83
Figura 4.8: Carta de Fabbri pelo método do azul de metileno.....	85
Figura 4.9: Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:10 .....	88
Figura 4.10: Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:12 .....	89

Figura 4.11: Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:15 .....	90
Figura 4.12: Absorção por imersão dos corpos-de-prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:10 .....	92
Figura 4.13: Absorção por imersão dos corpos-de-prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:12 .....	94
Figura 4.14: Absorção por imersão dos corpos-de-prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:15 .....	95

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Características do solo segundo a NBR 10832 .....	19
Tabela 2.2: Tipos de cimento .....	22
Tabela 2.3: Reservas de caulim – 2005 .....	43
Tabela 3.1: Características dos solos para a produção de solo-cimento .....	59
Tabela 3.2: Exigências físicas e mecânicas CPII-Z-32-RS .....	62
Tabela 3.3: Composição da mistura $SR_{\text{Caulim}}$ .....	66
Tabela 3.4: Teor de cimento sugerido para a composição das misturas .....	69
Tabela 3.5: Composição dos traços para as misturas de Solo-cimento e $SCR_{\text{caulim}}$ .....	70
Tabela 4.1: Análise do extrato lixiviado .....	76
Tabela 4.2: Análise do extrato solubilizado .....	77
Tabela 4.3: Resultados adicionais da caracterização ambiental .....	77
Tabela 4.4: Composição química dos resíduos.....	78
Tabela 4.5: Massa específica dos sólidos das amostras dos materiais e misturas estudadas.....	79
Tabela 4.6: Análise granulométrica e classificação dos materiais.....	80
Tabela 4.7: Determinação dos limites de Atterberg.....	84
Tabela 4.8: Parâmetros de compactação.....	84
Tabela 4.9: Determinação do pH.....	85
Tabela 4.10: Resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno .....	85
Tabela 4.11: Faixa de valores de CTC associadas ao argilomineral (Santos, 1975) .....	86
Tabela 4.12: Índice de atividade pozolânica com o cimento .....	87
Tabela 4.13: Resistência à compressão simples para o traço 1:10 .....	87
Tabela 4.14: Resistência à compressão simples para o traço 1:12 .....	88
Tabela 4.15: Resistência à compressão simples para o traço 1:15 .....	90
Tabela 4.16: Absorção de água para o traço 1:10 .....	92
Tabela 4.17: Absorção de água para o traço 1:12 .....	93
Tabela 4.18: Absorção de água para o traço 1:15 .....	95

## SÍMBOLOS E ABREVIações

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	- Associação Brasileira de Cimento Portland
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- Óxido de Alumínio
ASTM	- American Society for testing and Materials
ASSHO	- American Association of State Highway Officials
AASHTO	- American Association Highway Transport Officials
CEPED	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
CNPq	- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CaO	- Óxido de Cálcio
C <sub>2</sub> S	- Silicato Dicálcico
C <sub>3</sub> S	- Silicato Tricálcico
CO <sub>2</sub>	- Dióxido de Carbono
CAULISA	- Caulisa Indústria SA
CCT	- Centro de Ciências e Tecnologia
DNER	- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DIRIN	- Divisão de Indústria Nuclear
DNPM	- Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	- Difração de Raios - X
EUA	- Estados Unidos da América
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- Óxido de Ferro
HRB	- Highway Research Board
IP	- Índice de Plasticidade
K <sub>2</sub> O	- Óxido de Potássio
MEAU	- Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana
MPa	- Mega Pascal
MgO	- Óxido de Magnésio
Na <sub>2</sub> O	- Óxido de Sódio
NBR	- Norma Brasileira Registrada
PCA	- Portland Cement Association
PVC	- Poli Cloreto de Vinila
R <sub>caulim</sub>	- Resíduo de Caulim

RFC	- Resíduo Fino de Caulim
RGC	- Resíduo Grosso de Caulim
RCS	- Resistência à Compressão Simples
SiO <sub>2</sub>	- Sílica
SCR <sub>caulim</sub>	- Solo-Cimento Resíduo de Caulim
SR <sub>caulim</sub>	- Solo Resíduo de Caulim
SCR <sub>caulim</sub> 10%	- Solo cimento com 10% de incorporação de resíduo de caulim
SCR <sub>caulim</sub> 20%	- Solo cimento com 20% de incorporação de resíduo de caulim
SCR <sub>caulim</sub> 30%	- Solo cimento com 30% de incorporação de resíduo de caulim
SR <sub>caulim-10%</sub>	- Solo com 10% de incorporação de resíduo de caulim
SR <sub>caulim-20%</sub>	- Solo com 20% de incorporação de resíduo de caulim
SR <sub>caulim-30%</sub>	- Solo com 30% de incorporação de resíduo de caulim
MR <sub>caulim#200</sub>	- Mistura de resíduo de caulim passado na peneira #200
MR <sub>caulim#4</sub>	- Mistura de resíduo de caulim passado na peneira #4
TiO <sub>2</sub>	- Óxido de Titânio
UFCG	- Universidade Federal de Campina Grande
UFBA	- Universidade Federal da Bahia
UAEMa	- Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais
USCS	- Unified Soil Classification System
W <sub>L</sub>	- Limite de liquidez
W <sub>P</sub>	- Limite de plasticidade
W <sub>ot</sub>	- Umidade ótima
γ <sub>dmax</sub>	- Peso específico aparente seco máximo
γ <sub>s</sub>	- peso específico dos sólidos



## **INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM SOLO-CIMENTO PARA CONSTRUÇÕES CIVIS**

### **RESUMO**

Com base na potencialidade da industrialização do caulim no Brasil e sua enorme geração de resíduos, observa-se a constante necessidade de estudos que permitam um aproveitamento racional desses rejeitos na indústria da construção civil, uma vez que este setor sofre com elevados custos de produção devido a escassez de matéria prima. Este trabalho tem como objetivo estudar a potencialidade do uso dos resíduos de beneficiamento do caulim para a produção de uma mistura alternativa com solo-cimento para construções civis. Nessa pesquisa foram realizados ensaios de caracterização física, química e mineralógica dos resíduos de caulim e solo e análise ambiental dos resíduos de caulim conforme normas da ABNT. Foi avaliado o índice de atividade pozolânica dos resíduos e realizado ensaios tecnológicos para determinação da absorção d'água e resistência à compressão simples em corpos-de-prova. Nos traços da mistura de solo-cimento (1:10, 1:12 e 1:15) foram incorporados 10%, 20% e 30% de uma mistura de 50% de resíduo grosso e fino de caulim, em substituição à parte do solo. Os resultados obtidos mostraram que os corpos-de-prova com incorporação de resíduos de caulim apresentaram atividade pozolânica dentro dos padrões estabelecidos por norma, elevados valores resistência a compressão simples e valores de absorção d'água muito inferiores ao limites conforme normas da ABNT. Os corpos-de-prova incorporados com 20% da mistura de resíduos obtiveram os melhores resultados chegando a um ganho de 33% de resistência em comparação ao corpo-de-prova de referência. Por fim, conclui-se a viabilidade técnica e recomenda-se o uso de resíduos de caulim incorporado a uma mistura alternativa de solo-cimento-resíduos de caulim na construção civil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solo-cimento, resíduo de caulim, construção civil.

# INCORPORATION OF KAOLIN RESIDUES IN SOIL-CEMENT FOR CIVIL CONSTRUCTIONS

## ABSTRACT

On the basis of the potentiality of the industrialization of kaolin in Brazil and its enormous generation of residues, observes it constant necessity of studies that allow a rational exploitation of these rejects in the industry of the civil construction, a time that this sector suffers with the high costs from production due the scarcity from substance cousin. This work has as objective to study the potentiality of the use of the residues of improvement of kaolin for the production of an alternative mixture with ground-cement for civil constructions. In this research assays of physical, chemical and mineralogy characterization of the kaolin residues and soil had been carried through and ambient analysis of in agreement kaolin residues norms of the ABNT. The index of pozolânica activity of the residues was evaluated and carried through technological assays for determination of the absorption of water and simple compressive strength in body-of-test. In the traces of the soil-cement mixture (1: 10, 1:12 and 1:15) had been incorporated 10%, 20% and 30% of a mixture of 50% of thick and fine residue of kaolin, in substitution to the part of the soil. The gotten results had shown that the body-of-test with incorporation of kaolin residues had inside presented pozolânica activity of the standards established for norm, raised values resistance the simple compression and values of very inferior absorption of water to the limits in agreement norms of the ABNT. The body-of-test incorporated with 20% of the mixture of residues had gotten the best ones resulted arriving at a profit of 33% of resistance in comparison to the body-of-test of reference. Finally, viability is concluded technique and sends regards to it to the use of residues of incorporated kaolin to an alternative mixture kaolin ground-cement-residues in the civil construction.

**Key Words:** soil-cement, kaolin residue, civil construction.

# CAPÍTULO I

## 1.1. Introdução

Ao longo da história, o homem vem explorando de forma inadequada, os recursos naturais para produzir os mais diversos tipos de materiais. Essa exploração vem aumentando cada vez mais devido ao grande crescimento populacional e o elevado déficit habitacional, a intensa industrialização e o aumento do poder aquisitivo da população em geral. Devido a estes fatores, estão ocorrendo grandes alterações no meio ambiente, as quais vêm comprometendo negativamente a qualidade do solo, ar e os recursos hídricos (PIOVEZAN JR., 2007).

Assim, surge a necessidade de se obter materiais de construção com baixo consumo de energia e capazes de satisfazer a necessidade de infra-estrutura da população, sobretudo nos países em desenvolvimento de modo a baratear os custos das habitações (ANJOS et al., 2003).

O solo-cimento é uma evolução de materiais de construção do passado, como o barro e a taipa. Só que as colas naturais, de características muito variáveis, foram substituídas por um produto industrializado e de qualidade controlada: o cimento.

A reciclagem de resíduos é uma das maneiras de diversificar a oferta de matéria - prima para utilizar como materiais de construção, viabilizando reduções de preço. Assim, a reciclagem de resíduos como materiais de construção, contribui para preservação ambiental e para o aperfeiçoamento de política social (JOHN, 2000). Este mesmo autor afirma que a caracterização de resíduo industrial a ser incorporado num traço para uso em construção civil envolve aspectos químicos, físicos e de risco ambiental, tanto em seus valores médios como na sua dispersão ao longo do tempo.

As indústrias beneficiadoras de caulim vêm preocupando os ambientalistas devido à enorme quantidade de resíduos gerados, que estão sendo lançados no ecossistema sem nenhum processo de tratamento para eliminar ou reduzir seus constituintes presentes (LIMA, 2005).

No Brasil existem grandes reservas de caulins, sendo 99,0 % de sua oferta concentrada nos estados de Amapá, Pará, São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul. Em 2000, só os Estados do Amapá e do Pará produziram 84,0 % da oferta

---

nacional. Já os estados Bahia, Paraíba e Paraná também aparecem como produtores de caulim beneficiado em pequena escala.

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

Com base no exposto, e na potencialidade da industrialização do caulim no Brasil, observa-se a constante necessidade de estudos que permitam um aproveitamento racional dos resíduos provenientes das indústrias beneficiadoras.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo geral**

O objetivo geral desta pesquisa é estudar o potencial dos resíduos de beneficiamento do caulim em substituição parcial do solo na produção de uma mistura alternativa para uso em construções civis.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

A presente pesquisa tem os seguintes objetivos específicos:

- caracterização ambiental dos resíduos de acordo com as normas da ABNT;
- caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas convencionais (solo) e alternativas (resíduos de caulim);
- avaliar a atividade pozolânica dos resíduos de caulim incorporados na mistura  $SCR_{caulim}$ ;
- estudar traços adequados para incorporação do resíduo de caulim na mistura do solo-cimento convencional de acordo com as normas da ABNT;
- caracterizar tecnologicamente através das propriedades físico-mecânicas a incorporação dos resíduos como matéria-prima alternativa incorporada ao solo para produção de uma mistura alternativa para solo-cimento;
- comparar os resultados obtidos com a mistura  $SCR_{caulim}$  em relação a convencional.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Solo-cimento

A ABNT na norma NBR 12023 (1992) define o solo-cimento como um produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, executada conforme a NBR 12253 (1992).

Segundo Enteiche apud Mercado (1990), trata-se de um processo físico-químico de estabilização, no qual as conseqüências decorrem de uma estruturação resultante da reorientação das partículas sólidas do solo com a deposição de substâncias cimentantes nos contatos intergranulares, alterando, portanto, a quantidade relativa de cada uma das três fases – sólidos, água e ar que constituem o solo.

Segundo Myrrha (2003), o solo-cimento é o material alternativo de baixo custo resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo argilo-arenoso, cimento, cal e água, em proporções adequadas.

De acordo com Pires (2004), o solo-cimento é uma mistura íntima e bem proporcionada de solo com aglomerante hidráulico artificial denominado cimento Portland, de tal modo que haja uma estabilização do solo pelo cimento, melhorando as propriedades da mistura.

O solo é o componente mais utilizado para a obtenção do solo-cimento. O cimento entra em uma quantidade que varia de 5 a 10% do peso do solo, o suficiente para estabilizar o solo e conferir as propriedades de resistência desejadas para o composto.

Aio et al. (2004) apud Silveira (1966), afirmam que os principais fatores que afetam as propriedades do solo-cimento são: tipo de solo, teor de cimento, teor de umidade, compactação e homogeneidade da mistura, além de outros fatores como idade e tempo de cura da mistura.

Segundo a ABCP (1985), os solos mais arenosos são os que se estabilizam com menores quantidades de cimento, sendo necessária a presença de argila na sua composição, visando dar à mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das formas.

---

Praticamente qualquer tipo de solo pode ser utilizado, entretanto os solos mais apropriados são os que possuem teor de areia entre 45 e 50%. Somente os solos que contêm matéria orgânica em sua composição (solo de cor preta) não podem ser utilizados.

O solo a ser utilizado na mistura pode ser extraído do próprio local da obra. A possibilidade de utilização de solo do próprio local constitui-se numa das grandes vantagens do solo-cimento, sendo que, na mistura solo-cimento, o solo é o elemento que entra em maior proporção, devendo ser tal que permita o uso da menor quantidade possível de cimento (ROLIM et al., 1999).

As proporções ideais de cada material no composto do solo-cimento variam de acordo com a composição do solo utilizado (RIBEIRO FILHO et al., 2006).

Apesar dos avanços introduzidos nos métodos de dosagem, as pesquisas continuam na tentativa de simplificar ainda mais a metodologia empregada. Nesse contexto tem sido estudado um método simples e rápido para dosagem de misturas solo-cimento, baseado na interação elétrica entre as partículas de cimento e de argila contida no solo. Esse método, denominado de “Método Físico-Químico de Dosagem”, foi proposto pelo “Central Road Research Institute of India” (CHADDA, 1971).

O aumento gradual no volume da suspensão de solo-cimento, causado pela rápida interação do cimento com as partículas do solo, prossegue até o ponto em que a concentração de cimento atinge o limite de saturação requerido para produzir uma mistura estável. A concentração que produz a máxima variação volumétrica na suspensão de solo-cimento é o mínimo teor de cimento requerido para a estabilização do solo em questão, sendo que, adições do estabilizante acima deste limite de saturação, provocam aumentos na resistência mecânica das amostras compactadas, mas não induzem a reações físico-químicas com as partículas do solo (FERRAZ et al., 2000).

Segundo Chadda (1971), em uma mistura solo-cimento, as partículas de cimento comportam-se como eletricamente carregadas, o que aumenta a condutividade elétrica da massa compactada. A interação elétrica entre as partículas argilosas e as do cimento em hidratação, produz rápidas alterações físico-químicas, resultando em uma substancial variação volumétrica da mistura solo-cimento quando esta se encontra em suspensão aquosa. Assim, com base nas variações

volumétricas ocorridas durante o processo de interação do solo com o cimento, pode-se determinar o teor de cimento que leva a uma mistura estável.

A utilização do solo como material de construção pode se dá tanto na forma como ele é encontrado (solo natural), ou após correção de algumas de suas propriedades de engenharia (FERRAZ et al., 2000).

Ainda segundo Ferraz (2000), para essa correção podem ser empregados diversos métodos, entre os quais citam-se a correção granulométrica e a adição de compostos químicos.

A aplicação do solo natural só é possível em locais onde o mesmo seja de boa qualidade e atenda aos requisitos da engenharia para o tipo de aplicação previsto; a correção granulométrica e a estabilização química englobam os casos de regiões de solos impróprios, onde o uso dos processos de estabilização pode ser uma boa opção para tornar o solo apto para emprego como material de construção. Dentre os agentes estabilizantes comumente adicionados ao solo, para fins de estabilização, destaca-se o cimento (FERRAZ et al., 2000).

O solo-cimento, portanto, trata-se de um material, cujas características técnicas atendem plenamente aos requisitos de desempenho para a aplicação em diversos tipos de serviços, como base para pavimentos rodoviários e aeroportuários, confecção de tijolos e paredes maciças, blocos para alvenaria, proteção de taludes de barragens de terra, revestimento de canais, etc. (ABCP, 1986; NASCIMENTO, 1994).

A confecção de parede com solo-cimento pode ser utilizada segundo dois processos construtivos: o de paredes monolíticas e o da produção de tijolos ou blocos prensados. A escolha da técnica a ser utilizada depende das características de cada obra em particular.

As paredes monolíticas são formadas através da compactação do solo-cimento dentro de fôrmas próprias e deslocáveis. A compactação do solo-cimento também é feita no próprio local da obra, em camadas sucessivas, no sentido vertical. É necessário molhar as paredes periodicamente durante uma semana para que seja feita a cura adequada e se evitem trincas. A aplicação de chapisco e reboco são dispensáveis devido ao acabamento liso e à impermeabilidade do material, sendo necessária apenas à aplicação de pintura na parede (RIBEIRO FILHO et al., 2006).

Um convênio entre a Caixa Econômica Federal e o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia – CEPED, representou a criação do Projeto

Tecnologias Alternativas para Habitação de Baixo Custo – THABA, marco inicial no âmbito do Sistema Financeiro da Habitação, que resultou em um sistema construtivo totalmente voltado para a baixa renda, podendo ser utilizado, com certa facilidade em processos de auto-ajuda e auto construção. Na busca de soluções simplificadas o estudo foi conduzido em etapas, mediante acúmulo de informações e conclusões, que englobaram testes laboratoriais e otimização do sistema construtivo. Como resultado desse trabalho criterioso foi desenvolvida uma cartilha, com conteúdo simples e objetivo, intitulada "Cartilha para construção de paredes monolíticas de solo-cimento" (CAIXA, 2007).

Os tijolos são blocos vazados de solo-cimento, prensados mecanicamente, cuja cura é feita em uma semana, molhando-os periodicamente para ganharem resistência (RIBEIRO FILHO et al., 2006).

Os blocos de solo-cimento são produzidos utilizando-se prensa manual ou hidráulica. A mistura fresca de solo-cimento é colocada dentro de moldes e prensada. Depois de retirado da prensa, o bloco é estocado em local coberto, onde é molhado periodicamente durante uma semana para ser curado adequadamente.

Segundo a ABCP (1995), a utilização do solo-cimento na construção de habitações permite redução de custos que pode chegar a 40%. Contribuem para isto o baixo custo do solo, que o material usado em maior quantidade, e também a redução dos custos com transporte e energia. Existe ainda a possibilidade de se reduzir os custos com mão-de-obra, pois o processo não requer, em grande número, profissionais especializados em construção.

#### **2.1.1. Histórico do solo-cimento**

Segundo Guimarães (1981) a terra, como material de construção, tem sido utilizada desde épocas remotas, com edificações resistindo às intempéries até os nossos dias. Como exemplo mais significativo tem-se a grande muralha da China, construída com esse material.

Cytryn (1957) afirma, que a construção com terra foi a primeira solução encontrada pelo homem primitivo para a construção de abrigos eficientes contra o meio ambiente hostil, em locais que apresentavam dificuldades de manuseio de pedras e madeira.

De acordo com Freire (1976), a utilização do cimento como agente estabilizador de solos teve início nos EUA em 1916, quando foi empregado para solucionar problemas causados pelo tráfego de veículos de rodas não pneumáticas.



Desde então, o solo-cimento teve grande aceitação, passando a ser utilizado na construção e pavimentação de estradas de rodagem e em vias urbanas, na construção de aeroportos e acostamentos, revestimento de barragens de terra e canais de irrigação, fabricação de tijolos, pavimentação de pátios industriais e de áreas destinadas ao estacionamento de veículos, construção de silos aéreos e subterrâneos, construção de casas e pavimentação de estábulos, além de muitas outras aplicações (SEGANTINI, 2000).

O início da utilização deste material no Brasil data de 1936 e, atualmente, pode ser encontrada uma vasta literatura sobre o assunto (BARBOSA et al., 1997).

Usado inicialmente na confecção de base e sub-base de pavimentos de estrada no Brasil, o solo-cimento foi utilizado em habitações a partir de 1948, em experiências desenvolvidas pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, que regulamentou, fomentou e pesquisou a sua aplicação, levando, em 1941, à pavimentação do aeroporto de Petrolina – PE. A rede pavimentada de solo-cimento no Brasil alcançava, em 1970, a casa dos 7500 quilômetros.

Apesar dos pontos positivos destacados, no Brasil, o interesse pelo solo-cimento na construção de habitações (como componente de alvenaria) foi desaparecendo na proporção que outros materiais, na maioria dos casos mais industrializados, surgiam no mercado. Assim sendo, sua utilização é mais expressiva em obras de pavimentação (cerca de 90% das bases de nossas rodovias são de solo-cimento compactado), reforços e melhorias de solos e, finalmente, em barragens e contenções (GRANDE, 2003).

### **2.1.2. Composição do solo-cimento**

Os componentes do solo-cimento são: cimento, água e solo, podendo ser empregados materiais alternativos (plástico, borracha, papel, vidro, resíduos de demolição, rejeitos de produção industrial e outros). A cal também pode ser utilizada no solo-cimento como potencializador de suas propriedades e como agente corretivo da acidez do solo.

#### **2.1.2.1. Solo**

O solo é um conjunto de materiais minerais, orgânicos, água e ar, não-consolidados, normalmente localizado à superfície da terra, com atividade biológica e capacidade para suportar a vida das plantas.

Segundo Pinto (2000), todos os solos se originam da decomposição de rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre. A decomposição é decorrente

de agentes físicos e químicos. Variações de temperatura provocam trincas, nas quais penetra a água, atacando quimicamente os minerais. Ainda de acordo com o autor, o congelamento da água nas trincas, entre outros fatores, exerce elevadas tensões, do que decorre maior fragmentação dos blocos. A presença da fauna e flora promove o ataque químico, através de hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, etc.

O conjunto destes processos, que são muito mais atuantes em climas quentes do que frios, segundo Pinto (2000), leva à formação dos solos que, em consequência, são misturas de partículas pequenas que se diferenciam pelo tamanho e pela composição química.

O comportamento dos solos depende da movimentação das partículas sólidas entre si, o que altera as porcentagens em volume das suas fases constituintes (sólidos, ar e água) e isto faz com que o solo se afaste dos sólidos idealizados na Mecânica dos Sólidos Deformáveis, na qual se fundamenta a Mecânica das Estruturas, considerada na Engenharia Civil (GRANDE, 2003).

Segundo Lopes (2002), o solo constitui 85% em massa dos materiais componentes do solo-cimento. Quase todos os tipos de solo podem ser utilizados para tal fim, embora os solos economicamente empregáveis se restrinjam àqueles que necessitem de teores de cimento relativamente baixos para que a execução, em grande escala, seja bastante facilitada.

Segundo a norma da ABNT NBR 8491 (1984), o solo a ser utilizado na confecção de solo-cimento não deve apresentar matéria orgânica em teores prejudiciais às características exigíveis por esta Norma. E de acordo com a norma NBR 10832 (1989), o solo deve atender às características apresentadas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1: Características do solo segundo a NBR 10832 (1989).**

Característica	Condições (%)
% de solo que passa na peneira ABNT 4,8mm (n.º 4)	100
% de solo passa na peneira ABNT 0,075mm (n.º 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de plasticidade	≤ 18

---

Solos contendo impurezas orgânicas não são indicados, pois inibem a hidratação do cimento, tolerando-se, no entanto, um teor máximo de 2% de matéria orgânica (LOPES, 2002). Portanto, o peneiramento é indispensável, quando a terra possui defeitos de textura, a fim de proporcionar a retirada de pedras e materiais orgânicos (folhas, raízes e galhos).

As propriedades dos solos exercem forte influência na qualidade e no custo do solo-cimento. Pinto (1980) descreveu que o solo ideal deve ter a seguinte composição granulométrica: 15% de silte mais argila; 20% de areia fina; 30% de areia grossa; e 35% de pedregulho. Os solos arenosos bem graduados, com razoável quantidade de silte mais argila, são os mais indicados, pois requerem baixo consumo de cimento. Segundo a PCA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1969), os solos arenosos e pedregulhosos, contendo cerca de 65% de areia, e teor de silte mais argila variando de 10% a 35%, são excelentes materiais para a obtenção do solo-cimento com economia e qualidade.

As propriedades mecânicas dos solos, de maneira geral, apresentam melhorias quando misturados com cimento e submetidos a processos de compactação. Existem, porém, limitações ao uso de determinados solos, geralmente vinculadas à trabalhabilidade e ao consumo de cimento. Os limites de consistência,  $W_L$  – limite de liquidez e  $W_P$  – limite de plasticidade, são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade (CEPED, 1984).

Quanto à granulometria, os solos arenosos são considerados os mais adequados. A existência de grãos de areia grossa e de pedregulhos é benéfica, pois são materiais inertes e têm apenas a função de enchimento. Isso favorece a liberação de quantidades maiores de cimento para aglomerar os grãos menores. Os solos devem ter, no entanto, um teor mínimo da fração fina, pois a resistência inicial do solo-cimento decorre da coesão da fração fina compactada.

De acordo com Silveira (1966), os solos arenosos e pedregulhosos, com cerca de 10% a 35% da fração silte e argila, são considerados os mais favoráveis para a estabilização com cimento. Os solos arenosos deficientes em finos são também considerados materiais de boa qualidade, havendo apenas maior dificuldade para a compactação e o acabamento. O autor acrescenta que outro fator relacionado ao tipo de solo é o teor de matéria orgânica, que tende a reduzir a resistência do solo-cimento. Tem-se limitado esse teor a 2% no máximo. Outro aspecto considerado pelo autor é a possibilidade de ocorrência de certos tipos de

sais, principalmente sulfatos, os quais se cristalizam nos poros, produzindo a desagregação do material.

Na composição do solo-cimento, o solo é o material que entra em maior proporção, devendo ser selecionado de modo que permita o menor consumo possível de cimento. Quando não o houver disponibilidade de solos com as características citadas, alguns autores consideram a possibilidade de se misturar dois ou mais solos, ou mesmo de adicionar areia grossa, de modo que o resultado seja favorável técnica e economicamente (FERRAZ & SEGANTINI, 2004).

De acordo com Lopes (2000), o solo-cimento é afetado pelo conjunto de propriedades do solo, de tal maneira que a persistência de apenas uma característica desfavorável pode comprometê-lo, contra-indicando-o para fins de solo-cimento ou exigindo medidas especiais, muitas vezes onerosas, para o seu aproveitamento.

#### **2.1.2.2. Cimento**

Grande (2003) define o cimento como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer, com adição de gesso (para regular o tempo de início de hidratação ou o tempo inicial de pega) e outras substâncias que determinam o tipo de cimento. O clínquer é o resultado da mistura de calcário, argilas e, em menor proporção, minério de ferro submetido a um processo chamado clinquerização.

O cimento passa por um rigoroso controle de qualidade em seu processo de fabricação. Sua qualidade final é aferida pela ABCP, que verifica se ele atende às exigências das Normas Técnicas Brasileiras da ABNT.

No mercado existem diversos tipos de cimento. A diferença entre eles, está em seus componentes, mas todos atendem às exigências das Normas Técnicas Brasileiras da ABNT. Cada tipo de cimento corresponde a uma nomenclatura, facilitando a sua identificação, conforme apresentado na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2: Tipos de cimento.**

<b>Tipos de Cimento</b>	<b>Nomenclatura</b>
Cimento Portland Comum	CP I
Cimento Portland Comum com Adição	CP I - S
Cimento Portland Composto com Escória	CP II - E
Cimento Portland Composto com Pozolana	CP II - Z
Cimento Portland Composto com Filer	CP II - F
Cimento Portland de Alto Forno	CP III
Cimento Portland Pozolânico	CP IV - 32
Cimento Portland – ARI (Alta Resistência Inicial)	CP V
Cimento Portland Branco	CBP

Fonte: ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

Nota: O número 32 refere-se à resistência mínima que o cimento alcança, 28 dias após a sua utilização.

Incorporado o cimento ao solo, suas partículas envolvem fisicamente os grânulos do solo formando agregados que aumentam de tamanho à medida que se processam a hidratação e cristalização do cimento (LOPES, 2002).

De acordo com o CEPED - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (1999), a quantidade de cimento na dosagem do solo-cimento deve ser determinada em função das características do solo, do teor de umidade e da massa específica a ser obtida na compactação.

De acordo com a norma da ABNT NBR 8491 (1984), o cimento Portland para ser utilizado em materiais de solo-cimento deve atender, conforme o tipo empregado, as normas da ABNT NBR 5732, NBR 5733, NBR 5735 e NBR 5736.

A correção de um solo muito argiloso pode ser feita com a adição de areia pura, ou de solo arenoso, segundo Cury Neto apud Figueirola (2004). Tal procedimento, segundo ele, pode baratear o processo, pois reduz a quantidade de cimento necessária para conferir estabilidade e resistência ao material.

O autor explica que as camadas superficiais do solo, com profundidades que variam normalmente de 10 a 60 cm, em que há o predomínio de matéria orgânica, não podem ser adicionadas à mistura. E a acidez da matéria orgânica no solo retarda as reações de hidratação do cimento, comprometendo a resistência à compressão do solo-cimento.

A escolha do teor de cimento mínimo, capaz de assegurar a estabilidade necessária e de garantir à mistura a permanência de suas características, é, antes de tudo, uma imposição do critério de economia (LOPES, 2002).

Ainda segundo Lopes (2002), solos da mesma série e horizonte e de textura similar, requerem a mesma quantidade de cimento para se estabilizarem, onde quer que eles se encontrem.

### **2.1.3. Estabilização de solos com cimento**

Segundo Milani & Freire (2006), na estabilização do solo com o cimento, ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo-lhe resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado.

O termo "estabilização do solo" corresponde a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual um solo, sob o efeito de cargas aplicadas, se torna mais resistente à deformação e ao deslocamento, do que o solo original. Tais processos consistem em modificar as características do sistema solo-água-ar com a finalidade de se obter propriedades de longa duração compatíveis com uma aplicação particular (HOUBEN & GUILLAUD, 1994).

Dentre os inúmeros métodos de estabilização de solos para fins construtivos, o que tem sido identificado como mais prático e eficiente é o da estabilização química. De acordo com Fang (1991), esse método se refere àqueles em que tanto as interações químicas, quanto as físico-químicas e físicas, podem ocorrer no processo de estabilização.

A estabilização química inclui, também, aqueles métodos nos quais um ou mais compostos são adicionados ao solo com o objetivo de estabilizá-lo. De acordo com o CEPED (1977) apud Souza (1994), a estabilização dos solos com cimento é uma das formas existentes de melhorá-lo, podendo servir também como uma alternativa tecnológica para habitação popular dentro de certos limites, estes limites referem-se, principalmente, ao custo do cimento.

Segundo Ferreira et al. (2005), dentre as técnicas de estabilização química citam-se a do solo-cimento, a do solo-cal, a do solo-betume, a do solo-resina, a estabilização com cinzas volantes ("fly ash") e escórias de alto forno ("blast furnace slag"), a estabilização com o emprego de sais (cloretos), ácidos (ácido fosfórico), lignina, silicatos de sódio ("water glass"), aluminatos de cálcio, sulfatos de potássio, óxidos de ferro, cinzas pozzolânicas de turfas e restos de atividade agrícola (casca de

arroz, casca de amendoim, bagaço de cana-de-açúcar etc.) e materiais vegetais (partículas de madeira, sobras de papel, polpa de celulose etc.).

#### **2.1.4. Métodos de dosagem da mistura solo-cimento**

Os critérios para a dosagem do solo-cimento, em sua maioria, foram elaborados tendo em vista a sua aplicação como elemento de base para pavimentos rodoviários e aeroportuários.

De acordo com o CEPED (1984), a quantidade de cimento a ser utilizada na dosagem deve ser feita em função das características do solo, do teor de umidade e da densidade a ser obtida no processo de compactação.

Neves (1993) afirmou que, para se obter uma resistência à compressão maior ou igual a 1,0 MPa, o teor de cimento em massa deve ser da ordem de 14%, enquanto que, para perdas de peso menor ou igual a 10%, a porcentagem de cimento em massa deve ser de 4%, propondo, então, que o critério de resistência seja adotado para definição do teor de cimento a ser empregado.

Segundo Pinto (1980), a quantidade de cimento a ser incorporada ao solo depende das características que se pretende do material resultante. O autor afirma que dois grãos de solo fortemente unidos pelo cimento, uma vez separados, não voltam mais a apresentar a mesma coesão. Desse modo, na determinação do teor de cimento, os estudos foram dirigidos no sentido de garantir a permanência da coesão quando o solo-cimento é solicitado, tanto pela ação do tráfego, como pelos esforços provenientes das variações de temperatura e de umidade. Com esse objetivo, os técnicos da PCA (Portland Cement Association) elaboraram ensaios de durabilidade em que os corpos-de-prova são submetidos a ciclos de molhagem/secagem e congelamento/degelo. O objetivo desses ensaios, no entanto, é a verificação da durabilidade e não da resistência ao desgaste, como tem sido algumas vezes interpretado.

Pinto (1980) afirma que os ingleses consideram adequado o uso de teores de cimento capazes de conferir, aos sete dias de cura, resistência à compressão igual ou superior a 1,75 MPa. São também empregados ensaios de durabilidade do tipo molhagem/secagem e congelamento/degelo, cujos resultados são expressos em função do decréscimo de resistência.

O autor afirma que os métodos de ensaio padronizados pelas normas inglesas, no entanto, diferem bastante dos métodos adotados pela PCA, nos quais

se consideram, inclusive, aspectos relacionados às dimensões dos corpos de prova, processo de compactação e sistemas de cura.

A experiência brasileira baseia-se nos métodos de dosagem da PCA. Embora em outros países tenham sido desenvolvidos procedimentos diferentes, falta-lhes o que justamente é a maior recomendação, ou seja, a comprovação de seus resultados por um grande número de obras executadas e em uso, com enorme variedade de solos, das mais diversas origens e regiões. De acordo com a ABCP (1986), a dosagem do solo-cimento é feita através de ensaios de laboratório, seguida da interpretação dos resultados por meio de critérios preestabelecidos. O resultado final consiste na fixação de três variáveis: quantidade de cimento, quantidade de água e massa específica aparente seca máxima. As duas últimas, entretanto, sofrem pequenas oscilações, dadas as variações de campo que ocorrem nas características do solo. Assim, essas variáveis passaram a servir apenas como elemento de controle e, com isso, o objetivo da dosagem passou a ser somente a fixação da quantidade adequada de cimento. O Estudo Técnico ET-35 da ABCP (1986) traz a completa descrição das normas de dosagem de solo-cimento propostas pela PCA. Seus resultados, desde 1932, têm comprovação em inúmeros serviços executados com solos de diversas origens, em diferentes regiões do mundo, inclusive no Brasil, após 1939.

A PCA dispõe de uma norma geral e de uma norma simplificada para a dosagem do solo-cimento. De acordo com a ABCP (1986), a norma geral de dosagem pode ser resumida nas seguintes operações:

- a) identificação e classificação do solo;
- b) escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação;
- c) execução do ensaio de compactação;
- d) escolha dos teores de cimento para o ensaio de durabilidade;
- e) moldagem de corpos de prova para o ensaio de durabilidade;
- f) execução do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem; e
- g) escolha do teor de cimento adequado em função dos resultados do ensaio.

A dosagem do solo-cimento, pela norma geral, apresenta a desvantagem prática de requerer muito tempo para a realização dos ensaios, principalmente para os de durabilidade, que requerem cerca de quarenta dias. Procurou-se, então, correlacionar os resultados dos ensaios com outros de execução mais rápida. Com base na correlação estatística de resultados de ensaios de durabilidade e resistência



à compressão simples em corpos de prova de solo-cimento, aplicados a mais de 2400 tipos de solos arenosos, a PCA apresentou a norma simplificada de dosagem, a qual pode ser resumida nas seguintes operações:

- a) ensaios preliminares do solo;
- b) ensaio de compactação do solo-cimento;
- c) determinação da resistência à compressão simples aos sete dias; e
- d) comparação entre a resistência média obtida aos sete dias e a resistência admissível para o solo-cimento produzido com o solo em estudo.

Segundo a ABCP (1986), o fundamento desse método, comprovado pelos ensaios realizados, é a constatação de que solos arenosos com determinada granulometria e massa específica aparente seca máxima irão requerer, de acordo com o critério da perda de massa no ensaio de durabilidade, o mesmo teor de cimento indicado por este ensaio, desde que alcance resistência à compressão, aos sete dias, superior a determinado valor mínimo, estabelecido estatisticamente na série de ensaios de comparação realizada. O procedimento, daí resultante, foi materializado em ábacos de fácil e direta utilização. O uso desse método restringe-se aos solos que contenham 50% no máximo de partículas com diâmetro equivalente inferior a 0,05 mm (silte mais argila) e 20% no máximo de partículas com diâmetro equivalente inferior a 0,005 mm (argila).

#### **2.1.5. Fatores que influenciam a qualidade do solo-cimento**

Segundo Specht (2000), o maior ou menor grau e velocidade de modificação das propriedades do solo dependerão das características específicas do solo, do teor de aditivo, da quantidade de água, do tipo e grau de compactação, do tipo e do tempo de cura, do grau de pulverização e, no caso de solos argilosos, da eficiência da mistura.

Os parâmetro de qualidade, de um material em solo-cimento, são as medidas de absorção d'água e a resistência à compressão, seguindo as Normas da ABNT.

Alem do solo e teor de cimento citados anteriormente, outros fatores que afetam as propriedades do solo-cimento são: a homogeneidade da mistura, o teor de umidade, a compactação, e o tempo de cura (SILVEIRA, 1966).

### **a) Mistura**

Na mistura ou homogeneização, somente materiais “secos” devem ser misturados com outros materiais ou com água uma vez que, misturas de materiais secos com materiais previamente umedecidos raramente dão bons resultados. Contudo, quando a estabilização do solo é realizado com aglomerantes hidráulicos, como o cimento Portland e a cal hidratada, uma homogeneização preliminar “a seco” é essencial antes da hidratação do composto.

Em geral, a água deve ser adicionada vagarosamente e para misturadores mecânicos, usualmente são necessários apenas dois a quatro minutos de operação, dependendo da eficiência do equipamento adotado; em todo caso, a cor do composto deve ser uniforme, indicando que a homogeneização foi suficiente.

A mistura de solo-cimento é submetida à compactação num teor de umidade ótimo para obtenção de máxima densidade, de modo a formar um material estruturalmente resistente e durável, utilizado na forma de tijolos, blocos e paredes monolíticas (LOPES & FREIRE, 2003), apresentando boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade e baixo índice de retração volumétrica (HABITAR, 2006).

A mistura de solo-cimento deve ser dosada conforme os critérios estabelecidos em projeto, onde a porcentagem de cimento a ser incorporada ao solo deve sempre ser determinada em relação à massa de solo seco (DNER, 2006).

Lopes (2002) concluiu que a resistência à compressão simples aumenta com o acréscimo do teor de cimento, com o acréscimo da massa específica aparente e, por conseguinte, com o decréscimo da porosidade.

A escolha do teor de cimento mínimo, capaz de assegurar a estabilidade necessária e de garantir à mistura a permanência de suas características, é, antes de tudo, uma imposição do critério de economia.

### **b) Umidade**

O teor de umidade do solo-cimento imediatamente antes do início das operações de compactação, deve estar compreendido no intervalo  $-2,0\%$  à  $+1,0\%$  da umidade ótima de compactação (DNER, 2006).

A umidade de moldagem mais conveniente também é função do tipo de solo. Para se obter tijolos prensados de qualidade, com um determinado solo, é necessário estabelecer a porcentagem ideal de água em relação à quantidade de

material a ser posto no molde da prensa, através de um processo de otimização, o que é desenvolvido com base na máxima densidade seca (BARBOSA et al., 2002).

Segundo Lopes (2002), o efeito do teor de umidade de moldagem sobre a resistência à compressão simples das misturas de solo-cimento mostrou que a resistência alcança um máximo e decresce de maneira semelhante à da curva de compactação.

Heineck et al. (1998) observou que, para mistura solo-cimento, a umidade ótima conduz a valores máximos de densidade e, também, conduz à máxima resistência.

### **c) Compactação**

Juntamente com as fases de seleção, preparo e estabilização de solo, a prensagem das misturas de solo-cimento merece cuidados especiais uma vez que, essas fases do processo de produção podem significar a fronteira entre o sucesso ou o fracasso de todos os esforços empenhados na fabricação deste material.

Segundo Hilf (1975), compactação é o processo pelo qual uma massa de solo, constituída de partículas sólidas, ar e água, é reduzida em volume pela aplicação de carga, tal como rolamento, socamento e vibração. A compactação envolve expulsão de ar do sistema, sem significativa mudança na quantidade de água da massa de solo. Conseqüentemente, o teor de umidade do solo é normalmente o mesmo para um solo no estado fofo e, após a compactação, no estado denso.

A compactação de um solo visa o melhoramento de suas características, não só quanto à resistência, mas, também, em relação à permeabilidade, compressibilidade, absorção d'água e, principalmente, estabilidade (SPECHT, 2000).

Cada solo possui uma curva própria de peso específico aparente seco versus teor de umidade para uma determinada energia de compactação. Há uma umidade ótima para a qual resultam valores de densidade e resistência máximas.

Entretanto, já é conhecido que grandes acréscimos na energia de compactação não significam necessariamente incrementos proporcionais na resistência mecânica dos tijolos, além de freqüentemente induzirem o aparecimento do fenômeno denominado "laminação", em que a água e o ar presentes no composto, por força dessa compressão excessiva, distribuem-se linearmente ao

longo da maior dimensão da estrutura, promovendo uma estratificação em camadas do composto, que tendem a se desagregar.

Segundo Lopes (2002) a resistência à compressão do solo-cimento depende do tamanho e forma das partículas do solo, bem como do vínculo estabelecido entre as mesmas pelo processo de cimentação.

A resistência à compressão tem sido usada como um índice tecnológico, sendo esta a propriedade mais comumente empregada para descrever misturas de solo-cimento; ela serve para indicar o grau de reação da mistura de solo-cimento-água, bem como a pega relativa e a velocidade de endurecimento do cimento.

#### **d) Cura**

De acordo com Levy & Helene (1996), a cura é um conjunto de operações ou procedimentos adotados para se evitar a evaporação da água de amassamento e hidratação do cimento presente nas regiões superficiais do material. A cura, em condições adequadas, tem como objetivo: impedir a perda da água de hidratação do cimento; controlar a temperatura do material, até que se alcance o nível de resistência desejado; e suprir água extra para as reações de hidratação. O autor salienta que, para definir o tempo de cura, motivo de constante preocupação entre engenheiros e construtores, é necessário considerar dois aspectos principais: relação água/cimento; e tipo de cimento. Há, no entanto, outros fatores a serem considerados, como condições locais, temperatura ambiente, existência de ventilação, umidade relativa do ar, geometria das peças, agressividade do meio, etc.

Os materiais de solo-cimento prensados, produzidos com solo estabilizado com aglomerantes hidráulicos tais como o cimento Portland e a cal hidratada, devem passar por um período de “cura”, análogo à cura do concreto, onde os tijolos são umedecidos constantemente por um período de aproximadamente uma semana, visando garantir o processamento normal das reações químicas promovidas pela hidratação do cimento ou da cal.

#### **2.1.6. Utilização do solo-cimento**

A escolha da técnica a ser utilizada depende das características de cada obra em particular. Entre as formas de utilização do solo-cimento pode-se destacar a utilização como base para pavimentos, na produção de sacarias, na confecção de tijolos e paredes maciças.

### a) Pavimentos

Os pavimentos de solo-cimento podem ser usados em piso e contrapiso na construção de passeios ou calçadas, pátios ou terreiros e na execução de ruas ou estradas.

Os pavimentos com base ou sub-base de solo-cimento são empregados no Brasil desde 1939, quando foi construída a estrada Caxambu-Areias, em empreendimento no qual a ABCP juntou-se ao DNER. Desde então, foram executados no país mais de 25.000 km com essa solução, um marco mundial.

Mistura homogênea compactada, curada e endurecida de solo, cimento e água, pode empregar solos do próprio leito da futura base, misturados no local com equipamento pulverizador, ou usar solos selecionados, de jazida, misturados em usina central ou no próprio campo. O baixo custo inicial e a alta durabilidade são dois pontos fortes dessa alternativa. É indicado como base e sub-base de pavimentos flexíveis, Figura 2.1, e de peças pré-moldadas de concreto e também sub-base de pavimentos de concreto. No campo rodoviário, serve também como contenção de encostas (ABCP, 1986).



Figura 2.1: Base estabilizada com solo-cimento.

### b) Ensacados

O solo-cimento ensacado é feito com a mesma mistura usada nos outros modos de utilização desse material. As fôrmas, porém, são sacos de ráfia, polipropileno ou aniagem, do tipo usado para embalar grãos (feijão, milho, café, etc.). Os sacos não precisam ser novos, podem ser aproveitados sacos usados, desde que não estejam rasgados, furados ou apodrecidos, no entanto todos devem ser do mesmo tamanho. Para fechar os sacos, é utilizada uma grande agulha curva (de

15cm aproximadamente) e barbante fino, mas resistente, próprio para costurar sacarias.

É necessário dispor ainda de um soquete igual ao que se usa na compactação das fundações de solo-cimento e de um soquete frontal, para compactar os lados dos sacos.

As sacarias de solo-cimento podem ser usadas na construção de muros de arrimo e no revestimento de taludes ou encostas, como também na execução de fundações, conforme Figura 2.2.



**Figura 2.2: Proteção de taludes com solo-cimento-ensacado.**

Fonte: <http://www.pracomprar.com/v2/abrir/site/espacoeng/fotos>

Os sacos são colocados na posição de uso, no sentido horizontal, e alinhados um a um. Eles devem ser compactados logo após o posicionamento. O processo de execução assemelha-se à construção de muros de arrimo com matacões de pedra. A primeira fiada é apoiada nas fundações. A segunda é colocada sobre a primeira, em sistema de amarração (junta desencontrada). E assim sucessivamente.

Quando a mistura solo-cimento se solidifica, os sacos deixam de ser necessários em termos estruturais da obra de contenção.

### **c) Paredes maciças**

O solo-cimento compactado em paredes monolíticas constitui uma das alternativas de construção habitacional de pequeno impacto sobre o ambiente, além de ter baixo custo.

As paredes monolíticas, ou paredes maciças, são compactadas no próprio local, em camadas sucessivas, no sentido vertical, com auxílio de formas e guias. O processo de produção assemelha-se ao sistema antigo de taipa de pilão, formando painéis inteiriços, sem juntas horizontais, conforme demonstrado na Figura 2.3.



**Figura 2.3: Confeção de parede monolítica de solo-cimento.**

Fonte: Revista Projeto Design Edição 249 Novembro 2000

O conjunto de fôrmas é colocado e completado o preenchimento total da segunda fôrma, a primeira é retirada e colocada sobre a outra. E assim sucessivamente, até se atingir a altura desejada da parede.

Os conjuntos de fôrmas devem ser retirados imediatamente após o término do painel inteiriço. Os furos deixados pelos tubinhos de PVC devem ser preenchidos com o próprio solo-cimento, a partir do dia seguinte à execução da parede.

Na execução das paredes de moradias e galpões, as esquadrias (portas e janelas) devem ser assentadas simultaneamente à execução dos painéis. Mas é preciso reforçar os caixões das esquadrias, para evitar que elas deformem durante a compactação.

As instalações hidráulicas, sanitárias e elétricas das edificações com paredes maciças de solo-cimento podem ser executadas do mesmo modo que nas construções convencionais. Quando as instalações não forem embutidas, os rasgos nas paredes devem ser feitos, no máximo 48 horas após a compactação da mistura de solo-cimento.

A cura das paredes maciças é igual à dos tijolos de solo-cimento. As paredes devem ser molhadas pelo menos 3 vezes ao dia, durante uma semana.

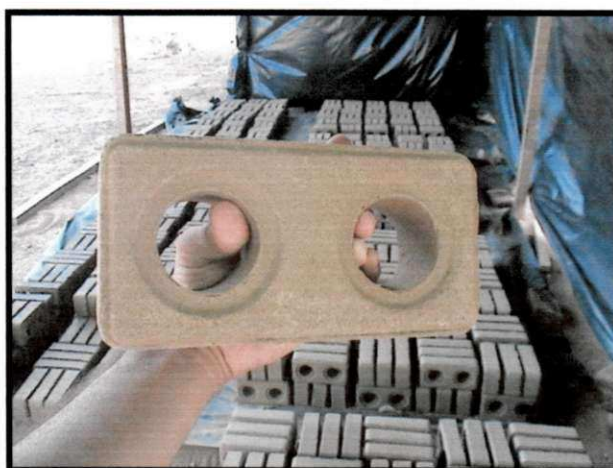
Não há necessidade de revestir as paredes maciças de solo-cimento, mas convém fazer uma pintura de impermeabilização (à base de látex, aguada de cimento, etc.).

#### d) Paredes com tijolos

Apesar de mais onerosa do que a parede monolítica, a alvenaria de blocos apresenta inúmeras vantagens como: dispensa o emprego de fôrmas, acelera a construção e facilita a passagem das instalações hidráulicas e elétricas.

Os blocos de solo-cimento são produzidos utilizando-se prensa manual ou hidráulica. A mistura fresca de solo-cimento é colocada dentro de moldes e prensada. Depois de retirado da prensa, o bloco é estocado em local coberto, onde é molhado periodicamente durante uma semana para ser curado por aproximadamente uma semana, para adquirir a resistência necessária.

Com faces regulares e um duplo encaixe, conforme apresentado na Figura 2.4, o tijolo de solo-cimento permite um melhor nivelamento e acabamento, oferecendo beleza estética à construção. Evita também o desperdício de material típico de uma obra comum, além de minimizar o tempo e custo de mão-de-obra.



**Figura 2.4: Tijolo de solo-cimento.**

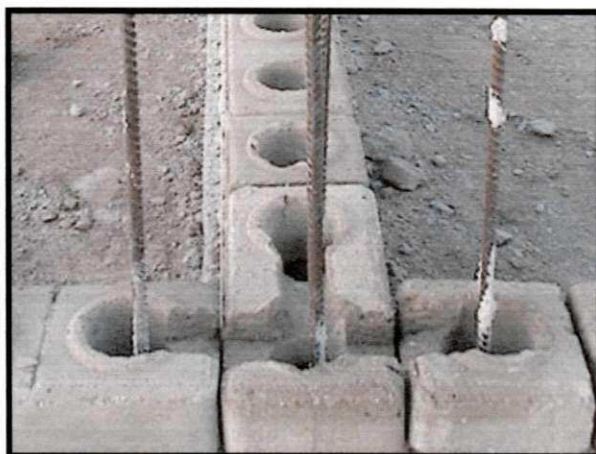
Fonte: Projeto MISOPA, Eco-Residência em parceria UFCG/CNPq, Paraíba 2005.

O tijolo modular, em solo-cimento, tem forma e desenho revolucionários, com furos e encaixe permitindo:

- através de seu sistema macho e fêmea, o encaixe entre os tijolos, sendo necessária a utilização de apenas um pequeno filete de argamassa como: cola branca, cimento-cola ou mesmo a própria argamassa de solo-cimento;
- através de seus furos, pode-se realizar a fundição de colunas de sustentação da edificação, dando melhor distribuição dos esforços entre elas (laje, telhado, etc.), evitando assim a utilização de madeira para as fôrmas convencionais e mão-de-obra de carpinteiro, como mostra a Figura 2.5;

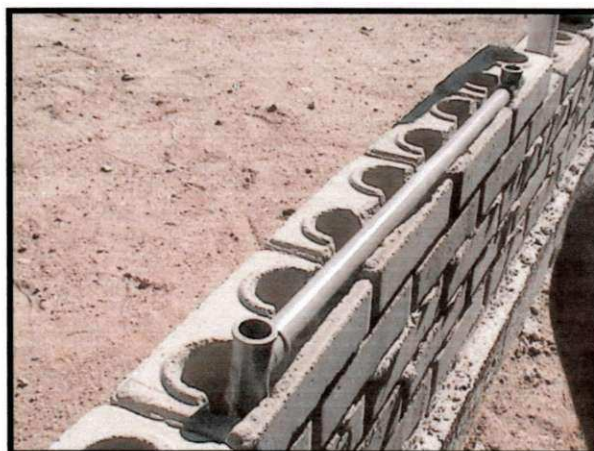


- prontas às paredes, formam-se condutores naturais, através dos furos, para a instalação dos sistemas hidráulico e elétrico, sem necessidade de quebrá-las, conforme apresentado na Figura 2.6;
- os furos proporcionam conforto térmico e acústico, através da câmara de ar que se forma no interior das paredes.



**Figura 2.5: Tijolo de solo-cimento servindo de forma para a estrutura da edificação.**

Fonte: Projeto MISOPA, Eco-Residência em parceria UFCG/CNPq, Paraíba 2005.



**Figura 2.6: Passagem de instalações hidráulicas no tijolo de solo-cimento.**

Fonte: Projeto MISOPA, Eco-Residência em parceria UFCG/CNPq, Paraíba 2005.

Toda essa funcionalidade evita o grande desperdício de material, utiliza mão-de-obra não especializada e proporciona maior velocidade à construção, ou seja, economia na obra, chegando à redução de até 50% do seu custo total, conforme Eco-casa construída na localidade de Latadinha, município de São José de Sabugi no Estado da Paraíba, Figura 2.7, onde foi construída uma residência unifamiliar de 78m<sup>2</sup>, que fez parte de um Projeto do CNPq em parceria com a UFCG. Esse projeto pode ser encontrado no sitio do Ambiente Brasil: [www.ambientebrasil.com.br/images/noticias/eco-casa.pdf](http://www.ambientebrasil.com.br/images/noticias/eco-casa.pdf).



**Figura 2.7: Casa construída com tijolos de solo-cimento.**

Fonte: Projeto MISOPA, Eco-Residência em parceria UFCG/CNPq, Paraíba 2005.

O uso de tijolos de solo-cimento produzidos por meio de prensas manuais apresenta vantagens em relação ao sistema convencional, entre as quais estão controle de perdas, a disponibilidade de abastecimento, baixo custo, durabilidade e segurança estrutural, economia de transporte, quando produzido no próprio local da obra, e a baixa agressividade ao meio ambiente, pois dispensa a queima (GRANDE, 2003). A eficácia da estabilização estrutural dos tijolos prensados de terra crua, com ou sem aditivos, é avaliada, comumente, por meio de testes físico-mecânicos destrutivos como: ensaios de resistência à compressão simples, capacidade de absorção de água e durabilidade (GORDON et al., 1997; REN & KAGI, 1995; WALKER, 1995; WEBB, 1992).

As vantagens da utilização dos tijolos de solo-cimento vão desde a sua fabricação até a sua utilização na obra. Os equipamentos utilizados são de simples manuseio e não há necessidade de pessoal especializado para operar as máquinas de produção, que podem ser instaladas no próprio canteiro, eliminando-se boa parte dos custos com transporte (FERRAZ & SEGANTINI, 2004).

#### **2.1.7. Vantagens do solo-cimento**

O solo-cimento vem se consagrando como tecnologia alternativa por oferecer o principal componente da mistura, o solo, em abundância na natureza, e geralmente disponível no local da obra ou próximo a ela.

O processo construtivo do solo-cimento é muito simples, podendo ser assimilado por mão de obra não qualificada.

Apresenta boas condições de conforto, comparáveis às construções de alvenaria de tijolos e ou blocos cerâmicos, não oferecendo condições para instalações e proliferações de insetos nocivos à saúde pública, atendendo às condições mínimas habitacionais.

É um material de boa resistência mecânica e perfeita impermeabilidade, resistindo aos intempéries e à umidade, facilitando a sua conservação.

A aplicação do chapisco, emboço e reboco são dispensáveis, devido ao acabamento liso das paredes monolíticas, em virtude da perfeição das faces (paredes) prensadas e a impermeabilidade do material, necessitando aplicar uma simples pintura com tinta à base de cimento, aumentando ainda mais a sua impermeabilidade, assim como o aspecto visual e conforto térmico.

Desse modo, conforme Grande (2003), o uso dos tijolos de solo-cimento produzidos, por meio de prensas manuais, com aplicações de técnicas simples e soluções viáveis, está em conformidade com os objetivos acima mencionados, porque permite o desenvolvimento de componentes de sistemas construtivos com as seguintes vantagens:

- Controle de perdas (a alvenaria modular minimiza o desperdício);
- disponibilidade de abastecimento;
- baixo custo em comparação às alvenarias convencionais;
- durabilidade e segurança estrutural;
- funcionalidade de seus equipamentos, permitindo uma operação direta no canteiro de obras, independentemente de sua localidade;
- eficiência construtiva devido ao sistema modular, pelo qual os tijolos são somente encaixados ou assentados com pouca quantidade de argamassa;
- os tijolos podem ser produzidos com furos internos que permitem a passagem de tubulações sem a necessidade de cortes ou quebras;
- facilidade de manuseio devido aos encaixes, que agilizam a execução da alvenaria;
- baixa agressividade ao meio ambiente, pois dispensa a queima;
- economia de transporte quando produzido no próprio local da obra.

#### **2.1.8. Solo-cimento com resíduos**

Nos últimos anos diversas pesquisas têm sido realizadas visando à redução do custo, tanto do concreto quanto da estabilização do solo, através da substituição parcial do cimento Portland por adições minerais, tais como: cinza de casca de arroz, sílica ativa, metacalinita e cinza volante, entre outros (ROLIM e FREIRE, 1998; AKASAKI e SILVA, 2001 e FARIAS FILHO et al., 2001).

As adições minerais contendo sílica e alumínio em forma amorfa reagem na presença da água, combinando quimicamente com a cal oriunda da hidratação do

cimento, para formar compostos semelhantes aos silicatos e aluminatos de cálcio hidratado, o que se denomina de reação pozolânica. Segundo Dallacort et al. (2002), este fato tem sido explorado por alguns pesquisadores visando, além de melhorar as propriedades mecânicas do solo estabilizado, diminuir a alcalinidade desse material. Outras adições usadas no cimento, como o pó de calcário moído, não possuem ação pozolânica, porém, devido à elevada finura de seus grãos podem preencher os vazios entre as partículas maiores do cimento, aumentando assim, a compactidade do solo e, por consequência, sua resistência mecânica. A este efeito dá-se o nome de efeito "filler". Outro fator de incentivo da utilização das adições minerais é que a maioria delas é subproduto ou resíduo industrial.

#### **2.1.8.1 Solo-cimento com resíduo cerâmico**

Um material que se enquadra dentro dos especificados acima e que pode ser utilizado como estabilizante do solo, é o resíduo cerâmico, proveniente da construção civil e de olarias (DALLACORT et al., 2002, apud AY & ÜNAL, 2000). Atualmente, o Brasil gera cerca de 90 kg por habitante por ano desse resíduo, que é quase todo lançado ao meio ambiente, sem nenhum tratamento (PINTO, 1999). A maioria das argilas, com as quais se fabricam blocos cerâmicos, em estado natural possui pequena atividade pozolânica, porém, quando calcinada a uma temperatura da ordem de 700 a 900 °C, torna-se reativa. O tratamento térmico destrói a estrutura cristalina da argila e a transforma em uma estrutura sílico-aluminosa amorfa. Este material, quando moído, apresenta composição físico-química dentro das especificadas pela ASTM 618 (1992) para uso como adição mineral em misturas com cimento Portland.

Dallacort et al. (2002) estudaram o comportamento de paredes estruturais de tijolos de solo-cimento com adição de resíduo cerâmico moído, trabalhando com três composições na fabricação dos tijolos. Em todos os ensaios realizados, as diferenças entre as tensões máximas observadas nas paredes e a resistência dos tijolos foram inferiores a 20%, concluindo ser possível e viável a substituição parcial do cimento por resíduos cerâmicos na fabricação dos tijolos.

#### **2.1.8.2. Solo-cimento com bagaço de cana de açúcar**

Freitas (1996) estudou as cinzas resultantes da queima do bagaço de cana em mistura com solo-cimento, na obtenção de tijolos para uso em construção civil. Adotando o método proposto pela ABCP em seu Boletim Técnico nº BT – 111 de 1985, para a realização dos ensaios de compressão e de absorção d'água, a autora

confeccionou tijolos com traços 1:0:12; 1:1:11; 1:2:10; 1:3:9 e 1:4:8 (cimento:cinzas:solo), em volume. O cimento, a cinza e o solo foram misturados manualmente até se tornarem uma mistura homogênea. Após a mistura seca, e para a determinação da umidade ideal, a água foi adicionada aos poucos, sendo em seguida realizado o teste de esfrelamento no chão (conforme indicado no Boletim Técnico BT – 111 de 1985). Os resultados desses ensaios revelaram valores de resistência à compressão simples variando de 1,9 a 2,2 MPa, para traços variando de 1:0:12 a 1:4:8. A autora pesquisou, também, a resistência mecânica de tijolos moldados com traços 1:0:10; 1:0:11; 1:0:12; 1:1:10; 1:1:11; 1:1:12; 1:2:10; 1:2:11 e 1:2:12 (cimento:cinzas:solo), em volume, alcançando valores superiores a 4,0 MPa para a resistência à compressão simples, aos 28 dias de idade, para todos os traços.

### **2.1.8.3. Solo-cimento com casca de arroz**

Ainda concentrada na fabricação de material de menor impacto ambiental, a utilização conjunta de resíduos vegetais, como a casca de arroz e matrizes cimentantes, tem-se revelado uma alternativa em potencial. Silveira et al, (1996), definiram a casca de arroz como sendo uma capa lenhosa oca, dura e altamente silicosa, composta por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica, em base anidra. Sob o aspecto econômico e tecnológico, a casca de arroz viabiliza a confecção de materiais de baixo custo, pois atua como material de enchimento ou até mesmo de substituição parcial da matéria-prima (agregado miúdo), utilizada em materiais de construção convencionais. Já sob o aspecto ambiental, a utilização da casca de arroz permite o controle e a minimização do descarte, do lançamento ou da queima indiscriminada.

Zucco (1999) submeteu diferentes frações de casca de arroz a alguns tratamentos para minimizar a incompatibilidade química entre a matriz cimentante e a biomassa vegetal, visando à fabricação de placas de compósito à base de cimento Portland e casca de arroz. Após prensagem e cura das placas, essas foram submetidas a ensaios de compressão paralela, tendo como melhores resultados obtidos os compósitos fabricados com partículas de casca de arroz lavadas em solução de cal. Esse tratamento permitiu a remoção de extratos, que se solubilizam na água e inibem a hidratação do cimento.

Milani & Freire (2006) estudaram os efeitos da adição da casca de arroz nas propriedades físico-mecânicas da mistura de solo-cimento, visando a obtenção de

composições de solo-cimento-casca de arroz com potencialidade para fabricação de materiais alternativos de construção. As composições de solo-cimento-casca de arroz foram submetidas aos ensaios de compressão simples e de tração na compressão diametral, aos 7 e aos 28 dias de idade, e de absorção d'água. Depois de determinadas as principais características físicas e mecânicas, pôde-se concluir que as misturas de solo com adição de 12% de combinações de cimento e casca de arroz se apresentaram como materiais promissores para a fabricação de elementos construtivos, a serem utilizados em construções e instalações rurais. Os valores de massa específica aparente seca máxima, de resistência à compressão simples e de tração na compressão diametral das composições de solo-cimento-casca de arroz, decresceram com o aumento do teor de casca de arroz. Já os valores de umidade ótima e absorção d'água, elevaram-se conforme o acréscimo do teor de casca de arroz. Para todos os tratamentos, os valores de resistência mecânica foram sempre maiores aos 28 dias do que aos 7 dias, evidenciando a tendência de aumento de resistência ao longo do tempo. Os resultados promissores para a confecção de componentes construtivos foram expressos pelos tratamentos com solo arenoso, sendo destacada a adição ao solo de 12% de cimento e a adição de 12% da combinação (de 80% de cimento + 20% de casca).

#### **2.1.8.4. Solo-cimento com montículo do cupim**

O trabalho de Albuquerque et al. (2008) teve como objetivo comparar a resistência à compressão de tijolos de solo-cimento fabricados com o montículo do cupim *Cornitermes cumulans* (Kollar, 1832), com tijolos que utilizaram como matéria prima um Neossolo Quartzarênico, ambos submetidos a duas idades de cura (07 ou 28 dias).

Os ensaios físicos e mecânicos obedeceram às prescrições das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR-8492 (ABNT, 1982) e NBR-8491 (ABNT, 1984). Concluiu-se que a resistência à compressão dos tijolos foi maior com o aumento das idades de cura.

Os tijolos fabricados com o montículo do cupim *Cornitermes cumulans* apresentaram diminuição da absorção de água com o aumento das idades de cura, o que normalmente corresponde a um maior aumento da resistência à compressão, ao contrário dos que utilizaram o Neossolo Quartzarênico.

A diminuição da absorção com a idade, normalmente corresponde a um maior aumento da resistência à compressão.

## 2.2. Caulim

O termo caulim é utilizado para denominar a rocha que contém a caulinita e também o produto resultante de seu beneficiamento. No passado, o caulim, conhecido como china clay, foi descoberto na região montanhosa de Jauchou Fu, na China. O nome caulim deriva da palavra chinesa kauling, que significa cume alto (SILVA, 2007).

Caulim é uma rocha constituída de material argiloso, com baixo teor de ferro e cor branca ou quase branca. Sua estequiometria se aproxima de  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  (SOUSA SANTOS, 1959). Para Motta (2004) é um material branco (claro) e fino, com pouca contaminação de outros minerais e sem matéria orgânica. Entre suas características cerâmicas mais comuns destacam-se a cor branca de queima, refratariedade, plasticidade média a baixa e pouca resistência mecânica a verde.

Segundo Flôr (2004), o caulim é um argilomineral constituído essencialmente de caulinita, possui placas de perfil hexagonal ou irregular, diâmetro de 0,1  $\mu m$  a 3  $\mu m$ , e também pode ser constituído por haloisita, porém em menor quantidade. A caulinita é um argilomineral, cuja composição química se aproxima de um silicato hidratado de alumínio com a seguinte estequiometria  $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$ .

É de conhecimento geral que os caulins apresentam juntamente com seu argilomineral constituinte, alguns minerais acessórios, tais como o quartzo, a mica e os minerais de ferro. Porém, se o tipo de mineral acessório e a proporção do mesmo variar entre uma região e outra da jazida, a matéria prima fornecida ao processo produtivo ao longo do tempo irá apresentar variações em suas características cerâmicas (MELCHIADES et al., 2002).

O Caulim é uma matéria-prima muito utilizada em diversos segmentos do setor produtivo, tais como: tintas, cerâmica, papel e outros, possuindo, portanto uma demanda de milhões de toneladas por ano (FLÔR, 2004). Entretanto, o seu beneficiamento e a distância de determinados pólos elevam os custos do produto (MOTTA et al., 2004).

Segundo Melchiades et al. (2002), é uma matéria prima de ocorrência natural comumente utilizada na fabricação de revestimentos porosos em virtude de sua cor de queima clara e estabilidade dimensional. No entanto, se a extração da matéria prima a partir da jazida não for executada convenientemente, as características da

mesma ao entrar no processo de fabricação não serão constantes, prejudicando o processo produtivo.

Segundo Hanson (1996) a seleção de um bem mineral para ser utilizado na indústria, depende de uma série de critérios: tamanho e forma das partículas, composição química, área específica, energia de superfície, alvura, opacidade, viscosidade da suspensão, índice de refração, compatibilidade com a polpa e com aditivos químicos, tais como ligantes e auxiliares.

Os caulins são resultantes de alterações de silicatos de alumínio, particularmente, os feldspatos, e podem ocorrer em dois tipos de depósitos: os primários ou residuais (eluvial) e os secundários (transportado ou sedimentar) (SILVA, 2007).

O caulim de origem primária (residual) é o mais comum em se tratando de matéria prima cerâmica produzida no Sudeste brasileiro. Nesta região, a rocha-mãe é geralmente ígnea e metamórfica e o porte dos depósitos primários variam de pequenos bolsões pegmatíticos a maciços granitóides de grande porte (MOTTA et al., 2004). O depósito primário apresenta baixa plasticidade e baixa resistência mecânica a cru (SOUSA SANTOS , 1975).

Segundo Silva (2007), os depósitos primários, resultantes das alterações de rochas *in situ*, são divididos em três grupos:

**a) Intemperizados** - Esses depósitos ocorrem em regiões de clima tropical (quente e úmido), onde as condições favorecem a decomposição dos feldspatos e de outros aluminossilicatos contidos em granitos, pegmatitos e rochas metamórficas. Outras argilas e folhelhos podem também ser alterados dando origem a uma mistura constituída de caulinita e quartzo. A reação do feldspato potássico com a água, em determinadas condições, resulta na formação da caulinita, sílica e hidróxido de potássio;

**b) Hidrotermal** - Formado pela alteração da rocha granítica, devido à circulação de fluidos quentes provenientes do interior da crosta terrestre;

**c) Solfataras** - São rochas alteradas pela ação de emanações vulcânicas ácidas, constituídas de vapor d'água rico em enxofre.

Os depósitos secundários são oriundos da deposição de materiais transportados por correntes de água doce. Neste caso, os teores de quartzo e de mica são menores (SILVA, 2007). Segundo Sousa Santos (1975), o depósito



secundário resulta do transporte e deposição de caulins residuais ou argilas caulínicas por meio de correntes de água e matéria orgânica.

Os caulins brasileiros podem ser divididos em cinco grupos: caulins sedimentares, caulins oriundos de pegmatitos, de rochas graníticas, de rochas vulcânicas e caulins derivados de anortosito (SILVA, 2007).

Nos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte existem grandes beneficiadoras nacionais de caulins primários para uso em uma vasta gama de produtos, destacando-se a indústria cerâmica e a de papel (CASTRO, 2008).

O caulim da região Borborema-Seridó é essencialmente caulínico, e encontra-se associado aos minerais quartzo, feldspato e muscovita (SILVA, 2007). A sua lavra é feita por meios manuais, inicialmente a céu aberto, podendo evoluir para a lavra subterrânea, com abertura de poços e galerias, segundo os procedimentos característicos da mineração artesanal (LUZ et al., 2003). Eles são beneficiados para a eliminação desses minerais, principalmente o quartzo (CASTRO, 2008).

### **2.2.1. Depósitos e mercado de Caulim**

Os depósitos de caulim de interesse econômico têm ampla distribuição no Planeta. As reservas de caulim são abundantes, com destaque para o tamanho e qualidade do caulim secundário encontrado nos Estados Unidos e Brasil, e de caulim primário do Reino Unido, nas jazidas localizadas no sudoeste da Inglaterra. Esse tipo de caulim tem seu uso direcionado, principalmente, para fins nobres, como o de enchimento e cobertura na indústria de papel (MÁRTIRES e SILVA, 2007).

As reservas mundiais de caulim são bastante abundantes e de ampla distribuição geográfica. Porém, apenas 4 países detêm cerca de 95,0% de um total estimado de aproximadamente 14,2 bilhões de toneladas: Estados Unidos (53,0%), Brasil (28,0%), Ucrânia (7,0%) e Índia (7,0%). Segundo o Anuário Mineral Brasileiro (2006), as reservas brasileiras de caulim atingiram, no ano de 2005, um total em torno de 4,9 bilhões de toneladas, das quais 2,7 bilhões são medidas. O somatório destas com as reservas indicadas atingiram 4,4 bilhões de toneladas, correspondendo a 89,8% das reservas totais. Os Estados do Amazonas, Pará e Amapá são as Unidades da Federação com maior destaque, participando, respectivamente, com 68,25%, 16,72% e 8,06% do total das reservas. A Tabela 2.3 apresenta as reservas de caulim em alguns estados brasileiros no ano de 2005.

**Tabela 2.3: Reservas de Caulim – 2005.**

UF	Minério			Total
	Medida*	Indicada**	Inferida***	
<b>AM</b>	1.924.282.431	1.218.157.624	263.406.700	<b>3.405.846.755</b>
<b>PA</b>	304.867.267	312.101.899	217.473.178	<b>834.442.344</b>
<b>AP</b>	272.187.823	130.124.000	-	<b>402.311.823</b>
<b>SC</b>	62.327.870	8.562.387	5.858.867	<b>76.749.124</b>
<b>GO</b>	8.513.520	11.048.871	41.838.500	<b>61.400.891</b>
<b>PR</b>	22.872.487	11.560.302	19.602.496	<b>54.035.285</b>
<b>SP</b>	31.629.817	16.227.012	6.118.736	<b>53.975.565</b>
<b>RS</b>	22.850.316	17.335.287	8.902.642	<b>49.088.245</b>
<b>MG</b>	16.169.460	10.087.208	2.104.215	<b>28.360.883</b>
<b>BA</b>	6.814.516	2.649.550	2.651.598	<b>12.115.664</b>
<b>ES</b>	25.000	6.818.013	-	<b>6.843.013</b>
<b>PE</b>	1.761.467	-	-	<b>1.761.467</b>
<b>PI</b>	754.292	337.907	448.256	<b>1.540.455</b>
<b>MA</b>	364.901	252.800	-	<b>617.701</b>
<b>PB</b>	190.924	166.037	64.673	<b>421.634</b>
<b>RN</b>	271.389	19.676	-	<b>291.065</b>
<b>RJ</b>	229.436	28.762	-	<b>258.198</b>

Fonte: DNPM – DIRIN (Balanço Mineral Brasileiro / 2006)

O Estado do Amazonas aparece no 1º lugar do ranking, sendo um dos principais depósitos brasileiros de caulim o estados do Amazonas, Pará e Amapá, detêm cerca de 93% das reservas nacionais.

O Estado da Paraíba aparece na 15ª posição em relação às reservas de caulim, sendo o Junco do Seridó e Salgadinho os principais municípios produtores (CASTRO, 2008).

Segundo Souza Santos (1989), apesar das reservas relativamente reduzidas, os caulins da Paraíba são de elevado rendimento, alvura e refletância pelo fato de serem constituídas por caulinita hexagonal.

Na região Sul, importantes jazidas estão relacionadas com a alteração de rochas vulcânicas ácidas (SC) e anortositos (RS); no Nordeste, associados aos pegmatitos (PB/RN), a sedimentos cretácicos e terciários (BA) e; no Norte, ocorrem os grandes depósitos sedimentares terciários da região amazônica, estes últimos lavrados para abastecimento da indústria mundial de papel (MOTTA et al., 2004).

Segundo Mártires e Silva (2007), a produção brasileira de caulim beneficiado apresentou um ligeiro crescimento (1,9%), em relação ao ano anterior, passando de

\*Reserva medida: a tonagem de minério computado pelas dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras, galerias, trabalhos subterrâneos e [sondagens], e na qual o teor é determinado pelos resultados de amostragem pormenorizada, devendo os pontos de inspeção, amostragem e medida estar tão proximamente espaçados e o caráter geológico tão bem definido que as dimensões, a forma e o teor da substância mineral possam ser perfeitamente estabelecidos.

\*\*Reserva indicada: a tonagem e o teor do minério são computados parcialmente de medidas e amostras específicas, ou de dados da produção, e parcialmente por extrapolação até distância razoável com base em evidências geológicas.

\*\*\*Reserva inferida: estimativa feita com base no conhecimento das características geológicas do depósito mineral, havendo pouco ou nenhum trabalho de pesquisa.

2,41 milhões de toneladas em 2005, para 2,45 milhões de toneladas em 2006. Entre as principais empresas produtoras, a Imerys Rio Capim Caulim S/A – IRCC mantém a liderança da produção nacional respondendo por 39%, sendo seguida pela Caulim da Amazônia S/A (CADAM) com 31%, Pará Pigmentos S/A (PPSA) com 24% e outras produtoras com 6%. Todas as empresas apresentaram ligeira ampliação de sua produção visando abastecer suas fatias no comércio internacional. No caso da PPSA, desde o ano anterior, esta evolução positiva teve base principal em investimentos em P&D, que resultaram no desenvolvimento de novos produtos, que poderão, inclusive, gerar aumentos de capacidade instalada. Além do Amapá e Pará, que produzem caulim para revestimento e cobertura de papel, são Estados produtores São Paulo, Paraná, Bahia, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Santa Catarina o calins produzidos são utilizados, principalmente, no setor de cerâmicas brancas (vasos em geral, porcelanas, etc.) (SILVA, 2007).

O valor da produção mineral do caulim comercializado do Brasil, segundo o Anuário Brasileiro (2006) foi de R\$ 696.150.225,00 dos quais R\$ 475.900,00 corresponderam ao valor da Paraíba comercializado nesse mesmo ano.

Em 2006, o mercado externo foi o destino de 98% do caulim produzido no País. As exportações de caulim beneficiado em 2006 foram 16% superior a de 2005, ou seja, 2,4 milhões de toneladas, gerando divisas de US\$ 269,01 milhões. Ressalta-se que o País quase não exporta bens manufaturados a base de caulim. O destino das exportações brasileiras de caulim beneficiado foi: Bélgica (21%), Estados Unidos (20%), Japão (14%), Holanda (13%), Finlândia (11%) e outros (21%). As três principais empresas produtoras IRCC (de capital francês), CADAM e PPSA (ambas controladas pela CVRD), foram responsáveis por 94% do total exportado. A exportação de produtos manufaturados à base de caulim apresentou um aumento de 12,0%, em toneladas, que, em valor, se traduziram em um incremento de apenas 21,6%, demonstrando a venda de produtos com valor agregado. Os Países de destino dos bens manufaturados foram: Bolívia (13%), Paraguai (13%), África do Sul (12%), Austrália (10%) Itália (9%), e outros (43%) (MÁRTIRES & SILVA, 2007).

Ainda segundo os autores, o consumo interno aparente de caulim em 2006 mostrou-se 83,3% inferior ao de 2005, passando de 343,1 mil toneladas para 57,4 mil toneladas, em decorrência do aumento nas exportações em 16%, sendo que a

produção se manteve estável. O caulim consumido no mercado interno provém das minas existentes nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e outros estados de menor produção, que forneceram, principalmente, caulim para uso na indústria de cerâmicas brancas, além de caulim do tipo carga para a indústria de papel. As empresas IRCC, CADAM e PPSA complementaram o abastecimento do mercado interno, participando respectivamente, com 1,5%, 2,2% e 15% de suas produções de caulim do tipo cobertura. O caulim é utilizado em diversos setores industriais em todo o mundo, destacando-se o de papel (cobertura e enchimento), que consome 45%, cerâmica (porcelana, cerâmica branca e refratários) 31% e o restante, 24% divididos entre tinta, borracha, plásticos e outros. O caulim tem, como principal competidor, no mercado de papel, o carbonato de cálcio.

O caulim é produzido para cerâmica com bons padrões de qualidade em diversas regiões brasileiras, e apresenta reservas em praticamente todos os estados da federação. Entretanto, apesar de um aparente equilíbrio entre produção e consumo, ainda não é pleno o abastecimento de caulim que atenda às diversas especificidades do mercado. Por exemplo, é carente o abastecimento de minério rico em haloisita; bem como é também a oferta de caulim com diversidade e controle granulométrico (MOTTA et al., 2004).

A província pegmatítica da região Borborema–Seridó localiza-se nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. Os pegmatitos dessa região, em sua maioria, são mineralizados em tantalita/columbita, berilo, entre outros (SILVA & DANTAS, 1997). O caulim extraído dos pegmatitos normalmente está encaixado em muscovita quartzitos da Formação Equador e nos micaxistos do Seridó. Pode estar associado a minerais como: tantalita, berilo, muscovita, quartzo e feldspato (SILVA, 2007).

Os depósitos de caulins da província Borborema-Seridó são lavrados há bastante tempo, mas de maneira rudimentar e predatória, sem um estudo prévio das jazidas e das condições geológicas de formação dos depósitos. A ausência de conhecimento sobre a geologia dos depósitos da região e a aplicação de tecnologias de lavra e beneficiamento acarretam em perdas significativas do minério (SILVA, 2007).

Na região nordeste, as principais indústrias mineradoras de caulim estão instaladas na região da Província Pegmatítica de Borborema do Seridó, localizada nos municípios do Equador (RN) e Junco do Seridó (PB). Essas mineradoras

perdem em torno de 50% de caulim durante o beneficiamento. Essa grande perda é causada principalmente pela ineficiência dos processos de cominuição e classificação das usinas de tratamento de minérios, para os quais são apresentadas rotas tecnológicas para maximizar a sua recuperação (LEITE et al., 2007).

As indústrias da mineração e beneficiamento de caulim são um importante segmento econômico do estado da Paraíba, entretanto produzem uma grande quantidade de resíduos, que poluem e agredem o meio ambiente (MENEZES et al., 2007).

Segundo Oliveira et al. (2004), o uso do rejeito do caulim como material pozolânico no cimento Portland pode incrementar o mercado da mineração de uma localidade e favorecer a economia das regiões produtoras, comumente dominadas pela pobreza, utilizando-o na construção de habitações populares como material alternativo. Esta nova forma de utilização também pode proporcionar uma redução dos impactos ambientais relacionados com a deposição desordenada desses resíduos, que são lançados sobre vegetação, em margens de estradas e próximo à açudes e córregos.

### **2.2.2. O Processo do beneficiamento do caulim**

O produto da alteração das rochas quartzo-feldspáticas é uma massa de caulinita e quartzo, em que o caulim é separado da areia e do silte por beneficiamento, processo que favorece a constância de qualidade do material produzido (MOTTA et al., 2004).

A industrialização do caulim envolve basicamente o processo de lavra e beneficiamento. A lavra pode ser feita em duas maneiras: em aberto e subterrânea. A lavra subterrânea é mais praticada nos locais de topografia acidentada, sendo preferida pelos garimpeiros, por evitar a operação de remoção da camada superficial (OLIVEIRA et al., 2004).

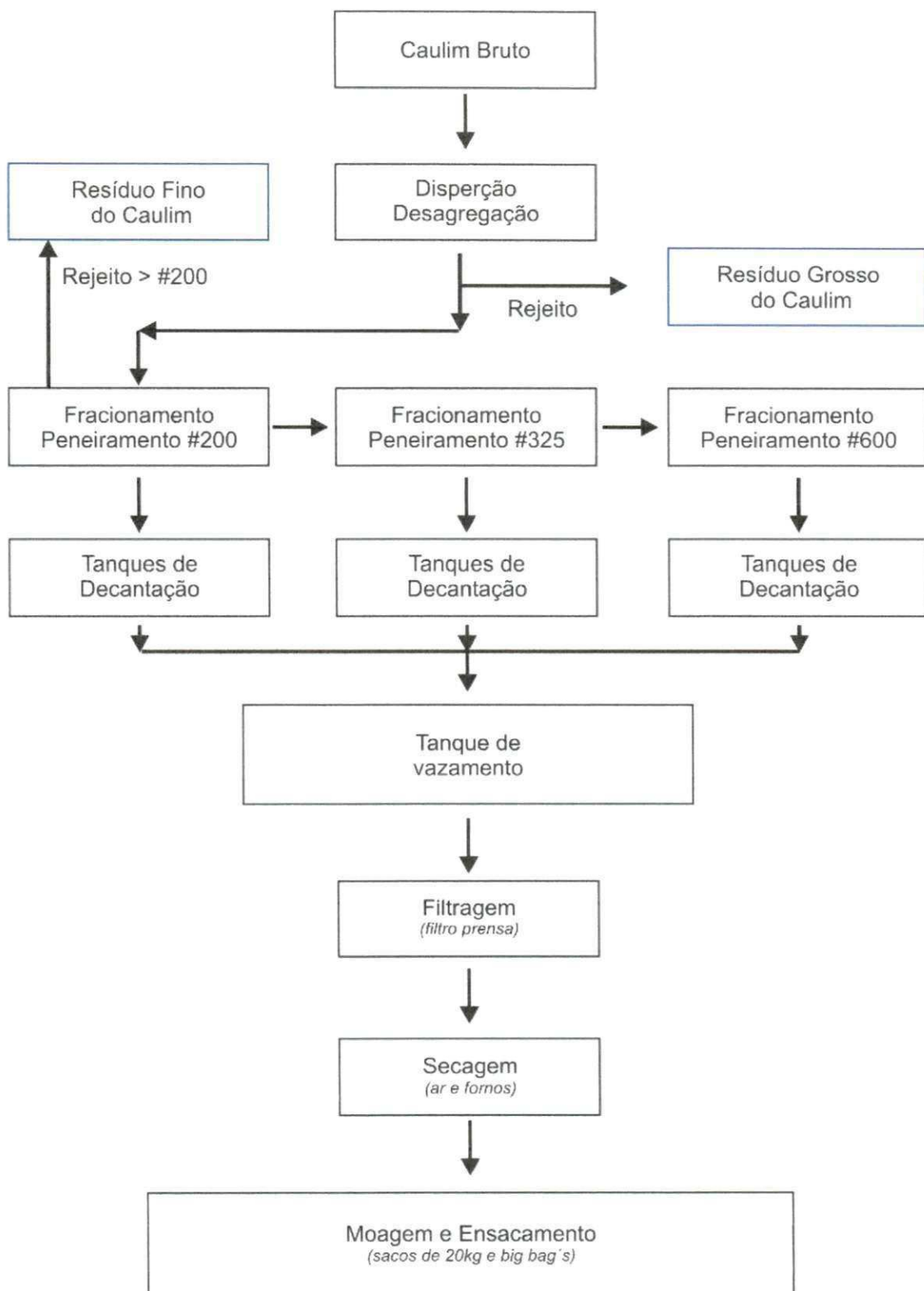
O processo do beneficiamento do caulim é necessário, pois eles ocorrem associados a várias impurezas, não atendendo, dessa forma, às especificações de mercado. As impurezas, como óxidos de ferro e titânio, mica e feldspato, influenciam diretamente na cor e alvura do caulim comprometendo sua qualidade (LUZ & DAMASCENO, 1993). Para promover o seu melhor aproveitamento é necessário realizar operações de beneficiamento, as quais vão depender do uso a que se destina. No caso de rochas sedimentares, a produção pode envolver ou não a etapa

de beneficiamento (MOTTA et al., 2004). Existem dois processos de beneficiamento: via seca e via úmida. Como a maioria dos caulins não possui as características necessárias para o mercado, predomina-se o beneficiamento por 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 que 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 (CASTRO, 2008).

O processo do beneficiamento a úmido, consta das etapas de dispersão, desareamento, separação granulométrica em hidrociclone ou centrífuga, separação magnética, floculação seletiva, alvejamento químico, filtração e secagem (MONTE et al., 2001).

O processo do beneficiamento das empresas na região Borborema-Seridó consta das etapas de desagregação, peneiramento, decantação, filtração em filtros-prensa, secagem em forno à lenha e moagem, conforme ilustrado no diagrama de fluxo da Figura 2.8.



**Figura 2.8: Diagrama para o beneficiamento de caulim por via úmida da Indústria CAULISA.**

### 2.2.2.1. Desagregação e peneiramento

O beneficiamento inicia-se com a adição de água ao caulim bruto, oriundo das jazidas, e a desagregação do mesmo em um misturador conforme Figura 2.9 (a) e 2.9 (b). A seguir, a polpa é transportada por gravidade para etapa de peneiramento Figura 2.9 (c), 2.9 (d), 2.9 (e) e 2.9 (f). Nesse transporte ocorre o desareamento, no qual são sedimentados os materiais mais grosseiros constituídos por mica, quartzo, feldspato, entre outros. Esse material é removido, através de caminhões caçambas, e depositado em terrenos da empresa. Nessa etapa já se verifica a grande quantidade de rejeito produzido, correspondendo ao resíduo grosso na obtenção do mineral caulim.

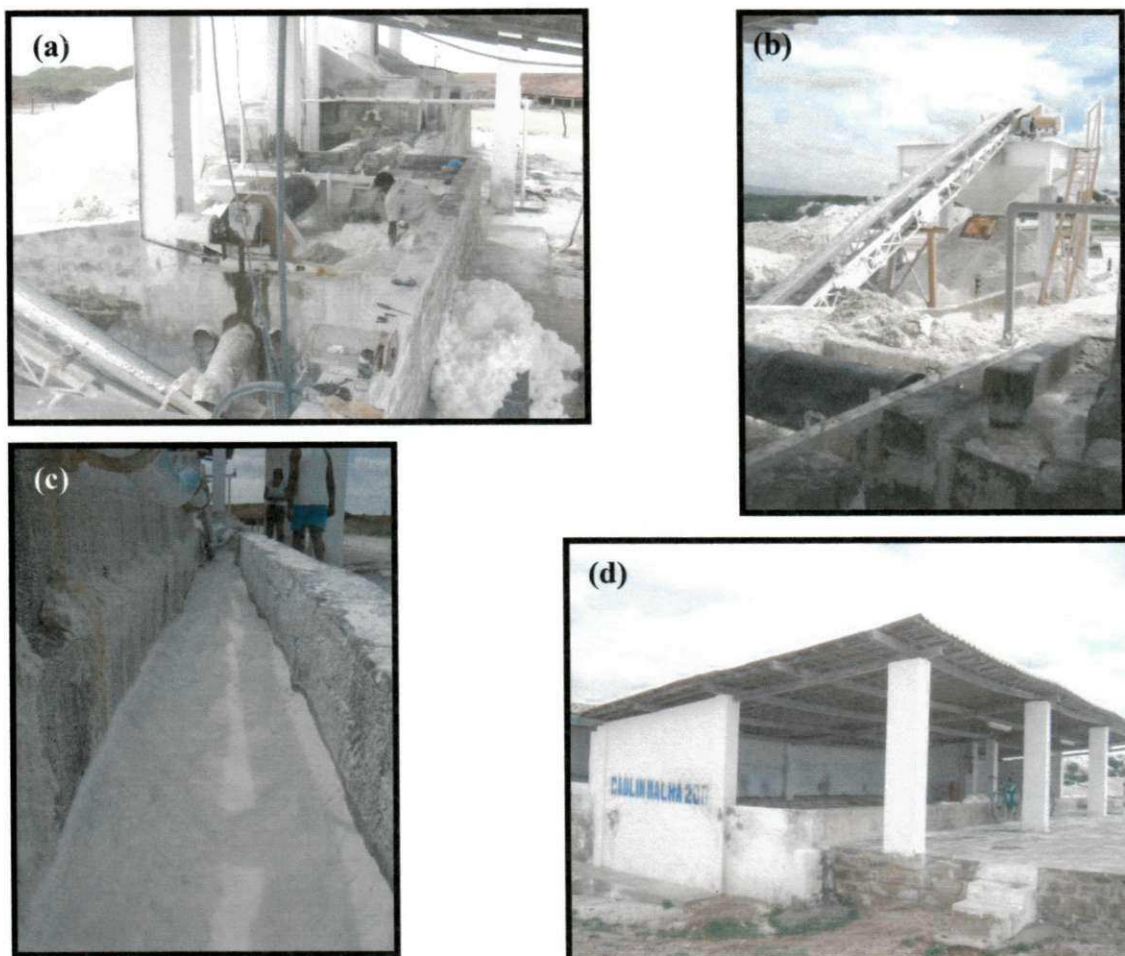
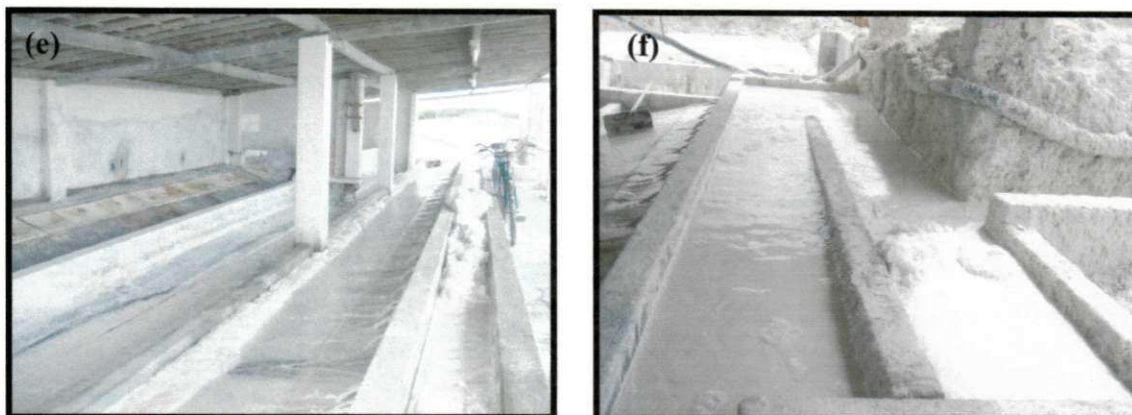


Figura 2.9: (a) Lavagem do caulim bruto, (b) Separação do resíduo grosso do caulim, (c) Transporte em meio líquido por gravidade do primeiro processo de separação do caulim, (d) Cobertura para o peneiramento na peneira ABNT n.º. 200.





**Figura 2.9: (e) Seqüência de peneiramento a úmido na ABNT nº. 200, (f) Separação do material fino “borra” que fica retido na peneira ABNT nº. 200.**

Segundo Guimarães (2005) apud Lima (2005), o coberto é formado por um conjunto de peneiras ABNT nº. 200, de abertura 0,074mm, e peneiras ABNT nº. 325, de abertura 0,044mm, que estão empilhadas em ordem crescente da abertura da malha. Nesse sistema, a mistura é classificada de acordo com as dimensões de suas partículas. Todo o material que passa nas peneiras ABNT nº. 200 (0,074mm) corresponde ao caulim que será beneficiado. Caso seja necessário um maior refinamento do minério, ele é passado nas peneiras ABNT nº. 325 (0,044mm). O material retido nas peneiras nº. 200 de abertura 0,074mm é rejeitado e consiste no resíduo fino da cadeia produtiva do caulim. Este material é conhecido usualmente, como a “borra do caulim”.

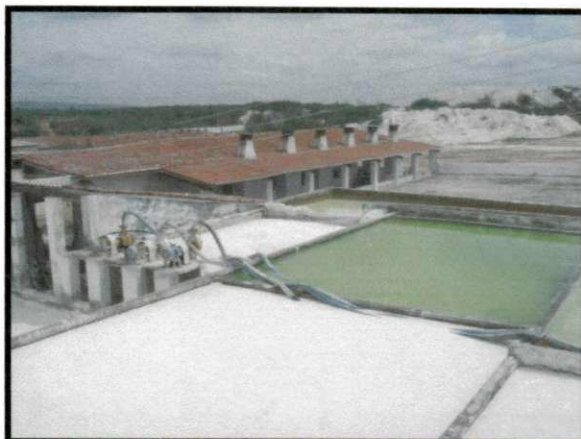
#### **2.2.2.2. Decantação**

Na decantação, o objetivo é classificar as parcelas da mistura de acordo com a sua granulometria.

Após o peneiramento, o material é levado, por gravidade, através de tubulações para um sistema de tanques, onde se inicia a fase de decantação e sedimentação, segunda lavagem do caulim. Este sistema é formado por seis tanques. O primeiro tanque recebe a mistura e é preenchido completamente com água destilada. Nele ocorre a separação de fração de maior granulometria através da sedimentação.

A fração mais fina que se posiciona na região superficial passa, por transbordamento, para o segundo tanque que apresenta um desnível de altura em relação ao primeiro, onde acontece a sedimentação da fração mais grossa. A

parcela mais fina é transbordada para o terceiro tanque, Figura 2.10. Neste tanque repete-se o mesmo procedimento de sedimentação descrito, acontecendo o mesmo também no quarto tanque (GUIMARÃES, 2004 apud LIMA, 2005).



**Figura 2.10: Seqüência de tanques de decantação.**

A água superficial que não transborda é vazada para outro tanque de onde é reciclada para a fase inicial de dispersão do minério bruto. Um dos materiais sedimentados em cada um dos tanques é escolhido de acordo com a utilização final e destinado ao tanque de vazamento, de onde será retirado para a realização do segundo processo da cadeia produtiva, a filtração.

### **2.2.2.3. Filtração**

Na etapa de filtração retira-se a água do material proveniente do tanque de vazamento. Este processo é realizado através do método da prensagem, em que a mistura é recalçada para dentro de filtros-prensa, por meio de uma bomba de recalque Figura 2.11 (a).

A mistura é prensada, assim a água é eliminada da mistura, os vazios são compactados, obtendo-se assim uma torta com aproximadamente 65% de sólidos. Nessa etapa também boa parte do ferro presente no caulim é removido junto com o filtrado. As tortas obtidas apresentam em média cerca de 32% de umidade e são encaminhadas à etapa de secagem, aproveitando o clima da região, o caulim fica então armazenado em forma de tortas (blocos), para a perda da umidade por evaporação, conforme Figura 2.11 (b) e (c), onde ficam parcialmente secas.



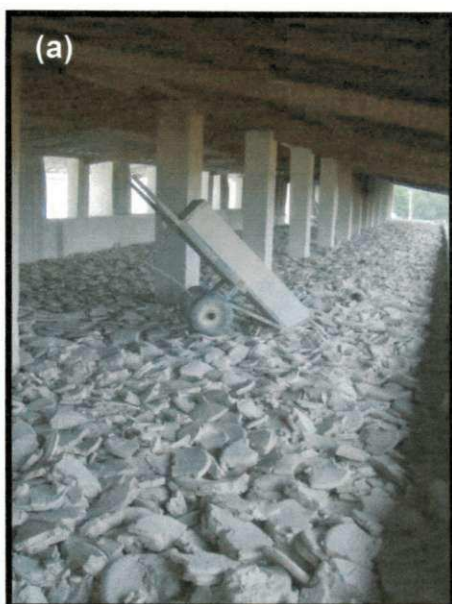
**Figura 2.11: (a) Seqüência em paralelo com bombas de recalque para filtração através de filtros-prensa, (b) Retirada dos blocos de caulim para estocagem e secagem, (c) Armazenagem em pilhas dos blocos de caulim para secagem prévia.**

#### **2.2.2.4. Secagem e moagem**

Para a perda total da umidade dos blocos de caulim, eles são encaminhados à fase de secagem. Na primeira etapa os blocos são expostos ao sol e às correntes de ar onde ficam parcialmente secos. Posteriormente os blocos de caulim são dispostos no forno, para a completa secagem do material, Figura 2.12 (a) e (b).

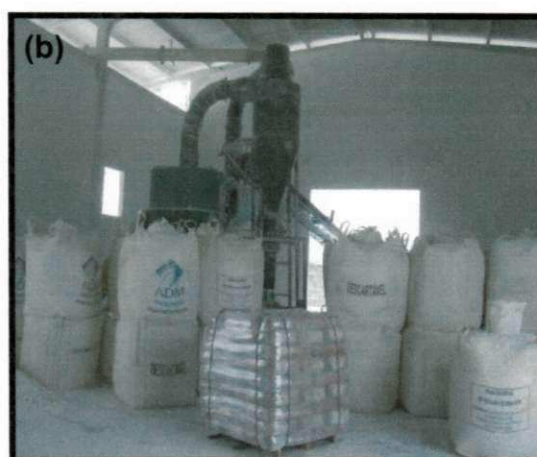
A secagem do caulim pode ser feita, segundo Rocha (2005), pelo modo de flash drayer, que é o mais economicamente viável, e que tem o maior grau de pureza, e também pelo modo de spray drayer o qual não é muito viável.

Secador flash é um sistema pneumático usado principalmente para produtos sólidos, exigindo a remoção de umidade livre. A secagem é realizada em questão de segundos. A spray secagem é comumente utilizada como um método de secagem de um líquido através de uma alimentação de gás quente. Este processo de secagem é um método rápido e elimina qualquer processamento adicional.



**Figura 2.12: (a) Disposição dos blocos de caulim, destorroados, nos fornos pra a secagem prévia ao ar, para posteriormente serem secadas com o calor dos fornos, (b) Chegada de material para abastecimento dos fornos de secagem do caulim.**

Na etapa de secagem ocorre desagregação das partículas. Em seguida o material é destorroado para facilitar a técnica da moagem. Todo o caulim é colocado em um moinho, Figura 2,13(a) onde são pulverizados, e o material coletado corresponde ao caulim beneficiado, produto final de todos esses processos, sendo finalmente ensacado, em sacos Figura 2,13(b) de 20 kg e “big bag’s” de 700, 1000, 1350 e 1500 kg, para serem destinados à comercialização, de acordo com as Figuras 2.13 (a) e (b).



**Figura 2.13: (a) Moagem e ensacamento do caulim para a comercialização (b) Estocagem do caulim em pilhas com sacos de 20kg e em big bag's.**

Durante a realização do processo de beneficiamento a úmido, pode ser necessário o uso de processos especiais para a obtenção de um produto de caulim de melhor qualidade e compatível com o mercado. Dentre esses, pode-se citar a delaminação, flotação, floculação seletiva e calcinação (SILVA, 2007).

A indústria da mineração e beneficiamento de caulim é um importante segmento da indústria mineral do estado da Paraíba, com importante papel econômico e social em várias regiões do Estado, entretanto, produz uma enorme quantidade de resíduo por ano. Dois tipos de resíduos são gerados pela indústria de processamento do caulim, um oriundo da primeira etapa do beneficiamento, separação da areia do minério caulim, que representa cerca de 70% do total do resíduo produzido e que é gerado pelas empresas mineradoras na etapa logo após a extração. O outro resíduo origina-se na segunda fase do beneficiamento, que compreende processos de tratamento a úmido que objetivam separar a fração fina do minério purificando o caulim, mas que geram um resíduo na forma de lama (MENEZES et al., 2007).

### **2.2.3. Resíduos de caulim**

Apesar a grande utilidade do caulim nos diversos setores industriais, da grande produtividade nacional e do seu alto valor econômico, a indústria de beneficiamento de caulim acarreta problemas significativos à região onde estão instaladas devido à geração de grande volume de resíduo contendo caulim, mica e quartzo (LEITE et al., 2007).

Segundo Costa et al. (2006) no processo de retirada das impurezas, ou seja, no beneficiamento, há uma grande geração de resíduos, os quais são dispostos em terrenos da própria empresa, ocupando um grande espaço.

Segundo Flores e Neves (1997), o processo de beneficiamento de caulim produz dois tipos de rejeitos: um, composto por partículas grosseiras (principalmente quartzo sob a forma de areia), sendo comumente chamado de resíduo grosso, que são, em alguns casos, repostas no próprio local da lavra, e um outro tipo de rejeito, também volumoso, constituído essencialmente por uma suspensão aquosa do argilomineral caulinita, sob a forma de partículas empilhadas, que não são totalmente dispersas durante o processamento, estando acompanhado de teores de ferro e titânio na ordem de 5%. O segundo resíduo origina-se na segunda fase do beneficiamento, que objetiva separar a fração fina do minério, purificando o caulim e

gerando um resíduo denominado comumente por resíduo fino (Menezes et al., 2007).

A deposição deste rejeito constitui uma tarefa delicada, quer por questões econômicas, quer por questões ambientais. Por não possuir valor comercial, ele precisa ser descartado da forma mais econômica possível, minimizando, porém, os impactos ambientais resultantes do processo. No caso de rejeitos sólidos secos, a deposição em áreas predeterminadas tem equacionado o problema, as chamadas “pilhas de resíduos”, como se pode observar na Figura 2.14. Em alguns casos, os rejeitos são utilizados para preenchimento de cavas, na recuperação ambiental de áreas já lavradas (DUTRA, 2005). Tradicionalmente, resíduos são dispostos em aterros e muito geralmente descartados diretamente no meio ambiente, sem qualquer processo de tratamento ou imobilização.



**Figura 2.14: Depósito de resíduo de caulim sobre vegetação.**

Todavia, a abordagem ambiental mais recente, objetiva, exatamente, a conservação e o desenvolvimento sustentável, com a minimização do descarte dos materiais oriundos das atividades industriais. Então, alternativas de reciclagem e/ou reutilização devem ser investigadas e, sempre que possível, implementadas (RAUPP-PEREIRA et al., 2006).

De acordo com Menezes et al. (2007), a maioria do rejeito gerado é, em geral, descartada em campo aberto e em várzeas de riachos e rios, o que causa agressão à fauna e flora e à saúde da população. Essa postura por parte das empresas produtoras de caulim vem sendo alvo de severas fiscalizações dos órgãos de proteção ambiental, fazendo com que o resíduo gerado torne-se uma fonte de custos para as empresas e, por vezes, um limitante no aumento de suas produções,

o que vislumbra um grande potencial de lucro para as empresas que puderem reaproveitar ou incorporar esses resíduos em suas linhas de produção.

O processo de beneficiamento acarreta ao resíduo, de forma involuntária, qualidades excelentes para que possa vir a ser uma matéria-prima de primeira qualidade, já que separa o quartzo da caulinita (LIMA et al., 2001).

Para Costa et al. (2006), na etapa de beneficiamento os principais problemas estão ligados à quantidade de resíduo gerada, 70% do caulim extraído, e a poluição do ar. Os resíduos gerados nessa etapa são simplesmente amontoados em terrenos das empresas de beneficiamento, ocupando assim um grande volume. Como a disposição dos resíduos não é feita de forma correta, observa-se que eles, depois de secos, se transformam em pó e pela ação do vento, se espalham, poluindo o ar.

Embora exista uma preocupação ambiental, por parte das empresas e dos órgãos ambientais, a indústria do caulim ainda causa transtornos, tais como a produção excessiva de particulados, gerados durante o transporte de caulim (matéria-prima bruta) e produção de rejeitos (resíduos), comprometendo o aspecto visual do local onde a empresa atua, bem como provocando uma série de danos ao meio ambiente, com impactos ambientais ao meio físico e biótico e à saúde da população residente nas regiões circunvizinhas aos "depósitos" de resíduos. O que faz com que os moradores rurais, pequenos agricultores em geral, sejam os mais afetados pelo inadequado gerenciamento de resíduos da indústria do beneficiamento do caulim.

É notável que, apesar de sua elevada importância sócio-econômica para o país, a extração e beneficiamento do caulim provocam impactos ambientais. Para mitigar esses impactos existem leis, que atualmente exigem a elaboração de EIAs/RIMAs (Estudos de Impactos Ambientais/Relatórios de Impactos Ambientais), nos quais é imprescindível a inclusão de PRADs (Plano de Recuperação de Áreas Degradadas). É preciso que as empresas que atuam nessa área se conscientizem da necessidade da preservação ambiental e da necessidade de um desenvolvimento sustentável, a fim de poderem usufruir das ISOs 9000 e 14000, tendo o privilégio de possuir um "Selo Verde" de Qualidade Ambiental, o que favorecerá a comercialização de seus produtos em nível nacional e internacional (SILVA, 2001).

A reutilização e a reciclagem de resíduos, após a detecção de suas potencialidades são consideradas atualmente alternativas que podem contribuir para

a diversificação de produtos, diminuição dos custos de produção, fornecer matérias-primas alternativas para uma série de setores industriais, conservação de recursos não renováveis, economia de energia e, principalmente, melhoria da saúde da população (MENEZES et al., 2002).

Nesse sentido, a incorporação dos resíduos da extração e beneficiamento mineral do caulim, em produtos para construção civil, vem se mostrando uma ótima alternativa para diversificar a oferta de matérias-primas e para a economia de recursos naturais (Menezes et al., 2002; Menezes et al., 2005). O que fez com que pesquisadores da Universidade Federal de Campina Grande, PB, desenvolvessem trabalhos visando o reaproveitamento dos resíduos do beneficiamento do caulim através de sua incorporação em blocos, telhas cerâmicos, argamassas de revestimento e assentamento, etc. (MENEZES et al, 2007; CASTRO, 2008).



## CAPÍTULO III

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa, que são o resíduo de caulim oriundo da Paraíba e o solo da Bahia, formam uma mistura básica para a produção de solo-cimento. Na Figura 3.1 pode-se observar a localização da jazida de solo utilizado e o local da disposição dos resíduos de caulim da empresa de beneficiamento.



**Figura 3.1: Imagem via satélite da localização da Jazida do Caji – BA e do Depósito de Resíduos de Caulim, CAULISA – PB.**

A seguir, descreve-se as características desses materiais.

### 3.1.1. Solo

Para a escolha do solo adotou-se critérios com base nas normas da ABNT NBR 10832, NBR 10833, NBR 11798 e NBR 12253. Cujas condições estão apresentadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1: Características dos solos para a produção de solo-cimento.**

Característica	Condições (%)
% de solo que passa na peneira ABNT 4,8mm (n.º 4)	100
% de solo passa na peneira ABNT 0,075mm (n.º 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de plasticidade	≤ 18

O local de escolha para a extração do solo foi a Jazida do Cají localizada próxima ao Km 4 da Estrada Cia Aeroporto na Bahia, distante 40km da Cidade de Salvador-BA, com coordenadas geográficas de referência 12°51'58.92"S e 38°21'28.28"O. A Figura 3.1, apresentada anteriormente, foi extraída do Image©2008 DigitalGlobe Programa Google Earth.

Observou-se uma heterogeneidade do solo da jazida do Cají, Figura 3.2 essa falta de homogeneidade é característica da região, no que diz respeito aos aspectos físicos, tais como: cor, textura, estrutura e consistência.



**Figura 3.2: Heterogeneidade do solo na Jazida do Cají.**

Para que não houvessem disparidades na pesquisa, retirou-se o material de um trecho aparentemente mais homogêneo.

O solo foi doado pelo responsável da jazida, transportado para o Laboratório de Geotecnia Politécnica-UFBA e acondicionado em sacos.

### 3.1.2. Resíduos de caulim

Resultantes dos processos de beneficiamento do caulim, os resíduos foram cedidos pela CAULISA Indústria S/A, localizada próxima a BR 230, e a 6 km do município de Juazeirinho - PB. Com coordenadas geográficas de referência 7°3'18.70"S e 36°39'24.71"O. A Figura 3.1 apresentada anteriormente foi extraída do Image©2008 DigitalGlobe Programa Google Earth, onde ficou notável a área de deposição circulado em vermelho dos resíduos de caulim na região.

#### 3.1.2.1. Resíduo grosso do caulim (RGC)

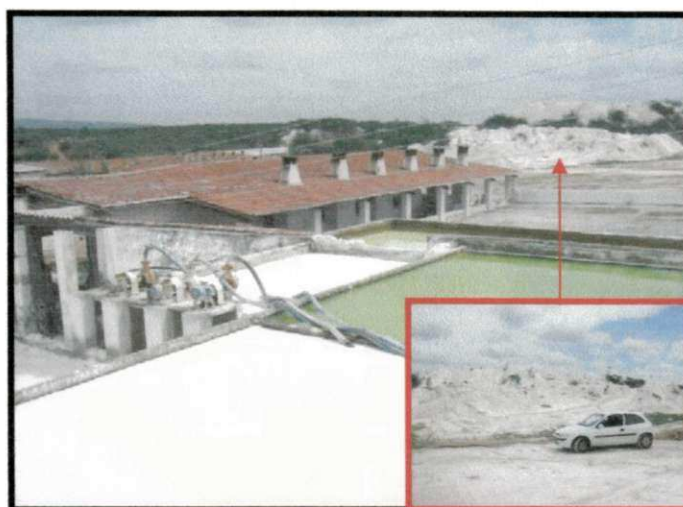
Rejeito do primeiro processo de beneficiamento do caulim é depositado em terrenos próximos a fábrica, como mostra a Figura 3.3. Foram recolhidas amostras e acondicionadas em sacos e enviadas para os Laboratórios de Geotecnia da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – UFBA, Laboratório de Cerâmica da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG e para o Laboratório de Caracterização da CETREL S/A - Empresa de Proteção Ambiental do Município de Camaçari – BA.



Figura 3.3: Deposição do resíduo grosso do caulim.

#### 3.1.2.2. Resíduo fino do caulim (RFC)

Rejeito do segundo processo de beneficiamento do caulim, denominado de borra, que fica retido na peneira ABNT nº 200 (0,074mm) e é depositado no próprio terreno da fábrica, conforme apresentado na Figura 3.4. Foram recolhidas amostras, acondicionados em sacos e enviados para os Laboratórios de Geotecnia da UFBA, de Cerâmica da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG e da CETREL S/A com o intuito de realizar os mesmos ensaios do RGC.



**Figura 3.4: Deposição do resíduo fino do caulim.**

### **3.1.3. Cimento**

Foram utilizados dois tipos de Cimento Portland na pesquisa, o CII-F e o CII-Z. O Cimento Portland Composto com Filler - CII-F-32, da marca NASSAU foi utilizado nos ensaios para determinação do índice de atividade pozolânica, fabricado pela Companhia de Cimento NASSAU, na cidade de Recife – PE e o cimento foi adquirido na indústria e acondicionado em sacos plásticos, para evitar hidratação. Este foi caracterizado em trabalhos anteriores (Souza et al., 2007), sendo observado que as propriedades físico - mecânicas do cimento estão de acordo com os valores das especificações da ABNT, sendo esses valores de: módulo de finura em malha de número 200 (0,074 mm) de 4,38%, massa específica real de 3,04 g/cm<sup>3</sup> e a superfície específica de 4.866,42 cm<sup>2</sup>/g.

Para os ensaios tecnológicos realizados na Politécnica-UFBA foi utilizado o Cimento Portland Composto com Pozolana Resistente a Sulfatos - CII-Z-32-RS, fabricado pela Votorantim Cimentos, na zona rural de Laranjeiras –SE, da marca POTY, o mais utilizado no mercado local, cujas propriedades são apresentadas, na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2: Exigências físicas e mecânicas CPII-Z-32-RS.**

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)				FINURA		TEMPO DE PEGA		EXPANSIBILIDADE	
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	Resíduo Peneira #200 (%)	Área específica (m <sup>2</sup> /kg)	Início (h)	Término (h)	A frio (mm)	A quente (mm)
-	≥10	≥20	≥32	≤12	≥260	≥1	≤10	≤5	≤5

Fonte: VOTOTANTIM CIMENTOS

Os sacos de cimento foram armazenados em local apropriado, com a finalidade de evitar a sua hidratação, devido a umidade do ar, assim que foi aberto para a utilização nos ensaios, o cimento foi acondicionado em sacos plásticos lacrados, também com a finalidade de protegê-lo da umidade

### 3.1.4. Água

Conforme NBR 10833 e NBR 10832 a água utilizada para os experimentos deve ser isenta de impurezas nocivas à hidratação do cimento, portanto, utilizou-se águas fornecidas pelas concessionárias locais, CAGEPA – Companhia de Água e Esgoto da Paraíba para os ensaios realizados a UAEMa/UFCG e EMBASA - Empresa Baiana de Águas e Saneamento, para os experimentos realizados na Politécnica/UFBA.

### 3.2. Métodos

Os ensaios realizados na pesquisa com os resíduos de caulim, solo, mistura  $SR_{\text{caulim}}$  e mistura  $SCR_{\text{caulim}}$  são mostrados esquematicamente no fluxograma da Figura 3.5, onde são detalhados todos os ensaios realizados: de caracterização; tecnológicos com os corpos de prova e dosagem experimental.

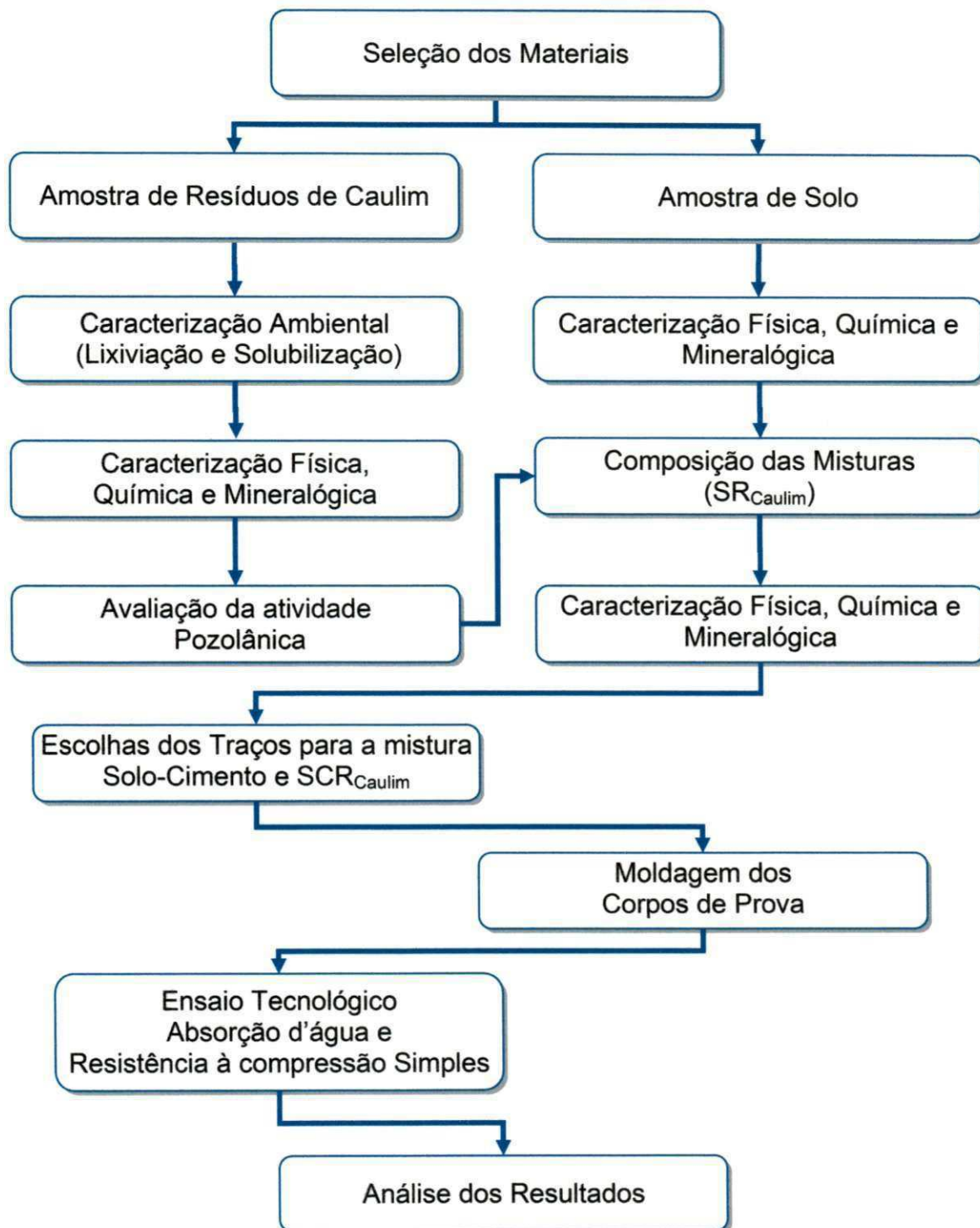


Figura 3.5: Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa.

### **3.2.1. Caracterizações dos resíduos de caulim**

#### **3.2.1.1. Caracterização ambiental**

Para que se possa avaliar o impacto ambiental dos processos ou atividades que dão origem aos resíduos é necessário classificar os materiais obtidos através de análise dos extratos lixiviados e solubilizados, sendo, em seguida, os aspectos toxicológicos destes constituintes comparados com listagens de substâncias, cujo impacto à saúde pública e ao meio ambiente já são conhecidos.

Através da norma ABNT NBR 10004 (2004) pode-se classificar os resíduos para que tenham manuseio e destinação adequados. De acordo com esta norma, os resíduos sólidos são os resíduos no estado sólidos ou semi-sólidos que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Para os ensaios de lixiviação e solubilização, foi estabelecida uma mistura de resíduos de caulim (50%RGC e 50%RFC) e passada em peneira ABNT nº. 3/8" (9,5 mm), sendo separadas duas amostras de aproximadamente 200 gramas. Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Caracterização da CETREL S/A - Empresa de Proteção Ambiental do Município de Camaçari, no Estado da Bahia.

##### **3.2.1.1.1. Análise do extrato lixiviado**

De acordo a norma ABNT NBR 10005 (2004), lixiviação é o processo utilizado para determinar a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator. A NBR 10004 (2004) classifica os resíduos como: classe I – perigosos - e classe II – não perigosos.

Na realização do ensaio, foram utilizados os seguintes equipamentos: agitador rotatório de frasco, medidor de pH, frascos de lixiviação (material inerte), aparelho de filtração pressurizado, peneira ABNT nº. 3/8" (9,5mm), balança com resolução de  $\pm 0,01g$ , agitador magnético, béquer de 500ml, etc.

##### **3.2.1.1.2. Análise do extrato solubilizado**

Na ABNT NBR 10004 (2004) é possível analisar o extrato para diferenciar os resíduos classificando-os como: classe II A – não inertes – e classe II B – inertes. Para a obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos o ensaio foi realizado de acordo com NBR 10006 (2004) da ABNT. Os aparelhos utilizados no ensaio foram: agitador, aparelho de filtração, estufa de circulação de ar forçado e exaustão,

medidor de pH, balança com resolução de  $\pm 0,01\text{g}$ , frasco de 1500ml, peneira ABNT nº. 3/8" (9,5mm), etc.

### **3.2.1.2. Caracterização físico-química e mineralógica dos resíduos de caulim**

#### **3.2.1.2.1. Massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ )**

A determinação da massa específica real foi realizada de acordo com a norma da ABNT NBR 6558 (1984). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da Politécnica-UFBA.

#### **3.2.1.2.2. Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação**

Este ensaio permite avaliar a influência da granulometria dos resíduos de caulim nas propriedades da mistura  $SR_{\text{caulim}}$  em estudo. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Politécnica-UFBA de acordo com a NBR – 7181 (1984) da ABNT.

#### **3.2.1.2.3. Limites de Atterberg**

Os Limites de Liquidez ( $W_L$ ) e Limites de Plasticidades ( $W_P$ ) foram realizados conforme normas da ABNT NBR 6459 (1984) e NBR 7180 (1984) respectivamente. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Politécnica-UFBA.

#### **3.2.1.2.4. Análise química**

Para essa análise, as matérias-primas foram beneficiadas em peneira ABNT nº 200 (0,074 mm) e em seguida caracterizadas quanto à composição química através do Equipamento EDX-900 da marca Shimadzu, pelo método de Espectrofotometria Fluorescente de Raio-X.

As análises foram realizadas no Centro de Tecnologia em Materiais em Criciúma-SC.

#### **3.2.1.2.5. Difração de raios-X (DRX)**

Para o estudo da microestrutura dos resíduos as amostras foram acondicionadas em porta amostra de alumínio para análise por difração de raios-X, em equipamento XRD 6000 da Shimadzu. A radiação utilizada foi  $K\alpha$  do Cu (40,0 KV/30,0 mA). A velocidade do goniômetro:  $0,02^\circ$  para  $2\theta$  por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões no PDF 02 (ICDD, 2003). Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do CCT/UFMG.



### 3.2.2. Índice de atividade pozolânica com o resíduo de caulim

Para avaliar se o material pode ser considerado pozolânico, deve-se analisar o índice de atividade pozolânica. Para isso foram utilizados os resíduos no estado natural de acordo com a norma da ABNT NBR 5752 (1992).

As amostras foram beneficiadas através de moagem em moinho tipo galga, em seguida passadas em peneira ABNT nº 200 (0,074mm). Foram produzidas argamassas de referência, de acordo com a ABNT NBR 5752 (1992), com cimento e RFC, RGF e uma mistura de 50%RFC+50%RGC para serem confrontadas.

Esses ensaios foram realizados pelo Laboratório de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do CCT/UFMG.

### 3.2.3. Composição da mistura solo-resíduos de caulim ( $SR_{\text{caulim}}$ )

No experimento adotou-se uma composição empírica em percentuais de 10, 20 e 30% de uma mistura de 50%RGC+50%RFC em substituição ao solo para compor uma mistura de  $SCR_{\text{caulim}}$ . Como mostra a Tabela 3.3.

**Tabela 3.3: Composição da mistura  $SR_{\text{caulim}}$ .**

MATERIAL	MISTURA		
	(%)		
Solo	90	80	70
*RGC+RFC	10	20	30
Total	100	100	100

\* Mistura (50%RGC+50%RFC)

### 3.2.4. Caracterização físico-química e mineralógica das amostras de solo e da mistura $SR_{\text{caulim}}$

Todos os ensaios referentes ao solo foram empregados da mesma forma para a mistura de  $SR_{\text{caulim}}$ . Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Politécnica-UFBA.

#### 3.2.4.1. Massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ )

Para a determinação da massa específica real foram realizados procedimentos de acordo com a norma ABNT NBR 6558 (1984).

#### 3.2.4.2. Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação

Este ensaio avalia a influência da granulometria do solo para compor a mistura com o resíduo do caulim. Para esse ensaio adotou-se a norma da ABNT NBR 7181 (1984).

### 3.2.4.3. Limites de Atterberg

Os Limites de Liquidez ( $W_L$ ) e Limites de Plasticidades ( $W_P$ ) foram realizados conforme as normas da ABNT NBR 6459 (1984) e NBR 7180 (1984) respectivamente.

### 3.2.4.4. Compactação

Para determinar o teor de umidade ótima ( $W_{ot}$ ) e peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d_{max}}$ ) da mistura de solo, RC e cimento, quando compactadas na energia normal seguiu-se a metodologia indicada na norma da ABNT NBR 6457 (1986).

### 3.2.4.5. Determinação do pH

Várias são as causas da acidez do solo e quem pode ser especificadas em termos de pH. O ensaio de pH do solo é importante para as patologias do solo que podem afetar a mistura de solo-cimento, pois solos ácidos apresentam dificuldades em se estabilizar com cimentos (GRANDE, 2003).

Para esses ensaios foram utilizados o solo, a mistura com 50%RFC+50%RGC,  $SR_{caulim-10\%}$ ,  $SR_{caulim-20\%}$  e  $SR_{caulim-30\%}$ . Este ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da Politécnica-UFBA, onde o pH foi determinado por medição em solução eletrolítica de 75ml de água destilada, com 31g dos materiais em estudo, passados previamente na peneira #10 (ABNT), submetida à agitação por alguns minutos e posterior repouso por 24 horas, para serem aferidos seu valores de pH, conforme norma internacional BS1377 de 1975 (Test 11 (A)) e medido com pHmetro WTW modelo 330i, conforme as Figuras 3.6(a) e 3.6 (b).

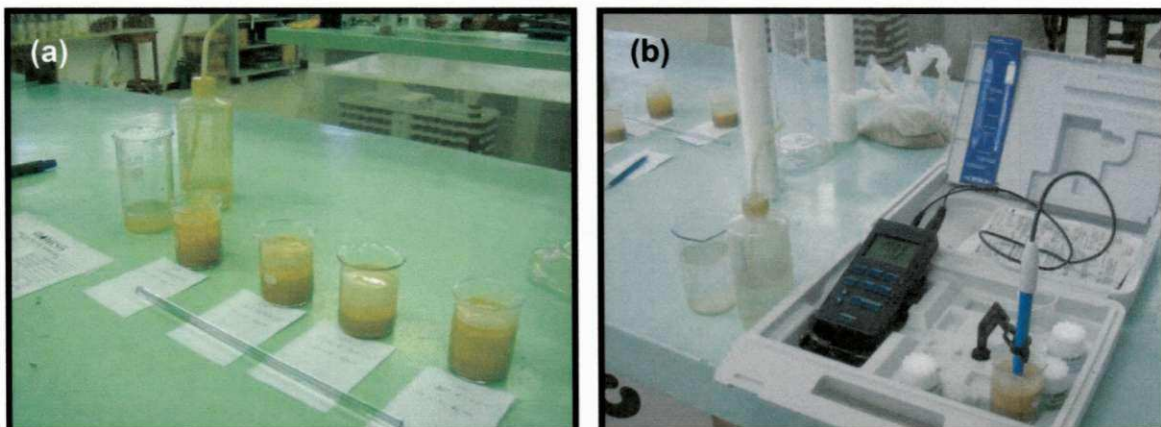


Figura 3.6: (a) Amostras para o ensaio de pH, (b) Equipamento utilizado no ensaio de pH.

### 3.2.4.6. Ensaio com adsorção de azul de metileno

Uma alternativa promissora para classificar os solos tropicais é a técnica de adsorção de azul de metileno, muito difundida no exterior, principalmente na França, mas ainda incipiente no Brasil.

O corante azul de metileno é caracterizado por ser catiônico, ou seja, em solução aquosa apresenta-se dissociado em ânions cloreto e cátions azul de metileno. Sua composição química é  $C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$ , com a nomenclatura de cloridrato metiltiamina.

Empregou-se o procedimento de Fabbri (1994) que consiste na determinação do Coeficiente de Atividade (CA), que mede a atividade mineralógica dos solos, a partir de três graus de atividade:  $CA > 80$  (Muito Ativo – abrangem os argilominerais dos grupos da montmorilonita, vermiculita etc),  $11 < CA < 80$  (Ativo – abrangem os argilominerais dos grupos da caulinita e/ou illita ou combinações desses com grupos mais ativos e grupos menos ativos) e  $CA < 11$  (Pouco Ativo – abrangem desde materiais inertes até argilominerais laterizados ou ainda combinações entre esses e grupos mais ativos). Burgos (1997) comenta que o ensaio de adsorção de azul de metileno possibilita obter informações acerca da atividade da fração argila dos solos, de forma relativamente rápida, simples e eficiente. A partir desse ensaio, pode-se determinar a capacidade de troca de cátions (CTC) de forma eficaz, empregando a expressão de Chen et al, (1974), expressas nas equações 01 e 02:

$$CA = 100 \times (V_a / P_f) \quad (01)$$

Onde:

$V_a$  = valor de azul (quantidade de azul de metileno consumida em mg por 1g de amostra de solo integral);

$P_f$  = Percentual em massa que o solo contém da fração cujo grau de atividade que avaliar, usualmente definido como a fração argila, com partículas de diâmetro inferior a 0,005mm.

$$CTC = (V \times C \times 100) / M \quad (02)$$

Onde:

CTC = capacidade de troca de cátions (meq/100g);

V = Volume de azul de metileno consumido (ml);

C = Concentração de solução de azul de metileno – normalidade;

M = massa de solo seco (g).

Os presentes procedimentos fazem uso da fração de solo menor que 0,074mm (1 grama), tendo a solução padrão a concentração de 1g/l.

Conforme Fabbri (1994), para executar o ensaio são necessários os seguintes equipamentos, mostrados na Figura 3.7.

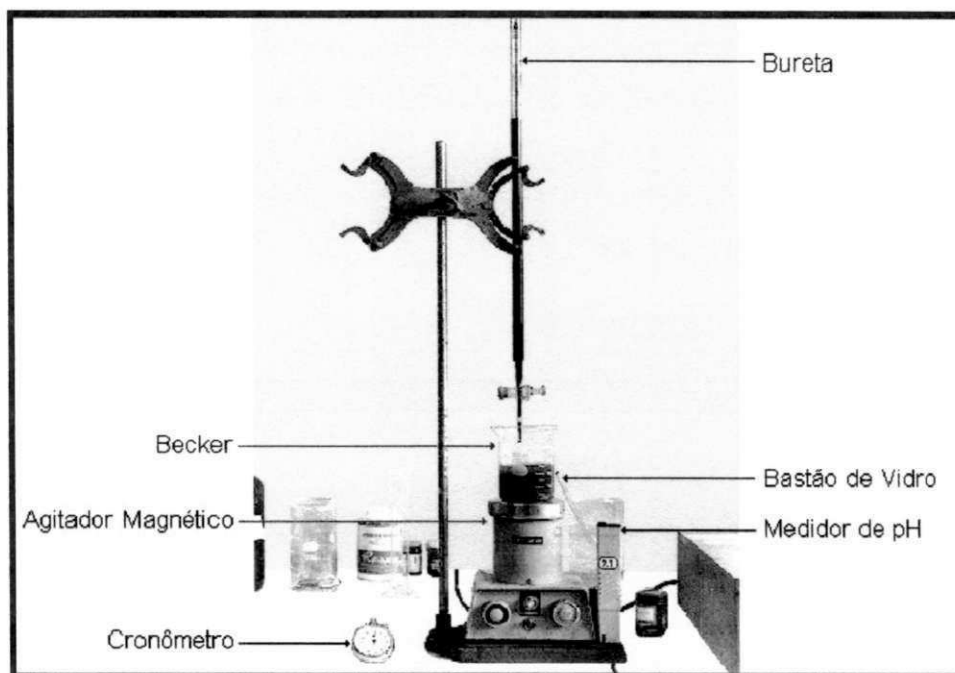


Figura 3.7: Equipamentos utilizados na execução do ensaio de azul de metileno pelo método da mancha (FABBRI, 1994).

### 3.2.5. Experimentação

#### 3.2.5.1. Composição do traço solo-cimento e $SCR_{caulim}$

Para avaliar as características da mistura solo-cimento e  $SCR_{caulim}$ , tomou-se como base teores de cimento sugeridos pela norma da ANBT NBR 12253 (1992), que sugere o teor de cimento com características granulométricas da mistura de acordo com a Tabela 3.4, e traços aconselhados no manual técnico da Empresa SAHARA- TECNOLOGIA MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA.

Tabela 3.4: Teor de cimento sugerido para a composição das misturas.

Classificação do Solo, segundo a ASTM D 3282	Teor de Cimento sugerido, em massa (%)
A1-a	5
A1-b	6
A2	7
A3	9
A4	10

### 3.2.5.2. Preparação dos corpos-de-prova

Para a realização dos ensaios tecnológicos adotou-se traços de referência de 1:12 em volume, que corresponde a 8,33% de cimento em massa na mistura, e outros dois traços, sendo um com percentuais abaixo do referencial e outro com percentuais acima, correspondendo a traços de 1:15 e 1:10 respectivos a 6,7% e 10% de cimento em massa. A mistura é composta por percentuais, de solo, resíduo fino de caulim (RFC), resíduo grosso de caulim (RGC) e cimento, conforme demonstrado na Tabela 3.5 e ilustrado na Figura 3.8.



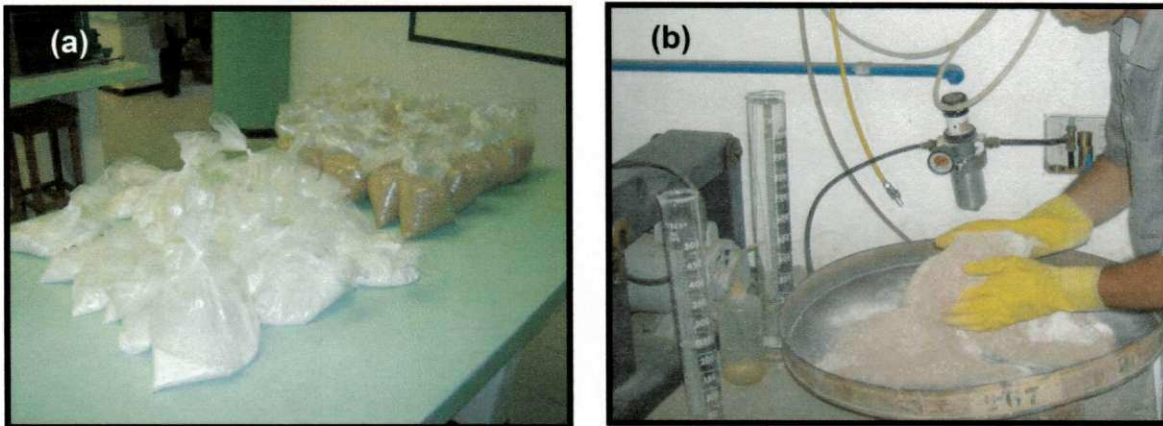
Figura 3.8 Materiais para as misturas de solo-cimento e SCR<sub>caulim</sub>.

Conforme as normas da ABNT NBR 12023 (1992), NBR 12024 (1992) e NBR 6457 (1986) foram separados em sacos plásticos, o solo e a mistura SCR<sub>caulim</sub> para formar uma mistura com massa total de 2500g, para a composição do solo-cimento e do SCR<sub>caulim</sub>, conforme Figura 3.9(a). Para o processo de mistura adicionou-se composições de solo, resíduos de caulim e cimento, estabelecidas conforme Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Composição dos traços para as misturas de solo-cimento e SCR<sub>caulim</sub>.

Lotes	Material	Traços	Composição para 2500g da mistura			
			Cimento (g)	Resíduo de Caulim		Solo (g)
				Fino (g)	Grosso (g)	
A	SCR <sub>caulim</sub> - 0%	1:10	250,0	0	0	2500
	SCR <sub>caulim</sub> - 0%	1:12	208,3	0	0	2500
	SCR <sub>caulim</sub> - 0%	1:15	166,7	0	0	2500
B	SCR <sub>caulim</sub> - 10%	1:10	250,0	125	125	2250
	SCR <sub>caulim</sub> - 10%	1:12	208,3	125	125	2250
	SCR <sub>caulim</sub> - 10%	1:15	166,7	125	125	2250
C	SCR <sub>caulim</sub> - 20%	1:10	250,0	250	250	2000
	SCR <sub>caulim</sub> - 20%	1:12	208,3	250	250	2000
	SCR <sub>caulim</sub> - 20%	1:15	166,7	250	250	2000
D	SCR <sub>caulim</sub> - 30%	1:10	250,0	375	375	1750
	SCR <sub>caulim</sub> - 30%	1:12	208,3	375	375	1750
	SCR <sub>caulim</sub> - 30%	1:15	166,7	375	375	1750

O processo de homogeneização da mistura foi manual, com adição de água até que se transformasse em uma mistura úmida pronta para o processo de compactação, Figura 3.9(b).



**Figura 3.9:** (a) Amostras para o ensaio de compactação (b) Homogeneização das misturas.

### **3.2.5.3. Moldagem e cura dos corpos-de-prova**

A moldagem dos corpos-de-prova seguiu a norma da ABNT NBR 12024 (1992) adotando o método “A”, usando 100% do material que passa na peneira nº 4 (4,8mm). Os corpos de prova foram moldados em molde cilíndrico, Figura 3.10(a) com diâmetro 100,1cm e altura 127,3cm. De posse dos valores em massa foi executado o ensaio de compactação, Figura 3.10(b), conforme norma ABNT NBR 12023 (1992), em seguida os corpos-de-prova foram acondicionados em sacos plásticos, Figura 3.10(c), para evitar a perda de umidade durante o processo de cura, ou seja, por um período de 7 dias. Após o período de cura, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água.



Figura 3.10: (a) Molde cilíndrico, (b) Ensaio de compactação, (c) Acondicionamento e cura dos corpos-de-prova.

#### 3.2.5.4. Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

Para avaliar a resistência à compressão simples foram moldados 3 corpos-de-prova, segundo MB-3360-Solo-Cimento, norma para moldagem e cura de corpos-de-prova, para cada lote e período de ensaio. Os períodos dos ensaios foram estabelecidos com base na obrigatoriedade de 7 dias de cura, segundo ABNT NBR 12024 (1992), no período mínimo de 14 dias para utilização de tijolos de solo-cimento conforme ABNT NBR 10832 (1989), nos 28 dias de ganho de resistência do CII-Z-32-RS e utilização dos tijolos segundo após a idade de 28 dias conforme NBR 10834 (1994) e 56 dias para avaliar o ganho de resistência ao longo do tempo, em resumo foram realizados ensaio com 7, 14, 28 e 56 dias.

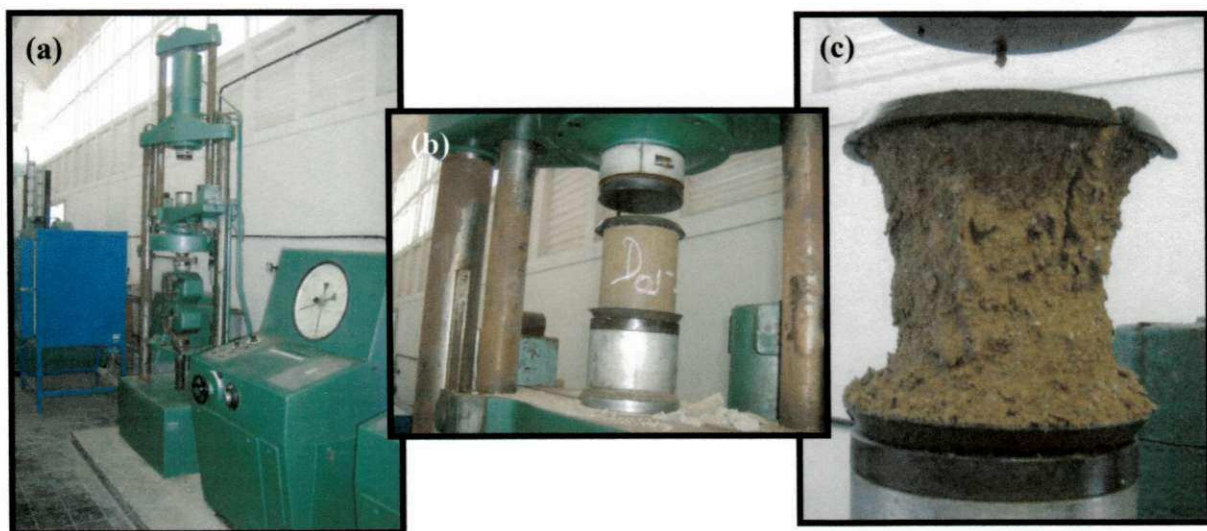
Após o período de cura especificado, foram realizados os ensaios de resistência a compressão simples (RCS), segundo a norma da ABNT NBR 12025 (1990), para os corpos-de-prova de solo-cimento convencionais usados como

referência e os corpos-de-prova de  $SCR_{caulim}10\%$ ,  $SCR_{caulim}20\%$  e  $SCR_{caulim}30\%$ . Os corpos-de-prova foram imersos em água 4 horas antes do ensaio, capeados e aferidos suas medidas de diâmetro e altura, conforme Figura 3.11.



**Figura 3.11: Corpo-de-prova pronto para ensaio de RCS.**

Para o rompimento foi utilizado uma prensa da marca “WPN” com capacidade de 30t e escalas entre 0 a 6t, 0 a 15t e 0 a 30t, Figura 3.12. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Ciências e Tecnologia da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, em Salvador – BA.



**Figura 3.12: (a) Prensa “WPN” (b) Corpo-de-prova na prensa para o ensaio de RCS (c) Corpo-de-prova após rompimento.**



A RCS é determinada pela razão entre a carga máxima e a área da secção transversal do corpo-de-prova, de acordo com a Equação 3.1.

Cálculo da RCS, pela equação (03).

$$\text{RCS} = \text{N} / \text{A} \quad (03)$$

Sendo:

**RCS** – resistência à compressão simples, em (MPa);

**N** – carga máxima de ruptura, em (kN);

**A** – área da secção transversal do corpo-de-prova (mm<sup>2</sup>).

O valor final da RSC foi obtido pelo valor médio de três corpos-de-prova ensaiados e que deve satisfazer as condições de utilização após a idade de 28 dias, que corresponde a média dos valores de resistência à compressão igual ou maior que 2,0 MPa e valores individuais iguais ou maiores que 1,7 MPa, exigido pela norma da ABNT NBR 10834 (1994).

### 3.2.5.5. Determinação da absorção d'água por imersão

A determinação da absorção d'água dos corpos-de-prova teve como base a norma da ABNT NBR 13555 (1996). Após o período de cura os corpos-de-prova foram levados à estufa até atingir massa constante para obter uma massa seca  $m_1$ , em gramas. Em seguida foram imersos em tanques durante 24 h pesados e obtida uma massa úmida  $m_2$ , em gramas. Conforme demonstrado nas Figuras 3.13.

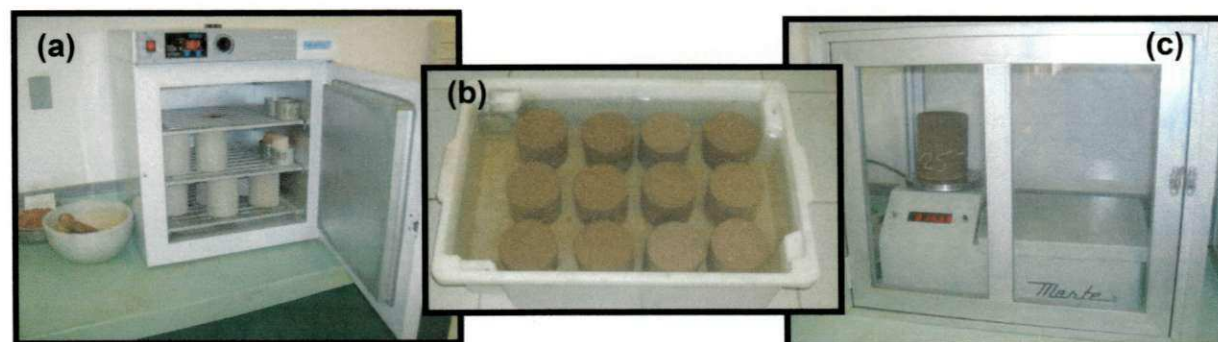


Figura 3.13: (a) Corpos-de-prova colocado na estufa, (b) Corpos-de-prova imersos no tanque, (c) Balança utilizada no ensaio.

A Absorção da água é determinada em percentuais pela a Equação (04).

$$Ab = ((m_2 - m_1) / m_1) \times 100 \quad (04)$$

Sendo:

**Ab** – absorção d'água, em percentuais (%);

**m<sub>1</sub>** – massa seca do corpo-de-prova, em (gramas);

**m<sub>2</sub>** – massa úmida do corpo-de-prova, em (gramas).

Os valores da  $Ab_{d'água}$  nas amostras ensaiadas foram obtidos pelo valor médio de três corpos-de-prova ensaiados, e que não deve apresentar de acordo com a NBR-8492 (1984) média de valores de absorção de água superior a 20%, nem valores individuais superiores a 22%.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos de acordo com o tipo de ensaio realizado e material estudado.

#### 4.1. Caracterização ambiental dos $R_{\text{caulim}}$

Observa-se que todos os resultados de lixiviação e solubilização dos resíduos grosso e fino do caulim, para uma mistura (50% fino + 50% grosso), estão abaixo do valor legislado nos anexos F e G da norma NBR 10004 (2004), que enquadra estes resíduos como Resíduo Classe II B - Resíduo Inerte, conforme Tabelas 4.1 e 4.2.

**Tabela 4.1: Análise do extrato lixiviado**

Parâmetros analisados	Lixiviado (mg/L)	
	Amostra	NBR 10004
<b>INORGÂNICOS</b>		
Arsênio	<0,5	1
Bário	0,62	70
Cádmio	<0,01	0,5
Chumbo	<0,05	1
Cromo total	<0,01	5
Fluoreto	0,08	150
Mercúrio	<0,05	0,1
Prata	<0,03	5
Selênio	<0,5	1

**Tabela 4.2: Análise do extrato solubilizado.**

Parâmetros analisados	Solubilizado (mg/L)		Parâmetros analisados	Solubilizado (mg/L)	
	Amostra	NBR 10004		Amostra	NBR 10004
	INORGÂNICOS			INORGÂNICOS	
Arsênio	<0,01	0,01	Cloreto	114	250
Bário	0,07	0,7	Cobre	0,01	2
Cádmio	<0,005	0,005	Índice de fenóis	<0,01	0,01
Chumbo	<0,01	0,01	Ferro	0,02	0,3
Cromo total	<0,01	0,05	Manganês	0,08	0,1
Fluoreto	<0,05	1,5	Nitrato	<0,1	10
Mercúrio	<0,001	0,001	Sódio	48	200
Prata	<0,005	0,05	Sulfato	24	250
Selênio	<0,5	0,01	Surfactantes	<0,05	0,5
Alumínio	0,07	0,2	Zinco	0,09	5
Cianeto	<0,012	0,07	-	-	-

Segundo a NBR 10004, 10006 e 10007 da ABNT, quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspectos como: cor, turbidez, dureza e sabor, são considerados como resíduos classe II B – inertes.

Na Tabela 4.3 pode-se verificar que o resíduo de caulim não é considerado corrosivo (de acordo com o item 4.2.1.2 da NBR 10.004 (2004)).

**Tabela 4.3: Resultados adicionais da caracterização ambiental.**

Informações adicionais	Resultado	
Determinação da solução extratora	Solução n°. 1 (conforme item 5.1.3 da NBR 10.005/04)	
Teor de resíduo seco	100%	
pH do extrato	Inicial	Final
	4,43	5
Tempo total de lixiviação	18h00min horas	
Teste de Corrosividade (pH 1:1)	4,4	

## 4.2. Caracterização químico-mineralógica dos R<sub>caulim</sub>

Na Tabela 4.4 estão apresentadas as composições químicas dos resíduos analisados. Verifica-se que os resíduos apresentam a soma dos teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> superando o valor mínimo de 70% requerido na ABNT NBR 12653 (1992) e na ASTM 618C (1991), para serem considerados materiais pozolânicos.

Tabela 4.4: Composição química dos resíduos.

Resíduos	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)
RGC	76,01	16,38	0,70	6,61	traços	traços	traços	0,30
RFC	56,50	36,00	1,00	6,14	0,13	traços	traços	traços

A presença de teores de K<sub>2</sub>O, que são possivelmente devido à formação geológica de onde é extraído o caulim, pode está associado a micas e feldspatos presentes no material. A possível presença desses minerais deve interferir nas características físicas dos tijolos de solo-cimento.

Na difração de raios-x apresenta-se os padrões de mineralogia para os resíduos de caulim (RFC e RGC) no estado natural, conforme a Figura 4.1.

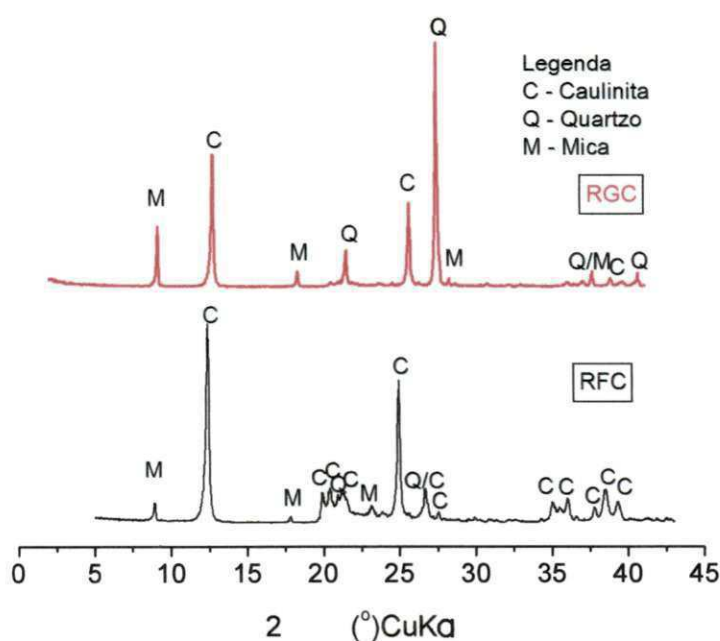


Figura 4.1: Padrão de difração de raios-X dos resíduos de caulim.

A difração de raios-X revela que os resíduos estudados (Figura 4.1) são constituídos por mica, caulinita e quartzo.

Resultados semelhantes foram obtidos por Almeida (2006) ao estudar resíduos de caulins da Província Pegmatítica da Borborema.

Foi comprovado através da difração de raios-X que os teores de  $K_2O$  nos resíduos são oriundos da mica presente nesses materiais. Verifica-se conforme, Tabela 4.4, que o RGC é constituído predominantemente por quartzo e pequenos teores de caulinita e mica, enquanto o RFC é constituído predominantemente por caulinita.

#### 4.3. Caracterização física e mineralógica das amostras de solo e da mistura $SR_{\text{caulim}}$

##### 4.3.1. Massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ )

Os ensaios conforme Tabela 4.5, apresentaram massa específica real semelhante para todas as amostras, e os valores obtidos para os resíduos de caulim aproximaram-se do encontrado por Silva (1992), que foi de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ .

**Tabela 4.5: Massa específica dos sólidos das amostras dos materiais e misturas estudadas.**

Materiais	$\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )
Solo Puro	2,67
RFC	2,66
RGC	2,67
$SR_{\text{caulim}} - 10\%$	2,67
$SR_{\text{caulim}} - 20\%$	2,67
$SR_{\text{caulim}} - 30\%$	2,67

##### 4.3.2. Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação

As análises granulométricas foram estabelecidas para todos os materiais isoladamente e suas respectivas misturas (Solo, RGC, RFC,  $SR_{\text{caulim}}-10\%$ ,  $SR_{\text{caulim}}-20\%$  e  $SR_{\text{caulim}}-30\%$ ), conforme Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 apresentadas. A classificação dos grãos foi determinada segundo Classificação Unificada dos Solos (USCS - Unified Soil Classification System) e pelo Sistema Rodoviária de Classificação estabelecido pela AASHTO - American Association Highway Transport Officials presentes na Tabela 4.6.

Para os ensaios com as misturas ( $SR_{\text{caulim}}-10\%$ ,  $SR_{\text{caulim}}-20\%$  e  $SR_{\text{caulim}}-30\%$ ) utilizou-se apenas os materiais que passaram na ABNT n° 4 (abertura 4,8 mm) conforme ABNT NBR 10832, NBR 10833, NBR 11798 e NBR 12253.

Tabela 4.6: Análise granulométrica e classificação dos materiais.

FRAÇÃO DO SOLO		ABNT					
SOLO		Solo	RFC	RGC	SR <sub>caulim - 10%</sub>	SR <sub>caulim - 20%</sub>	SR <sub>caulim - 30%</sub>
Pedregulho		4%	12%	21%	6%	6%	7%
Areia	Grossa	34%	16%	39%	32%	30%	33%
	Média	31%	10%	32%	30%	29%	26%
	Fina	13%	18%	6%	15%	15%	13%
Silte		5%	36%	8%	6%	7%	10%
Argila		13%	8%	4%	11%	13%	11%
		<b>A-2-4(0)</b>	<b>A-4(3)</b>	<b>A-1-b(0)</b>	<b>A-2-4(0)</b>	<b>A-2-4(0)</b>	<b>A-1-b(0)</b>

FRAÇÃO DO SOLO		AASHTO					
SOLO		Solo	RFC	RGC	SR <sub>caulim - 10%</sub>	SR <sub>caulim - 20%</sub>	SR <sub>caulim - 30%</sub>
Pedregulho		1%	3%	3%	0%	0%	0%
Areia	Grossa	49%	28%	67%	48%	46%	51%
	Média	---	---	---	---	---	---
	Fina	32%	20%	17%	34%	32%	28%
Silte		2%	31%	6%	5%	8%	8%
Argila		16%	18%	7%	13%	14%	13%
		<b>SC-SM</b>	<b>SM</b>	<b>SM</b>	<b>SM</b>	<b>SM</b>	<b>SM</b>

USCS						
------	--	--	--	--	--	--

Analisando os resultados obtidos na tabela 4.6 pode-se verificar que:

a) **solo puro**: SM e A-2-4(0) (areias siltosas ou argilosas). Apresentou peso específico de 26,2 kN/m<sup>3</sup>, com 99% de material passando na peneira ABNT n° 4 (abertura 4,8 mm), e 18% passando na peneira ABNT n° 200 (abertura 0,074 mm), segundo distribuição granulométrica na Figura 4.2.

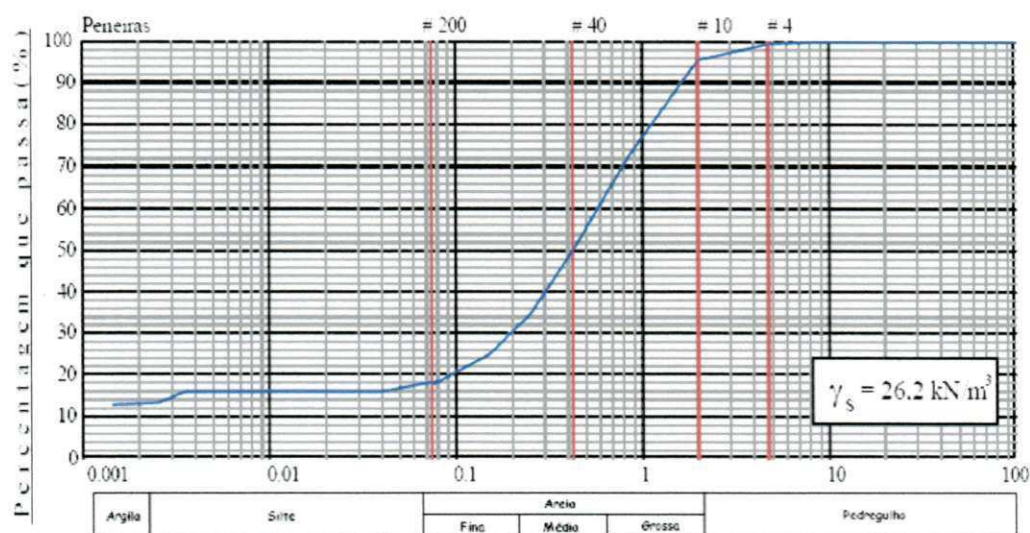


Figura 4.2: Distribuição granulométrica do tamanho das partículas do solo.

b) **resíduo fino do caulim (RFC):** SM e A-4(3) (areias siltsas). Apresentou peso específico de  $26,0 \text{ kN/m}^3$ , com 97% de material passando na peneira ABNT n° 4 (abertura 4,8 mm), e 49% passando na peneira ABNT n° 200 (abertura 0,074 mm), segundo distribuição granulométrica na Figura 4.3.

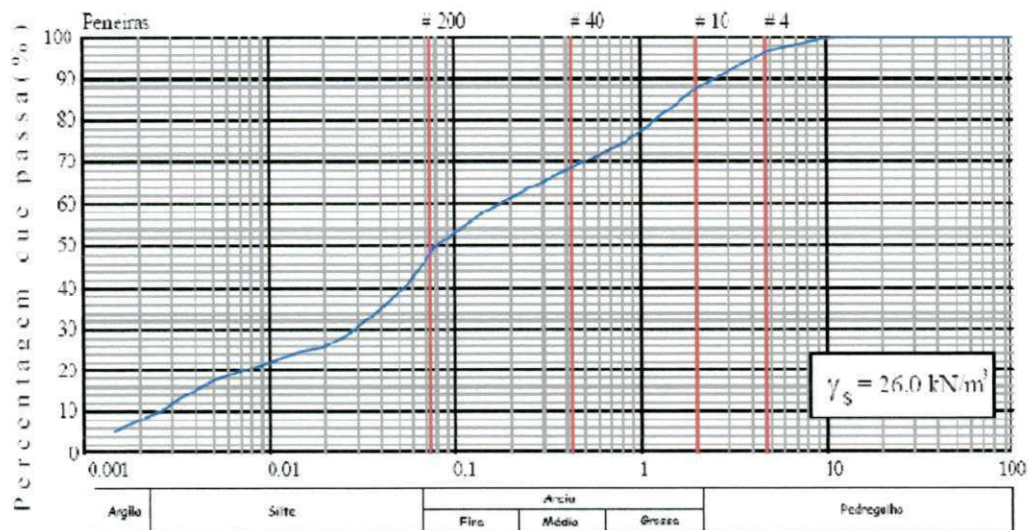


Figura 4.3: Distribuição do tamanho de partículas do resíduo fino de caulim (RFC).

c) **resíduo grosso do caulim (RGC):** SM e A-1-b(0) (areias siltsas com fragmentos de pedregulhos e pedras). Apresentou peso específico de  $26,2 \text{ kN/m}^3$  com 97% de material passando na peneira ABNT n° 4 (abertura 4,8 mm), e 12% passando na peneira ABNT n° 200 (abertura 0,074 mm), segundo distribuição granulométrica na Figura 4.4.

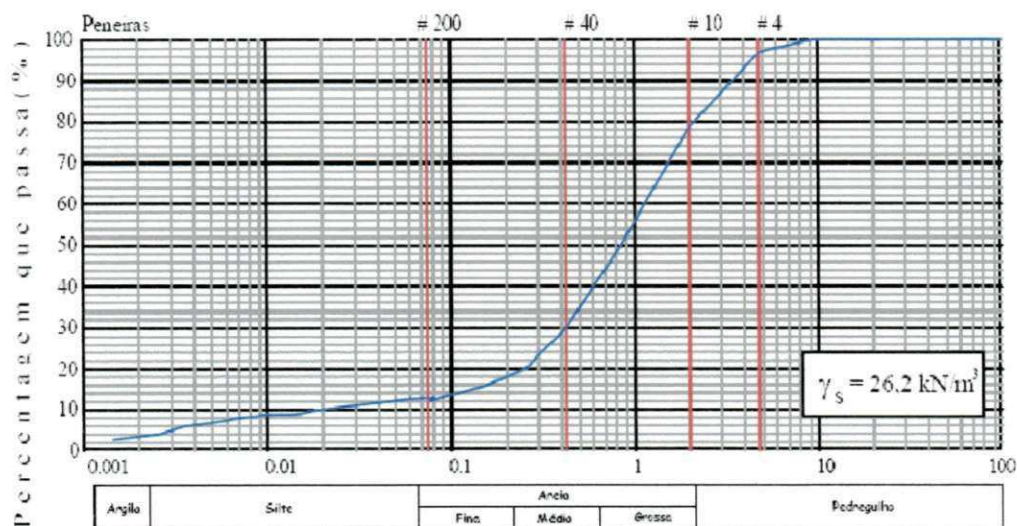


Figura 4.4: Distribuição granulométrica do tamanho de partículas do resíduo grosso de caulim (RGC).



d) solo com 10% de incorporação da mistura de RFC + RGC (SR<sub>caulim-10%</sub>): SM e A-2-4(0) (areias siltosas com fragmentos de pedregulhos). Apresentou peso específico de 26,2 kN/m<sup>3</sup>, com 100% de material passando na peneira ABNT n° 4 (abertura 4,8 mm), e 18% passando na peneira ABNT n° 200 (abertura 0,074 mm), segundo distribuição granulométrica na Figura 4.5.

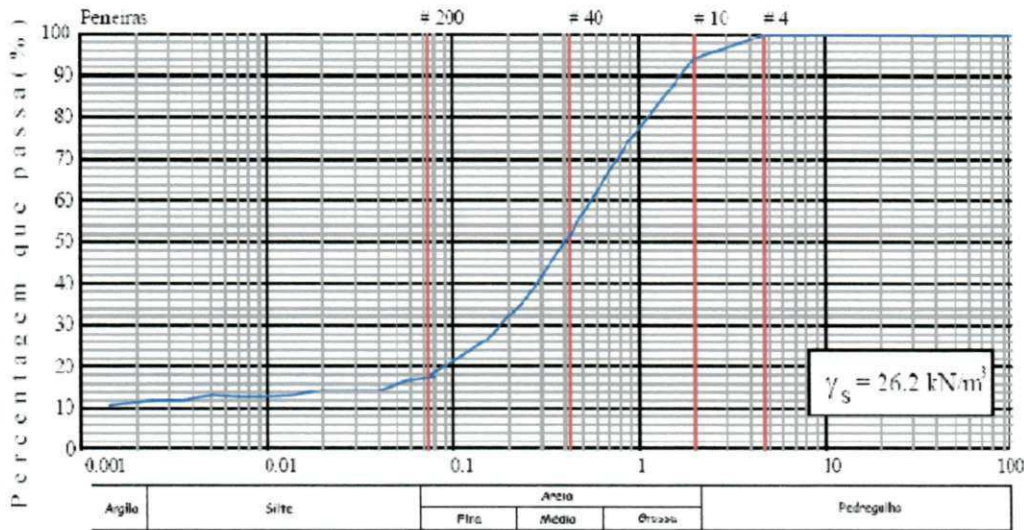


Figura 4.5: Distribuição do tamanho de partículas da mistura de solo com incorporação de 10% de resíduo de caulim (SR<sub>caulim-10%</sub>).

e) solo com 20% de incorporação da mistura de RFC + RGC (SR<sub>caulim-20%</sub>): SM e A-2-4(0) (areias siltosas com fragmentos de pedregulhos). Apresentou peso específico de 26,2 kN/m<sup>3</sup>, com 100% de material passando na peneira ABNT n° 4 (abertura 4,8 mm), e 21% passando na peneira ABNT n° 200 (abertura 0,074 mm), segundo distribuição granulométrica na Figura 4.6.

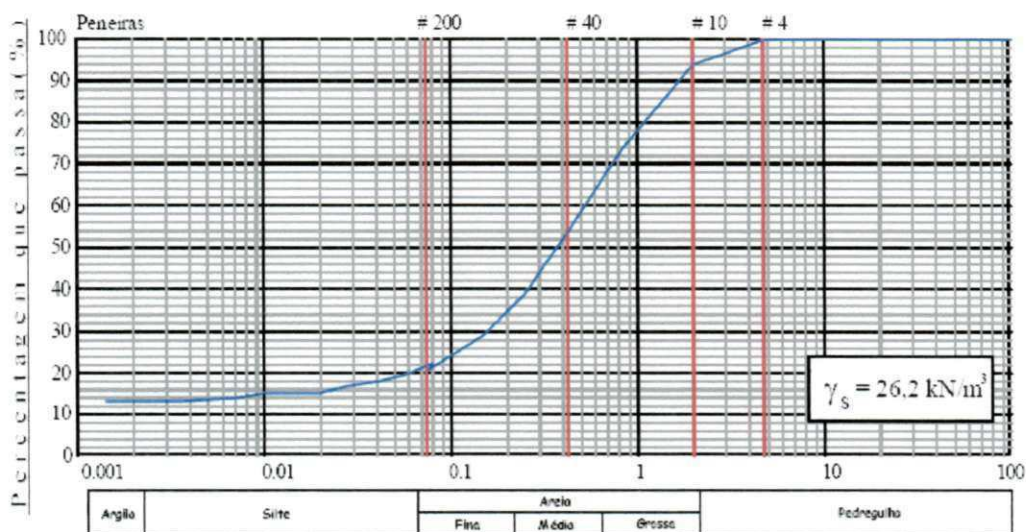


Figura 4.6: Distribuição do tamanho de partículas da mistura de solo com incorporação de 20% de resíduo de caulim (SR<sub>caulim-20%</sub>).

f) solo com 30% de incorporação da mistura de RFC + RGC ( $SR_{\text{caulim-30\%}}$ ): SM e A-1-b(0) (areias siltosas com fragmentos de pedregulhos e pedras). Apresentou peso específico de  $26,2 \text{ kN/m}^3$ , com 100% de material passando na peneira ABNT n° 4 (abertura 4,8 mm), e 20% passando na peneira ABNT n° 200 (abertura 0,074 mm), segundo distribuição granulométrica na Figura 4.7.

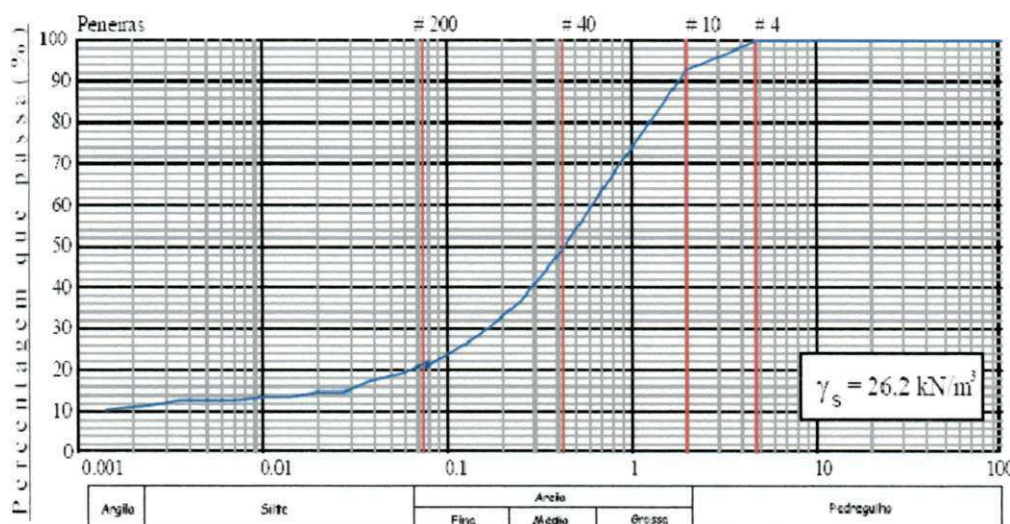


Figura 4.7: Distribuição do tamanho de partículas da mistura de solo com incorporação de 30% de resíduo de caulim ( $SR_{\text{caulim-30\%}}$ ).

Observou-se que os valores obtidos para as misturas utilizadas na pesquisa ficaram dentro dos parâmetros estabelecidos pela NBR (10832) com 100% passando pela peneira ABNT 4,8mm (n°4) e percentuais entre 10 e 50% passando pela peneira ABNT 0,075mm (n°200). Ferificou-se também que não houveram grandes variações nas granulometrias com a adição dos percentuais de resíduos, sendo classificados como materiais contendo partículas de areias siltosas com fragmentos de pedregulhos e pedras, para o acréscimo de 30%  $SR_{\text{caulim}}$ .

#### 4.3.3. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg que identificam a plasticidade dos materiais conforme seus limites de Liquidez ( $W_L$ ) e plasticidade ( $W_P$ ), resultam no índice de plasticidade (IP) e foram empregados para todas as misturas (solo, RGC, RFC,  $SR_{\text{caulim-10\%}}$ ,  $SR_{\text{caulim-20\%}}$  e  $SR_{\text{caulim-30\%}}$ ), conforme Tabela 4.7.

**Tabela 4.7: Determinação dos limites de Atterberg.**

Materiais	Limites		
	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	IP (%)
Solo Puro	19	15	4
RFC	NL	NP	NP
RGC	NL	NP	NP
SR <sub>caulim</sub> - 10%	NL	NP	NP
SR <sub>caulim</sub> - 20%	NL	NP	NP
SR <sub>caulim</sub> - 30%	NL	NP	NP

O solo puro apresentou índices de consistência muito baixos, caracterizando-se como um material composto por areias siltosas ou argilosas (IP=4), com baixa compressibilidade de acordo com Pinto (2000). Com a adição nas misturas de percentuais de resíduos de caulim, que possuem características de materiais arenosos e pedregulhosos, resultou-se em misturas com características de solo não líquido (NL) e não plástico (NP).

#### 4.3.4. Compactação

No ensaio de compactação os valores de umidade ótima ( $W_{ot}$ ) e peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d_{max}}$ ) foram determinados pela curva de compactação de cada mistura, segundo Tabela 4.8.

**Tabela 4.8: Parâmetros de compactação.**

Materiais	W <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{d_{max}}$ (kN/m <sup>3</sup> )
Solo Puro	9,88	19,63
SR <sub>caulim</sub> - 10%	10,15	19,34
SR <sub>caulim</sub> - 20%	10,41	19,05
SR <sub>caulim</sub> - 30%	10,68	18,76

Os valores encontrados da massa específica máxima seca para o solo puro, usado como referência, foram baixos, possivelmente por se tratar de solo siltoso, porém, maiores do que com as misturas com incorporação de resíduos de caulim, provavelmente devido a presença de mica do resíduo nas misturas, que diminui a compressibilidade na compactação e, conseqüentemente, aumenta o teor de umidade a cada percentual a mais de resíduo incorporado, comparado com o solo de referência.

#### 4.3.5. Determinação do pH

Na Tabela 4.9 estão apresentados os valores encontrados para o pH do solo e das misturas com R<sub>caulim</sub>.

**Tabela 4.9: Determinação do pH.**

Materiais	Temperatura da mistura em solução (°C)	pH
Solo Puro	26	5,5
SR <sub>caulim</sub> - 10%	26	4,8
SR <sub>caulim</sub> - 20%	26	4,9
SR <sub>caulim</sub> - 30%	26	5,0

O valor encontrado para o pH do solo constata a incidência de poucos sais e que o acréscimo do resíduo de caulim traz mudanças insignificantes à mistura final, porém requer cuidados às construções realizadas com esse tipo de solo encontrado na jazida em estudo, para evitar possíveis agressões ácidas às construções.

#### 4.3.6. Ensaio com adsorção de azul de metileno

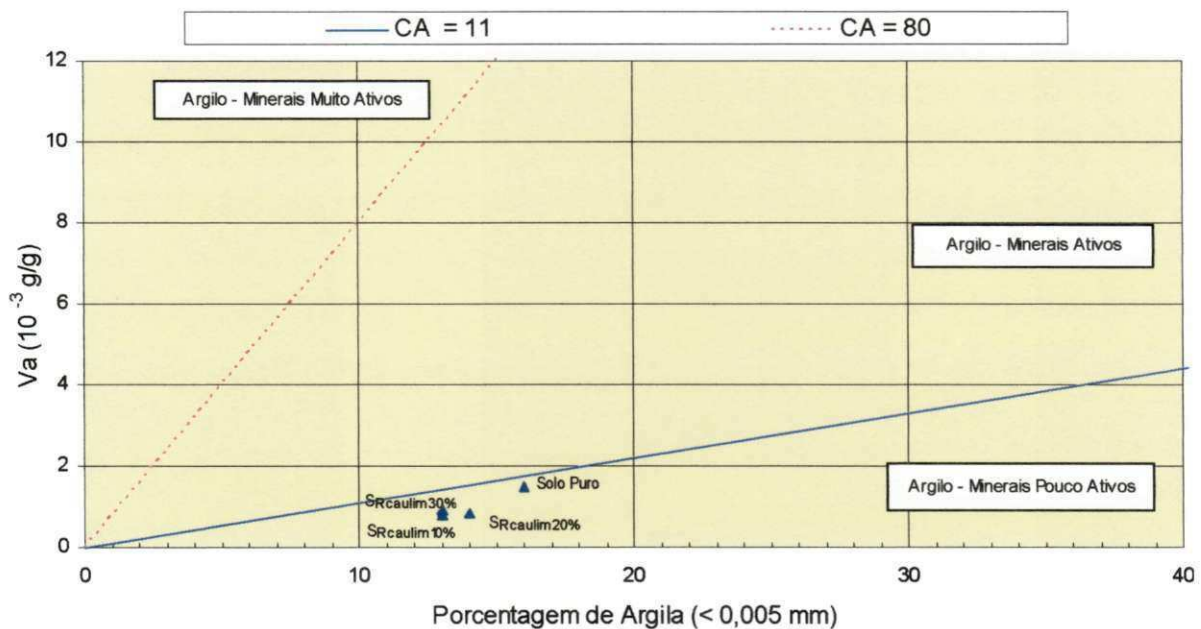
Na Figura 4.8, os resultados obtidos, conforme Tabela 4.10, com os dados resultantes do ensaio do azul de metileno, revelaram materiais pouco ativos, CA<11. Neste grupo predomina o argilo-mineral do grupo da caulinita.

**Tabela 4.10: Resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno.**

Amostra	Va*	Argila (%) <5µm	CTC** (meq/100 g)
Solo Puro	1,502	16	20,03
SR <sub>caulim</sub> 10%	0,936	13	14,74
SR <sub>caulim</sub> 20%	0,856	14	9,79
SR <sub>caulim</sub> 30%	0,822	13	11,65

\*Va = valor de azul (quantidade de azul de metileno consumida em mg por 1g de amostra de solo integral)

\*\*CTC = capacidade de troca de cátions



**Figura 4.8: Carta de Fabbri pelo método do azul de metileno.**

De acordo com os resultados da CTC (Capacidade de Troca de Cátions) e a Tabela 4.11, as misturas estudadas podem ser constituídas pelos seguintes argilominerais: solo puro (predominância de ilita) e as misturas com resíduos de caulim, que apresentaram predominância de caulinita.

Tabela 4.11: Faixa de valores de CTC associadas ao argilomineral (Santos, 1975).

Argilomineral	CTC (meq/100g) de argila
Caulinita	3 – 15
Halloysita	5 – 10
Clorita	10 – 40
Montmorillonita	80 – 150
Ilita	10 – 40
Vermiculita	100 – 150
Esmectita	60 - 150
Sepiolita-Paligorsquita	20 – 30

Fonte : valores compilados por GRIM (1968), capacidade de troca

A ilita, mineral argiloso cuja estrutura está essencialmente relacionada com as micas, de baixa CTC variando entre 10 a 40 meq/100g, deve-se, principalmente à presença de considerável quantidade de íons potássio entre os estratos, dificultando a entrada na sua estrutura, não somente de água, mas de outros líquidos (SANTOS, 1998).

#### 4.4 Atividade pozolânica

Na Tabela 4.12 estão apresentados os valores do índice de atividade pozolânica que, segundo norma da ABNT NBR 5752 (1992), utilizou-se argamassas alternativas incorporadas com resíduos de caulim no estado natural, para ser comparado com uma argamassa convencional.

Analisando os resultados da Tabela 4.12, verifica-se que as argamassas com cimento, contendo resíduos de caulim no estado natural apresentam índices de atividade pozolânica, conforme a norma da ABNT NBR 5251 (1992), onde um material pode ser considerado pozolânico quando a diferença entre resistência à compressão simples da argamassa convencional e a incorporada com resíduo for superior ou igual a 75,0%.

O índice de atividade pozolânica encontrado nos resíduos de caulim pode ser justificado, pelo fato de que na hidratação do cimento Portland o hidróxido de cálcio é produzido, sendo, este consumido pela reação pozolânica dos resíduos de caulim formando um silicato de cálcio hidratado (MONTANHEIRO, et al., 2003). Estes

resultados são similares aos obtidos por Souza (2002) com argilas calcinadas incorporadas ao cimento Portland.

**Tabela 4.12 – Índice de atividade pozolânica com o cimento.**

Resíduos	Índice de Atividade Pozolânica (%)
	28 dias
RGC	79,43
RFC	87,52
50%RGC+50%RFC	78,07

Para a mistura de 50%RGC+50%RFC o resultado foi 4,09% maior que o estabelecido por norma. Mesmo sendo inferior ao encontrado com RFC, adotou-se essa mistura como referência para a incorporação parcial no solo, por se tratar de um maior aproveitamento dos resíduos encontrados.

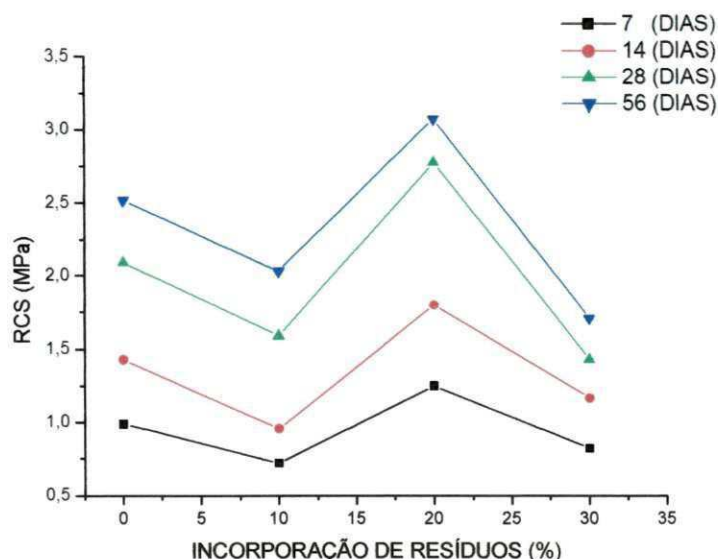
#### 4.5 Resistência à compressão simples (RCS)

Na Tabela 4.13 estão apresentados os valores da RCS dos corpos-de-prova incorporados com 10, 20 e 30% da mistura RFC e RGC, e uma mistura de solo-cimento convencional de referência para o traço 1:10, com 7, 14, 28 e 56 dias de cura.

**Tabela 4.13 – Resistência à compressão simples (RCS) para o traço 1:10.**

Traço	Incorporação de Resíduo (%)	RCS (Mpa)			
		7 (dias)	14 (dias)	28 (dias)	56 (dias)
1:10	0	0,99	1,43	2,10	<b>2,52</b>
	10	0,72	0,96	1,59	2,03
	20	1,25	1,8	2,78	<b>3,08</b>
	30	0,82	1,17	1,43	1,71

Através dos valores analisados de RCS, contidos na Tabela 4.13, observa-se um ganho de resistência expressivo ao longo do período de cura, sendo os valores máximos obtidos no 56º dia de 2,52 MPa (mistura SCR<sub>caulim</sub>0%) e 3,08 MPa (mistura SCR<sub>caulim</sub>20%).



**Figura 4.9: Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:10.**

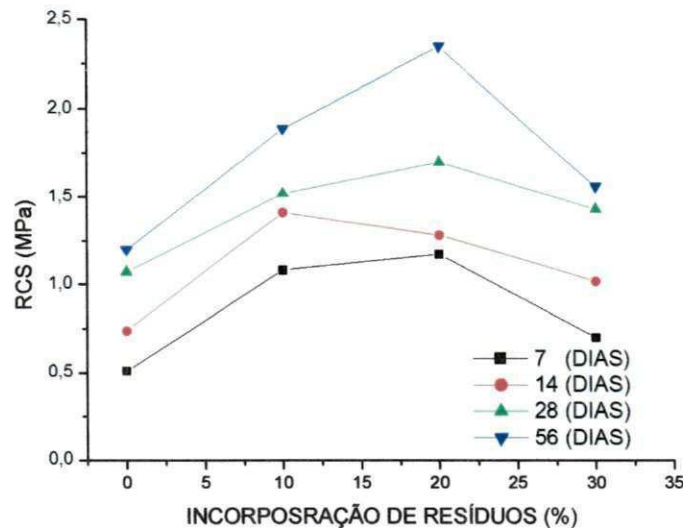
Com base na Figura 4.9 verifica-se que o comportamento dos corpos-de-prova com incorporação de 20% de resíduos obtiveram os melhores resultados em relação ao solo-cimento convencional, com um aumento máximo da RCS na ordem de 22,22%. Provavelmente o acréscimo está ligado a fatores relacionados à incorporação do resíduo de caulim: a) quando incorporados ao solo melhoram as características granulométricas, estabilizando a mistura com uma maior fração de finos na estrutura e preenchendo os vazios deixados, densificando e aumentando a resistência; b) outro fator que pode contribuir para o ganho de resistência deve estar relacionado a ação química do resíduo que apresenta índice considerável de atividade pozolânica proporcionando um ganho extra na resistência final do corpo-de-prova.

Na Tabela 4.14 estão apresentados os valores da RCS dos corpos-de-prova incorporados com 10, 20 e 30% da mistura RFC e RGC, e uma mistura de solo-cimento convencional para o traço 1:12, com 7, 14, 28 e 56 dias de cura.

**Tabela 4.14: Resistência à compressão simples para o traço 1:12.**

Traço	Incorporação de Resíduo (%)	RCS (Mpa)			
		7 (dias)	14 (dias)	28 (dias)	56 (dias)
1:12	0	0,51	0,74	1,07	1,20
	10	1,08	1,41	1,52	<b>1,89</b>
	20	1,17	1,28	1,70	<b>2,35</b>
	30	0,7	1,02	1,43	1,56

Analisados os valores de RCS contidos na Tabela 4.14, observa-se um ganho de resistência ao longo do período de cura, sendo os valores máximos obtidos de 1,89 MPa (mistura SCR<sub>caulim</sub>10%) e 2,35 MPa (mistura SCR<sub>caulim</sub>20%) para 56 dias de cura.



**Figura 4.10: Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:12.**

Verifica-se de maneira geral, na Figura 4.10, que o comportamento dos corpos-de-prova com incorporação de 20% da mistura SCR<sub>caulim</sub> obtiveram melhores resultados em relação ao solo-cimento de referência, com um ganho máximo da RCS na ordem de 95,83%. É possível que o acréscimo esteja relacionado a ação física dos resíduos, melhorando e formando um arranjo mais eficiente, densificando e aumentando a resistência. Outro fator que pode contribuir para o ganho de resistência deve está relacionado a liberação do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do cimento com a atividade pozolânica da caulinita contida no resíduo de caulim originando compostos ligantes semelhantes àqueles produzidos pela ação do cimento Portland.

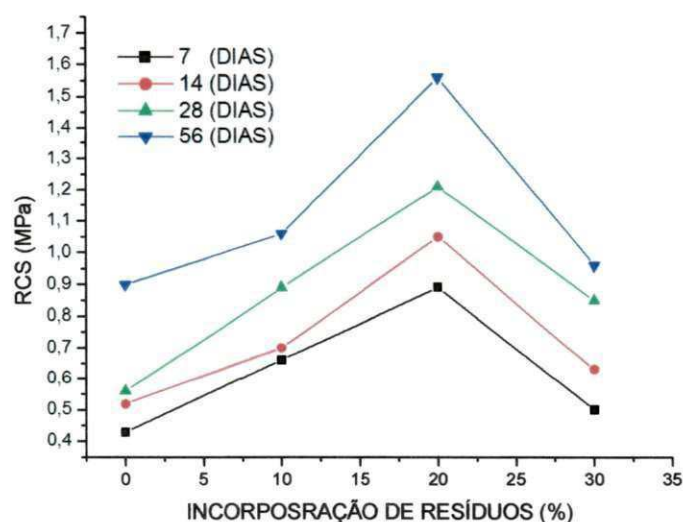
Apresenta-se na Tabela 4.15 os valores da RCS dos corpos de prova incorporados com 10, 20 e 30% da mistura de resíduos grosso e fino de caulim e do solo-cimento de referência para o traço 1:15, com 7, 14, 28 e 56 dias de cura.



**Tabela 4.15: Resistência à compressão simples para o traço 1:15.**

Traço	Incorporação de Resíduo (%)	RCS (Mpa)			
		7 (dias)	14 (dias)	28 (dias)	56 (dias)
1:12	0	0,43	0,52	0,56	0,90
	10	0,66	0,70	0,89	<b>1,06</b>
	20	0,89	1,05	1,21	<b>1,56</b>
	30	0,50	0,63	0,85	0,96

Analisando os valores de RCS obtidos na Tabela 4.15, observa-se a continuidade vista para os outros traços 1:10 e 1:12, com ganho de resistência moderado ao longo do período de cura, explicado pelo potencial aglomerante do cimento Portland pozolânico e seu ganho de resistência mais lento ao longo do período de cura, pela ação de uma maior quantidade de material pozolânico das misturas, sendo os valores máximos obtidos para esse traço de 1,06 MPa (mistura SCR<sub>caulim</sub>10%) e 1,56 MPa (mistura SCR<sub>caulim</sub>20%) para 56 dias de cura.



**Figura 4.11 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:15.**

Como era esperado, conforme apresentado na Figura 4.11, o comportamento dos corpos-de-prova com menor percentual de cimento 6,67% (traço 1:15) obtiveram os menores resultados. A mistura com 20% de incorporação de R<sub>caulim</sub> se repetiu como os demais traços e obteve os melhores resultados em relação ao solo-cimento de referência, com um aumento máximo da RCS na ordem de 73,3%.

Provavelmente o acréscimo está ligado a fatores relacionados à incorporação do resíduo de caulim: a) quando incorporados ao solo melhoram as características

granulométricas, estabilizando a mistura devido a uma maior fração de finos, preenchendo os vazios, densificando e melhorando a resistência; b) outro fator que pode contribuir para o ganho de resistência pode estar relacionado com a liberação do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do cimento, com a atividade pozolânica da caulinita presente no resíduo de caulim, que apresenta elevada atividade pozolânica.

Observa-se que houve um ganho de resistência máximo com incorporação de 20% de  $R_{caulim}$  e uma diminuição da resistência com incorporações de 30% de  $R_{caulim}$ . Provavelmente a granulometria e uma maior quantidade de mica diminuiu a densidade e coesão da mistura.

Observou-se, que para os traços empregados, apenas o traço 1:10 com 0 e 20% de incorporação de resíduos de caulim apresentaram os melhores resultados, correspondendo a 2,09 MPa e 2,78 MPa respectivamente, o que satisfaz as condições de utilização após a idade de 28 dias, que corresponde a média dos valores de resistência à compressão igual ou maior que 2,0 MPa, e valores individuais iguais ou maiores que 1,7 MPa exigido pela norma da ABNT NBR 10834 (1994). Isso não implica que tijolos produzidos com resistências inferiores para o período de 28 dias não possam ser utilizados na construção, pois existe a possibilidade de fazer uso do CP V – ARI ou até mesmo, utilizar os tijolos pós período de 28 dias. Como se trata de misturas compostas por materiais com alto índice pozolânico, elas possuem um ganho de resistência retardado.

Valenciano & Freire (2004) estudaram as características físicas e mecânicas de misturas de solo-cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, e obtiveram resultados de resistência à compressão simples de 1,94 MPa aos 28 dias e 2,04 MPa aos 60 dias de cura para a mistura: solo arenoso + 3% de cimento (80% cimento portland +20% cinzas), semelhantes aos resultados alcançados nesta pesquisa.

Os estudos utilizando solo-cimento e casca de arroz realizados por Milani & Freire (2005) obtiveram resultados compatíveis aos apresentados no estudo com resíduos de caulim, onde a resistência à compressão simples para uma mistura de solo arenoso com 8% de aglomerante (80% cimento portland e 20% casca de arroz) foi de 1,70MPa para os 7 dias de cura.

Para melhor entender o comportamento do ganho de resistência da mistura com resíduos de caulim, foram ensaiados corpos-de-prova com teor de resíduos diferentes  $((50\%MR_{\text{caulim}\#200})+(50\%MR_{\text{caulim}\#4}))$  para o traço de 1:10, conforme resultados no Anexo.

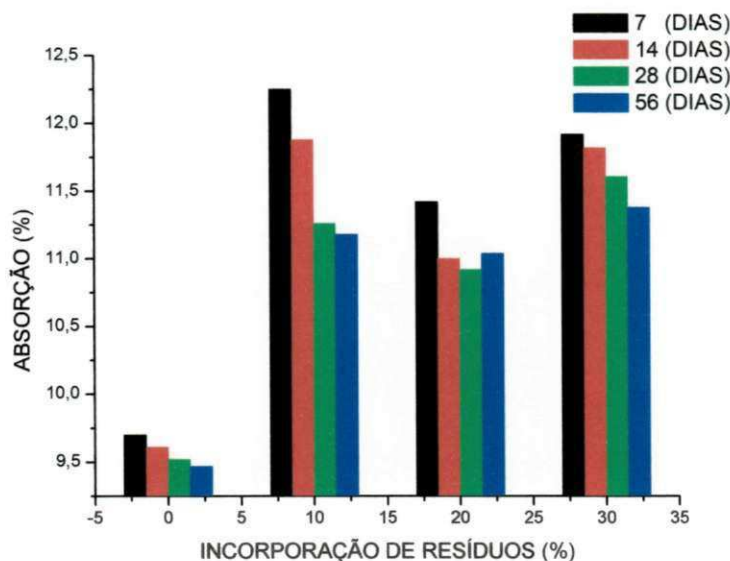
#### 4.6 Determinação da absorção d'água por imersão

Os resultados apresentados na Tabela 4.16, mostram valores de absorção de água dos corpos-de-prova incorporados com 10, 20 e 30% da mistura de resíduos de caulim e de solo-cimento convencional de referência, para o traço 1:10 passados 7, 14, 28 e 56 dias de período cura.

**Tabela 4.16: Absorção de água para o traço 1:10.**

Traço	Incorporação de Resíduo (%)	Absorção (%)			
		7 (dias)	14 (dias)	28 (dias)	56 (dias)
1:10	0	9,70	9,61	9,52	<b>9,47</b>
	10	12,25	11,88	11,26	11,18
	20	11,42	<b>11,00</b>	10,92	11,04
	30	11,92	11,82	11,61	11,38

Analisando os valores de absorção contidos na Tabela 4.16, observa-se reduções significativas de absorção ao longo do período de cura, sendo que os valores mínimos para esse traço foram de 9,47% com a mistura  $SCR_{\text{caulim}0\%}$  para 56 dias de cura e 11,04% com a mistura  $SCR_{\text{caulim}20\%}$  para 14 dias de cura.



**Figura 4.12: Absorção de água dos corpos de prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:10.**

Neste caso, conforme Figura 4.12 os corpos-de-prova que apresentaram os melhores valores de absorção foram também os que apresentaram maiores ganhos de resistência mecânica, no entanto, com a adição dos percentuais de  $R_{caulim}$  nos corpos-de-prova, a absorção de água aumentou com relação à mistura de referência, fato que não influenciou, ao final do período de cura, o ganho de resistência dos corpos-de-prova com  $R_{caulim}$ . Provavelmente a ação química da atividade pozolânica dos resíduos ofereceram um ganho de resistência que minimizou as perdas com a absorção de água da estrutura.

Possivelmente o acréscimo na absorção dos corpos-de-prova com  $R_{caulim}$  está relacionado à presença de mica, que devido a sua forma lamelar, diminui a densidade do corpo-de-prova, criando vazios na estrutura e aumentando a porosidade e, conseqüentemente sua absorção.

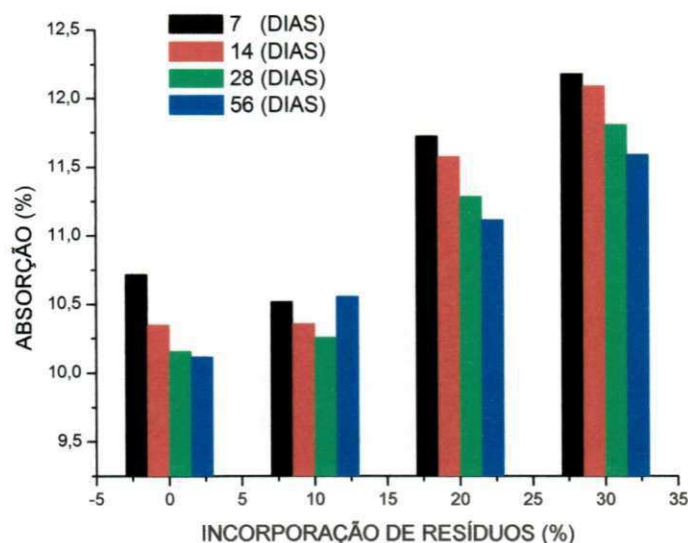
Apesar de terem apresentado um aumento da absorção com a incorporação dos  $R_{caulim}$ , esses resultados não ultrapassaram os valores máximos estabelecidos pela norma da ABNT NBR 8492 (1984), cuja média de valores de absorção de água não deve ser maior que 20%, nem ter valor individual superior a 22%.

A Tabela 4.17, mostra os valores de absorção dos corpos-de-prova incorporados com 10, 20 e 30% da mistura de resíduos de caulim e de solo-cimento convencional de referência, para o traço 1:12, passados 7, 14, 28 e 56 dias de período cura.

**Tabela 4.17: Absorção de água para o traço 1:12.**

Traço	Incorporação de Resíduo (%)	Absorção (%)			
		7 (dias)	14 (dias)	28 (dias)	56 (dias)
1:12	0	10,72	10,35	10,16	<b>10,12</b>
	10	10,52	10,36	<b>10,26</b>	10,56
	20	11,73	11,58	11,29	11,12
	30	12,19	12,10	11,82	11,60

Com a Análise dos valores de absorção contidos na Tabela 4.17, observa-se reduções consideráveis da absorção ao longo do período de cura, sendo que os valores mínimos para esse traço foram de 10,12% com a mistura  $SCR_{caulim}0\%$  para 56 dias de cura e 10,26% com a mistura  $SCR_{caulim}10\%$  para 28 dias de cura.



**Figura 4.13: Absorção de água dos corpos-de-prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:12.**

Conforme Figura 4.13, o resultado que obteve menor valor de absorção foi o valor referente à mistura  $SCR_{caulim}0\%$ , que obteve um dos maiores ganhos de resistência. Esse resultado não correspondeu ao encontrado para a mistura  $SCR_{caulim}20\%$ , que obteve maior ganho de resistência, porém, nesse caso não houve uma diminuição da absorção da água. Isso se deve à heterogeneidade da mistura e a presença de mica, que aumenta a porosidade e absorção do material. No entanto, a atividade pozolânica dos resíduos de caulim na mistura ofereceram um ganho de resistência superando a perda de resistência causada pela alta absorção d'água na mistura.

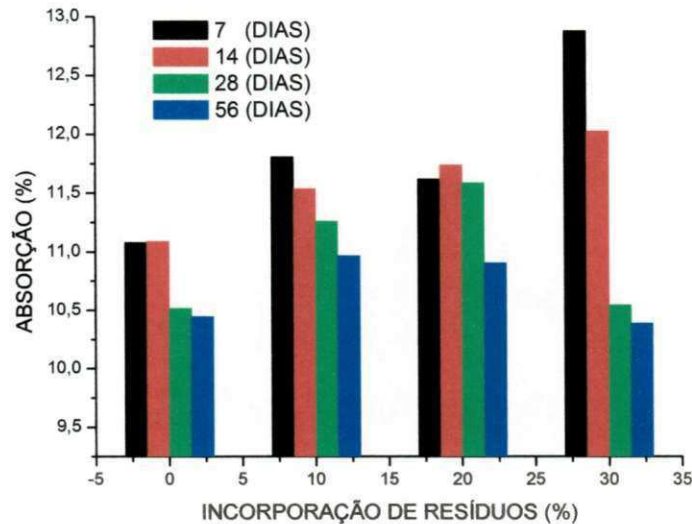
O aumento da absorção com a incorporação dos  $R_{caulim}$  não ultrapassou os valores máximos estabelecidos pela norma da ABNT NBR 8492 (1984), cuja média de valores de absorção de água não deve ser maior que 20%, nem ter valor individual superior a 22%.

Na Tabela 4.18, observa-se os valores de absorção d'água dos corpos de prova incorporados com 10, 20 e 30% da mistura de resíduos de caulim e de solo-cimento de referência, para o traço 1:15, passados 7, 14, 28 e 56 dias de período cura.

**Tabela 4.18: Absorção de água para o traço 1:15.**

Traço	Incorporação de Resíduo (%)	Absorção (%)			
		7 (dias)	14 (dias)	28 (dias)	56 (dias)
1:15	0	11,08	11,09	10,52	<b>10,45</b>
	10	11,81	11,54	11,26	10,97
	20	11,62	11,74	11,59	10,91
	30	12,88	12,03	10,55	<b>10,39</b>

Analisando os valores de absorção d'água contidos na Tabela 4.18, observa-se reduções da absorção d'água ao longo do período de cura, sendo que os valores mínimos para esse traço foram de 10,45% com a mistura  $SCR_{caulim}0\%$  e 10,39% com a mistura  $SCR_{caulim}30\%$  para 56 dias de cura.



**Figura 4.14: Absorção de água dos corpos de prova incorporados com misturas de RGC e RFC, para o traço 1:15.**

De acordo com a Figura 4.14, o resultado que obteve menor valor de absorção foi o valor referente à mistura  $SCR_{caulim}30\%$ , no qual não correspondeu ao maior ganho de resistência para esse traço. A presença da mica, que possui forma lamelar influencia negativamente a densidade e estrutura dos corpos-de-prova, criando vazios e aumentando a porosidade do material, conseqüentemente aumentando sua absorção, tornando-a uma provável causadora da variação e irregularidades nos valores de absorção.

Apesar das irregularidades nos valores de absorção, de forma geral, existe uma tendência no aumento da absorção de água nos corpo-de-prova com o aumento da incorporação dos  $R_{caulim}$ , e uma diminuição da absorção ao longo do

tempo de cura, isso se deve, provavelmente, ao aumento dos percentuais de mica contidos nas misturas, e a estabilização da misturas pelo poder aglomerante do cimento ao longo do tempo, bem como ao ganho extra de resistência da mistura por parte da atividade pozolânica do resíduo de caulim, respectivamente.

Contudo, os resultados não ultrapassaram os valores máximos estabelecidos pela norma da ABNT NBR 8492 (1984), cuja média de valores de absorção de água não deve ser maior que 20%, nem ter valor individual superior a 22%.

Nos estudos da absorção de água, para uma mistura de solo-cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, Valenciano & Freire (2003) obtiveram resultados de 13,56% de absorção de água para o traço: solo arenoso + 3% de cimento (80% cimento portland +20% cinzas). Esses resultados estão próximos aos alcançados nesta pesquisa.

Comparando com os resultados alcançados por Milani & Freire (2005) para uma mistura de solo-cimento e casca de arroz observou-se resultados diferentes com os desta pesquisa, pois foram encontrados 15,5% de absorção de água para a misturas de solo arenoso com 8% de aglomerante (80% cimento portland e 20% casca de arroz), para 7 dias de cura, mas dentro dos parâmetros mínimos exigidos pela NBR 8492 (1984).

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

Nesse capítulo serão apresentadas as conclusões dos resultados expostos nesta pesquisa, com base nos de ensaios de caracterização, estudos de traços e ensaios tecnológicos, para as incorporações de resíduos de caulim no solo, visando a determinação do potencial da produção de uma mistura alternativa de solo-cimento incorporado com resíduos de caulim nas construções civis.

#### **5.1 Conclusões**

Após incorporação dos resíduos de caulim, na composição de uma mistura de solo-cimento, pode-se concluir que:

- com base nas normas técnicas da ABNT, os resíduos de caulim foram classificados como Resíduos Não Perigosos e Inertes;
- a análise granulométrica do solo apresentou um material com características de areia siltosa ou argilosa (com partículas muito finas). A incorporação de resíduos de caulim, que apresentaram granulometrias maiores (com presença de pedregulhos e pedras), resultaram em um material granulometricamente mais distribuído, um solo mais estabilizado. O solo apresentou limites de Atterberg baixos, sendo caracterizado como material com grande presença de areias e que, com a incorporação das misturas de resíduos de caulim passaram a perder completamente a sua plasticidade. Através da caracterização mineralógica por difração de raios-X o resíduo de caulim é composto das seguintes fases: caulinita, quartzo e mica, servindo como alternativa para uso como agregado na produção de uma mistura de solo-cimento, salvo cuidados prévios devido da presença de mica;
- os ensaios que determinaram o índice de atividade pozolânica, para os resíduos, com o cimento, apresentaram valores superiores ao estabelecido pela norma;
- os ensaios de resistência à compressão simples realizados nos corpos-de-prova apresentaram melhores resultados quando incorporados com 20 % da mistura de RFC+RGC chegando a 95,83% de ganho de resistência em comparação ao corpo-de-prova de referência;



- os corpos-de-prova com o traço 1:10 apresentaram resistência à compressão simples, após 28 dias de cura, dentro dos valores exigidos pela norma para o solo-cimento, com incorporação de 20% da mistura de RFC+RGC, apresentando 33% de aumento da resistência em relação ao solo-cimento convencional;
- constatou-se que houve um ganho de resistência considerável dos corpos-de-prova no 56º dia, em consequência da presença de materiais pozolânicos contidos nas misturas;
- a absorção da água nos corpos-de-prova apresentou picos irregulares de valores, possivelmente pela presença de mica e a um controle melhor da umidade no período de cura;
- apesar dos pontos irregulares, pode-se constatar uma diminuição da absorção no decorrer do período de cura dos corpos-de-prova, mas, um aumento da absorção, com relação ao solo-cimento de referência em consequência do acréscimo de percentuais da mistura de RFC+RGC. De forma geral, a adição de 30% da mistura de RFC+RGC obteve os maiores valores de absorção de água;
- apesar do aumento da absorção, os valores encontrados de umidade não ultrapassaram os limites estabelecidos por norma;
- de acordo com o proposto neste trabalho, os resultados obtidos com a incorporação de resíduos de caulim para a composição de uma mistura alternativa de solo-cimento, constataram que a atividade pozolânica e a sílica presente no resíduo de caulim proporcionaram um ganho expressivo na resistência mecânica dos corpos-de-prova ensaiados, com 20% de incorporação da mistura RFC+RGC. Portanto, recomenda-se o uso de resíduos de caulim no solo-cimento para a formação de uma mistura alternativa para obras civis, contribuindo para o desenvolvimento de novos materiais e proporcionando a redução dos impactos ambientais.

## **5.2 Sugestões para futuras pesquisas**

- verificar as conseqüências causadas pelo carreamento dos resíduos de caulim até os espelhos d'água mais próximos, avaliando aspectos como: cor, turbidez, dureza e sabor;
- avaliar a influência do teor de umidade nas misturas com resíduos de caulim compactadas;
- avaliar a influência de solos siltosos na composição de misturas para solo-cimento;
- avaliar a influência da mica nas estrutura de solo-cimento;
- avaliar a influência do tipo de solo incorporados com os resíduos de caulim, em buscas de outros resultados em termo de resistência e umidade;
- avaliar durabilidade dos materiais incorporados com resíduos de caulim por meio de determinação de perda de massa;
- avaliar a incorporação dos resíduos de caulim misturados na proporção: 70% de resíduo grosso de caulim + 30% do resíduo fino de caulim, nas misturas alternativas, tendo em vista que a geração de resíduos grosso de caulim chega aproximadamente a 70% do total de resíduos produzidos.

## CAPÍTULO VI

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND.** Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais: prática recomendada. Publicação ABCP, São Paulo, 1985.

**ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND.** Solo-cimento na habitação popular. Publicação ABCP, 2 ed., 6p, São Paulo, 1995.

**ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND.** Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. ABCP, São Paulo, SP, ET-35, 51p, 1986.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Cimento Portland comum, **NBR 5732**, Rio de Janeiro, 1991.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Cimento Portland de alta resistência inicial, **NBR 5733**, Rio de Janeiro, 1991.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Cimento Portland de alto forno, **NBR 5735**, Rio de Janeiro, 1991.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Cimento Portland pozolânico, **NBR 5736**, Rio de Janeiro, 1991.

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

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, **NBR 6457**, Rio de Janeiro, 1986.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Solo - Determinação do limite de liquidez, **NBR 6459**, Rio de Janeiro, 1984.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Determinação da massa específica real, **NBR 6558**, Rio de Janeiro, 1984.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Solo -Determinação do limite de plasticidade, **NBR 7180**, Rio de Janeiro, 1984.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Solo - Análise granulométrica, **NBR 7181**, Rio de Janeiro, 1984.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Tijolo maciço de solo-cimento, **NBR 8491**, Rio de Janeiro, 1984.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Tijolo maciço de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão simples e absorção d'água, **NBR 8492**, Rio de Janeiro, 1984.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Resíduos sólidos - classificação, **NBR 10004**, Rio de Janeiro, 2004.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, **NBR 10005**, Rio de Janeiro, 2004.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, **NBR 10006**, Rio de Janeiro, 2004.

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

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual, **NBR 10832**, Rio de Janeiro, 1989.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica, **NBR 10833**, Rio de Janeiro, 1989.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural, **NBR 10834**, Rio de Janeiro, 1994.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Materiais para sub-base e base de solo-cimento, **NBR 11798**, Rio de Janeiro, 1990.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Solo-Cimento - Ensaio de compactação, **NBR 12023**, Rio de Janeiro, 1992.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos, **NBR 12024**, Rio de Janeiro, 1992.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndrico, **NBR 12025**, Rio de Janeiro, 1990.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento, **NBR 12253**, Rio de Janeiro, 1992.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Materiais pozolânicos, **NBR 12653**, Rio de Janeiro, 1992.

**ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Solo-cimento – Determinação da absorção d'água, **NBR 13555**, Rio de Janeiro, 1996.

**AIO, D. A.; SILVA, J. P. N. da; MACHADO, A. F.; SEGANTINI, A. A. da S.** Estudo da Influência do Uso do Cimento ARI nas Propriedades do Solo- Cimento Auto-Adensável.

PPGEC - DEC - UNESP / CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA LABORATÓRIO CESP DE ENGENHARIA CIVIL IBRACON NOROESTE / SP Workshop: Concreto: Durabilidade, Qualidade e Novas Tecnologias, 2004.

**AKASAKI, J. L.; SILVA, A. P.** Estudo de composições do solo estabilizado com cal e resíduos agroindustriais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30. 2001, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: SBEA, 2001.

**ANJOS, M. A. S.; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P.** Compósitos à base de cimento reforçados com polpa celulósica de bambu. Parte I: Determinação do teor de reforço ótimo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, p.339-345, 2003.

**ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO**, DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 2006.

**ASTM - American Society for Testing and Materials.** Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete, **ASTM 618 C**, In: Annual Book of ASTM standards, Philadelphia, USA, 1992.

**AY, N.; ÜNAL, M.** The use of waste ceramic tile in cement production. Cement and Concrete Research, v.30, p.497-499, 2000.

**BARBOSA, N. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.** Construção com terra crua. In: Toledo Filho, R.D.; Nascimento, J.W.B.; Ghavami, K. (eds.). Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande: UFPB/SBEA, cap.4, p.113-144, 1997.

**BARBOSA, N. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.** Construção com Terra Crua. Materiais de Construção não Convencionais. Livro publicado pela Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. Editores R. Toledo Filho, J W B do Nascimento, K. Ghavami, pp 113-144, 1997.

**BURGOS, P. C.; VILAR, O. M.** Caracterização da atividade de solos da cidade de Salvador através da técnica de adsorção de azul de metileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, ABMS, v.1, p.101-107, Brasília, 1997.

**CAIXA ECONÔMICA FEDERAL.** Disponível em: [http://www1.caixa.gov.br/gov/gov\\_social/estadual/programas\\_desenvolvimento\\_urbano/nov\\_tecno/solo\\_cimento](http://www1.caixa.gov.br/gov/gov_social/estadual/programas_desenvolvimento_urbano/nov_tecno/solo_cimento). Acesso em: 27 de julho, 2007.

**CAMPOS, L. V.** Determinação da Capacidade de Troca de Cátions e da Superfície Específica de Algumas Argilas e Caulins Cerâmicos Brasileiros pelo Azul de Metileno e sua Correlação com Algumas Propriedades Tecnológicas, Cerâmica, 79, Jul. – Set., p. 305- 326, 1974.

**CASTRO, W. A. de M.** Incorporação de Resíduos de Caulim em Argamassas para uso na Construção Civil. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – UFCG, Campina Grande-PB, 2008.

**CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento.** Manual de construção com solo-cimento. THABA. Camaçari, 1977.

**CEPED - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento.** Manual de construção com solo-cimento. Camaçari: CEPED, 116p, 1984.

**CEPED – CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO.** Manual de construção com solo-cimento. Camaçari-BA, 147p, 1999.

**CHADDA, L.R.** A rapid method of assessing the cement requirement for the stabilization of soils. *IndianConcrete Journal*, 45(7): 298-314, 1971).

**CHEN, P. Y.; LIN, M. L.; ZHENG, Z.** On the Original of the name Kaolin deposits of the Kauling and Dazhou areas, Kiangsi, China, *Applied Clay Science*, v. 12, pp. 1 – 25, 1997.

**CHEN, T. J.; SANTOS, P. S.; FERREIRA, H. C.; CALIL, S. F.; ZANDONAD, A. R.; COSTA, C. G.; MEDEIROS, S. A. de; INGUNZA, M. d. P. D.; SANTOS JUNIOR, O. F. dos; DANTAS, E. R.** Valorização do rejeito proveniente do beneficiamento de caulim do município de Equador-RN. In: XXX Congreso de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Punta del Este, Uruguai. Cd do XXX Congreso de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Punta del Este : AIDIS, 2006. v. 1. p. 1-9, 2006.

**CYTRYN, S.** Soil construction: its principles and application for housing. State of Israel – Ministry of Labor – House Division. The Weizmann Science Press of Israel. Jerusalem, 1957.

**DALLACORT, R.; LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P.** Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, vol.6 nº. 3, Campina Grande Set./Dez, 2002.

**DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM.** Sub-base ou base de solo-cimento, Secretaria dos Transportes, ET-DE-P00/004 Especificação Técnica, 2006.

**DUTRA, R;** Beneficiamento dos minerais industriais. 49º Congresso brasileiro de cerâmica, São Pedro-SP, 2005. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/asp/49cb>, Acesso em: 07 set 2007.

**ENTEICHE, A. A.** Suelo-cemento, su aplicacion em la edificacion. Bogotá, CINVA, 1963.

- FABBRI, G. T. P.** *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno.* São Carlos. 101p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1994.
- FANG, H. S.** *Foundation engineering handbook.* Van Nostrand Reinhold, New York. 923 p. 1991.
- FARIAS FILHO, F.; TOLEDO FILHO, R. D.; RABELO, M. S.** Incremento da durabilidade de compósitos reforçados com fibras vegetais através da substituição parcial do cimento portland por metacaolinita. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30. 2001, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: SBEA, 2001.
- FERRAZ, A. L. N.; SEGANTINI, A. A. S.** Estudo da Aplicação de Resíduo de Argamassa de Cimento nas Propriedades de Tijolos de Solo-Cimento. Ilha Solteira-SP, 2004.
- FERRAZ, R. L.; BELINCANTA, A.; GUTIERREZ, N. H. M.** Estudo comparativo de alguns métodos de dosagem de misturas solo-cimento. In: I Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá, 2000, Maringá PR. ENTECA 2000. Maringá : Universidade Estadual de Maringá, v. 1, p. 173-181, 2000.
- FERREIRA, R. de C.; FALEIRO, H. T.; FREIRE, W. J.** Desempenho Físico-Mecânico de Solo Argiloso Estabilizado com Cal e Silicato de Sódio Visando Aplicação em Construções Rurais. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 35 (3): 191-198, 2005.
- FIQUEROLA, V.** Revista Técnica 85 - abril de 2004.
- CURY NETO, N.** Solo cimento aplicado em casas populares. Tecper - Fundações e Geotecnia Ltda. Acesso em <http://www.geocities.com/Athens/Styx/5303/>, 2007.
- FLÔR, R. dos S.** Utilização do Silicato de Sódio no Processo de Beneficiamento do Caulim. *Cerâmica Industrial*, 9 (4) Julho/Agosto, 2004.
- FLORES, S. M. P.; NEVES, R. F.** Alumina para utilização cerâmica, obtida a partir do rejeito de beneficiamento de caulim. 41º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, 1997.
- FREIRE, W. J.** Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento. Tese de Doutorado, ESALQ, USP, Piracicaba, 142p, 1976.
- FREIRE, W. J.; VALENCIANO M.; MARTHA D. C.** Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. *Eng. Agrícola*. vol.24 nº.3 Jaboticabal Set./Dez. 2004.
- FREITAS, E. D. G. A.** Obtenção de tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção civil. 1996. 120 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1996.

**GRANDE, F. M.** Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-cimento por Prensagem Manual com e sem Adição de Sílica Ativa, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2003.

**GORDON, J. N.; PINNOCK, W. R.; MOORE, M. M.** A preliminary investigation of strength development in Jamaican red mud composites. *Cement and Concrete Composites*, [S.l.], v. 18, p. 371-379, 1997.

**GUIMARÃES, C. G.** Utilização do Resíduo Proveniente da Produção do Caulim como Aglomerante na Estabilização de Solos de Estradas Vicinais. Relatório final do Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). 62f. 2005.

**GUIMARÃES, J. E. P.** Epítome da história da mineração. Art Editora/Sec. de Estado da Cultura, São Paulo, 1981.

**HABITAR** – Tecnologia das Habitações - Sistemas Construtivo. Disponível em: <http://arquitura.ufmg.br/habitar/sis4.html> Acesso em: 16 de junho, 2006.

**HABITAR.** Tijolos de solo-cimento. Disponível em: <http://www.arq.ufmg.br/habitar/sis4.html>. Acesso em: maio de 2004.

**HANSON, A.** European GCC. A fine, fine filler. *Industrial Minerals*, Jun, p.49-57, 1996.

**HEINECK, K. S.; CONSOLI, N. C.** Estudo da Influência da Microestrutura e da Densidade no Comportamento de um Solo Compactado Artificialmente Cimentado. XI COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, UFRGS, Porto Alegre-RS, 1998.

**HILF, J. W.** Compacted fill. In: H. F. Winterkorn; H. Fang. *Foundation Engineering Handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold, p 244 – 311, 1975.

**HOUBEN, H; GUILLAUD, H.** Earth construction: a comprehensive guide. IT publications, p. 362, 1994.

**JOHN, V. M.** Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 102p, 2000.

**LEITE, J. Y. P.; SOUSA, L. D. A. de; HARIMA, E.;** Rejeito de Caulim de APL de Pegmatito do RN/PB – Uma Fonte Promissora para Cerâmica Branca. *Holos*, Ano 23, Vol. 3, 2007.

**LEVY, S.; HELENE, P.** Cura: como quando e por quê. Editora Pini, Revista

**LIMA, F.T.; GOMES, J.; NEVES, G. A.; LIRA H. L.** Utilização do resíduo industrial resultantes do beneficiamento de caulim para fabricação de revestimentos cerâmicos.



In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45, 2001, Florianópolis. Anais. Associação Brasileira de Cerâmica, Florianópolis-SC, p. 1501-1512, 2001.

**LIMA, M. S.** Utilização do Resíduo de Caulim para uso em Blocos de Concreto sem Função Estrutural. 2005. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)- Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2005.

**LOPES, W. G. R.** Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas-SP, 2002.

**LOPES, W. G. R.; FREIRE, W. J.** Análise comparativa de dois métodos usados para avaliar a aderência de taliscas de bambu encravadas em solo-cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 32., 2003, Goiânia, GO. Anais. Goiânia: CONBEA, 2003.

**LUZ, A. B.; DAMASCENO, E. C.** Caulim: Um mineral industrial importante”. In: Tecnologia Mineral, v. 65, Centro de Tecnologia Mineral, 1993.

**LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.; PIQUET, B.; COSTA, M. J.; COELHO, J. M.** Pegmatitos do Nordeste: diagnóstico sobre o aproveitamento racional e integrado. In: Rochas e Minerais Industriais, v. 09, Centro de Tecnologia Mineral, 2003.

**MÁRTIRES, R. A. C.** Caulim. In: Anuário Mineral Brasileiro - DNPM (Departamento Nacional de Processamento Mineral), Brasília, 2000.

**MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BOSCHI, A. O.** Caracterização de uma Jazida de Caulim de Campo Alegre (SC). Cerâmica Industrial, 7 (6) Novembro/Dezembro, 2002.

**MENEZES, R. R.; ALMEIDA, R. R. de; SANTANA, L. N. L.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.** Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. Matéria (Rio J.) vol.12 nº.1, Rio de Janeiro, 2007.

**MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; LIRA, H. L.** Recycling of granite industry waste from the northeast region of Brazil. Environmental Management and Health, v.13, p.134-142, 2002.

**MERCADO, M. C.** Solo-cimento: alguns aspectos referentes à sua produção e utilização em estudo de caso. Dissertação de Mestrado FAU/USP, São Paulo, 1990.

**MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J.** Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 1-10, jan./abr. 2006.

**MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J.** Características Físicas e Mecânicas de Misturas de Solo, Cimento e Casca de Arroz. Campinas-SP, 2005.

**MONTANHEIRO, T. J.; YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y.** Proposta de Pré-Qualificação Pozolânica de Materiais Geológicos: Difractometria de Raios X como Método Alternativo. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, V.24, nº2, p.1-9, 2003.

**MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; C. JÚNIOR, M.; TANNOA, L. C.; CUCHIERATO, G.** As Matérias-Primas Plásticas para a Cerâmica Tradicional: Argilas e Caulins. Cerâmica Industrial, 9 (2) Março/Abril, 2004.

**MONTE, M. B. M.; CARVALHO, E. A.; FERREIRA, O.; CABO, S. S.** Caulim CADAM. In: SAMPAIO, J. A., LUZ, A. B., LINS, F. F. (eds), *Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil*, Centro de Tecnologia Mineral, 1 ed., cap. 01, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

**MYRRHA, M. A. de L.** Solo cimento para fins construtivos. In: FREIRE, W.J. BERALDO, A.L. *Tecnologias e materiais alternativos de construção*. São Paulo: Editora da Unicamp, 332p., cap.4, p.95-120, 2003.

**NASCIMENTO, A. A. P.** Um estudo sobre fissuras em alvenarias: solo-cimento. São Paulo, SP. Editora Pini, Revista Thécne, n.o 10, maio/junho, p.23-27, 1994.

**NEVES, G. A.; BRASILEIRO, M. I.; OLIVEIRA, D. H. S.; OLIVEIRA, M. F. DE; OLIVEIRA, M. P. de; NÓBREGA, A. F. da; Campos M. S. DI; BARBOSA, N. P.** Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social Brasil-NOCMAT, 2004. Anais Conferência Brasileira de Materiais. Tecnologias Não Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social Brasil-NOCMAT 2004, Pirassununga, SP, pp. 337-378, 2004.

**RIBEIRO, K. F. S.; SANTANA, L. N. L.** Estudo da obtenção de mulita por meio de interações entre o Resíduo de caulim e ball-clay sinterizados, e alumina em um Processo termicamente ativado. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2006.

**PCA - PORTLAND CEMENT ASSOCIATION.** Soil-Cement Construction handbook. Illinois, 42p, 1969.

**PCA - Portland Cement Association.** Soil primer. Illinois, 52p, 1976.

**PINTO, C. de S.** Curso Básico de Mecânica dos Solos. São Paulo. 2000.

**PINTO, C. S.** Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento. ABCP, São Paulo, 1980.

**PINTO, T. P.** Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo: USP - Escola Politécnica, Tese Doutorado, 189p, 1999.

**PIOVEZAN JÚNIOR, G. T. A.** Avaliação dos Resíduos da Construção Civil (RCC) Gerados no Município de Santa Maria. Dissertação de Mestrado, Santa Maria-RS, 2007.

**PIRES, I. B. A. A.** Utilização do Tijolo Ecológico como Solução para Construção de Habitações Populares. Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Salvador – UNIFACS, 2004.

**RIBEIRO FILHO, J. N.; SILVA G. C.; LUCENA, K. F. M.; CARVALHO, N. H. C.** Projeto e Execução de Casa Ecoeficiente em Campina Grande –PB. I Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, 2006.

**RAUPP-PEREIRA, F., HOTZA, D., SEGADÃES, A.M., et al.,** Ceramic Formulations Prepared with Industrial Wastes and Natural sub-products, *Ceramics International*, v. 32, n. 2, pp 173-179, 2006.

**REN, K. B.; KAGI, D. A.** Upgrading the durability of mud bricks by impregnation. *Building and Environmental*, [S.l.], v. 30, n. 3, p. 433-440, 1995.

**ROLIM, M. M.; FREIRE W. J.; BERALDO A. L.** Análise Comparativa da Resistência à Compressão Simples de Corpos-de-prova, Tijolos e Painéis de Solo-cimento, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande – PB, DEAg/UFPB,1999.

**ROLIM, M. M.; FREIRE, W. J.** Resistência à compressão de tijolos fabricados com solo-vinhaça concentrada. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.17, n.3, p.1-8, 1998.

**SANTOS, J. P. dos.** Determinação do Teor de liita em Argilominerais interestartificados a Partir da Análise de Postássio Total. *Sittientibus*, Feira de Santana, n. 18, p127-141, 1998.

**SEGANTINI, A. A. da S.** Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira-SP. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, Departamento de Construções Rurais, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-São Paulo, 176p, 2000.

**SILVA, A. C. da; VIDAL, M.; PEREIRA, M. G.** *Revista Escola de Minas*, vol.54, nº.2, Ouro Preto-MG, 2001.

**SILVA, F. A. N. G. da.** Estudos de Caracterização Tecnológica e Beneficiamento do Caulim da Região Borborema-Seridó (RN). Dissertação de Mestrado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 70p, 2007.

**SILVA, E. T.** Solo-cimento e solo-vinhaça no revestimento de canais de irrigação para transporte de vinhaça: adequação física e parâmetros hidráulicos. Campinas, SP. Dissertação de Mestrado, FEAGRI, UNICAMP, 108p, 1992.

**SILVA, S. P. da.** Balanço Mineral Brasileiro, Distrito do DNPM-PA, 2001.

- SILVA, M. R. R.; DANTAS, J. R. A.** Província pegmatítica da Borborema-Seridó, Paraíba e Rio Grande do Norte. In: DNPM/CPRM (eds) Principais Depósitos Minerais do Brasil, Departamento Nacional de Produção Mineral, 1 ed., v. 4b, Brasília, Brasil, 1997.
- SILVEIRA, A.** Estabilização de solos com cimento – síntese de notas de aula. EESC – USP. Publicação 128, p.1-44, 1966.
- SOUZA, et al.** Avaliação de argamassas com cinza e casca de arroz. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 51, 2007. Anais do 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Salvador, BA, pp. 1-12, 2007.
- Thécne, jan/fev, nº 20, p. 18-21, 1996.
- SOUSA SANTOS, H. L.; SANTOS, P. S.** Estudos sobre a composição mineralógica de caulins primários e secundários do Brasil. Cerâmica, v. 15, n. 57/58, p.21-44, 1959.
- SOUZA SANTOS, P.** Ciência e Tecnologia de Argilas, 2a edição revisada e ampliada, v. 1, p 113; v, 2, p 468-505; Editora Edigar Blucher, 1989.
- SOUZA, J. de.** Estudo de materiais de solo-cimento-cal e solo-cimento-cal pozolânica para uso em habitação popular. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 113p, 1994,
- SPECHT, L. P.** Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- VALENCIANO, M. D. C. M.; FREIRE, W. J.** Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. FEAGRI/ UNICAMP, Campinas-SP, 2004.
- WALKER, P. J.** Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilized soil blocks. Cement & Concrete Composites, [S.I.], v. 17, p. 301-310, 1995.
- WEBB, D. J. T.** Lime stabilized soil blocks for third world housing. p. 246-257. In N. Hill, S. Holmes & D. Mather. Lime and other alternative cements. Intermediate Technology Publications, London. 390 p, 1992.
- ZUCCO, L. L.** Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz. 118 f. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

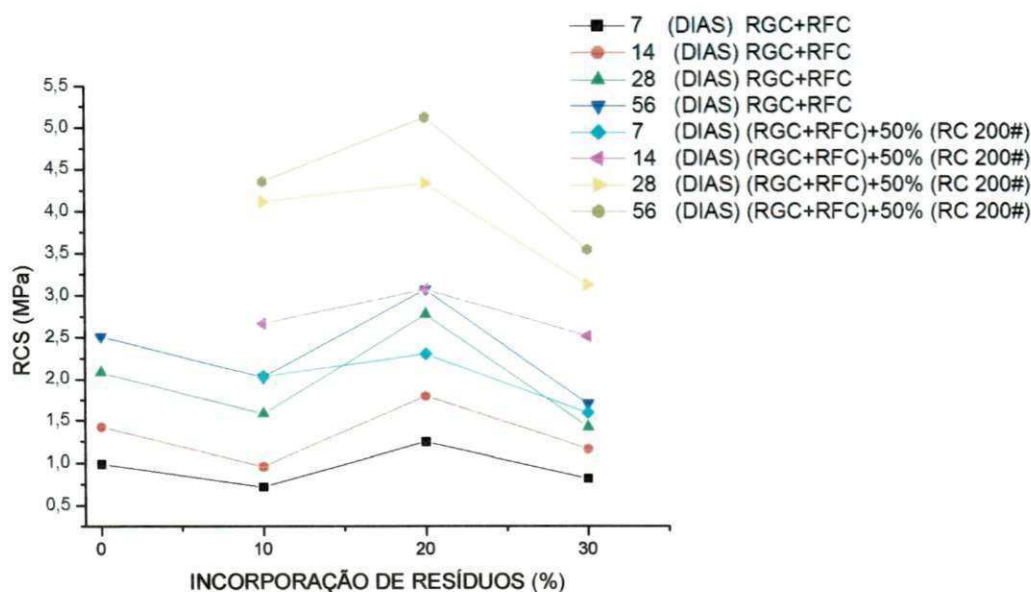
## **ANEXO**

**EXPERIMENTO COM ACRÉSCIMO DE UMA MISTURA DE 50% DE  
R<sub>CAULIM</sub> PASSADO NA PENEIRA #200**

Ensaio de Resistência à compressão simples com 50% da mistura de  $R_{caulim}$  passada na peneira #200, conforme Tabela 01 e Figura 01

**Tabela 01 – Resistência à compressão simples para o traço 1:10.**

Traço	Incorporação de Resíduo (%)	RCS (Mpa)			
		7 (dias)	14 (dias)	28 (dias)	56 (dias)
1:10	0	0,99	1,43	2,09	<b>2,52</b>
	10	0,72	0,96	1,59	2,03
	20	1,25	1,8	2,78	<b>3,08</b>
	30	0,82	1,17	1,43	1,71
	10 <sub>(RGC+RFC)+50% (RC 200#)</sub>	2,04	2,67	4,12	4,36
	20 <sub>(RGC+RFC)+50% (RC 200#)</sub>	2,31	3,08	4,34	<b>5,13</b>
	30 <sub>(RGC+RFC)+50% (RC 200#)</sub>	1,60	2,52	3,13	3,55



**Figura 01 – Resistências à compressão simples (RCS) dos corpos de prova incorporados com misturas de RGC e RFC e 50% (RGC e RFC passados na peneira #200), para o traço 1:10.**

Como foi observado, o ganho de resistência com a incorporação de 50% do  $R_{caulim}$  passado na #200, passou de 3,08 MPa para 5,13MPa para 20% de incorporação dessa nova mistura, com 66,6% de acréscimo na resistência para a melhor situação encontrada na pesquisa. Esse resultado ocorreu, provavelmente, devido ao maior número partículasde finas na estrutura, que preencheu com maior eficiência os vazios e conseqüentemente aumentou o fator de empacotamento.

Este experimento, onde parte do material foi passado na #200 trouxe melhores resultados, porém, existe o fato de que grande parte do material que fica retido na #200, entorno de 51%, para resíduo fino do caulim, e 88%, para resíduo grosso do caulim, vira rejeito. Como o objetivo é retirar os resíduos do meio ambiente fica descartada inicialmente a idéia da utilização dessa mistura. Isso não implica que sejam realizados estudos para melhorar o processo de aproveitamento dos  $R_{\text{Caulim}}$  aumentando a eficácia da metodologia com essa nova mistura.