

ESTUDO DE LABORATÓRIO DE UM RESIDUO CATALISADOR DE EQUILÍBRIO  
PARA UTILIZAÇÃO EM ALVENARIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Renata Lopes Guilhermino

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Francisco José Casanova de Oliveira e Castro, D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Cláudia Barbosa, D.Sc.

---

Prof. Jacques de Medina, L.D.

---

Prof. Hélio Fernandes Machado Jr., Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2008

GUILHERMINO, RENATA LOPES

Estudo de Laboratório de um Resíduo  
Catalisador de Equilíbrio para Utilização  
em Alvenaria na Construção Civil [Rio de  
Janeiro] 2008

VIII, 152 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Civil, 2008)

Dissertação – Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, COPPE

1. Reaproveitamento de resíduos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*As coisas que amamos,  
as pessoas que amamos  
são eternas até certo ponto.  
Duram o infinito variável  
no limite de nosso poder  
de respirar a eternidade.*

*Carlos Drummond de Andrade*

Aos quatro grandes amores da minha vida:  
Mãe, Pai, Lela e Léo.

## AGRADECIMENTOS

*Certa palavra dorme na sombra  
de um livro raro.  
Como desencantá-la?  
É a senha da vida  
a senha do mundo.  
Vou procurá-la.*

*Carlos Drummond de Andrade*

Agradeço a Deus por me guiar nessa caminhada que tantas vezes pareceu interminável e solitária, me fazendo seguir em frente após cada tropeço.

Agradeço ao Professor Casanova que, mais que um orientador foi um semeador do conhecimento, mostrando-se sempre acessível e disponível, me apoiando e acompanhando a cada pequena conquista dessa jornada.

Agradeço a meus pais, maiores tesouros da minha vida. Obrigada pelo apoio e suporte, pelos abraços e beijos, pelos choros, pelos risos e sorrisos, pelas broncas e brigas, pelos erros e acertos, pelo colo e carinho, pelas noites em claro, pelos telefonemas inesperados, pelas palavras de incentivo, pela generosidade de pensarem mais em mim do que em vocês. Obrigada pela vida. Obrigada pelo amor. Amo vocês!

Agradeço à Raphaela pelo carinho, pela cumplicidade, pelas brincadeiras. Obrigada por tudo. Te amo, minha irmã!

Agradeço muito ao Léo, grande amor da minha vida, que me possibilitou ter alguém para dividir todos os meus problemas, angústias, conquistas e, acima de tudo, a enorme felicidade que sinto por estar ao seu lado. Obrigada pelo apoio, companheirismo, dedicação e amor que tornaram possível a chegada ao final de mais uma etapa tão importante para mim.

*Minha vida, nossas vidas formam um só diamante. Aprendi novas palavras e tornei outras mais belas. – CDA*

Agradeço aos tios, tias, primos e primas que sempre torceram por mim, especialmente à Luciana não só pela revisão deste trabalho, mas pelos conselhos e amizade.

À família Maurício pelo carinho com que me acolheu.

Obrigada a todos os amigos, em especial Clarisse, Juliana, Thiago e Carlos que me incentivaram e apoiaram nos mais difíceis momentos, principalmente quando pensava em desistir. Obrigada pelo carinho, disponibilidade e companheirismo.

Agradeço aos recentes, mas não menos importantes, amigos do mestrado por todos os momentos (bons e nem tão bons assim) passados no Fundão: Leandro, Vitor, Vinícius, Jefferson e Eliane.

Agradeço a todos os técnicos do Laboratório de Geotecnia, sem os quais esse trabalho não poderia ser realizado. À Glória, Maiara e Ana também pela amizade e receptividade. Aos professores da Geotecnia que acreditaram no meu potencial e me indicaram como bolsista nota 10.

Finalmente, agradeço ao CNPq e Faperj pelo suporte financeiro.

*Para ser grande, sê inteiro: nada  
Teu exagera ou exclui.  
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és  
No mínimo que fazes.  
Assim em cada lago a lua toda  
Brilha, porque alta vive.*

*Ricardo Reis*

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (MSc)

## ESTUDO DE LABORATÓRIO DE UM RESÍDUO CATALISADOR DE EQUILÍBRIO PARA UTILIZAÇÃO EM ALVENARIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Renata Lopes Guilhermino

Março/2008

Orientador: Prof. Francisco José Casanova de Oliveira e Castro

Programa: Engenharia Civil

Com o desenvolvimento da sociedade e com as inovações tecnológicas ocorridas nos últimos séculos, houve um considerável aumento da geração de resíduos, o que acelera o processo de degradação ambiental e interfere negativamente na qualidade de vida do homem. Aliado a isso têm-se o crescente e exagerado consumo de energia, cujo custo econômico e ambiental está cada vez mais alto. Outra questão que preocupa a sociedade há tempos é o déficit habitacional, que com o acelerado crescimento populacional tornou-se urgente. Baseado principalmente nesses três problemas, o presente trabalho pretende mostrar a importância do reaproveitamento dos resíduos industriais através da reutilização de um material proveniente da indústria do petróleo, denominado Catalisador de Equilíbrio (Ecat), produzido em grande quantidade no país. Foi avaliada a atividade pozolânica do Ecat moído, objetivando a confecção de elementos construtivos estruturais. Para isso, foram analisadas suas características físicas, químicas e principalmente mecânicas (Resistência à Compressão Simples). Os melhores resultados mostraram que misturas com 25,5% de Ecat, areia (47,7%), caulinita (9,5%), cal (11%),  $\text{CaSO}_4$  (1,5%) e cimento (4,5%) apresentaram resistências de 8,3 MPa aos 7 dias e atingiram 17,7 Mpa aos 28 dias, confirmando a viabilidade técnica da fabricação de tijolos com o resíduo estudado em substituição parcial ao cimento.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

LABORATORY STUDY OF AN EQUILIBRIUM CATALYST WASTE FOR USE IN  
WALL CONSTRUCTIONS

Renata Lopes Guilhermino

March/2008

Advisor: Francisco José Casanova de Oliveira e Castro

Department: Civil Engineering

With the society development and the technological innovations occurred in the last few centuries, there was a considerable increase in waste generation, which speeds up the process of environmental degradation and interfere negatively on the quality of human life. Another challenge to society is the excessive energy consumption that leads inevitably to great economic and environmental costs. Another issue that has been concerning the society is the housing deficit that with the quickly population growth has become urgent. Based on these three problems, this study aims to show the importance of industrial waste recycling and its viability through the reuse of a material from the petroleum industry, produced in large quantity in Brazil, called Equilibrium Catalyst (Ecat). The study evaluated the pozzolanic activity of grounded Ecat through physical and chemical tests and compressive strength analysis, aiming its use in constructions elements. The bests results show that admixtures containing Ecat (25,5%), sand (47,7%), kaolinite (9,5%), lime (11%),  $\text{CaSO}_4$  (1,5%) and cement (4,5%) achieved 8,3 MPa at the age of 7 days and 17,7 MPa at age of 28 days. These values confirm the technical viability of Ecat utilization to partially replace cement on bricks fabrication.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	12
1.2. PANORAMA GERAL .....	12
1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO .....	15
1.3.1. Objetivos gerais .....	15
1.3.2. Objetivos específicos.....	16
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS .....	17
2.1.1. Introdução.....	17
2.1.2 Histórico .....	18
2.1.2.1 O homem e o saneamento .....	18
2.1.2.2. A disposição do lixo.....	20
2.1.3. Classificação dos resíduos.....	21
2.1.3.1. Quanto à fonte geradora .....	21
2.1.3.2. Quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente.....	24
2.1.4. Resíduos industriais .....	25
2.1.4.1. Dados sobre resíduos industriais no Brasil.....	31
2.1.4.2. Tratamento e destinação final de resíduos industriais .....	40
2.1.5. Resíduos com atividade pozolânica .....	49
2.1.5.1. Pozolanas .....	49
2.1.5.2. Utilização de resíduos pozolânicos .....	54
2.2. DÉFICIT HABITACIONAL .....	61
2.2.1 Introdução.....	61
2.2.2. Déficit habitacional em 2005.....	65
2.2.3. Componentes do déficit habitacional 2005 .....	71
2.2.3.1. Habitação precária .....	71
2.2.3.2. Coabitação familiar.....	72
2.2.3.3. Ônus excessivo com aluguel.....	73
2.2.4. Inadequação de domicílios.....	73
2.2.5. Evolução do déficit habitacional.....	75
2.2.6. Déficit habitacional no Estado do Rio de Janeiro.....	77
2.3. ENERGIA .....	79
2.3.1. Panorama geral .....	79
2.3.2. Energia na construção civil.....	86
2.3.3. Mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL.....	97
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>105</b>
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS .....	105
3.1.1. Resíduo proveniente do craqueamento catalítico do petróleo .....	105
3.1.1.1. Introdução.....	105
3.1.1.2. Zeólitas .....	106
3.1.1.3. Estudos do Ecat como pozolana .....	108
3.1.1.4. Características do Ecat estudado.....	111
3.1.1.5. Características físicas .....	112
3.1.1.6. Características químicas .....	113
3.1.1.7. Características mineralógicas.....	115
3.1.1.8. Características ambientais .....	115

3.1.2. Cal .....	116
3.1.3. Sulfato de cálcio.....	116
3.1.4. Cimento.....	116
3.1.5. Caolim .....	117
3.1.6. Areia .....	118
3.2. MÉTODOS E EXPERIMENTOS .....	119
3.2.1. Método físico-químico .....	119
3.2.2. Corpos de prova e Resistência à Compressão Simples .....	121
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>127</b>
4.1. MÉTODO FÍSICO-QUÍMICO.....	127
4.1.1 Sistema Ecat/cimento .....	127
4.1.2. Sistema Ecat/cal .....	129
4.2. ENSAIOS MECÂNICOS - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	134
4.2.1. Sistema solo/cimento .....	134
4.2.2. Sistema Ecat/cal .....	136
4.2.3. Sistema Ecat/cal/sulfato .....	138
4.2.4. Sistema completo: Ecat/cal/sulfato/caolinita/areia/cimento.....	142
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS</b>	<b>154</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	154
5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS.....	157
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>158</b>
<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</b>	<b>166</b>

## ABREVIATURAS E SÍMBLOS

ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
ABIQUIM	Associação Brasileira de Indústrias Químicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Índice de Atividade
AND	Autoridade Nacional Designada
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
a/s	Fator Água/Sólidos
CEE	Condutividade Elétrica
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CEMBUREAU	The European Cement Association
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CIMGC	Comissão Internacional de Mudança Global do Clima
CLSM	Controlled Low Strength Materials (Materiais de Baixa Resistência Controlada)
CNEN	Conselho Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática
DCP	Documento de Concepção de Projeto
ECAT	Catalisador de Equilíbrio
ECO	Ecology: Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
EOD	Entidade Operacional Designada
EPCAT	Catalisador Precipitador Eletrostático
FEAM	A Fundação Estadual do Meio Ambiente (Minas Gerais)
FEEMA	A Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (Rio de Janeiro)
FI	Formulação I
FI -C	Formulação I com Cimento
FII	Formulação II
FII -C	Formulação II com Cimento
FIII	Formulação III
FIII -C	Formulação III com Cimento
FJP	Fundação João Pinheiro
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GWP	Global Warming Potencial
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEO	Internacional Energy Overlook

INT	Instituto Nacional de Tecnologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPT	Instituto Nacional de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	Internacional Organization for Standardization
MEAS	Massa específica Aparente Seca
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MFQ	Método Físico-Químico
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
$M_u$	Massa Úmida
ND	Não Detectado
NUCAT	Núcleo de Catálise (PEQ/COPPE/UFRJ)
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OFICEMEN	Agrupación de Fabricantes de Cimento em Espanha
P.A.	Pró-análise
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
RCE	Reduções Certificadas de Emissões
RCS	Resistência à Compressão Simples
SE	Superfície Específica
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
TEC	Toneladas Equivalente de Carvão
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
V	Volume
w	Umidade
w/c	Fator água/ cimento (Water/Cement ratio)
$\Delta V$	Varição de Volume
$\rho_d$	Massa Específica Aparente Seca
$\rho_s$	Massa Específica Real
$\rho_u$	Massa Específica Unitária

---

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

---

### **1.1. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

No primeiro capítulo está apresentado um panorama geral da situação do Brasil e do Mundo quanto à geração de resíduos, ao consumo de energia e ao déficit habitacional, além de algumas questões ambientais. Ainda estão incluídos nesse capítulo os objetivos gerais e específicos do presente trabalho e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 é bastante amplo, pois traz toda a revisão bibliográfica, entrando mais profundamente em assuntos citados no capítulo anterior - como energia - com destaque para o setor da construção civil, geração de resíduos e déficit habitacional. Também inclui temas relacionados a resíduos industriais e de atividade pozolânica. Aborda, ainda, o tema de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e sua relação com o presente estudo.

O terceiro capítulo é dedicado à descrição pormenorizada dos diversos materiais, métodos e ensaios utilizados na pesquisa.

No Capítulo 4 estão apresentados todos os resultados obtidos e as discussões pertinentes.

O capítulo 5 é composto pelas conclusões finais do trabalho.

Por fim, o capítulo 6 é dedicado à bibliografia utilizada.

### **1.2. PANORAMA GERAL**

O crescimento da população e as grandes inovações tecnológicas ocorridas ao longo do século XX vêm provocando uma série de problemas sócio-econômicos, além de contribuir para o aumento acentuado da geração de resíduos, acelerando o processo

contínuo de deterioração ambiental com sérias implicações na qualidade de vida do homem.

A disposição final dos resíduos sólidos representa um sério problema ecológico, envolvendo aspectos sanitários e de saúde pública, e devido à falta de alternativas políticas, econômicas e tecnologicamente viáveis, está causando impactos ambientais de diferentes magnitudes, tornando-se um grande desafio a ser solucionado pelo poder público em busca da sustentabilidade.

Desde a realização da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento – ECO-92, a crescente produção de resíduos sólidos em todo o mundo tem sido uma questão amplamente discutida e considerada fundamental quanto à preservação do meio ambiente.

As revoluções tecnológicas alteraram substancialmente a capacidade potencial de gerar bens e serviços. Os avanços simultâneos em campos como a informática, a biotecnologia e a ciência dos materiais, entre outras áreas, determinaram rupturas qualitativas nas possibilidades usuais de produção, ampliando-as extensamente e com um horizonte de contínuo crescimento. (KLIKSBURG, 2003)

Porém, ao mesmo tempo em que o conhecimento tecnológico disponível multiplica a capacidade de dominar a natureza, o ser humano vem criando desequilíbrios ecológicos de grandes proporções, colocando em perigo aspectos básicos do ecossistema e sua própria sobrevivência.

Particularmente, a geração, a disposição e o tratamento de resíduos industriais têm sido grandes desafios, pois estes não podem ser tratados como resíduos comuns, uma vez que são potencialmente perigosos à saúde humana.

Dessa forma, surge como caminho para mitigação do problema o reaproveitamento dos resíduos gerados. Dentre os resíduos industriais, a escória de alto forno, a cinza-volante e o pó de sílica são exemplos de grande sucesso. Estes materiais apresentam propriedades cimentícias ou pozolânicas, e vários estudos já indicaram a viabilidade técnica e econômica de seu reaproveitamento.

Um país com escassez de capitais como o Brasil não pode se dar ao luxo de desprezar o gigantesco volume de resíduos industriais e minerários disponíveis, muitos deles insumos de qualidade, pois tal perda representa indubitavelmente um pesado ônus para a nação.

Além da questão da geração de resíduos, outro problema atual é o exagerado aumento do consumo energético. Costuma-se atribuir o crescimento no consumo de eletricidade ao crescimento do parque de equipamentos elétricos. Entretanto, as mudanças ambientais e sócio-econômicas irão afetar o consumo de eletricidade.

Fatores como o crescimento populacional, elevação do PIB mundial, mudanças climáticas devido a ações antropológicas e o desenvolvimento tecnológico contribuíram para que o consumo energético chegasse a níveis preocupantes.

A indústria é o setor que mais contribui para este aumento. A preocupação com a questão se legitima pelo fato de que grande parte da energia consumida no Brasil provém de fontes não renováveis, como o gás e o petróleo.

Ainda pode-se destacar outra questão em foco nos dias de hoje: a crescente necessidade habitacional que assola o país. Esta se divide em dois segmentos distintos: déficit habitacional e a inadequação de moradias.

Como déficit habitacional entende-se a noção mais imediata e intuitiva de necessidade de construção de novas moradias para a solução de problemas sociais e específicos de habitação detectados em certo momento.

Por outro lado, o conceito de inadequação de moradias reflete problemas na qualidade de vida dos moradores: não está relacionado ao dimensionamento do estoque de habitações, e sim a especificidades internas do mesmo. Seu dimensionamento visa ao delineamento de políticas complementares à construção de moradias, voltadas para a melhoria dos domicílios existentes. (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO - FJP, 2006)

Observando a situação habitacional do país e considerando inquestionável a necessidade de reaproveitamento de resíduos, principalmente os industriais, vislumbra-se como caminho para a mitigação desse conjunto de graves problemas a

utilização de tais materiais na produção de artefatos estabilizados para a construção civil.

Desta forma, contribui-se não só para a diminuição do montante de resíduos industriais descartados no meio ambiente, como para a redução do consumo de energia e para a diminuição do custo de certos materiais de construção que, muitas vezes, oneram o custo das habitações, principalmente as mais populares.

Conclui-se que a escolha da tecnologia adequada e economicamente sã é de vital importância para o sucesso de qualquer empreendimento que siga o caminho do eco-desenvolvimento, devendo-se notar que, na realidade, não existem tecnologias apropriadas tal qual. De fato, para cada contexto ecológico, econômico e social, assim como para um dado período de tempo, há de se explicitarem critérios de aceitação e, em seguida, empregá-los numa análise comparativa envolvendo as possíveis opções tecnológicas. Portanto, qualquer estratégia de desenvolvimento tem forçosamente que utilizar uma mistura de técnicas, caracterizadas por diferentes graus de intensidade de capital. (FAJARDO, 2005)

### **1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO**

#### **1.3.1. Objetivos gerais**

A presente dissertação de mestrado visa mostrar a importância do reaproveitamento de resíduos industriais e os benefícios em diversas esferas que podem ser gerados para toda a sociedade.

O foco principal é o reaproveitamento de um resíduo industrial proveniente da indústria do petróleo, já anteriormente estudado tal qual, modificado e ativado mecânica e quimicamente, respectivamente. No presente trabalho, o material é estudado a fim de ser utilizado como matéria-prima para o segmento da construção civil, com ênfase nos materiais atualmente empregados em habitações populares, bem como naqueles que podem substituí-los. Objetiva-se obter materiais de menor custo financeiro, energético e ecológico.

É importante ressaltar que o trabalho foi planejado e elaborado sem perder de vista a sua aplicação industrial, isto é, de modo a poder ser transferido para uma indústria já instalada e em funcionamento, sem a necessidade de modificações significativas de processamento, equipamentos ou a contratação adicional de mão-de-obra especificamente qualificada.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

O presente trabalho visa caracterizar química, física e mineralogicamente o resíduo industrial proveniente do craqueamento do petróleo, denominado *Catalisador de Equilíbrio (Ecat)*, produzido em grande quantidade no país. De posse de suas principais características e propriedades, parte-se para o estudo da fabricação de misturas cimentíceas, formuladas com base nos fundamentos científicos da química dos ligantes hidráulicos, objetivando a confecção de elementos construtivos estruturais.

Para se verificar a viabilidade da utilização do citado resíduo e para a avaliação de sua atividade pozolânica, utilizando as interações entre suas partículas e a cal ou os grãos de clínquer em suspensão aquosa, optou-se pela aplicação do *Método Físico-Químico*.

O estudo tem também como objetivo a avaliação técnica das formulações cimentíceas criadas, através de ensaios químicos, físico-químicos e mecânicos – Resistência à Compressão Simples. Tais ensaios foram realizados em laboratório, de modo a reproduzir o mais fielmente possível as condições reais existentes em indústrias da construção civil especializadas na produção de elementos construtivos estruturais.

---

## **CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

### **2.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS**

#### **2.1.1. Introdução**

A sociedade é a razão da existência da *Indústria de Resíduos* no mundo, um segmento econômico que cuida dos dejetos resultantes de atividades humanas.

Porém, a atenção dispensada aos resíduos sólidos, de maneira geral, é incipiente, ou seja, relega-se a administração das questões de resíduos sólidos a planos inferiores. No entanto, alguns mais atentos perceberam a desproporcionalidade entre o crescimento e o desenvolvimento da humanidade e iniciaram movimentos a fim de sinalizar e alertar que os espaços físicos e os meios naturais são finitos.

E foi assim, de vozes isoladas a grupos regionais, que hoje um exército de “cidadãos do mundo” mostra-se cada vez mais apto a suportar os desafios da globalização no setor de manejo dos Resíduos Sólidos.

De acordo com CAVALCANTI (1998), a década de 70 foi a década da água, a de 80 foi a do ar e a de 90, de resíduos sólidos. Enquanto de 1970 a 1990 a população do planeta aumentou em 18%, a quantidade de lixo sobre a Terra passou a ser 25% maior (LERIPIO, 2004).

Nos Estados Unidos, o grande volume de lixo gerado pela sociedade está altamente fundamentado no famoso "*american way of life*", que associa a qualidade de vida ao consumo exagerado de bens materiais. Este padrão de vida alimenta fortemente o consumismo, incentivando a produção de bens descartáveis e difundindo a utilização de materiais artificiais.

No que diz respeito à questão dos resíduos sólidos, verifica-se na Europa uma forte preocupação em relação à recuperação e ao reaproveitamento energético. A

dificuldade de geração de energia, devida aos escassos recursos disponíveis e aliada a um alto consumo energético, favorece a estratégia de reciclagem dos materiais e seu aproveitamento térmico. Ainda de acordo com Leripio, na indústria do alumínio, por exemplo, 99% dos resíduos da produção são reutilizados, e na indústria de plásticos o reaproveitamento de sobras chega a 88%. Do total de resíduos municipais europeus, cerca de 24% são destinados à incineração, sendo 16% com reaproveitamento energético.

Na China, país de extensão territorial considerável e com grande contingente populacional concentrado nas cidades, o povo considera os resíduos orgânicos como uma responsabilidade do gerador. Este tipo de valor cultural facilita a introdução de métodos mais racionais de controle dos resíduos sólidos, com participação ativa da população. A massa dos resíduos sólidos urbanos é composta predominantemente de material orgânico utilizado na agricultura. Assim, o resíduo não é visto como um problema, mas sim como uma solução para a fertilização dos solos, o que estimula a formação de uma extensa rede de compostagem e biodigestão de resíduos.

A compreensão da problemática do lixo e a busca de sua resolução pressupõem mais do que a adoção de tecnologias. Uma ação na origem do problema exige reflexão não sobre o lixo em si, no aspecto material, mas quanto ao seu significado simbólico, seu papel e sua contextualização cultural, e também sobre as relações históricas estabelecidas pela sociedade com os seus rejeitos.

## **2.1.2 Histórico**

### *2.1.2.1 O homem e o saneamento*

“O lixo reproduz os valores de um grupamento social, sendo o reflexo de suas atividades cotidianas, demonstrando, em sua composição, o grau de desenvolvimento deste grupo”. (SOARES, 1999)

O homem primitivo apresentou uma relação simbiótica com o meio ambiente, retirando da natureza o necessário para as suas funções vitais e devolvendo os resíduos de seu metabolismo interno. Com o tempo, o desenvolvimento da capacidade humana de

exercer domínio sobre a natureza permitiu alterar o meio ambiente natural indefinidamente (FARIA, 2002).

As populações nômades da Antigüidade evitaram o confronto com os danos ecológicos de sua própria lavra, abandonando a terra esgotada em busca de regiões não habitadas, que mantinham ainda sua fauna, flora e solo originais.

Em vários momentos da história antiga, foi possível observar cuidados ecológicos e sanitários. Em Jerusalém, os esgotos urbanos eram conduzidos por uma canalização para dentro de um açude. A matéria, que se depositava no fundo do açude, era utilizada como fertilizante, e a água servia para a irrigação dos jardins.

Ruínas de uma grande civilização ao norte da Índia, com mais de 4.000 anos de idade, indicam evidências da existência de hábitos higiênicos, incluindo a presença de banheiros e de sistemas de coleta de esgotos sanitários nas edificações, além de drenagem nos arruamentos. Outros povos, como os egípcios, dispunham de sistemas de drenagem de água, além da existência de grandes aquedutos. Também destacam-se os cuidados com o destino dos dejetos na cultura creto-micênica e as noções de engenharia sanitária dos quíchuas (ROSEN, 1994).

Segundo HELLER (1997), o avanço das práticas sanitárias coletivas encontrou sua expressão mais marcante na Antigüidade nos aquedutos, banhos públicos, termas e esgotos da Roma Antiga, tendo como símbolo histórico máximo a Cloaca Máxima de Roma.

Acompanhando a decadência do Império Romano, surgiram as epidemias provocadas pela falta de higiene. Com a proliferação dos ratos criaram-se as condições básicas para o alastramento da peste bubônica. A varíola e a cólera abalaram a Idade Média numa amplitude jamais vista.

Pelo desenvolvimento das ciências sanitárias foi possível relacionar a incidência de doenças com seus transmissores e, com a evolução da medicina, foi sendo construída uma ideologia de higiene pessoal, doméstica e municipal e de cuidados na erradicação de epidemias. Iniciaram-se, então, os serviços de coleta de lixo domiciliar.

A questão relacionada com a disposição destes resíduos tornou-se evidente, uma vez que as áreas disponíveis, localizadas perto dos centros de geração do lixo, vinham se tornando cada vez mais raras. Os terrenos mais adequados para a disposição do lixo geralmente apresentam um custo financeiro elevado, muitas vezes não se encontram disponíveis ou com capacidade de recebimento de resíduos limitada a certo volume e vida útil.

Assim, à medida que a população cresce, se reorganiza e desorganiza, aumentam consideravelmente os problemas ocasionados pela produção e disposição final do lixo. O crescimento da produção de resíduos tornou-se inevitável diante da velocidade da evolução da ciência e da tecnologia dos novos tempos, do aumento do consumo, dos novos modos de produção da moderna sociedade.

Com o avanço do processo de industrialização e o aumento da vida média dos seres humanos, houve um crescimento demográfico, uma elevação significativa do consumo e, conseqüentemente, da geração de resíduos. Além disso, ocorreu também uma mudança das características dos resíduos, aumentando, por exemplo, a porcentagem os plásticos e diminuindo gradativamente, nas sociedades desenvolvidas, a participação da matéria orgânica. Porém, quanto mais desenvolvida a sociedade, maior a quantidade de resíduos sólidos por habitante.

#### *2.1.2.2. A disposição do lixo*

Na Antigüidade as cidades eram cercadas por muralhas, e apenas dentro desses limites existia lugar para a regulamentação higiênica. Os detritos eram lançados fora dos muros da cidade, acumulando-se nas redondezas. O lodo putrefato dos esgotos era jogado nos rios e conduzido a estuários e baías, criando ali condições favoráveis à proliferação do mosquito da malária e de outros vetores de epidemias (FARIA, 2002).

Em Roma, no ano de 150, a população da zona urbana, assustada com a proliferação de roedores e insetos nos locais onde o lixo era deixado, resolveu abrir valas e aterrar todos os resíduos, eliminando os inconvenientes causados pelos vetores. Desde então, os administradores públicos e os interessados em saúde pública passaram a defender a necessidade de se desenvolver técnicas mais confiáveis no manejo e destinação dos resíduos.

Desenvolveram-se então, na Idade Média, os primeiros projetos de saneamento básico em grandes cidades como Paris e Bruxelas, bem como o hábito de dispor os resíduos sólidos fora das chamadas áreas urbanas.

Ainda hoje existem cidades na África onde os habitantes dispõem seu lixo de forma desordenada, em frente a suas casas, no meio da rua; e catadores públicos, com carroças de burro, fazem a coleta precária destes resíduos.

Assim, com o aprimoramento contínuo da prática de enterrar lixo, surgiu o que hoje conhecemos como aterros para disposição de lixo.

### **2.1.3. Classificação dos resíduos**

A classificação dos resíduos sólidos é um importante instrumento para o posterior gerenciamento dos mesmos. A vasta gama de classificações decorre, basicamente, da variedade de constituintes que fazem parte da composição física do lixo.

Portanto, os resíduos podem ser classificados de diversas formas como, por exemplo:

- quanto à fonte geradora;
- pelos riscos potenciais ao meio ambiente;
- quanto à sua natureza física;
- quanto à sua composição química;
- quanto à degradabilidade.

Particularmente, para o presente trabalho, interessam apenas as duas primeiras, que serão então descritas a seguir.

#### *2.1.3.1. Quanto à fonte geradora*

De acordo com sua origem, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- Domiciliar

São os resíduos gerados em domicílios residenciais. Geralmente, é composto predominantemente por material orgânico, reciclável e itens diversos.

Embora em pequenas quantidades, também são encontrados no lixo domiciliar óleos, pilhas, baterias, tintas, solventes, produtos de limpeza, termômetros, lâmpadas, entre outros. É comum, também, a presença de itens perfuro cortantes, como agulhas, lâminas de barbear e pregos. Esses resíduos têm efeitos potencialmente negativos à saúde humana e ao meio ambiente. Por esse motivo, os resíduos domiciliares, antes considerados como de pequeno risco para o meio ambiente, hoje são fonte de preocupação.

- Comercial

São os resíduos gerados em estabelecimento comerciais e de prestação de serviços, como supermercados, bancos, lojas, bares e restaurantes. Possuem composição variável de acordo com o tipo de atividade desenvolvida pela unidade geradora. Os resíduos oriundos de estabelecimentos de prestação de serviços são mais ricos em material reciclável, enquanto aqueles provenientes de bares, restaurantes e similares são mais ricos em matéria orgânica.

Os resíduos de origem domiciliar e comercial compõem o lixo domiciliar urbano, caso não haja coleta diferenciada, o que ocorre na grande maioria dos municípios brasileiros.

- Industriais

São os resíduos em que o estudo irá se focar. Sua composição é altamente variada e depende basicamente da atividade desenvolvida pela indústria. Há legislação específica que trata da disposição, coleta e destinação final dos resíduos industriais.

Os resíduos sólidos tipicamente urbanos gerados no interior das indústrias (em instalações como cantinas e escritórios) devem ser recolhidos separadamente e dispostos à coleta regular.

- Atividades públicas

Resíduos compostos por sobras ou descartes de atividades desenvolvidas pela administração pública, como poda de árvores e gramados e resíduos de construção ou demolição de obras públicas.

- Portos, aeroportos e terminais rodoviários e ferroviários

Geralmente, o resíduo gerado nesses estabelecimentos assemelha-se ao domiciliar. Contudo, podem veicular doenças provenientes de outras cidades, estados e países.

- Construção civil

São habitualmente compostos por materiais inertes, mas podem ser encontrados produtos tóxicos como restos de tinta, solventes, fibra de amianto, entre outros.

- Serviços de saúde

São os resíduos sólidos de hospitais, de clínicas médicas e veterinárias, de centros de saúde, de consultórios odontológicos e de farmácia. Nesses locais existem formas diferenciadas de separação e coleta dos materiais. É feita uma classificação dos resíduos de acordo com seu estado físico e a separação dos materiais que entraram em contato dos que não entraram em contato com pacientes. Do total, cerca de 70% (IPT/CEMPRE, 2001) dos resíduos não tiveram contato com pacientes e podem ser tratados como resíduos comuns sendo, inclusive, encaminhados à reciclagem quando possível. A outra fração dos resíduos de saúde não pode ser depositada em aterros sem prévio tratamento. A área destinada à disposição dos resíduos de saúde deve ser cercada e devidamente identificada devido ao risco de contaminação.

- Urbano

Em geral, o resíduo urbano é composto pelos resíduos domiciliar, comercial, de atividade pública, de vias públicas e de serviços de saúde. São de responsabilidade do município.

- Radioativos

São os resíduos de origem atômica, cujo controle e gerenciamento é feito, por lei, pelo Conselho Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

- Agrícolas

São os resíduos resultantes dos processos de produção de defensivos agrícolas, incluindo suas embalagens.

### 2.1.3.2. Quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente

Essa classificação é realizada de acordo com a NBR-10.004/2004. Quando há necessidade da realização de ensaios tecnológicos para avaliar as concentrações de elementos que conferem periculosidade, devem ser respeitadas as normas auxiliares: NBR-10.005/2004, NBR-10.006/2004 e NBR-10.007/2004. Os resíduos são, então, agrupados em três classes, conforme descritos na Tabela 1:

**TABELA 1**

Classificação dos resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente (NBR-10.004/2004)

CLASSE DE RISCO	CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS
CLASSE I – Resíduos perigosos	Apresentam risco à saúde pública e ao meio ambiente, caracterizando-se por possuir uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, oxididade e patogenicidade
CLASSE II A – Resíduos Não Perigosos – Não-inertes	São aqueles que não se enquadram como resíduos classe I ou II B, porém podem ter propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Nesta classe estão incluídos materiais como papéis, papelão e matéria vegetal.
CLASSE II B – Resíduos Não Perigosos – Inertes	Não tem nenhum constituinte solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade de água. As rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não se decompõem facilmente são exemplos de resíduos pertencentes a essa categoria.

FONTE – NBR 10.004/2004



**FIGURA 1** – Símbolo de algumas características dos resíduos

FONTE - ABRELPE – Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil/2006

Essa classificação é amplamente utilizada para caracterizar os resíduos industriais, sendo fundamental para embasar decisões sobre o tipo de tratamento e/ou destinação finais mais adequados que o resíduo deve receber. Além disso, a classificação é extremamente útil na definição da possibilidade ou não de reaproveitamento de dado material, pois os potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde humana são fatores limitantes neste caso.

#### **2.1.4. Resíduos industriais**

As sociedades desenvolvidas precisam cada vez mais da indústria para a produção de energia e bens de consumo que atendam às suas necessidades de vida. Quanto mais desenvolvida é a sociedade, maior é sua dependência das indústrias. As indústrias são as mais variadas possíveis e abrangem atividades como o processamento de alimentos, a mineração, a produção petroquímica, de plástico, metais, produtos químicos, papel e celulose, a manufatura de bens de consumo, entre outros ramos. Porém, para que a indústria produza toda essa variedade de bens e produtos, ela precisa de matéria-prima, ou seja, materiais como o ferro, a água e a madeira. Nesses processos de manufatura, inquestionavelmente há a geração de resíduos, que podem ser ou não tóxicos.

Os resíduos gerados pelas atividades agrícolas e industriais são de responsabilidade dos geradores, que são obrigados a cuidar do gerenciamento, transporte, tratamento e destinação final dos mesmos. Além disso, deve-se ressaltar que essa responsabilidade é eterna.

A indústria é responsável pela geração de grande quantidade de resíduos, como sobras de carvão mineral, refulos da indústria metalúrgica, resíduos químicos, gás e fumaça lançados pelas chaminés das fábricas. O lixo industrial, portanto, varia de acordo com a atividade industrial. Na indústria alimentícia, por exemplo, os refulos são vendidos para fábricas de ração animal. Já as indústrias metalúrgicas e de plásticos os vendem em grande parte para serem reciclados por outras empresas. As indústrias químicas, porém, precisam tratar seus rejeitos, e isso muitas vezes requer altos investimentos. O grande problema é quando esses resíduos não são tratados, sendo lançados em rios ou simplesmente queimados, poluindo o meio ambiente.

Entretanto, observa-se que com o adequado investimento isso pode ser revertido. Um bom exemplo é a cidade paulista de Cubatão que, na década de 80, sofreu com a poluição e hoje, graças a investimentos e pesquisas, está conseguindo mudar esse quadro.

O resíduo industrial é um dos maiores responsáveis pelas agressões fatais ao ambiente. Nele estão incluídos produtos químicos, metais e solventes que ameaçam os ciclos naturais nos locais onde são despejados. Assim, a saúde do ambiente e, conseqüentemente, dos seres que nele vivem, torna-se ameaçada, podendo levar a grandes tragédias.

De acordo com KRAEMER (2007), cerca de 10 a 20% dos resíduos industriais podem ser perigosos ao homem e ao ecossistema. Entre eles estão produtos químicos como o cianureto, pesticidas como o DDT, solventes e metais, como o mercúrio e o cádmio.

Os metais pesados, ou seja, os elementos de elevado peso molecular, quando absorvidos pelo ser humano, se depositam no tecido ósseo e gorduroso e deslocam minerais nobres dos ossos e músculos para a circulação, provocando uma série de doenças. Assim, o consumo habitual de água e alimentos – como peixes de água doce ou do mar – contaminados com metais pesados coloca em risco a saúde. As populações que moram em torno das fábricas de baterias artesanais, indústrias de cloro-soda que utilizam mercúrio, indústrias navais, siderúrgicas e metalúrgicas, correm sério risco de contaminação.

Os metais pesados são muito usados na indústria e estão em vários produtos. Na Tabela 2 estão listados os principais metais usados, suas fontes e riscos à saúde.

**TABELA 2**

Principais metais usados na indústria, suas fontes e riscos à saúde

<b>Metais</b>	<b>Fontes</b>	<b>Efeitos</b>
Alumínio	Produção de artefatos de alumínio; serralheria; soldagem de medicamentos (antiácidos) e tratamento convencional de água.	Anemia por deficiência de ferro; intoxicação crônica.
Arsênio	Metalurgia; manufatura de vidros e fundição.	Câncer (seios paranasais)
Cádmio	Soldas; tabaco; baterias e pilhas.	Câncer de pulmões e próstata; lesão nos rins.
Chumbo	Fabricação e reciclagem de baterias de autos; indústria de tintas; pintura em cerâmica; soldagem.	Saturnismo (cólicas abdominais; tremores, fraqueza muscular; lesão renal e cerebral).
Cobalto	Preparo de ferramentas de corte e furadoras.	Fibrose pulmonar (endurecimento do pulmão) que pode levar à morte.
Cromo	Indústrias de corantes, esmaltes, tintas, ligas com aço e níquel; cromagem de metais.	Asma (bronquite); câncer.
Fósforo amarelo	Veneno para baratas; rodenticidas (tipo de inseticida usado na lavoura) e fogos de artifício.	Náuseas; gastrite; odor de alho; fezes e vômitos fosforescentes; dor muscular; torpor; choque; coma e até morte.
Mercúrio	Moldes industriais; certas indústrias de cloro-soda; garimpo de ouro; lâmpadas fluorescentes.	Intoxicação do sistema nervoso central
Níquel	Baterias; aramados; fundição e niquelagem de metais; refinarias.	Câncer de pulmão e seios paranasais
Fumos metálicos	Vapores (de cobre, cádmio, ferro, manganês, níquel e zinco) da soldagem industrial ou da galvanização de metais.	Febre dos fumos metálicos (febre, tosse, cansaço e dores musculares) - parecida com pneumonia.

FONTES - <http://www.ambientebrasil.com.br/> CUT – RJ – Comissão de Meio Ambiente

Certos resíduos perigosos são jogados no meio ambiente precisamente por serem tão danosos, isto é, as indústrias não sabem como lidar com eles com segurança e, então, lançam essas substâncias tóxicas esperando que o ambiente as absorva. Porém, essa

não é uma solução segura para o problema. Muitos metais e produtos químicos não são naturais nem biodegradáveis. Dessa forma, cada vez mais os ciclos naturais são ameaçados e o ambiente se torna poluído.

As indústrias tradicionalmente responsáveis pela maior produção de resíduos perigosos são as metalúrgicas, as de equipamentos eletro-eletrônicos, as fundições, a indústria química e a de couro e borracha. Atualmente, há mais de 7 milhões de produtos químicos conhecidos, e a cada ano outros milhares são descobertos, dificultando cada vez mais o tratamento efetivo do resíduo.

Os resíduos das classes I e II já citados anteriormente devem ser tratados e destinados em instalações apropriadas para tal fim. Por exemplo, os aterros industriais precisam de mantas impermeáveis e diversas camadas de proteção para evitar a contaminação do solo e das águas, além de instalações preparadas para receber o lixo industrial e hospitalar, normalmente operados por empresas privadas. Porém, ainda hoje predomina, em muitas áreas urbanas, a disposição final inadequada de resíduos industriais como, por exemplo, o lançamento dos dejetos perigosos em lixões, nas margens das estradas ou em terrenos baldios, o que compromete a qualidade ambiental e de vida da população. A manipulação correta de um resíduo tem grande importância para o controle do risco que ele representa, pois um material descartado relativamente inofensivo, em mãos inexperientes, pode transformar-se em um risco ambiental bastante grave.

Para tratar a questão dos resíduos industriais, o Brasil possui legislação e normas específicas. Pode-se citar a Constituição Brasileira em seu Artigo 225, que dispõe sobre a proteção ao meio ambiente; a Lei 6.938/81, que estabelece a Política Nacional de Meio Ambiente; a Lei 6.803/80, que dispõe sobre as diretrizes básicas para o zoneamento industrial em áreas críticas de poluição; as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA 257/263 e 258 - que dispõem, respectivamente, sobre pilhas, baterias e pneumáticos. Além disso, a questão é amplamente tratada nos Capítulos 19, 20 e 21 da Agenda 21 (Rio-92).

Além disso, o governo federal, através do Ministério do Meio Ambiente – MMA - e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA - está desenvolvendo projetos para caracterizar os resíduos industriais através de um

inventário nacional, para traçar e desenvolver uma política de atuação, visando reduzir a produção e a destinação inadequada de resíduos perigosos.

Com a aprovação, em 1998, da Lei de Crimes Ambientais, que estabelece pesadas sanções para os responsáveis pela disposição inadequada de resíduos, ocorreu um aumento na demanda dos serviços de empresas na área de resíduos, algumas chegando a atingir um crescimento de 20%, mas tal movimento foi, de certa forma, arrefecido com a emissão da Medida Provisória que ampliou o prazo para que as empresas se adaptassem à nova legislação.

Destacam-se, também, as normas ISO 14000–Gestão Ambiental, que foram inicialmente elaboradas visando o “manejo ambiental”, que significa “o que a organização faz para minimizar os efeitos nocivos ao ambiente causados pelas suas atividades”.

Assim sendo, essas normas fomentam a prevenção de processos de contaminações ambientais, uma vez que orientam a organização quanto à sua estrutura, forma de operação e de levantamento, armazenamento, recuperação e disponibilização de dados e resultados (sempre atentando para as necessidades futuras e imediatas de mercado e, conseqüentemente, a satisfação do cliente), entre outras orientações, inserindo a organização no contexto ambiental.

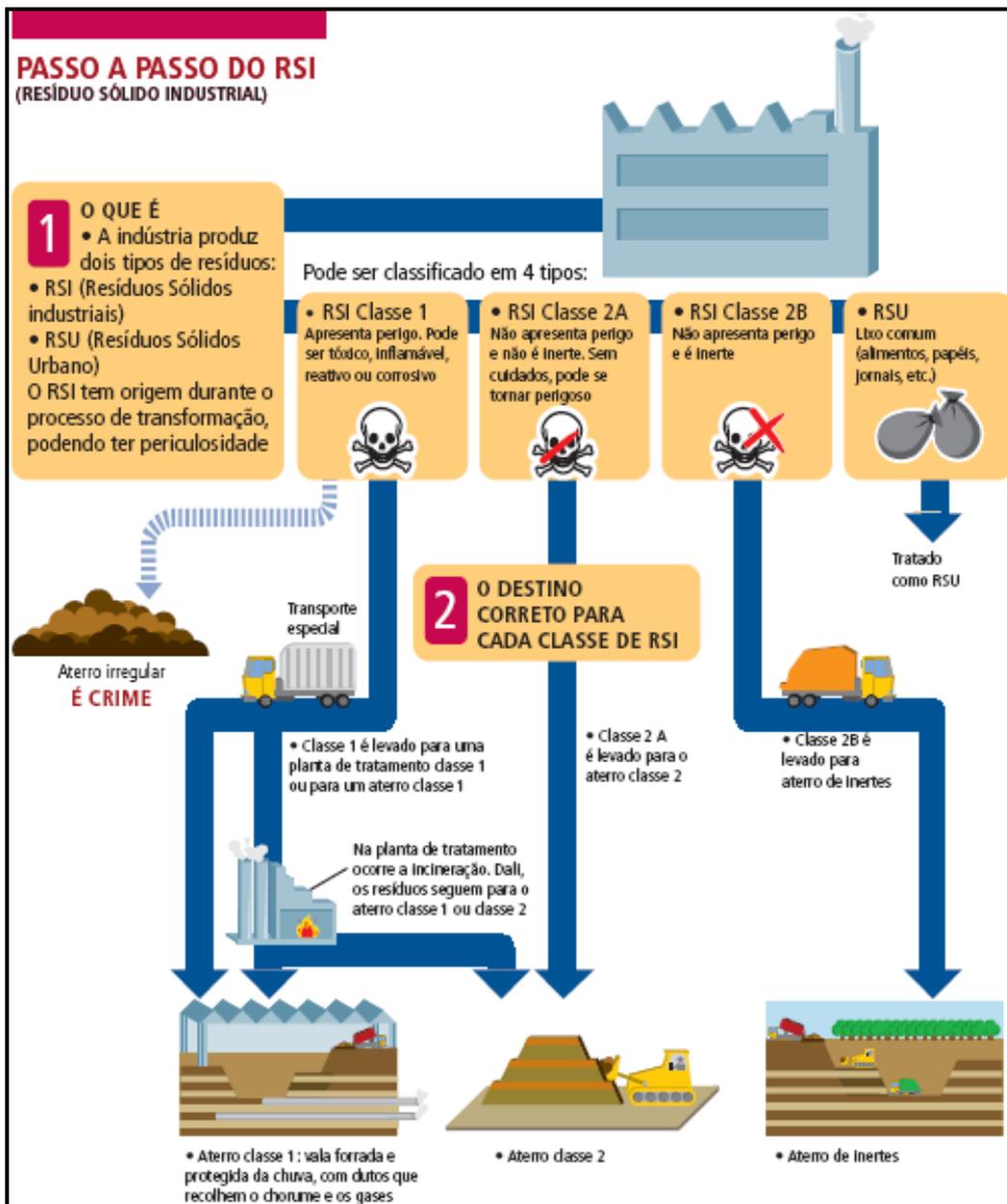
A esperança das empresas que investiram em tecnologia e instalações para tratamento e disposição de resíduos industriais está na disseminação da ISO 14000, pois as empresas que aderirem à norma terão que gerenciar adequadamente seus resíduos, e numa maior atuação fiscalizadora por parte dos órgãos de controle ambiental.

A soma das ações de controle, envolvendo a geração, manipulação, transporte, tratamento e disposição final, traduz-se nos seguintes benefícios principais:

- minimização dos riscos de acidentes pela manipulação de resíduos perigosos;
- disposição de resíduos em sistemas apropriados;
- promoção de controle eficiente do sistema de transporte de resíduos perigosos;

- proteção à saúde da população em relação aos riscos potenciais oriundos da manipulação, tratamento e disposição final inadequada;
- intensificação do reaproveitamento de resíduos industriais;
- proteção dos recursos não renováveis, bem como o adiamento do esgotamento de matérias-primas;
- diminuição da quantidade de resíduos e dos elevados e crescentes custos de sua destinação final;
- minimização dos impactos adversos, provocados pelos resíduos no meio ambiente, protegendo o solo, o ar e as coleções hídricas superficiais e subterrâneas de contaminação.

Muitas vezes, as empresas têm consciência da necessidade de tratar seus resíduos e querem fazer isso, mas a grande maioria desses tratamentos representa alto custo. Desse modo, se uma determinada empresa fizer o tratamento e a sua concorrente não o fizer, isto colocará a primeira empresa numa posição de menos competitividade, o que faz com que muitas indústrias deixem de tratar seus resíduos para que consigam vender seus produtos a preço de mercado.



**FIGURA 2** – Passo a passo dos Resíduos Sólidos Industriais

FONTE - ABRELPE – Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil/2006

#### 2.1.4.1. Dados sobre resíduos industriais no Brasil

Devido à grande variedade e quantidade de indústrias no país, não há dados oficiais levantados sobre a geração de resíduos industriais em nível nacional. Pode-se contar apenas com algumas iniciativas de setores específicos (como as indústrias químicas) ou de estados isoladamente, principalmente aqueles da região Sul e Sudeste.

De acordo com a Associação Brasileira de Indústrias Químicas, a ABIQUIM, a geração de resíduos sólidos foi significativamente reduzida em 2005, considerando-se tanto os resíduos perigosos como os inertes (lixo comum). Esta redução pode ser atribuída a fatores como os aprimoramentos constantes feitos na gestão da qualidade (que geram menor quantidade de produtos fora de especificação ou de subprodutos indesejáveis), aplicação de melhores controles nos procedimentos de manutenção e de programas de ordem e limpeza.



**FIGURA 3** – Evolução da geração de resíduos perigosos e não-perigosos  
FONTE – ABIQUIM, 2006

No Estado do Rio de Janeiro, o levantamento realizado pela FEEMA indica uma geração mensal pelas indústrias fluminenses de 505.209,56 toneladas de resíduos industriais, sendo 24.496,11 toneladas de resíduos perigosos. A maior parte deste tipo de resíduo é produzida na região metropolitana do Rio de Janeiro.

Observa-se que, nesse estado, o inventário ressalta a distribuição por bacias hidrográficas, e não por indústria ou fonte geradora. A distribuição de resíduos perigosos aponta as bacias da Baía de Guanabara e Paraíba do Sul como responsáveis por mais de 75% da geração estadual total. A maior geração de resíduos perigosos ocorre na Baía de Guanabara, com mais de 41% do total gerado (aproximadamente 10 000 toneladas mensais), com destaque para o município do Rio de Janeiro, que gera cerca de 4 000 toneladas por mês, seguido do município de Duque de Caxias, com uma geração mensal em torno de 3.500 toneladas/mês.

**TABELA 3**

Geração mensal de resíduos perigosos – Rio de Janeiro

<b>BACIA HIDROGRÁFICA</b>	<b>GERAÇÃO DE RESÍDUOS PERIGOSOS (t/mês)</b>	<b>PERCENTUAL</b>
Baía de Guanabara	10075.16	41,13
Paraíba do Sul	9431.98	38,50
Baía de Sepetiba	4879.66	19,92
Lagoa de Jacarepaguá	109.31	0,45
<b>Total</b>	<b>24.496.12</b>	<b>100%</b>

FONTE - FEEMA: <http://www.feema.rj.gov.br>, 2007

No Estado de São Paulo, observa-se que o crescimento populacional, aliado ao incremento das atividades industriais, tem acarretado um aumento considerável na produção de resíduos sólidos.

Paralelamente a esse crescimento, amplia-se o anseio por um desenvolvimento sustentável e, portanto, a urgência em se efetuar o gerenciamento criterioso desses resíduos, de modo a permitir o controle e a prevenção da poluição do meio ambiente.

Em razão da diversidade do parque industrial no estado de São Paulo, decorrente de fatores sócio-econômicos, de mercado, da localização geográfica e características regionais diversas, a gestão dos resíduos sólidos industriais tornou-se uma questão urgente. Outro fator que ressalta a necessidade de uma atuação mais firme na gestão de resíduos industriais são os inúmeros episódios críticos de poluição que têm sido relacionados ao trato inadequado desses resíduos, causando efeitos danosos à população e ao meio ambiente.

Desde o final da década de 1970, têm sido realizados levantamentos de dados de indústrias em regiões preestabelecidas. Como produtos destes trabalhos, foram definidos critérios para identificar os tipos de segmentos responsáveis pela geração de resíduos perigosos.

Em 1983, a CETESB iniciou um programa específico para controle da poluição por resíduos industriais, sendo selecionado, na ocasião, o Pólo Petroquímico de Cubatão, obtendo-se um diagnóstico de 23 indústrias localizadas na região. Logo após, em

1986, o programa estendeu-se às regiões do Vale do Paraíba, Sorocaba, Campinas e Grande São Paulo.

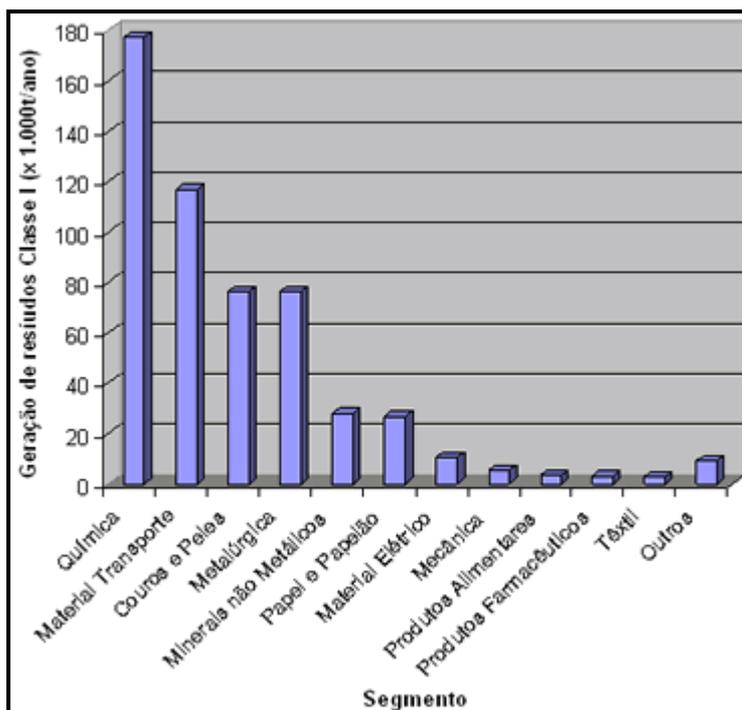
Em 1988, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA - aprovou a Resolução 006/88, que instituiu o Inventário de Fontes Poluidoras no Estado de São Paulo, tendo o primeiro sido realizado em 1988, com o cadastramento de 1.923 indústrias.

Após essa data, foram realizados outros estudos, tais como o levantamento de dados de 1996, onde foi observado que as indústrias do Estado de São Paulo geraram, por ano, mais de 500 mil toneladas de resíduos sólidos perigosos, cerca de 20 milhões de toneladas de resíduos sólidos não-inertes e não-perigosos, e acima de um milhão de toneladas de resíduos inertes. Os estudos revelaram, ainda, que 53% dos resíduos perigosos são tratados, 31% são armazenados e os 16% restantes são depositados no solo.

Os dados apresentados para o estado de São Paulo, de acordo com a CETESB, referem-se ao ano de 1996, onde foram inventariadas cerca de 1.500 empresas. Observa-se que há uma necessidade premente de se realizar um novo estudo, que sirva de base para a definição de estratégias a serem tomadas.

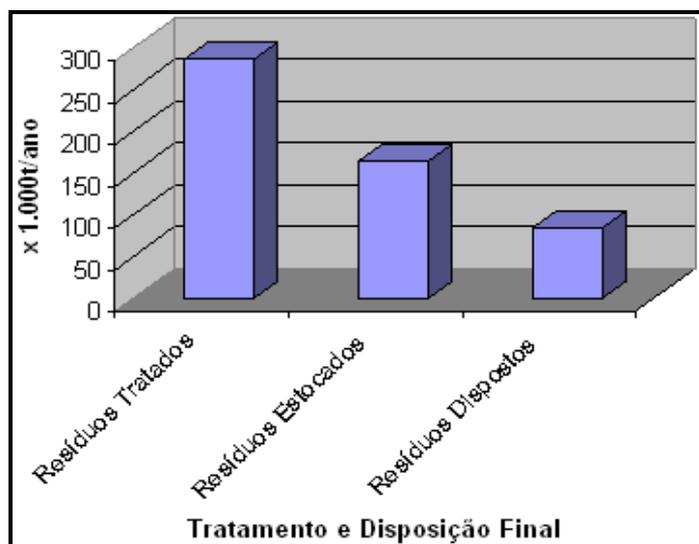
De acordo com as informações obtidas, as indústrias químicas são responsáveis pela geração da maior quantidade dos resíduos Classe I, seguidas das indústrias de material de transporte, couro e peles, metalúrgica, minerais não metálicos e papel e papelão. Esses setores contribuem com cerca de 88% da quantidade total.

Os principais setores contribuintes dos resíduos Classe II são derivados da produção de açúcar/álcool, minerais não metálicos, produtos alimentícios, metalurgia, química e papel e papelão. A geração de resíduos desses setores representa cerca de 93% do total gerado.



**GRÁFICO 1** - Maiores geradores de resíduos industriais perigosos (Classe I) no Estado de São Paulo (1996)

FONTE - CETESB. Inventário de resíduos industriais – 1996



**GRÁFICO 2** - Tratamento e disposição final de resíduos industriais perigosos (Classe I) no Estado de São Paulo (1996)

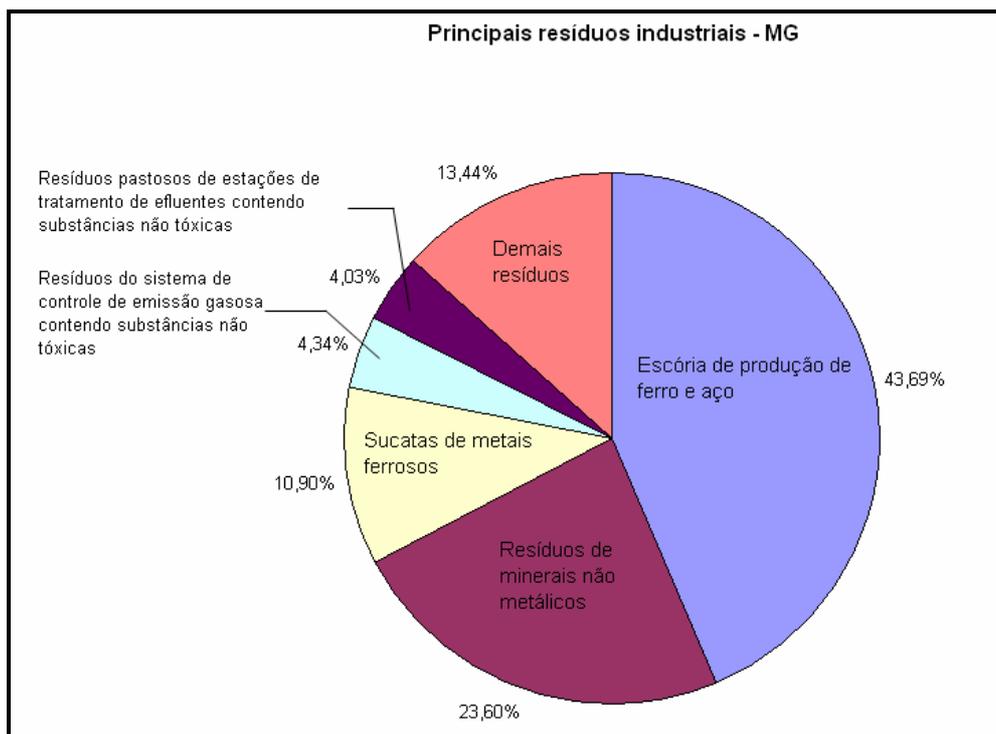
FONTE - CETESB. Inventário de resíduos industriais – 1996



**FIGURA 4 - Aterros no Estado de São Paulo**  
 FONTE - ABRELPE- Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil/2006

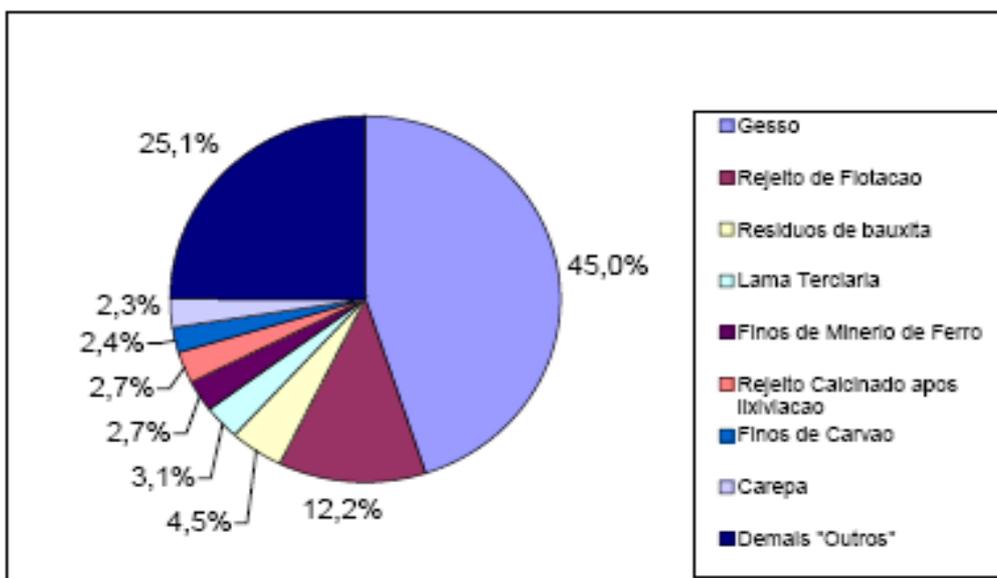
No Estado de Minas Gerais, de acordo com dados da FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente), foram inventariados os resíduos de 586 empresas e considerado um ciclo de 12 meses (data limite inicial de julho/2001). A quantidade de resíduos gerada foi de 15.165.193,65t, sendo 828.182,75t (5,46%) de resíduos perigosos e 14.337.010,93t (94,54%) não perigosos. Deste total, 9.906.701,86t (65,33%) foram classificados conforme a Listagem Base definida pela FEAM.

Os principais resíduos da Listagem Base apontados foram: escória de produção de ferro e aço (43,69%), resíduos de minerais não metálicos (23,60%), sucatas de metais ferrosos (10,90%), resíduos do sistema de controle de emissão gasosa contendo substâncias não tóxicas (4,34%), resíduos pastosos de estações de tratamento de efluentes contendo substâncias não tóxicas (4,03%).



**GRÁFICO 3 – Principais resíduos industriais de Minas Gerais (Listagem de Base)**  
 FONTE - Inventário estadual de resíduos sólidos industriais – Minas Gerais/2003

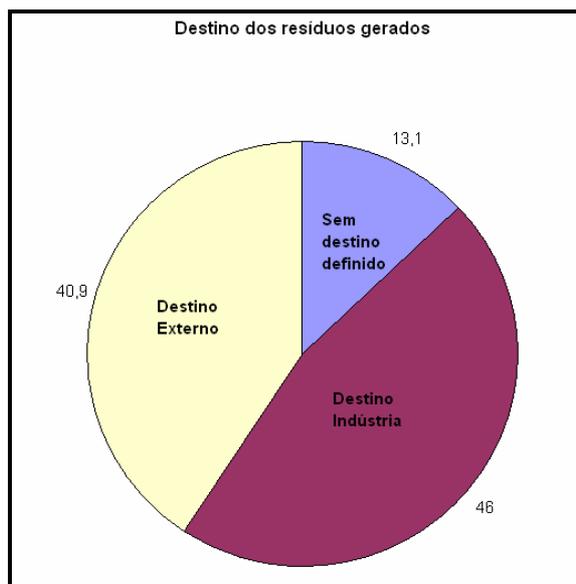
As 5.258.491, 79 t restantes (34,67%) que não foram classificadas segundo a Listagem Base, estão divididas principalmente em: gesso (44,98%), rejeito de flotação (12,23%), resíduos de bauxita (4,50%), lama terciária (3,13%), finos de minério de ferro (2,70%), rejeito calcinado após lixiviação (2,67%), finos de carvão (2,41%) e carepa (2,27%).



**GRÁFICO 4** – Principais resíduos industriais de Minas Gerais (Não Listagem de Base)  
 FONTE - Inventário estadual de resíduos sólidos industriais – Minas Gerais/2003

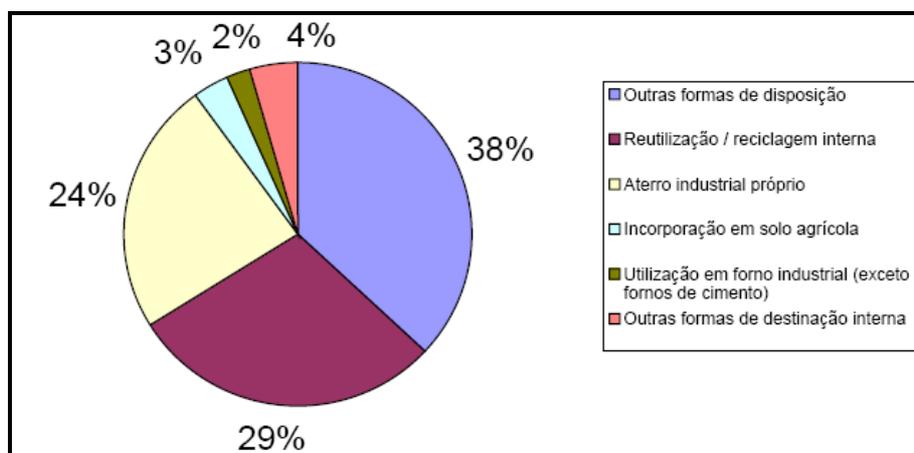
Além disso, os resíduos gerados foram classificados segundo três opções de destino:

- *sem destino definido* – resíduos gerados no período do inventário, que não tiveram destino definido até a data de término do período de referência do inventário, encontrando-se, portanto, armazenados na área da indústria;
- *destino indústria* – resíduos gerados no período de referência que foram destinados à própria planta industrial, seja para tratamento, disposição ou reutilização;
- *destino externo* – resíduos gerados no período de referência, que receberam algum tipo de tratamento, reutilização, reciclagem ou disposição final fora da unidade industrial.



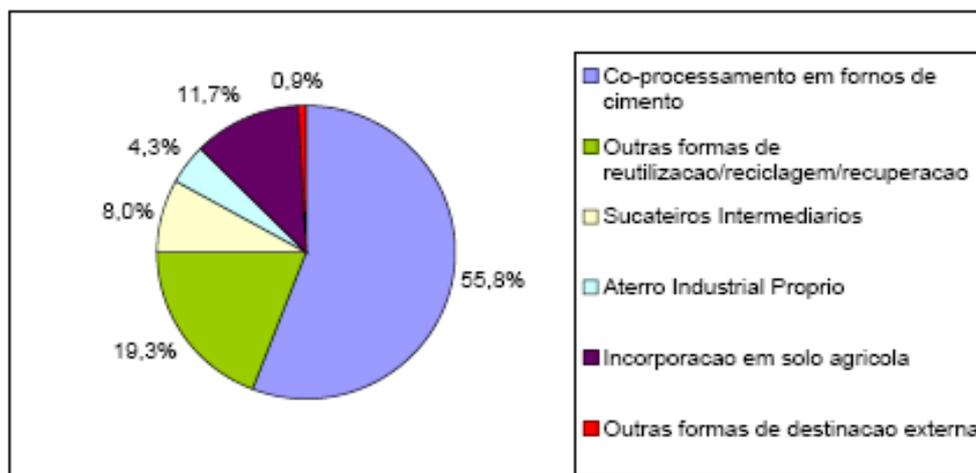
**GRÁFICO 5** – Destino dos resíduos industriais gerados - Minas Gerais  
 FONTE - Inventário estadual de resíduos sólidos industriais – Minas Gerais/2003

Dentre as formas de destinação dentro da Indústria, as principais são: reutilização ou reciclagem interna, aterro industrial próprio, incorporação em solo agrícola, utilização em forno industrial (exceto fornos de cimento).



**GRÁFICO 6** – Principais formas de destinação de resíduos dentro das indústrias  
 FONTE - Inventário estadual de resíduos sólidos industriais – Minas Gerais/2003

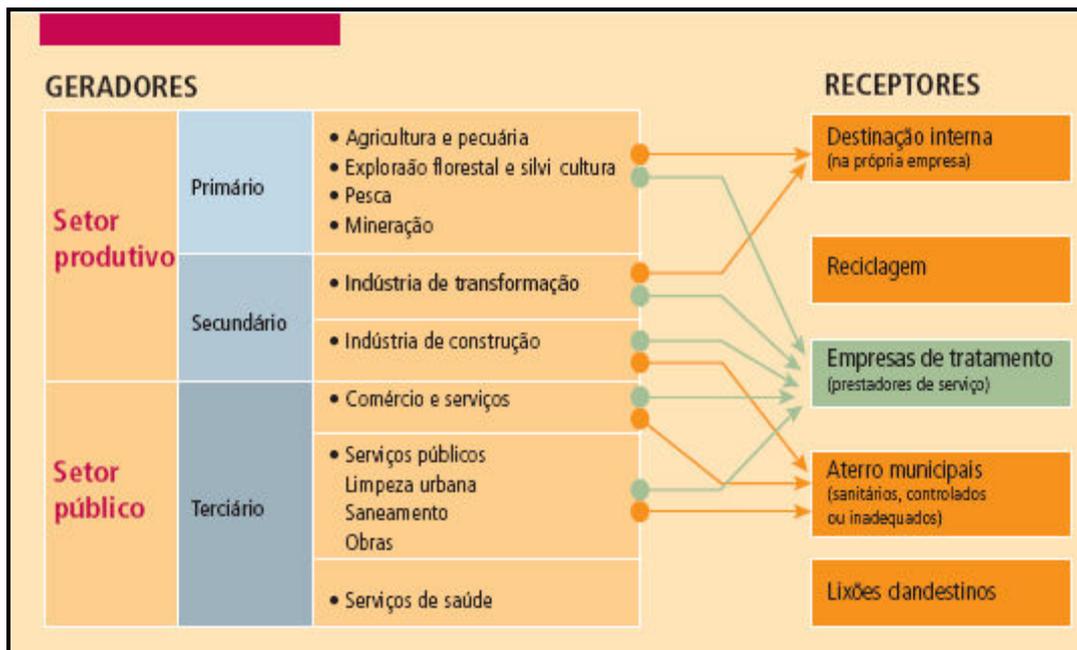
As principais formas de destinos externos apontados foram: co-processamento em fornos de cimento, outras formas de reutilização/reciclagem/recuperação, incorporação em solo agrícola, sucateiros intermediários, aterro industrial próprio.



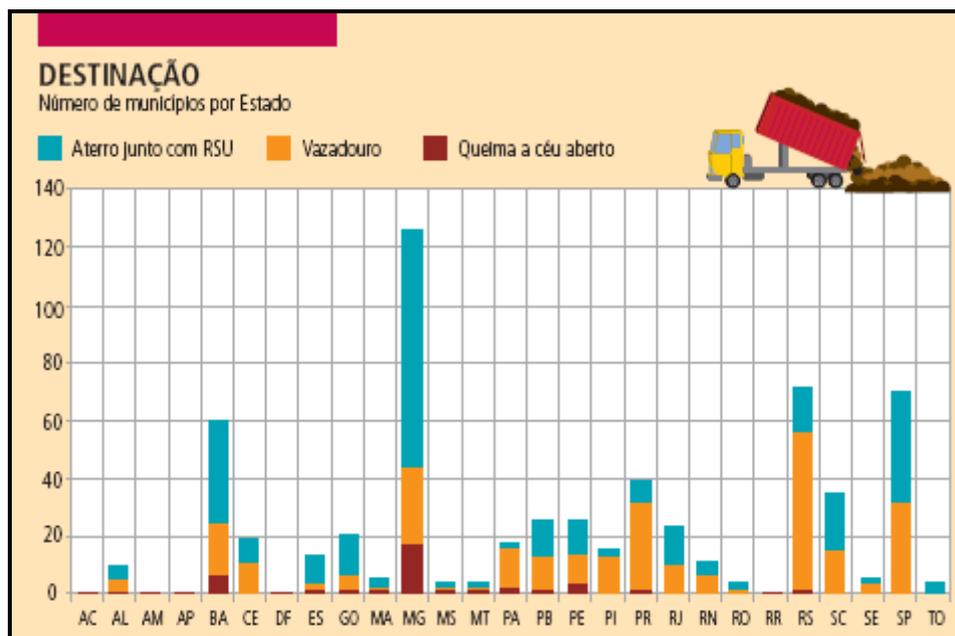
**GRÁFICO 7** – Principais formas de destinação externa de resíduos  
 FONTE - Inventário estadual de resíduos sólidos industriais – Minas Gerais/2003

#### 2.1.4.2. Tratamento e destinação final de resíduos industriais

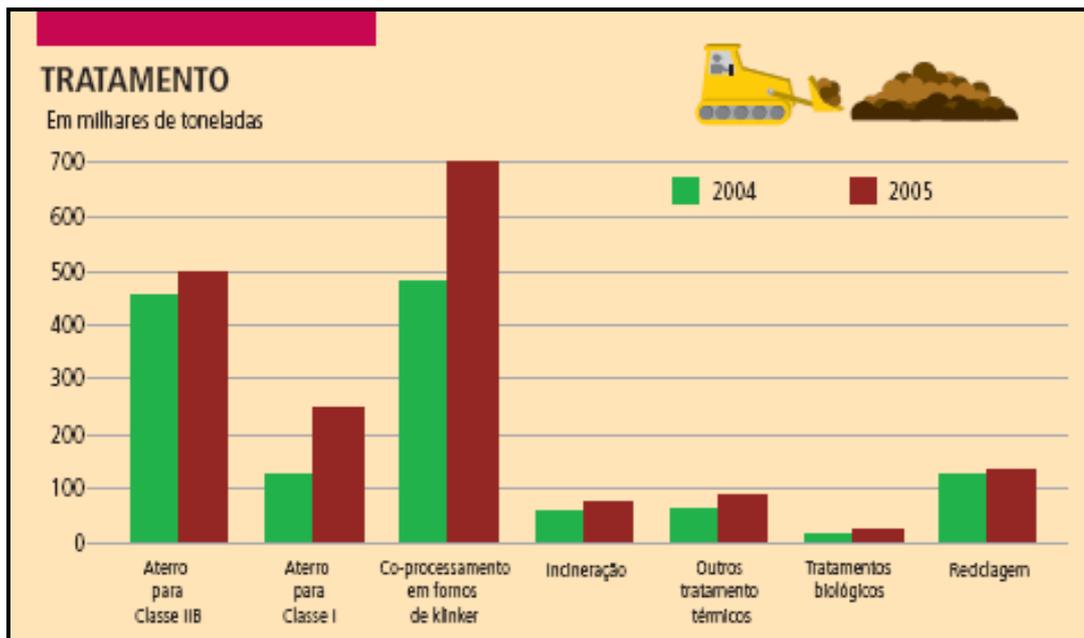
Segundo a ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos, metade da capacidade de tratamento disponível no país está localizada em um entorno de 250 km ao redor da cidade de São Paulo. Sabe-se ainda que vários aterros municipais recebem seus resíduos de forma inadequada, sem um efetivo controle necessário à manutenção da condição de aterro sanitário, ou no mínimo de aterro controlado. O cenário já se modifica quando se analisa os quantitativos de processamento e tratamento do setor privado.



**FIGURA 5 – Principais geradores e receptores de resíduos**  
 FONTE - ABRELPE - Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil/2006



**GRÁFICO 8 – Destinação dos resíduos sólidos por município**  
 FONTE - ABRELPE - Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil/2006



**GRÁFICO 9 – Tipos de destinação/ tratamento de resíduos 2004/2005**  
 FONTE - ABRELPE - Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil/2006



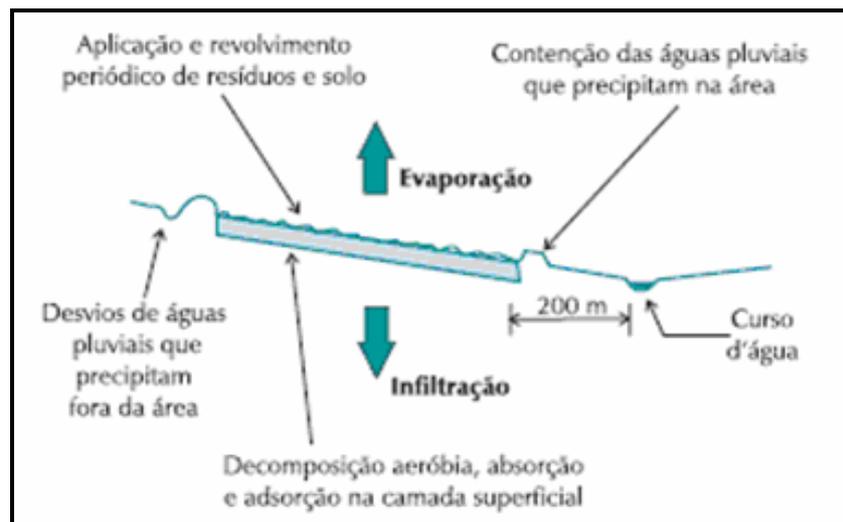
**FIGURA 6 – Cimenteiras licenciadas para co-processamento de resíduos no Brasil**  
 FONTE - ABRELPE - Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil/2006

Os métodos de destinação mais empregados são os seguintes:

- Landfarming

Consiste em um tratamento biológico no qual a parte orgânica do resíduo é decomposta pelos microorganismos presentes na camada superficial do próprio solo. É um tratamento muito utilizado na disposição final de derivados de petróleo e compostos orgânicos.

O tratamento consiste na mistura e homogeneização do resíduo com a camada superficial do solo (zona arável – 15 a 20 cm). Concluído o trabalho de degradação pelos microorganismos, nova camada de resíduo pode ser aplicada sobre o mesmo solo, repetindo-se os mesmos procedimentos sucessivamente. O processo de landfarming demanda áreas extensas na medida em que as camadas, ainda que sucessivas, são pouco espessas.



**FIGURA 7** - Esquema representativo de Landfarming  
FONTE: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos - IBAM, 2001.

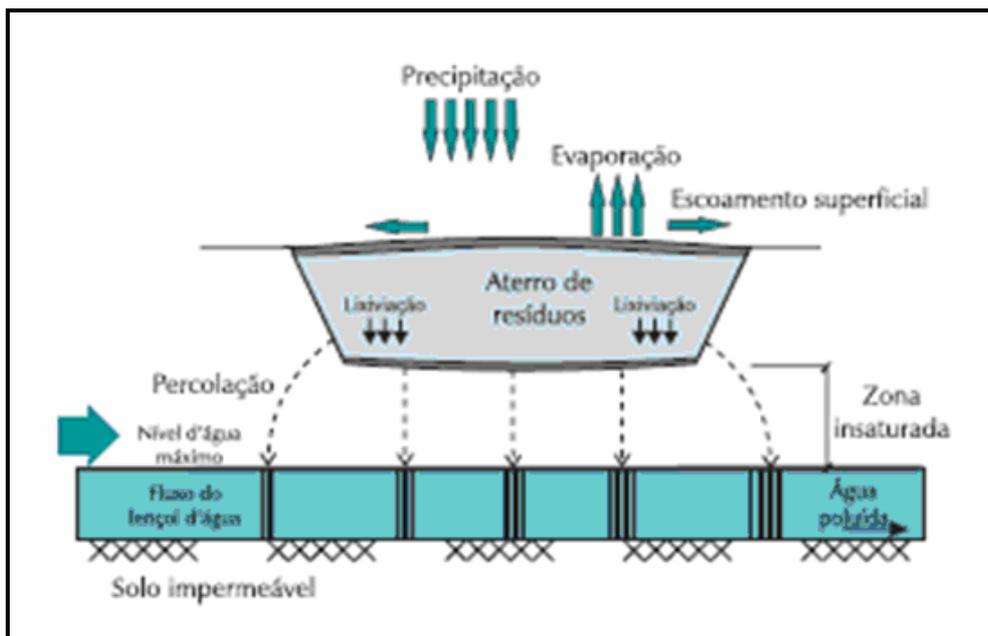
- Aterros industriais

Os aterros industriais podem ser classificados nas classes I e II, conforme a periculosidade dos resíduos a serem dispostos. Ou seja: os aterros Classe I podem receber resíduos industriais perigosos; os Classe II A, resíduos não-inertes; e os Classe II B, somente resíduos inertes.



**FIGURA 8** – Foto de um Aterro de Resíduos Industriais  
 FONTE - CETESB. Inventário de resíduos industriais – 1996

Qualquer que seja o aterro destinado a resíduos industriais, são fundamentais os sistemas de drenagem pluvial e a impermeabilização do seu leito para evitar a contaminação do solo e do lençol freático com as águas da chuva que percolam através dos resíduos.



**FIGURA 9** – Fluxo das águas em um aterro  
 FONTE: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos - IBAM, 2001

Deve-se evitar, através de barreiras e valas de drenagem, que as águas da chuva que precipitam além dos limites do aterro contribuam com o volume que percola no interior do aterro, reduzindo assim a quantidade de líquido a ser tratado.

É necessário impermeabilizar o leito do aterro, preferencialmente com o auxílio de uma manta plástica, impedindo que o percolato venha a contaminar o solo e o lençol d'água subterrâneo.

A maior restrição quanto aos aterros, como solução para disposição final de lixo, é sua demanda por grandes extensões de área para sua viabilização operacional e econômica, lembrando que os resíduos permanecem potencialmente perigosos no solo até que possam ser incorporados naturalmente ao meio ambiente.

Um cuidado especial que se deve tomar na operação de aterros industriais é o controle dos resíduos a serem dispostos, pois em aterros industriais, só podem ser dispostos resíduos quimicamente compatíveis, ou seja, aqueles que não reagem entre si nem com as águas de chuva infiltradas.

Os fenômenos mais comuns que podem ter origem na mistura de resíduos incompatíveis são: geração de calor, fogo ou explosão, produção de fumos e gases tóxicos e inflamáveis, solubilização de substâncias tóxicas e polimerização violenta. Portanto, antes de se dispor o resíduo no aterro, deve-se consultar as listagens de compatibilidade publicadas pelos órgãos de controle ambiental.

O aterro Classe II A é como um aterro sanitário para lixo domiciliar, porém, normalmente, sem o sistema de drenagem de gases.

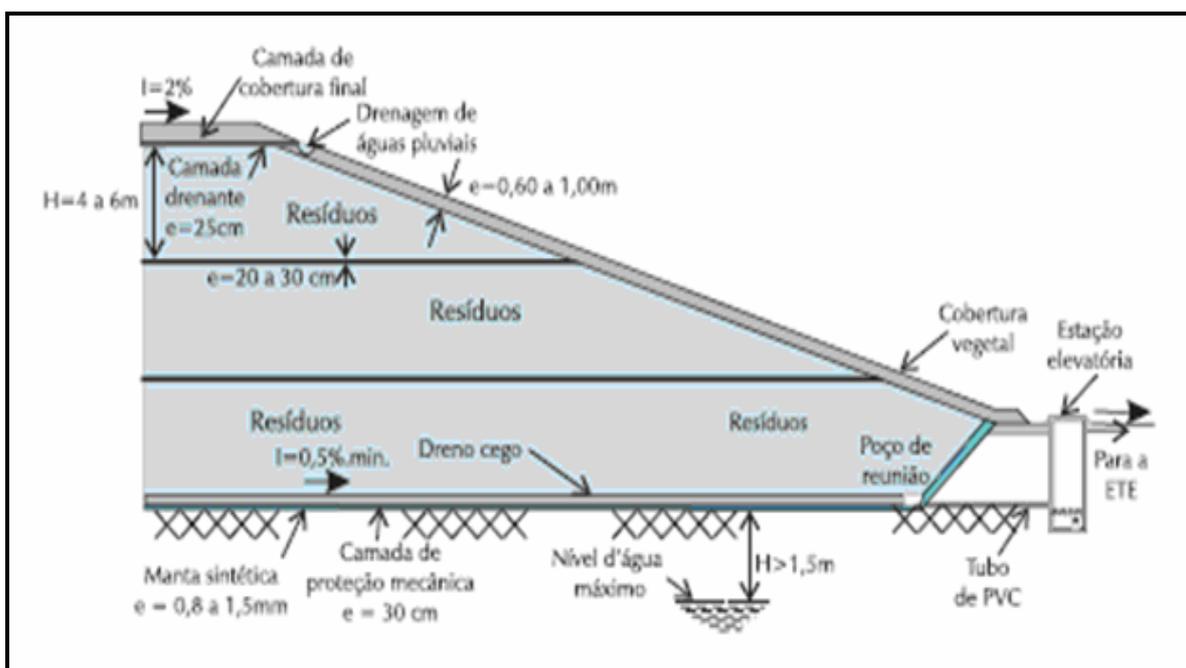


**FIGURA 10** – Distribuição de Aterros de Resíduos Classe II A no Brasil  
 FONTE - ABRELPE - Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil/2006

A 1,5 m do nível máximo do lençol freático, de baixo para cima, o aterro Classe II A, segundo o Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (IBAM, 2001), deve ser constituído das seguintes camadas:

- camada de impermeabilização de fundo, com manta plástica (0,8 a 1,2mm de espessura) ou com argila de boa qualidade ( $k = 10^{-6}$  cm/s;  $e > 80$  cm);
- camada de proteção mecânica (somente se a impermeabilização for feita com manta sintética);
- sistema de drenagem de percolado;
- camadas de resíduos (de 4,0 a 6,0m de altura) entremeadas com camadas de solo de 25 cm de espessura;
- camada de impermeabilização superior, com manta plástica (0,8 a 1,2mm de espessura) ou com argila de boa qualidade ( $k = 10^{-6}$  cm/s;  $e > 50$  cm);
- camada drenante de areia com 25 cm de espessura (necessária somente se houver impermeabilização superior);
- camada de solo orgânico ( $e > 60$  cm);
- cobertura vegetal com espécies de raízes curtas.

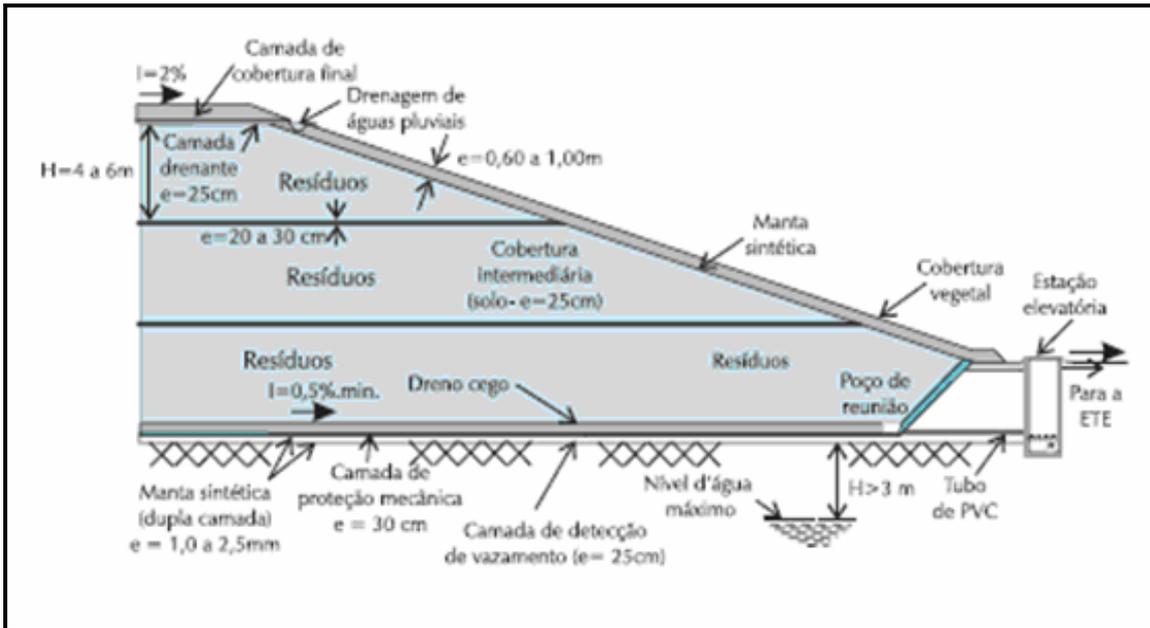
O líquido percolado, coletado através de um sistema de drenagem, deve ser conduzido para tratamento. O tipo de tratamento a ser adotado depende das características dos resíduos aterrados, sendo usual a adoção de um processo físico-químico completo seguido de um processo biológico convencional (lagoas de estabilização ou lodos ativados).



**FIGURA 11** – Corte típico de um aterro Classe II A  
 FONTE: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos - IBAM, 2001

As condições de impermeabilização dos aterros Classe I são mais severas que as da classe anterior. Ainda de acordo com o Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (IBAM, 2001), a distância mínima do lençol d'água é de três metros, e as seguintes camadas são obrigatórias:

- dupla camada de impermeabilização inferior com manta sintética ou camada de argila ( $e > 80 \text{ cm}$ ;  $k < 10^{-7} \text{ cm/s}$ );
- camada de detecção de vazamento entre as camadas de impermeabilização inferior;
- camada de impermeabilização superior;
- camada drenante acima da camada de impermeabilização superior ( $e = 25 \text{ cm}$ ).



**FIGURA 12** – Corte típico de Aterro Classe I

FONTE: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos - IBAM, 2001



**FIGURA 13** – Distribuição de Aterros de Resíduos Classe I no Brasil

FONTE - ABRELPE - Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil/2006

- Barragens de rejeito

As barragens de rejeito são usadas para resíduos líquidos e pastosos, com teor de umidade acima de 80%. Esses aterros possuem pequena profundidade e necessitam de muita área. São dotados de um sistema de filtração e drenagem de fundo (flauta) para captar e tratar a parte líquida, deixando a matéria sólida no interior da barragem.

Nesse tipo de barragem só existe a dupla camada de impermeabilização inferior. A camada de impermeabilização superior não é executada, uma vez que o espelho d'água é utilizado para evaporar parte da fração líquida.

Após o encerramento, quando a capa superior do rejeito já se encontra solidificada, procede-se a uma impermeabilização superior com uma camada de argila para reduzir a infiltração de líquidos a serem tratados.

- Outras formas de disposição

Além dos tipos de disposição apresentados nos itens anteriores, resíduos considerados de alta periculosidade ainda podem ser dispostos em cavernas subterrâneas salinas ou calcárias, ou ainda injetados em poços de petróleo esgotados.

## **2.1.5. Resíduos com atividade pozolânica**

### *2.1.5.1. Pozolanas*

O termo Pozolana, ou pozzolana (do italiano *pozzolana* ou *pozzuolana*) é derivado da localidade italiana de Pozzuoli, nas imediações do Vesúvio, onde são encontradas cinzas vulcânicas conhecidas por *cinzas pozolânicas* ou pumicite. Embora a designação se tenha alargado a materiais produzidos industrialmente, originalmente as pozolanas são derivadas de rochas vulcânicas, constituídas por uma mistura mais ou menos homogênea de materiais argilosos, siltes e areias, com maior ou menor agregação, resultantes da alteração pelos agentes atmosféricos de materiais vulcânicos ricos em sílica não cristalina, com destaque para a pedra-pomes.

Atualmente, define-se como pozolanas os materiais siliciosos ou silico-aluminosos, naturais ou artificiais, que contém um elevado teor de sílica em forma reativa, isto é, numa forma não cristalina (vítrea). São materiais com pouca qualidade cimentante

intrínseca, uma vez que por si só são ligantes pobres, mas quando finamente pulverizados e na presença de água, à temperatura normal, são capazes de reagir com hidróxido de cálcio, dando origem a compostos cimentícios de grande estabilidade e resistência à ação desagregadora da água, análogos aos formados na hidratação do Cimento Portland.

A reatividade da sílica de um material, geralmente designada como *grau de pozolanicidade* do material, depende, dentre outros fatores, da proporção dos silicatos que se encontram em forma vítrea, já que a sílica cristalina é muito estável à temperatura normal, e da dimensão das partículas, uma vez que a reatividade aumenta com a superfície específica do material, sendo esta tanto maior quanto menores forem as partículas que o compõem. Por essa razão é essencial que as pozolanas estejam finamente pulverizadas, caso contrário o *grau de pozolanicidade* do material é baixo, não permitindo a utilização do material que as contenha como ligante.

As pozolanas mais comuns são de cor clara, mas em função dos óxidos metálicos que contenham, podem ter colorações que variam desde o esbranquiçado até o cinzento-escuro, incluindo variedades avermelhadas e rosa.

Os materiais pozolânicos mais frequentemente encontrados são: a pozolana natural (pumicita), as calcedônias, as opalas, terras diatomáceas, argilas calcinadas, as cinzas volantes e a metacaulinita.

A principal vantagem na adição de pozolanas ao cimento comum reside na sua hidratação lenta e, portanto, com baixo desprendimento de calor. Outra vantagem em seu emprego é o aumento de resistência do concreto aos sulfatos e outros agentes agressivos ácidos. A reação pozolânica deixa menos hidróxido de cálcio para ser lixiviado, reduzindo também a permeabilidade do concreto. Além disso, não se pode esquecer de citar sua importante contribuição para o aumento da resistência mecânica a médio e longo prazo, o controle do pH e da expansão álcali-agregado, levando ao aumento da sua estabilidade e durabilidade.

Dentre as propriedades inerentes às pozolanas, a mais utilizada é, sem dúvida, a que consiste em fazer decrescer o pH de equilíbrio do meio reacional do cimento para valores da ordem de  $\text{pH} = 11,5$  através do consumo da cal hidrolítica, dando origem a

neo-formações suplementares que colmatam os poros, densificando o concreto e diminuindo sua permeabilidade. (FAJARDO, 2005)

Observa-se, também, a importância da expressiva redução do fenômeno da expansão, através da interferência nas reações químicas que originam a formação da etringita e dos produtos gelatinosos provenientes da interação química dos metais alcalinos (Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>) com os agregados. Contribuindo para o aumento da durabilidade e, conseqüentemente, da vida média do concreto, está a formação de películas protetoras que recobrem os compostos mais vulneráveis do cimento hidratado (cal, aluminatos, etc), aumentando consideravelmente a sua estabilidade.

Cita-se ainda como propriedade indesejável do Cimento Portland o fato de a hidratação dos seus componentes anidros, causa do aumento progressivo da resistência mecânica, ser um conjunto de reações apreciavelmente exotérmicas. Com o passar do tempo, essa liberação de calor diminui gradualmente até que a quantidade de calor dissipado por condução térmica seja maior do que a gerada no interior da massa, o que faz a sua temperatura baixar. Como essa diminuição de temperatura acontece com o concreto já endurecido e com as suas ligações internas e externas já constituídas, são geradas tensões de tração que dão origem a fissuras que reduzem a resistência mecânica do concreto, podendo levar, em último caso, à ruptura.

A utilização da pozolana aparece, então, como alternativa para solução ou minimização do problema. Seu papel é o de diminuir sensivelmente o calor de hidratação do cimento através de reações bem menos exotérmicas, colaborando para elevação da resistência mecânica e durabilidade do concreto. Através de seu emprego chega-se a diminuir a temperatura de 15 a 30%.

A todas essas vantagens de caráter técnico alia-se ainda a economia, resultado da substituição de parte do cimento pela pozolana, pois seu custo pode chegar à metade ou um terço daquele do cimento, de acordo com uma série de variáveis, como a sua extração, preparação e transporte.

As primeiras utilizações conhecidas das pozolanas datam dos tempos do Império Romano, quando se descobriu que as cinzas vulcânicas da região de Pozzuoli, se trituradas e misturadas com cal, produzem uma argamassa resistente e duradoura. As

primeiras explorações surgiram naquela região, mas foram se alargando a outras zonas vulcânicas do Lácio e da Campânia e, depois, por toda a bacia mediterrânea. O engenheiro e arquiteto romano Vitruvius, que viveu no século I a.C., já descrevia quatro tipos de pozolana (negra, branca, cinzenta, e vermelha) e os seus usos.

Descobertas as suas propriedades ligantes, os romanos fizeram largo uso das pozolanas, utilizando-as na confecção do *opus coementicium* (o cementício), uma argamassa criada pela mistura de pozolanas com cal (proporção de 2:1 a 3:1) imediatamente antes da adição de água. Esta argamassa era um ligante suficientemente poderoso para construir grandes estruturas, como pontes, cúpulas e vigas longas.

A utilização das argamassas pozolânicas perdeu-se com a desagregação do Império Romano, mas foi retomada a partir do Renascimento europeu e está na origem dos cimentos modernos. A redescoberta do uso das pozolanas deve-se aos humanistas italianos, tendo sido divulgado pelos grandes arquitetos e construtores renascentistas.

A reintrodução em larga escala do uso das pozolanas levou à procura de fontes alternativas às naturais, tendo-se descoberto que múltiplos materiais ricos em sílica não cristalina exibem as mesmas propriedades cimentantes.

Dessa forma, as pozolanas podem ser classificadas em quatro grandes grupos, a saber:

- Pozolanas naturais

São constituídas por rochas consolidadas ou não, mais ou menos friáveis e intemperizadas, além de solos derivados do intemperismo de cinza vulcânicas, (Andossolos do Chile, Havaí, Nova Zelândia, etc.). Possuem uma elevada proporção de óxido de silício reativo e óxido de alumínio, podendo conter ainda óxido de ferro e outros óxidos, mas com um teor em óxido de cálcio reativo muito pequeno. O teor ponderal de  $\text{SiO}_2$  reativo não deve ser inferior a 25%. Apresentam propriedades pozolânicas intrínsecas, não requerendo qualquer tipo de tratamento, a não ser, eventualmente, a cominuição mecânica. As mais conhecidas são: as italianas (a de Bacoli Naples, a escura de Segni, e o tufo vulcânico amarelo de Nápoles); a Terra de Santorim (Ilha de Creta); Tufos Vulcânicos, Terras Diatomáceas e os Pumicitos.



**FIGURA 14** – Exemplos de pozolanas naturais : pedra-pomes à esquerda e cinza vulcânica estratificada à direita

FONTE - FAJARDO, 2005

- *Pozolanas vulcânicas*

São variedades metamórficas de tufos vulcânicos, formadas por materiais ejetados na atmosfera por erupções vulcânicas e constituídas por misturas variáveis de material vítreo e minerais cristalinos. As principais variedades são: pozolanas cinzas, tufos, pumicito e trass (romeno e alemão). As vulcânicas podem ser divididas em:

- Piroclásticas não-coesivas: cinzas vulcânicas, areias, escórias.
- Piroclásticas coesivas: cinesitas, tufos, bréchas, ignimbritas e escórias consolidadas.
- Lavas massivas: granuladas não alteradas e alteradas, rochosas compactas ou alteradas, escoriáceas.
- Depósitos vulcânicos: colúvios, aluviões.
- Quaternária: depósitos argilo-xistosos recentes com menos de 2 milhões de anos..
- Argilosas: rochas sedimentares com granulometria inferior a 0,065 mm.

- *Pozolanas naturais processadas*

São derivadas de rochas que, quando submetidas a um tratamento químico ou térmico adequado, passam a apresentar propriedades pozolânicas mais ou menos acentuadas. As mais utilizadas são: rochas básicas como o basalto, ácidas (silíceas), solos argilosos e argilas (montmorilonita, ilita, caolinita e nefelina), as bauxitas (tal qual ou calcinadas) e as argilas calcinadas (xistos, metacaolinita, solos residuais de um modo geral).

- Pozolanas artificiais

Formadas por resíduos e subprodutos minerários, industriais e agrícolas, que apresentam propriedades pozolânicas intrínsecas ou latentes. As principais pozolanas constituintes deste grupo são: os finos de britagem (pó de pedra), as cinzas derivadas da calcinação de materiais inorgânicos e orgânicos (volante, de fundo, de grelha, da incineração de lamas, cinzas da casca do arroz, do bagaço de cana, da turfa, do amendoim, etc), as escórias metalúrgicas ferrosas e não-ferrosas, resíduos cerâmicos, e a microssílica proveniente da indústria do Ferro-Silício. De um modo geral esse tipo de micro sílica apresenta elevada reatividade pozolânica, especialmente se no estado disperso.

#### *2.1.5.2. Utilização de resíduos pozolânicos*

Como já foi dito anteriormente, os resíduos pozolânicos são largamente estudados e utilizados, na prática, em substituição parcial ao cimento para confecção de argamassas e outros elementos construtivos. A seguir, serão mostrados trabalhos que comprovam a eficácia da utilização desses materiais, obtendo elevadas resistências e resultados satisfatórios.

Já em 1975, Price publicou uma revisão sobre a utilização de pozolanas, afirmando que a substituição do cimento pode chegar a até 40%. Dentre as vantagens de utilização desses materiais, o autor destaca as seguintes: melhora na trabalhabilidade da mistura, diminuição do calor de hidratação e, conseqüentemente, da quantidade de fissuras, aumento da resistência ao sulfato, minoração da expansão destrutiva e, por fim, redução de custo. O autor ainda alerta para cuidados com a baixa qualidade de certos materiais e o uso excessivo de pozolana, pois ambos podem causar sérios danos ao concreto. O estudo mostra que o tratamento de pozolanas a base de calor (calcinação) pode desenvolver suas propriedades cimentantes, além de trazer benefícios como redução da quantidade de água requerida, maior facilidade para moagem, elevação de resistência e maior inibição da reação álcali-agregado.

Os indianos Dan e Chatterjee (1982) estudaram misturas contendo escória de alto forno, cal e gesso, chegando à conclusão de que a proporção 60-30-10 era a que apresentava melhores resultados. Difrações de raio-X mostraram a ocorrência da etringita como principal produto da reação de hidratação, responsável pelo

desenvolvimento de resistência a curto prazo. A partir do terceiro dia, no entanto, a resistência é devida à formação de silicato de cálcio hidratado.

Para a realização de ensaios de Resistência à Compressão Simples, foram confeccionadas argamassas contendo areia comum na proporção 1:3 e relação água/cimento de 0,6. As resistências mais altas foram encontradas nas argamassas preparadas com as seguintes porcentagens de escória, cal e gesso, respectivamente: 80%, 10% e 10% (16,7 MPa aos 7 dias e 30,9 MPa aos 28 dias), 70%, 20% e 10% (17,7 MPa aos 7 e 33,6 MPa aos 28 dias) e 60% 30% e 10% (17,4 MPa aos 7 e 32,0 MPa aos 28 dias). De acordo com os autores a literatura apontava para uma relação ideal de 80% de escória, 15% de cal e 5% de gesso, mostrando que a escória utilizada necessitava de maiores quantidades de cal por apresentar deficiência desse componente.

Por fim, mostrou-se que quantidades excessivas de cal (acima de 30%) e de gesso (acima de 10%) provocam influência deletéria à argamassa causando, inclusive, redução de resistências.

Os estudos de Shi e Day (1993) mostraram a influência da ativação química em misturas de 80% de pozolana natural e 20% de cal hidratada, com relação água/sólidos de 0,5. Os aditivos testados em diversas proporções foram  $Na_2SO_4$ ,  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ ,  $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$  e  $NaCl$ .

Os resultados obtidos indicaram que a incorporação de compostos alcalinos pode aumentar consideravelmente a resistência das pastas. Porém, algumas substâncias são muito caras para poderem ser utilizadas na prática em larga escala.

Com 28 e 90 dias, ocorre um notável aumento de resistência das misturas, quando o teor de  $Na_2SO_4$  passa de 1% para 2 a 4%. Aos 3 dias, as pastas com 4% de  $Na_2SO_4$  apresentavam resistências três vezes maiores que as da pasta de controle (sem adição). Quanto à utilização de  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ , levando em conta não só o acréscimo de resistências, mas também a questão econômica, chega-se ao teor de 4% como ideal. Esse teor, porém, só passa a fazer efeito a longo prazo. Com a utilização de  $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ , nos primeiros 7 dias ocorre uma pequena redução da resistência à compressão; entretanto, após 28 dias, com um teor de 6% de aditivo, obtém-se

valores de resistência até 65% maiores que as da pasta de controle. Para o uso de NaCl não foram observadas contribuições significativas. Os autores concluíram, então, que os melhores resultados são obtidos com 4% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ou de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Em seu trabalho, Chengzhi *et al.* (1996) avaliou o papel de preenchimento no cimento do material pozolânico. Investigou, também, a influência desse material na fluidez e resistência do cimento. O autor ressalta que, além da atividade pozolânica, o que difere esse tipo de material do cimento é seu baixo peso específico e seu tamanho menor de partículas.

A primeira parte do estudo trata da influência do material pozolânico na demanda de água da mistura. Os autores afirmam que a água da pasta pode ser dividida em duas partes, sendo uma a água que preenche os vazios entre as partículas e não contribui para a fluidez da pasta, e a outra a da camada superficial, que forma uma fina película de água na superfície da partícula. A fluidez da pasta depende da espessura de tal película. A água de preenchimento está relacionada com a densidade da mistura, que é afetada quando o material pozolânico é acrescentado. Já a quantidade de água superficial é afetada pela superfície específica do sistema. Como as pozolanas apresentam superfície específica maior que a do cimento, sua adição provoca aumento da quantidade de água requerida. No geral, só quando a superfície específica do material é realmente alta é que ocorre alteração significativa da quantidade de água total.

Quanto à resistência mecânica, observou-se que quando a pozolana é adicionada à mistura, esta reduz a porosidade e o tamanho dos poros do sistema. Dessa forma, há contribuição direta para o aumento da Resistência à Compressão Simples. Com a adição de 10% de microssílica e de um superplastificante para reduzir a quantidade de água necessária, chegou-se a uma resistência de 70,75 MPa aos 28 dias.

WILD *et al* (1998) mostraram como a substituição parcial da cal pela escória de alto forno pode ser benéfica para controle da expansão provocada pelo surgimento da etringita.

As propriedades de materiais estabilizados à base de cal são significativamente afetadas pela presença de sulfato, que pode estar presente no solo ou ser produzido

pela oxidação de minerais na presença de água. Na presença de gesso, ocorre a formação de uma camada coloidal, na qual formam-se regiões ricas em sulfato e deficientes de sílica, que se precipitam dando origem à etringita. As partículas cristalizadas de etringita têm a capacidade de atrair moléculas de água, causando repulsão entre as partículas de argila e, conseqüentemente, a indesejada expansão do sistema. A expansão excessiva requer quatro componentes livres principais: água, cal, alumínio e sulfato. A falta de um deles resulta em inibição desse fenômeno.

A introdução de escória na mistura resulta em pastas mais densas, com porosidade e permeabilidade reduzidas, aumento de resistência mecânica e ao ataque sulfúrico. Observa-se que, com essa substituição, menos cal livre existe, não só devido ao efeito de diluição, mas também devido à reação escória-cal, dificultando a formação de etringita.

Para a confecção das misturas com umidade em torno de 30%, obtida através de ensaios *Proctor*, foram utilizados caulinita industrial, cal hidratada, argila com alto teor de sulfato (gesso) e a escória de alto forno, em proporções variadas. Estas foram, então, avaliadas com relação à expansão.

Observou-se que as que apresentaram maior grau de expansão eram as misturas que continham altos teores de cal e gesso e pouca ou nenhuma escória. As misturas sem gesso ou sem cal apresentaram baixa expansão. As amostras com escória tiveram sua expansão reduzida ou eliminada, de acordo com a quantidade de sulfato (gesso) disponível. Notou-se, portanto, uma tendência geral de redução na expansão à medida que a cal era substituída pela escória, principalmente em casos onde a concentração de sulfato era alta. Assim, a composição mais favorável no que diz respeito à expansão é aquela na qual o teor de cal seja o mínimo possível. Entretanto, a resistência mecânica desejada irá limitar o grau de substituição da cal pela escória, pois deve haver cal suficiente para ativar a pozolanicidade do segundo material, garantindo o comportamento apropriado da pasta cimentante. O percentual de substituição da cal tido como adequado pelos autores está entre 60% e 80%.

Em 1999, SU publicou um estudo no qual investiga os efeitos da adição de pozolana, no caso a cinza volante, ao cimento e concreto. Os percentuais de cinza utilizados foram 30, 40, 50, 60 e 70%, além da mistura de controle, que não incluía o resíduo.

Aos 3 dias as resistências encontradas foram todas menores que da mistura de controle. Isso pode ser explicado pelo fato de que num período tão curto o grau da reação de hidratação do cimento com cinza volante é ainda baixo, proporcionando um fraco efeito pozolânico. Já aos 28 dias e, mais acentuadamente, aos 360 dias, os valores de resistência superaram os da mistura de controle, chegando a 75,7 MPa, com 30% de cinza volante, aos 360 dias.

Segundo o estudo, a resistência à compressão do cimento com adição mineral pode ser dividida em duas partes: a primeira se deve à contribuição dos hidratos formados na hidratação do clínquer no cimento; a segunda parte pode ser creditada aos hidratos adicionais, obtidos na reação secundária entre a sílica ativa e o hidróxido de alumínio presentes nas pozolanas com o hidróxido de cálcio livre advindo da hidratação do clínquer. Essa segunda parte é chamada de resistência de efeito pozolânico, sendo responsável pelo aumento de resistência a longo prazo dos cimentos com cinza volante.

No concreto, a adição de cinza volante foi de 10%, provocando aumento de resistência em relação ao concreto sem o resíduo. A contribuição máxima se deu aos 28 dias, chegando a 105,2 MPa, o que equivale a um aumento de cerca de 38%.

Kumar, ainda em 1999, também publicou um estudo a respeito da utilização da cinza volante na fabricação de tijolos. As propriedades do tijolo feito com cinza volante, cal e fosfogesso são, então, comparadas às do tijolo cerâmico comum. Foram pesquisados vinte tipos de misturas, com teores variados dos materiais utilizados.

A pasta cimentante foi confeccionada com uma razão de água igual a 0,9 vezes a quantidade necessária para se obter uma consistência normal, medida com a Agulha de Vicat. Os tijolos foram moldados em duas camadas e compactados por vibração.

Os maiores valores de resistência à compressão foram encontrados para teores de 40% de cinza volante, 30% de cal e 30% de fosfogesso, atingindo cerca de 5 MPa com 24 dias e chegando a 12 MPa aos 96 dias. As fissuras não foram medidas, mas também não foram visíveis a olho nu. Observou-se, então, que os tijolos eram mais leves que os cerâmicos, apresentaram durabilidade com relação às agressões do ambiente e resistência suficiente para serem utilizados sem prejuízo de qualidade na construção civil.

LI *et al.* (2002) estudaram o comportamento de misturas de resíduos industriais – escória de alto forno e cinza volante – com cal, gesso e clínquer. Os percentuais em massa dos materiais utilizados foram 30% de escória de alto forno, 20% de cinza volante, 5% de cal e 5% de gesso. Foram preparados dois tipos de mistura, ambas de composição idêntica, diferindo apenas pela moagem dos materiais. Na primeira a moagem dos materiais foi realizada separadamente, e na segunda todos os componentes foram moídos em conjunto.

Os autores observaram que a mistura moída separadamente apresentou maior resistência e endurecimento mais rápido quando comparada à outra, apesar de as duas terem mesma composição e granulometria.

Os resultados mostraram que a quantidade ideal de gesso é de 5% em massa, e que a substituição do gesso calcinado pelo não calcinado atua em favor da melhora da resistência. Isso pode ser explicado pelo fato do gesso calcinado resultar em maior formação de etringita durante a hidratação por possuir maior solubilidade e reatividade que o gesso não calcinado.

Quanto à adição de cinza volante e escória de alto forno, os resultados mostraram que, mantendo-se a quantidade de cinza constante (10%) e variando-se a quantidade de escória, a Resistência à Compressão Simples caía. Na situação inversa, ou seja, conservando-se a porcentagem de escória (30%) e alterando-se a de cinza volante, também há queda de resistência. Confirma-se portanto, como melhor formulação, 30% de escória de alto forno, 10% de cinza volante, 5% de cal, 5% de gesso e 50% de clínquer, com resistências de 34,3 MPa e 68,8 MPa aos 3 e 28 dias, respectivamente.

Ainda de acordo com os autores, pôde-se observar que a formação de fissuras na mistura endurecida foi maior que no Cimento Portland nos 3 primeiros dias, possivelmente devido à formação de etringita; porém, entre 7 e 180 dias, se tornou menor.

No Brasil, DA FONSECA (sd) estudou a fabricação de tijolos de cinzas – de carvão mineral e de casca de arroz. Uma das justificativas apresentadas para a utilização desses materiais está no fato de que o processo de estabilização de solos com adição

de pozolanas comprovadamente possibilita a redução dos percentuais de cimento e do volume de solo empregado, bem como oferece destinação final e adequada às cinzas, resíduo industrial poluente.

O produto final obtido, os tijolos maciços de cinzas confeccionados com teores de cimento de 6 a 10%, apresentou características mecânicas de resistência a compressão simples e absorção de água enquadradas nas normas brasileiras. Os tijolos confeccionados com cinza de carvão mineral apresentaram comportamento mecânico superior aos de cinza de casca de arroz, 8,5 e 4,1 MPa, respectivamente, aos 28 dias.

Além disso, de acordo com a pesquisa, a redução de custos observada na confecção manual dos tijolos de cinzas em relação aos tijolos maciços de barro cozido apresentou-se com valores redutores da ordem de 20 a 35%, conforme o teor de cimento utilizado, o que comprova mais uma vez a viabilidade econômica da utilização das pozolanas.

ALLAHVERDI e GHORBANI (2006) estudaram a ativação química de pastas contendo cal hidratada e pozolana natural (Pumicito) para aumento de resistência e aceleração do tempo de pega. Os teores de ambos os materiais foram variados, sendo que o melhor resultado em termos de resistência foi obtido para a relação 30% de cal e 70% de pumicito – 7,25 MPa aos 50 dias e 10,03 MPa aos 90 dias.

A partir dessa mistura considerada ideal foram feitas adições de NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O e clínquer do Cimento Portland. Pôde-se observar que todas as adições influenciam de alguma forma o comportamento da pasta. No que concerne a resistência à compressão, a introdução de 6% de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aumenta consideravelmente os valores obtidos. Em 90 dias a resistência passou de 10,03 MPa para 19,83 MPa, isto é, aproximadamente o dobro. Quanto ao tempo de pega, o composto que provocou a maior aceleração foi o NaOH com um teor de 4%. O hidróxido de sódio conseguiu reduzir os tempos de início e de fim de pega em 11 e 20 horas, respectivamente.

Deste modo, o presente trabalho pretende dar mais uma contribuição aos estudos e pesquisas sobre a utilização de materiais pozolânicos, mais especificamente aplicável ao setor de construção civil.

## **2.2. DÉFICIT HABITACIONAL**

### **2.2.1 Introdução**

Devido à crise social e ambiental que assola o país, torna-se necessário repensar a qualidade de vida, principalmente nos centros urbanos, onde está concentrada a grande maioria do contingente populacional. Com o déficit habitacional houve um agravamento desse quadro nos últimos anos, e isso se deveu fundamentalmente à ocupação desordenada do espaço urbano e ao uso desenfreado e abusivo de recursos naturais não renováveis.

Ao longo da história recente, com a crise sócio-econômica-ambiental, que levou à estagnação na construção civil, o sistema informal e “atécnico” construiu tetos como nunca havia construído em áreas de risco à saúde. Rapidamente o contingente populacional urbano cresce e, na maioria das vezes, não é acompanhado pelo provimento de serviços de infra-estrutura urbana. Passam, então, a existir áreas favelizadas, ocupadas de forma desordenada, sem infra-estrutura básica urbana e onde são construídas moradias inadequadas. Essas habitações, erguidas com restos de tábuas ou outros materiais que foram descartados de alguma obra, são denominadas barracos. Alguns deles progridem para casas de concreto armado e alvenaria, mas guardam o estigma da anarquia e do desfiguramento urbano que dificultam ou mesmo impossibilitam o atendimento dos serviços básicos urbanos.



**FIGURA 15** – Favela no Morro do Estado em Niterói/RJ  
FONTE: Jornal O Globo – Arquivo



**FIGURA 16** – Favela no Rio de Janeiro/RJ  
FONTE: Jornal O Globo – Arquivo

Chega-se então ao conceito de *necessidades habitacionais* que, de acordo com a Fundação João Pinheiro, pode ser separado em dois segmentos distintos: o *déficit habitacional* e a *inadequação de moradias*.

Por déficit habitacional entende-se a noção mais imediata e intuitiva de necessidade de construção de novas moradias para a solução de problemas sociais e específicos de habitação.

Por outro lado, o conceito de inadequação de moradias reflete problemas na qualidade de vida dos moradores. Ou seja, o conceito não está relacionado ao dimensionamento do estoque de habitações e sim às especificidades internas do mesmo. Seu dimensionamento visa ao delineamento de políticas complementares à construção de moradias, voltadas para a melhoria dos domicílios existentes.

O conceito de déficit habitacional utilizado está ligado diretamente às deficiências do estoque de moradias, além de englobar aquelas sem condições de habitabilidade devido à precariedade das construções ou em virtude de desgaste da estrutura física. Inclui, ainda, a necessidade de incremento do estoque, devido à coabitação familiar ou à moradia em imóveis construídos com fins não residenciais. O déficit habitacional pode ser entendido, portanto, como *déficit por incremento de estoque* e como *déficit por reposição do estoque*.

O *déficit por reposição do estoque* refere-se aos domicílios rústicos acrescidos de uma parcela devida à depreciação dos domicílios existentes. Entende-se como domicílios rústicos aqueles sem paredes de alvenaria ou madeira aparelhada, o que resulta em desconforto e risco de contaminação por doenças, em decorrência das suas condições de insalubridade. São domicílios que devem, portanto, ser repostos. A depreciação de moradias está relacionada ao pressuposto de que há um limite para a vida útil de um imóvel a partir do qual são exigidos reparos em sua estrutura física, visando à conservação de sua habitabilidade. Toma-se 50 anos de construção como o limite que define a necessidade de reposição do estoque. Aplica-se um percentual sobre o montante de imóveis construídos antes desse limite, devido à suposição de que parte desse estoque tenha passado regularmente por manutenção e reformas mantendo, assim, suas condições de uso.

O *déficit por incremento de estoque* engloba os domicílios improvisados e a coabitação familiar. O conceito de domicílios improvisados inclui todos os locais construídos sem fins residenciais e que servem como moradia, o que indica claramente a carência de novas unidades domiciliares.

A coabitação familiar compreende a soma das famílias conviventes secundárias que vivem junto a outra família em um mesmo domicílio e das que vivem em cômodos – exceto os cedidos por empregador. Segundo a definição do IBGE, os cômodos são “domicílios particulares compostos por um ou mais aposentos localizados em casa de cômodo, cortiço, cabeça-de-porco etc.”.

As famílias conviventes secundárias são constituídas por, no mínimo, duas pessoas ligadas por laço de parentesco, dependência doméstica ou normas de convivência, e que residem no mesmo domicílio com outra família denominada principal. O responsável pela família principal é também o responsável pelo domicílio. A esses dois componentes, agrega-se o *ônus excessivo com aluguel*, que corresponde ao número de famílias urbanas, com renda familiar de até três salários mínimos, que moram em casa ou apartamento (domicílios urbanos duráveis) e que despendem mais de 30% de sua renda com aluguel.

As habitações inadequadas são aquelas que não proporcionam condições desejáveis de habitabilidade, o que não implica, contudo, em necessidade de construção de novas unidades. De acordo com o levantamento realizado pela Fundação João Pinheiro, são identificadas somente as moradias localizadas em áreas urbanas, não sendo contempladas as áreas rurais, que apresentam formas diferenciadas de adequação não captadas pelos dados utilizados.

Como inadequados são classificados os domicílios com carência de infra-estrutura, com adensamento excessivo de moradores e problemas de natureza fundiária, em alto grau de depreciação ou sem unidade sanitária domiciliar exclusiva. São considerados domicílios carentes de infra-estrutura todos os que não dispõem de, ao menos, um dos seguintes serviços básicos: iluminação elétrica, rede geral de abastecimento de água com canalização interna, rede geral de esgotamento sanitário ou fossa séptica e coleta de lixo. O adensamento excessivo ocorre quando o domicílio apresenta um número médio de moradores superior a três por dormitório. A inadequação fundiária refere-se aos casos em que pelo menos um dos moradores do domicílio tem a propriedade da moradia, mas não possui a propriedade, total ou parcial, do terreno ou a fração ideal de terreno (no caso de apartamento) em que ela se localiza. A inexistência de unidade sanitária domiciliar exclusiva define o domicílio que não dispõe de banheiro ou sanitário de uso exclusivo do domicílio.

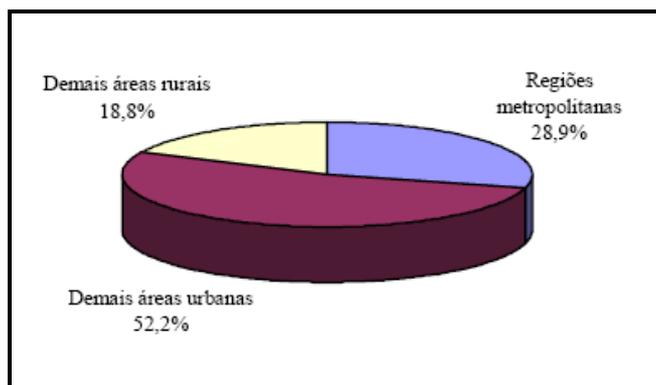


**FIGURA 17** – Exemplo de inadequação de domicílio  
FONTE - Fundação João Pinheiro, 2006

Além desses componentes deve ser considerada ainda uma parcela de domicílios em função da depreciação dos imóveis. Essa parcela é definida como o complemento dos domicílios com mais de 50 anos de construção, cuja reposição é considerada necessária e, portanto, incluídos no déficit habitacional. Considera-se que a manutenção de parte dos imóveis mais antigos necessita apenas de pequenos cuidados.

### **2.2.2. Déficit habitacional em 2005**

O total das carências habitacionais no país estimado em 2005 foi de 7,903 milhões de moradias, significando 14,9% do total do estoque de domicílios, com incidência notadamente urbana. Desse total, 2.285.462 (28,9%) situavam-se nas regiões metropolitanas selecionadas de Belém, Fortaleza, Recife, Salvador, Belo Horizonte, Rio de Janeiro, São Paulo, Curitiba e Porto Alegre.

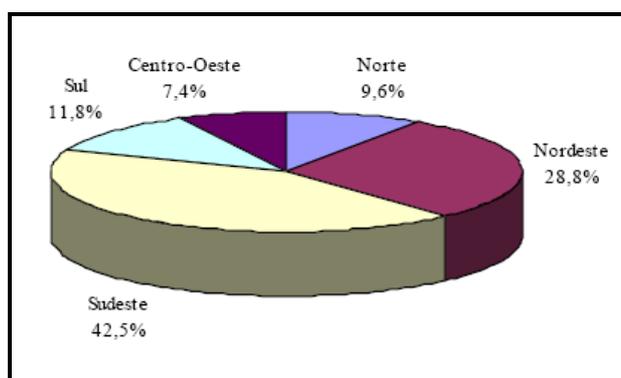


**GRÁFICO 10** – Composição do déficit habitacional – Brasil/2005

FONTE - Dados básicos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2005

Em números absolutos, o déficit habitacional está predominantemente concentrado nas áreas urbanas: 6.414.143 domicílios, dos quais 34,7% estão nas regiões metropolitanas. No entanto, apesar da pequena participação do déficit habitacional rural no total das estimativas - apenas 1.488.556 unidades -, percentualmente o problema é mais evidente nessas áreas, devido principalmente à presença de habitações em condições precárias, mais especificamente os domicílios rústicos.

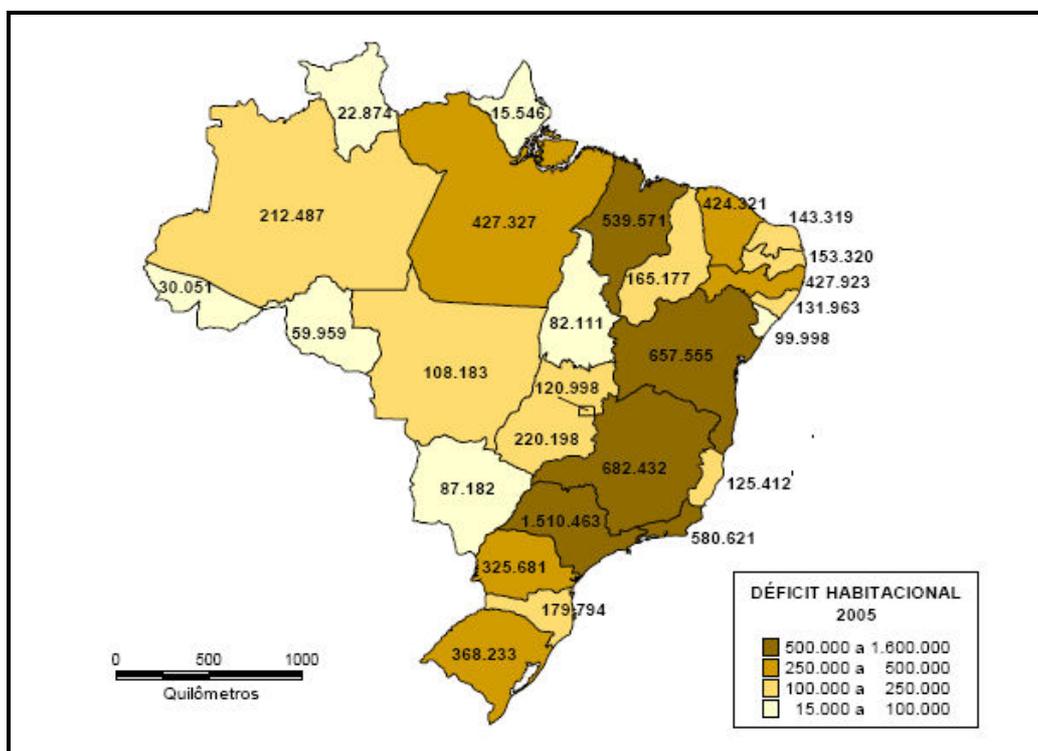
Em termos da distribuição regional, a região Sudeste lidera a demanda nacional, com necessidades estimadas em 2,899 milhões de unidades, vindo a seguir a Nordeste, com 2,743 milhões de unidades. As duas regiões juntas representam 71,4% do déficit habitacional brasileiro. Entretanto, observa-se que enquanto a maioria das deficiências do setor concentra-se na área urbana da primeira, no Nordeste a área rural é que tem papel de destaque.



**GRÁFICO 11** - Déficit habitacional urbano segundo Grandes Regiões (Brasil/2005)

FONTE - Dados básicos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2005

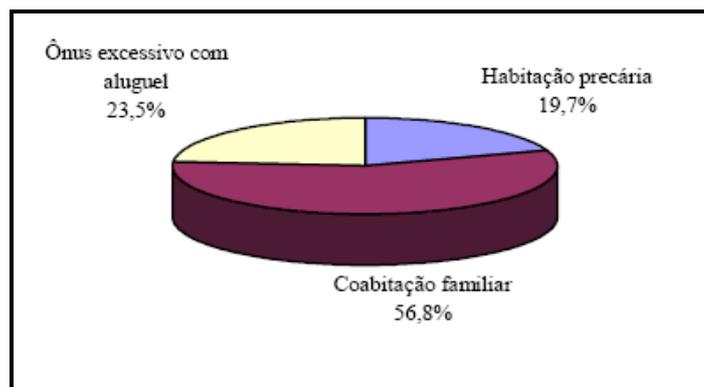
Na região Sudeste, destacam-se os estados de São Paulo (1.510.463), com o maior déficit em números absolutos do país, Minas Gerais (682.432) e o Rio de Janeiro (580.624), além das regiões metropolitanas de São Paulo (738.334) e Rio de Janeiro (442.153). Nessa região, o grande volume do déficit se dá em função da concentração de população nas suas áreas urbanas.



**FIGURA 18** – Déficit habitacional total - Brasil e Unidades da Federação – 2005  
 FONTE - Fundação João Pinheiro, 2006

A análise em termos percentuais revela um padrão de comportamento bastante diferenciado entre as regiões. No Norte e Nordeste, a participação do déficit habitacional em relação ao total do estoque de domicílios é significativamente superior em relação às demais. Nessas regiões, em todas as unidades da Federação, o déficit é superior a 15% do total de domicílios (exceto Rondônia, com 13,9%, e Amapá, com 11,5%). Ressalta-se o Maranhão (37,4%), Amazonas, (25,8%), e o Pará, (25,1%). Nas regiões Sudeste e Sul, esses percentuais situam-se pouco acima de 10%. No Centro-Oeste, os valores situam-se em torno de 13%, com exceção do Distrito Federal, onde o déficit corresponde a 17,9% do estoque de domicílios.

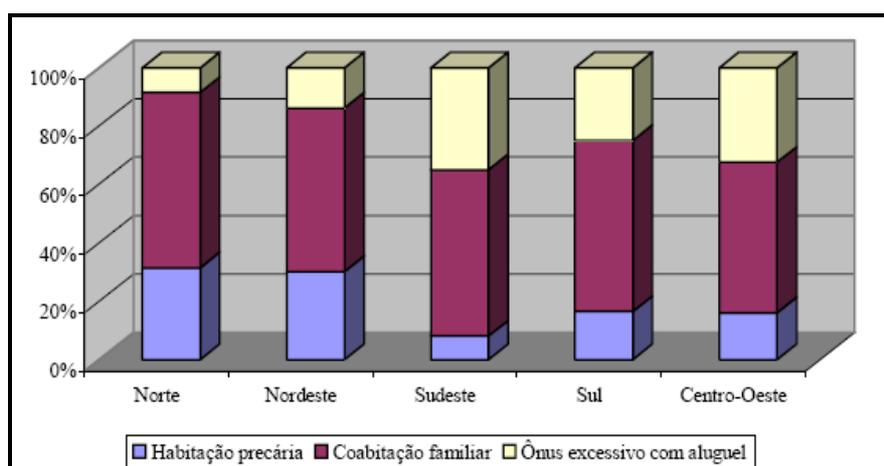




**GRÁFICO 12** – Distribuição dos componentes do déficit habitacional – Brasil/2005  
 FONTE - Dados básicos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2005

Regionalmente, pode-se observar que existem diferenças acentuadas na composição do déficit habitacional. Nas regiões Norte e Nordeste, as menos desenvolvidas e com maior parcela de população rural, ainda é relevante o número das habitações precárias, com elevados percentuais também nas áreas urbanas. O ônus com aluguel, por outro lado, é menos significativo do que nas regiões mais ao sul do país.

Na região Sudeste, a habitação precária tem presença pouco significativa, com os menores percentuais do país. No entanto, devido à grande concentração de população, em São Paulo e Minas Gerais, é digno de nota o número absoluto de domicílios nessas condições. Por outro lado, é nessa região que o ônus excessivo com aluguel assume maior relevância, reflexo, em grande parte, da presença das aglomerações urbanas nas suas regiões metropolitanas.

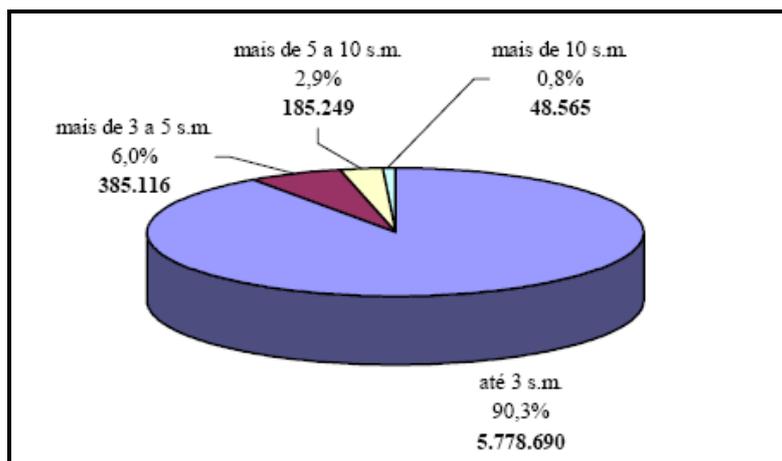


**GRÁFICO 13** – Componentes do déficit habitacional - Grandes Regiões – Brasil/2005  
 FONTE - Dados básicos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2005

Para completar o retrato da situação das carências do setor habitacional no país, falta mencionar o fator econômico, por meio da análise do déficit habitacional segundo faixas de rendimento médio mensal familiar. Quando concebe-se e implementa-se qualquer política pública que vise à melhoria das condições de vida da população, o alvo preferencial deve ser sempre sua parcela mais carente. No caso do setor habitacional, grande número dessas ações se direciona às famílias que recebem até três salários mínimos, segmento em que a falta de moradias assume sua dimensão mais drástica.

Portanto, foi calculado também o déficit de moradias dos moradores dos aglomerados subnormais (favelas), que, entretanto, são reconhecidamente subenumerados em relação ao real montante de pessoas que vivem nessa situação. No país são assim classificados 1,956 milhão de domicílios, que representam apenas 3,7% dos domicílios totais. A grande maioria está concentrada nas regiões metropolitanas: 1,460 milhões de unidades, ou 8,8% dos domicílios. Não é confirmada a expectativa de que a maioria dessas moradias precisaria de reposição. Esse fato demonstra a necessidade de se criarem novos instrumentos que possam identificar e captar a realidade da população favelada no país.

Para a análise por faixas de renda é considerado apenas o segmento urbano da população. Nota-se que a quase totalidade das famílias que necessitam de uma moradia nova recebem cinco salários mínimos ou menos por mês: são 96,3% no Brasil, e 95,2% nas regiões metropolitanas. A concentração das carências se dá, todavia, na faixa mais baixa de renda: até três salários mínimos as percentagens são 90,3% e 88,4% respectivamente, correspondendo a 5.778.690 e 1.956.437 domicílios urbanos.



**GRÁFICO 14** – Déficit habitacional urbano segundo faixas de renda mensal familiar – Brasil/2005

FONTE - Dados básicos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2005

### 2.2.3. Componentes do déficit habitacional 2005

De acordo com a Fundação João Pinheiro (2006), as estimativas do déficit habitacional envolvem o cálculo de vários componentes identificados como básicos para a compreensão das necessidades habitacionais, que serão detalhados a seguir.

#### 2.2.3.1. Habitação precária

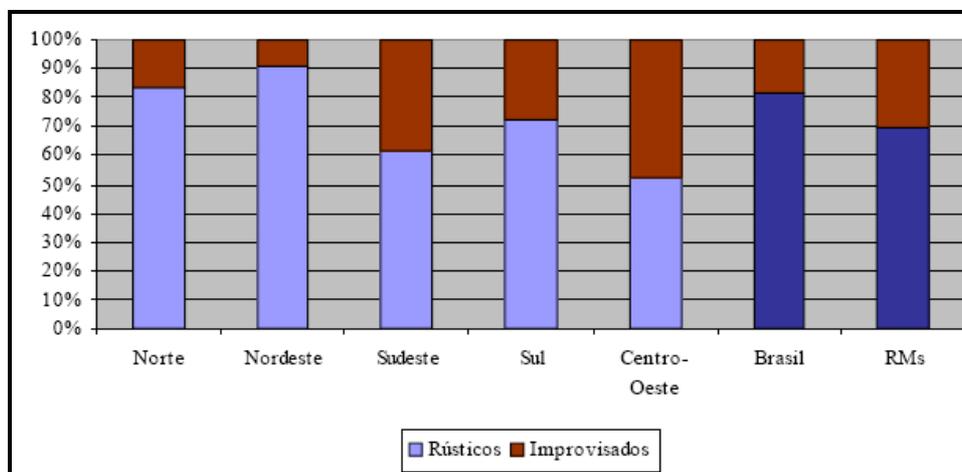
As habitações precárias correspondem aos domicílios improvisados e rústicos, e são estimadas em 1.556.237 unidades. Devido às características dessas habitações, grande parte delas encontra-se nas áreas rurais, onde correspondem a 10,4% dos domicílios. Nas áreas urbanas, apesar do número absoluto relativamente elevado, percentualmente significam apenas 1,6%.

A maioria delas está concentrada na região Nordeste (53,1%), sendo que as maiores carências encontram-se no Maranhão: quase 290 mil domicílios, 19,9% do estoque de domicílios. Destacam-se, ainda, o Ceará, a Bahia e o Piauí, em termos relativos.

Na região Norte, as habitações precárias têm também presença significativa, principalmente em números percentuais. Em números absolutos são relevantes apenas o Pará e o Amazonas.

Nas demais regiões, esse componente assume menor relevância e se destaca em números absolutos apenas para São Paulo. Grande concentração urbana em regiões metropolitanas mais populosas e maior número das favelas levariam a esperar maior existência de moradias precárias, o que de fato não ocorre. Nas regiões metropolitanas, é sempre muito baixo o percentual de domicílios com essas características.

Em relação à composição das habitações precárias, a maioria é de domicílios rústicos, correspondendo a 81,2% do total. Observa-se, de acordo com o gráfico abaixo, maior importância das habitações improvisadas apenas nas regiões Centro-Oeste e Sudeste.



**GRÁFICO 15** – Composição das habitações precárias – Brasil, Grandes Regiões e Regiões Metropolitanas/2005

FONTE - Dados básicos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2005

#### 2.2.3.2. Coabitação familiar

A coabitação familiar, componente mais expressivo do déficit habitacional, engloba as famílias conviventes e os cômodos. Estima-se que em condição de coabitação familiar estejam 4.489.139 domicílios, concentrados basicamente nas áreas urbanas (85,8% do total). Nas regiões metropolitanas, que têm participação relevante no dimensionamento desse componente, a estimativa é de que existam 1.355.421 famílias vivendo em situação de coabitação, representando pouco mais de 30% do montante do país.

Entre as regiões, destacam-se a Sudeste e a Nordeste, com os maiores montantes estimados, 1.649.590 e 1.539.652 respectivamente. Desses totais, São Paulo concentra parcela substantiva, 824.930. A seguir vêm Minas Gerais (401.287), Bahia (411.762) e Rio de Janeiro (347.866).

Na região Norte, destaca-se apenas o Pará, com 294.181 domicílios em números absolutos. Na região Sul os percentuais estão sempre em torno de 6%, e a maioria está localizada no Rio Grande do Sul, com 219.457 unidades. Na Centro-Oeste, é expressiva a situação do Distrito Federal. Apesar do pequeno número absoluto, apresenta altos percentuais de domicílios onde residem duas ou mais famílias.

### *2.2.3.3. Ônus excessivo com aluguel*

O último componente do déficit habitacional a ser descrito é o ônus excessivo com aluguel, que está restrito à área urbana e corresponde a 29% do total das carências. São estimados 1.857.323 domicílios, cujas famílias residentes, excetuadas as famílias conviventes, recebem até três salários mínimos de renda mensal e despendem mais de 30% desse total com o aluguel. Desses, 724.644 estão localizados nas áreas metropolitanas.

Em números absolutos, a região Sudeste concentra cerca de 54,7% das famílias que despendem um montante excessivo com aluguel. Isso corresponde a 1.015.367 domicílios, a maioria deles situados em São Paulo e em sua região metropolitana. Esse componente é pouco expressivo na região Norte, tanto em números absolutos quanto relativos. Destaque entre as demais regiões deve ser dado apenas para o Distrito Federal que, em termos percentuais, é responsável pelos maiores valores entre todas as unidades da Federação: são 8,1% do estoque de domicílios, correspondendo a 51.957 unidades.

### **2.2.4. Inadequação de domicílios**

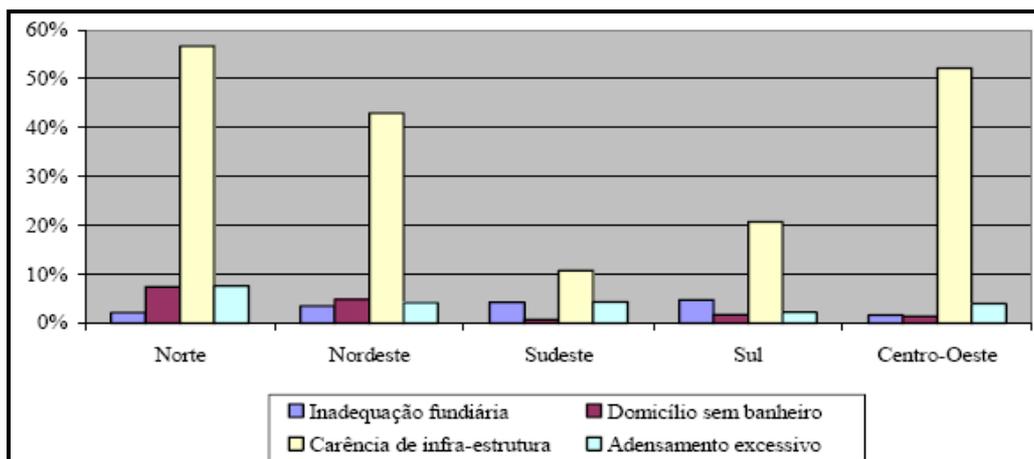
Diferentemente do déficit habitacional, que identifica a necessidade de construção de novas moradias, a inadequação dos domicílios é o segmento das necessidades habitacionais que tem como pressuposto a melhoria de qualidade de vida dos

moradores, sem implicar reposição das moradias. Caracteriza situações de natureza distinta, que exigem soluções diferenciadas na tentativa de resolver o problema.

São avaliados apenas domicílios urbanos que não foram considerados como em situação de déficit habitacional. Sua classificação como inadequados segue critérios de inadequação fundiária, adensamento excessivo, carência de infra-estrutura e domicílio sem banheiro.

A carência de infra-estrutura, definida como ausência de atendimento adequado em um ou mais dos serviços básicos considerados (redes de iluminação elétrica, de abastecimento de água, de esgotamento sanitário ou fossa séptica e coleta de lixo), é o fator que mais contribui para que o domicílio seja classificado como inadequado. Observa-se que são mais de 11 milhões de moradias que apresentam deficiência nos serviços de infra-estrutura, 25,1% do estoque de domicílios urbanos. Os outros critérios têm presença bem menos relevante e não representam 5% dos domicílios. Parcela substancial das habitações com problemas de inadequação fundiária e adensamento excessivo, critérios com características ligadas mais diretamente às grandes aglomerações urbanas, está localizada nas regiões metropolitanas.

Grande concentração de domicílios inadequados em números absolutos ocorre na região Nordeste (42,6% do estoque de moradias urbanas). Na Norte e Centro-Oeste a situação é alarmante: está presente em 56,9% e 52% dos domicílios respectivamente. Apenas na região Sudeste os domicílios com adensamento excessivo e inadequação fundiária sobressaem, em números absolutos, quase 1 milhão de unidades.



**GRÁFICO 16 – Critérios de inadequação (domicílios urbanos) – Grandes Regiões – Brasil/2005**

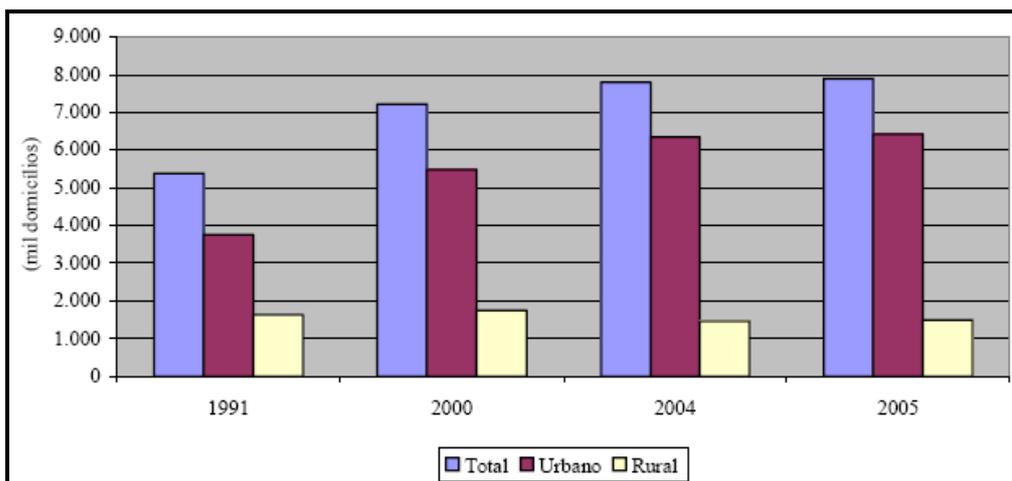
FONTE - Dados básicos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2005

### 2.2.5. Evolução do déficit habitacional

O gráfico a seguir apresenta as estimativas do déficit habitacional no período. Deve-se ressaltar que, para 1991, as estimativas não incluem os números da área rural da região Norte, não pesquisada pela PNAD. Portanto, para tornar possível a comparação, foram feitos ajustes nos valores e chegou-se à seguinte conclusão: segundo a FJP, houve o incremento absoluto do déficit habitacional ajustado no Brasil, que passou de 5.374.380 em 1991 para 6.539.528 unidades habitacionais em 2000, representando 21,7%, no decurso de quase uma década, com uma taxa de crescimento de 2,2% ao ano.

Na evolução do déficit habitacional total referida ao intervalo de 2000 a 2005, também é verificado um acréscimo, em termos absolutos, de cerca de 680 mil domicílios.

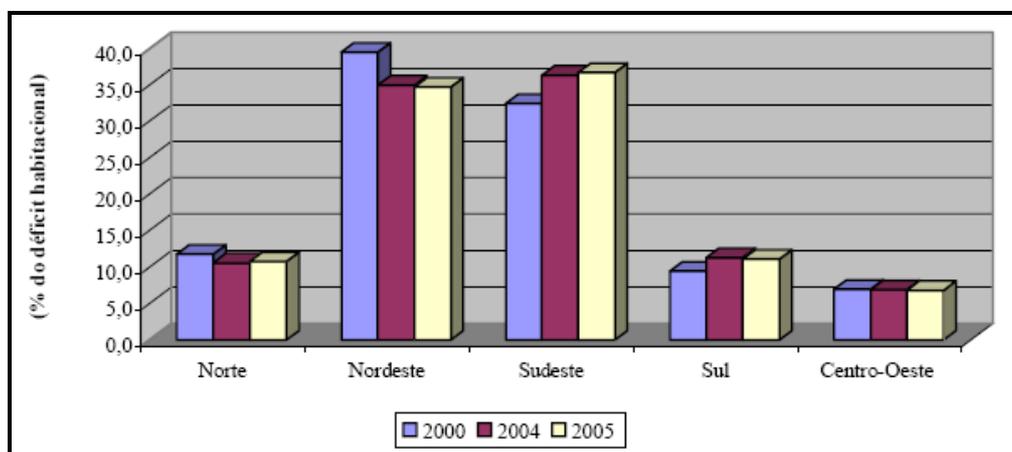
Nas áreas urbanas, observa-se um crescimento do déficit ao longo de todo período. As áreas rurais, entretanto, apresentaram queda entre 2000 e 2005. Relativamente, no entanto, os indicadores evidenciam queda do déficit em relação ao estoque existente de domicílios, principalmente na área rural. A situação nas áreas urbanas mantém-se praticamente estável. Isso é um indicativo de que o ritmo de crescimento do déficit habitacional foi menos acentuado que o dos domicílios no período.



**GRÁFICO 17** – Evolução do déficit habitacional por situação do domicílio – Brasil – 1991/2000/2004-2005

FONTES - Dados básicos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2004-2005 - Fundação João Pinheiro, Déficit Habitacional no Brasil 2000; Déficit Habitacional no Brasil, municípios selecionados e microrregiões geográficas

É importante, também, analisar a evolução das estimativas do déficit habitacional nas grandes regiões, verificando-se diferenças de comportamento e alterações no padrão evidenciado nos anos anteriores. Observa-se que, desde 2004, a região Sudeste passa a concentrar, em números absolutos, a maior parcela das carências habitacionais. Até essa data, a posição era ocupada pela região Nordeste.



**GRÁFICO 18** – Percentual do déficit habitacional - Grandes Regiões – Brasil – 2000/2004/2005

FONTES - Dados básicos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2004-2005 - Fundação João Pinheiro, Déficit Habitacional no Brasil 2000; Déficit Habitacional no Brasil, municípios selecionados e microrregiões geográficas

Em termos relativos, no entanto, as regiões Nordeste e Norte continuam a apresentar a pior situação, com o déficit representando mais de 20% do estoque de domicílios, apesar da evolução positiva do indicador. Em 2000, na Norte, seria necessária a

construção de um número equivalente a 30,2% das moradias existentes para sanar as carências habitacionais da região. Em 2005, esse percentual passa para 22,9%. Na região Nordeste, seriam, respectivamente, 25% e 20,6%. Queda percentual também se verifica na região Centro-Oeste. Nas regiões Sudeste e Sul, ao contrário, há ligeira tendência de crescimento percentual da demanda por novas habitações, apesar de comprometerem percentual bem menor do estoque de moradias. O déficit correspondia a 11,6% e 9,4% respectivamente, em 2000, e sobe para 12,2% e 10,4%, em 2005.

#### **2.2.6. Déficit habitacional no Estado do Rio de Janeiro**

De acordo com estudos da FJP, com dados do Censo Demográfico do IBGE, verifica-se que em 2005 a demanda no Estado do Rio de Janeiro de incremento do estoque domiciliar foi da ordem de 580.000 unidades, correspondendo a 11,7% em relação ao estoque domiciliar permanente. Este percentual é acompanhado pela Região Metropolitana do Rio de Janeiro, que apresenta um déficit de 11,8% em relação ao total de moradias.

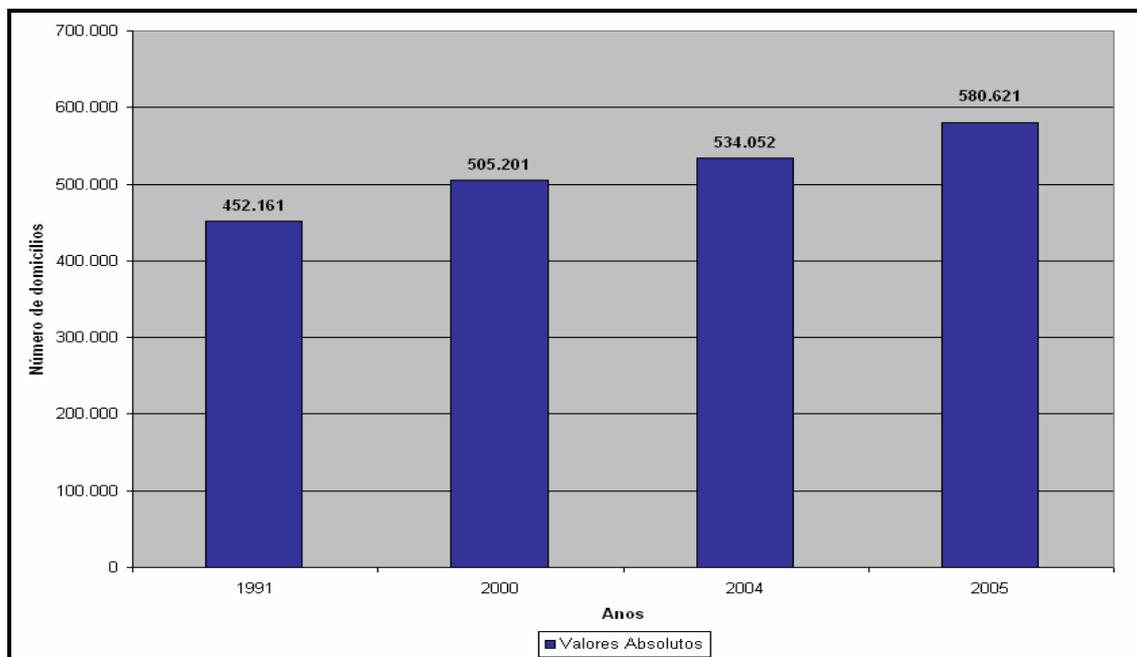
As regiões mais críticas são o Centro-Sul Fluminense e Costa Verde. Abaixo do valor médio, pode-se destacar a Região Serrana com um dos menores valores percentuais do Estado.

Relativamente aos componentes do déficit habitacional, a coabitação familiar representa cerca de 60% do déficit total - o maior peso na sua composição, seguido do ônus excessivo com o aluguel.

No que diz respeito à inadequação de domicílios, o componente carência por infraestrutura, que dimensiona a demanda por programas de infra-estrutura básica e de urbanização integrada, apresenta valores absolutos para o total do Estado da ordem de 876.190, sendo disparado o que tem maior peso na composição. A maior parte desses se concentra na Região Metropolitana, que apresenta uma demanda da ordem de 530.104 domicílios.

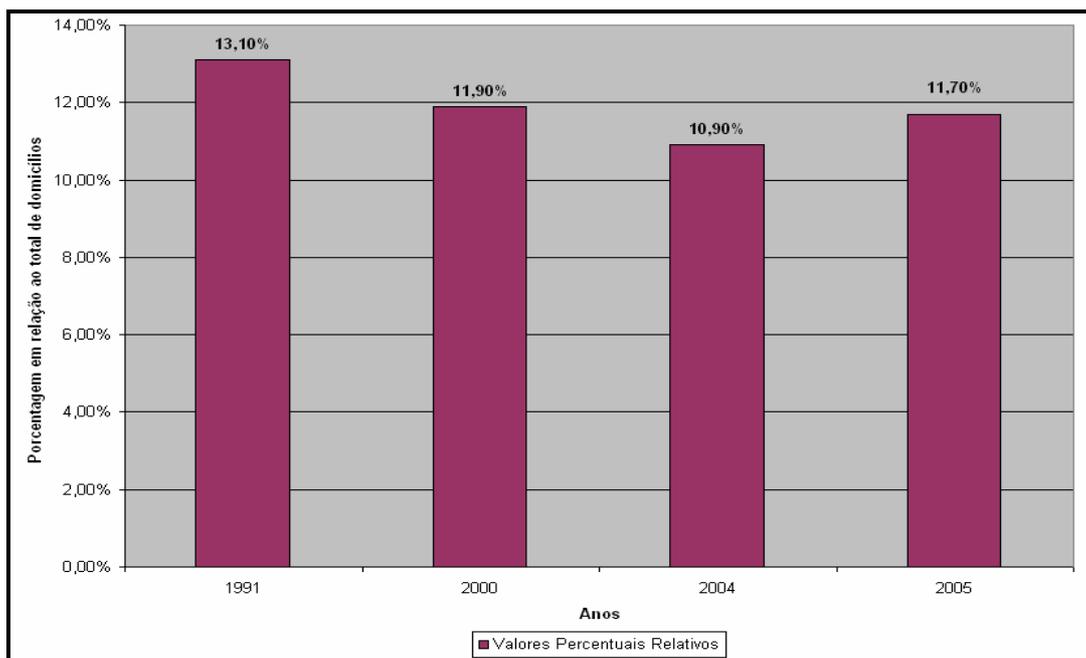
A evolução do déficit habitacional no Estado do Rio de Janeiro de 1991 a 2005 se deu da seguinte forma: em 1991 contabilizava-se, em valores absolutos, cerca de 452.161,

chegando a 580.621 no ano de 2005, representando um aumento significativo de cerca de 28%. Porém, quando se analisa os valores relativos ao número total de domicílios, o que se observa é uma queda de 13,1% em 1991 para 11,7% em 2005. Observa-se, também, um incremento dos valores relativos entre os dois últimos anos analisados.



**GRÁFICO 19** – Evolução do déficit habitacional no Estado do Rio de Janeiro – 1991/2000/2004/2005

FONTE - Dados básicos: Fundação João Pinheiro, 2006



**GRÁFICO 20** - Evolução do Percentual do déficit em relação ao total de domicílios no Estado do Rio de Janeiro – 1991/200/2004/2005  
 FONTE - Dados básicos: Fundação João Pinheiro, 2006

A conclusão que se chega em relação à análise do déficit habitacional é que não se deve apenas pensar na falta de moradias, mas nas condições desejáveis do espaço habitacional que promovam uma boa qualidade de vida. Analisando também que grande parte da população que sofre com o déficit habitacional e com a inadequação de moradias é de baixa renda, torna-se primordial o foco em soluções de baixo custo. Nesse contexto observa-se a importância da reutilização de materiais na confecção de elementos estruturais para a construção civil, que além da diminuição de custos, proporciona enormes benefícios sociais e ambientais.

## 2.3. ENERGIA

### 2.3.1. Panorama geral

Dos diversos impactos que as atividades humanas exercem sobre o meio ambiente destacam-se aqueles causados pelo uso de energia em suas diversas formas. Embora nem todos os impactos ambientais estejam relacionados ao consumo de energia – ainda que grande parte esteja – o uso de energia está sempre ligado a impactos sobre o meio ambiente. As necessidades energéticas criadas pelo desenvolvimento econômico implicam em pressões sobre os recursos naturais e a qualidade ambiental.

O desenvolvimento econômico depende diretamente do uso de energia. Esta, por sua vez, faz-se necessária na realização de atividades produtivas, assim como na melhora do bem estar da população. Contudo, a relação entre os dois não é necessariamente fixa, podendo variar por diversas razões como, por exemplo, o nível de atividade econômica. Muitos fatores, como a composição da produção e do consumo, as tecnologias disponíveis, as condições climáticas, os padrões culturais, geográficos, demográficos e distributivos podem ter influência sobre a quantidade de energia gasta.

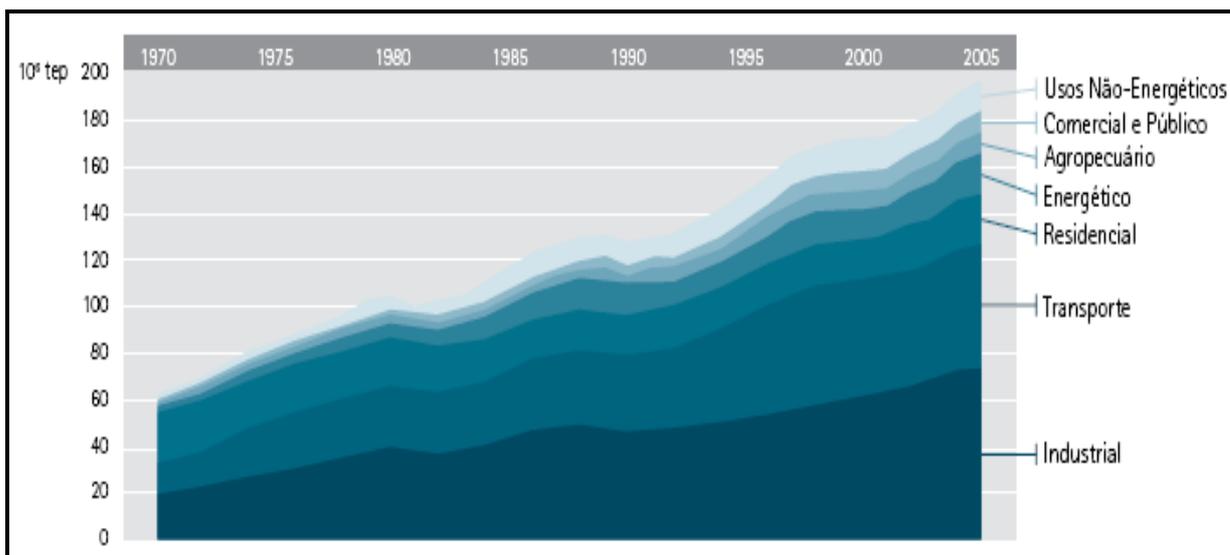
Quando a humanidade deu o grande salto conhecido como Revolução Agrícola, teve início um processo de acúmulo de alimentos pelas populações que o praticavam. O estabelecimento paulatino do novo modelo de vida exigiu toda uma mudança de comportamento. Este tipo de adaptação faria com que a tradicional tendência da evolução fosse acelerada. Com ela o homem poderia dispor dos recursos ao seu alcance para contornar as eventuais dificuldades que o clima e a busca por alimentos apresentassem. Neste trajeto, a humanidade aprendeu como gerar mais energia, de um modo diverso do que era proporcionado pelas próprias mãos humanas, ou posteriormente por animais. Passou, com isso, a produzir muito mais do que poderia imaginar o primeiro caçador ou agricultor. O ônus da abundância ficaria evidenciado na dependência de estruturas, tanto produtivas quanto administrativas, fundamentais para a manutenção deste novo patamar de existência. No antigo sistema a natureza tinha um poder maior de controle, no sentido de que tudo dela provinha, mas as quantidades eram também por ela proporcionadas, sendo este o limite de qualquer expansão ou concentração populacional. (ODUM,1983)

Enquanto esta energia provinha de fontes naturais ou renováveis, como aquela extraída dos ventos ou das correntes de água, não houve na atmosfera mudança significativa de origem antrópica, salvo a mais rápida devastação de florestas do que a natureza conseguia naturalmente renovar. Esta fase da humanidade é historicamente encerrada em meados do século XVIII. A partir de então, a Revolução Industrial, baseada na força do vapor como força motriz, passou a demandar mais do que a natureza conseguiria repor, nos acelerados prazos que esta nova etapa do desenvolvimento humano determinava. A lenha para alimentar as caldeiras já não seria mais suficiente, e passou-se a usar o carvão mineral como combustível. Toda a tecnologia advinda deste processo acelerou de forma nunca vista a produção de bens e o consumo cada vez maior de recursos. Porém um limite estava sendo ultrapassado.

Ao se queimar cada vez mais combustíveis fósseis, o nível de gás carbônico na atmosfera começou a aumentar, não sendo suficientes os recursos naturais de absorção deste gás para que o equilíbrio se restabelecesse. A temperatura média da superfície do planeta desde então vem aumentando pelo agravamento artificial do Efeito Estufa. O aproveitamento do petróleo sucedeu rapidamente, a partir do final do século XIX, ao carvão como principal combustível da máquina desenvolvimentista das nações mais ricas. Deste somatório de ofertas de combustíveis fósseis resultou o aceleração do processo de acúmulo dos gases responsáveis pelo efeito de aquecimento, muito além do equilíbrio conhecido.

No Brasil, em termos da composição em fontes de energia, o consumo energético diversificou-se a partir de 1970, privilegiando fontes mais modernas, como os derivados de petróleo e eletricidade, em detrimento do consumo de lenha, principal energético no começo da década. Das principais fontes energéticas, destacam-se os derivados de petróleo, tanto em nível de consumo quanto em taxa de crescimento, pois ao longo da década de 1970, seu consumo subiu 116%.

Observa-se que, entre 1970 e 2000, o uso energético no Brasil quase triplicou com uma taxa média de crescimento de 3,7% a.a., enquanto as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao uso de energia mais que duplicaram (aumentaram 228%), a uma taxa média de crescimento de 3,3% a.a. (MME, 2003 e MCT, 2002). Essa evolução foi principalmente causada pelo crescimento do uso de energia dos setores produtivos, ou seja, pelo aumento da energia necessária na produção dos bens e serviços que serão fornecidos à demanda final da economia brasileira.

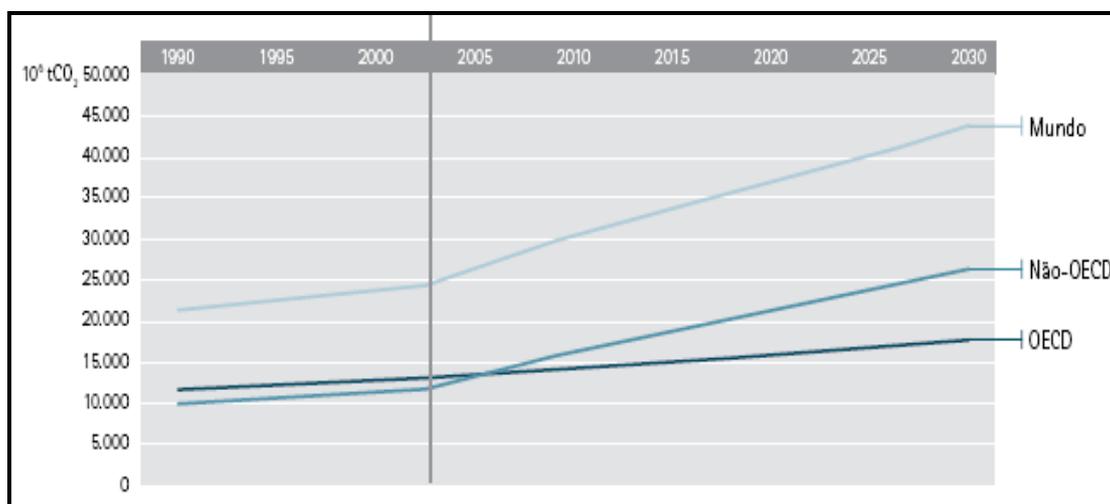


**GRÁFICO 21** - Evolução dos Consumos finais de energia Setoriais - Brasil 1970/ 2005  
 FONTE - MME – Balanço Energético Nacional 2006 (ano base 2005)

Ao contrário de certos países desenvolvidos, onde o crescimento econômico chega a ser acompanhado por um decréscimo de consumo de energia, no caso do Brasil a relação entre consumo de energia/emissões de CO<sub>2</sub> e PIB indica que quanto mais alto o PIB, mais energia é consumida e mais CO<sub>2</sub> é emitido. Entretanto, a contribuição brasileira na emissão de gás carbônico é de 0,41%, enquanto as dos EUA, China, Alemanha, Rússia e Japão somam 65%.

A previsão para o total de emissões de CO<sub>2</sub> chega a 46,7 bilhões de toneladas em 2030, com crescimento anual médio de 2,3% no período de 2003 a 2030. Comparativamente ao ano de 2003, as emissões de CO<sub>2</sub> são ligeiramente superiores (0,1% a.a.) ao crescimento na demanda de energia, representando uma maior utilização mundial de fontes fósseis de energia. Para o Brasil, a taxa de crescimento projetada é igual à mundial, sendo o valor previsto para 2030 igual a 610 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, contra 348 MtCO<sub>2</sub> emitidas em 2003. Mesmo assim, o Brasil ainda continuaria com um indicador favorável em relação ao restante do mundo, pois chegaria em 2030 consumindo 2,4% da energia mundial, mas com apenas 1,4% das emissões totais de CO<sub>2</sub>. As previsões do Departamento de Energia dos Estados Unidos constantes na publicação IEO (*International Energy Outlook*) 2006 e expostas no gráfico abaixo mostram que o total de emissões de CO<sub>2</sub> dos países OECD (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, entidade que reúne

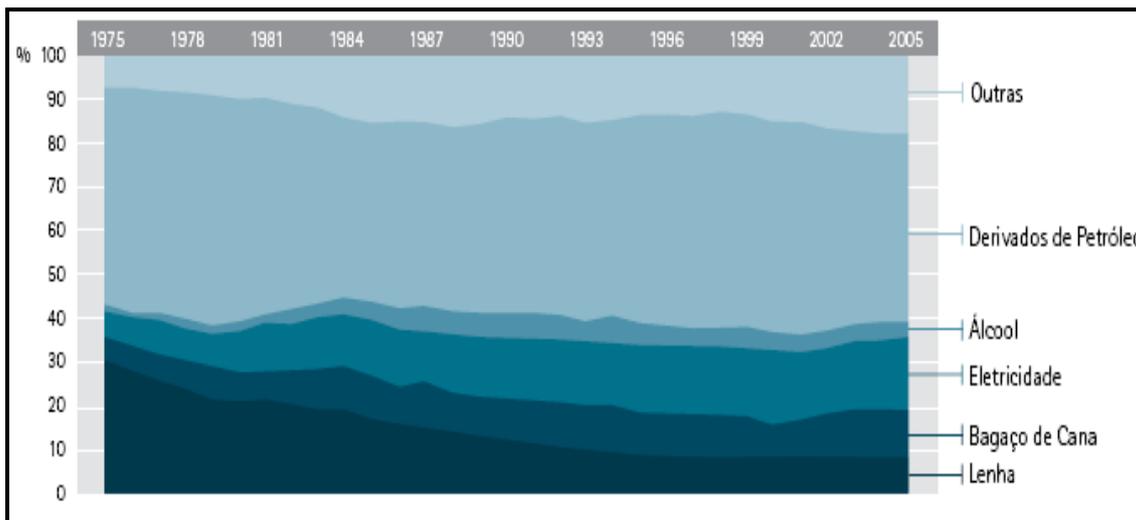
30 países dentre os mais desenvolvidos do mundo) serão superadas antes de 2010 pelo dos países não-OECD, categoria na qual o Brasil se encaixa.



**GRÁFICO 22** - Evolução e Cenários das Emissões de CO<sub>2</sub> - Mundo, Países Membros da OECD e Não-membros 1990 a 2030

FONTE - MME – Balanço Energético Nacional 2006 (ano base 2005)

No decorrer dos anos de 1990, a retomada do crescimento econômico foi seguida por um aumento no consumo energético. Nesses anos, o efeito atividade foi o principal impulsionador da elevação do consumo energético brasileiro. O consumo de derivados do petróleo cresceu ao longo da maior parte desta década, tendo se estabilizado a partir de 1999 e, posteriormente, caído, em função de novas altas no preço do barril. Em 1999, o preço médio do barril no mercado *spot* sofreu um aumento de 33,8% em relação ao ano anterior e, em 2000, ficou 57,4% acima daquele de 1999. O consumo de energia elétrica também cresceu, aumentando 52% entre 1990 e 2000. Embora ainda representem uma parcela pequena do consumo energético final brasileiro, o crescimento do consumo de gás e carvão mineral foi notável: 190% e 186% entre 1990 e 2000, respectivamente.



**GRÁFICO 23 - Consumo final por fonte**

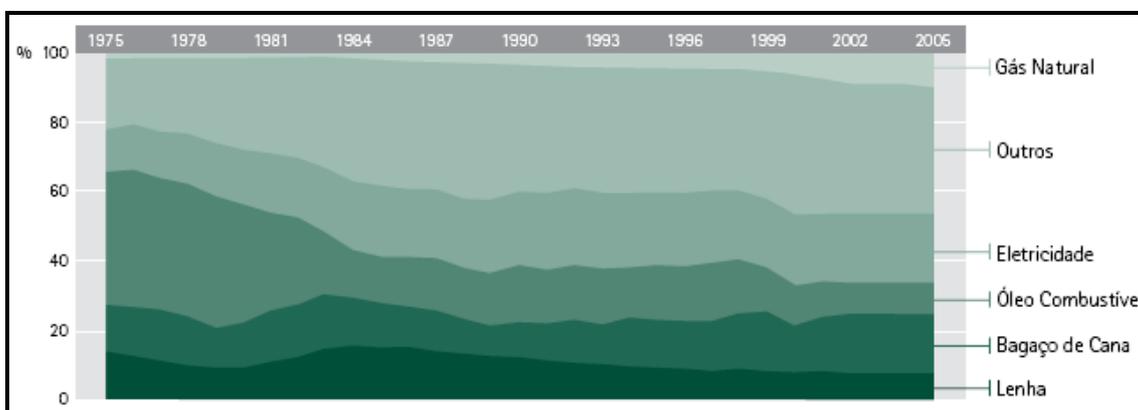
FONTE - MME – Balanço Energético Nacional 2006 (ano base 2005)

Alternativas renováveis aos combustíveis fósseis eram conhecidas, mas somente em ocasiões de grande crise ou guerra foram usadas pela desproporção de preço. Como exemplo, cita-se o uso de etanol de batatas e beterrabas na Alemanha e de gasogênios veiculares (gaseificadores de carvão vegetal), durante a Segunda Guerra Mundial, para substituir a gasolina.

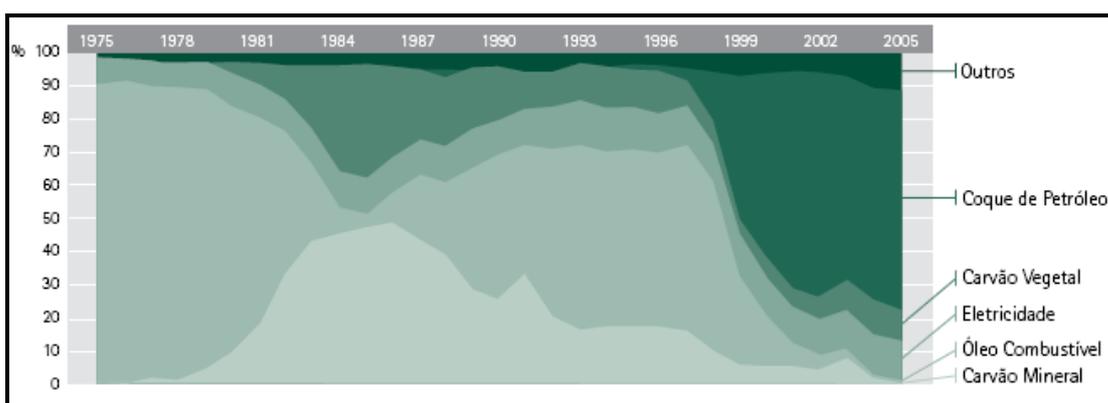
Normalmente, um aumento do consumo energético demanda uma maior quantidade de fontes energéticas primárias, o que no caso das fontes fósseis pode levar a um esgotamento de recursos no futuro. Por outro lado, o maior uso de energia causa uma degradação ambiental, tanto pela poluição atmosférica (principalmente pela queima dos combustíveis fósseis) quanto pela destruição de áreas naturais necessárias para a construção de usinas hidrelétricas ou pelo desmatamento devido à procura de lenha. O Brasil é um país reconhecidamente produtor de energia limpa devido à grande participação de hidroeletricidade na matriz energética, isto é, 60% da energia aqui gerada vêm de fontes renováveis, enquanto os demais países pretendem chegar a 12% em 2010. No entanto o uso de fontes novas e renováveis para geração de eletricidade ainda é pequeno, quando consideramos o imenso potencial existente. Todavia, atualmente 85% da energia que movimenta o mundo ainda é de origem fóssil e 80% dessa energia tem seu uso concentrado em cerca de dez países (VIDAL, 2003).

Portanto, além do problema ambiental, há a preocupação com a segurança do abastecimento energético futuro do país, o que requer um planejamento energético da oferta de energia para os consumidores da economia brasileira.

Uma das fontes dessas preocupações é o setor industrial. Observa-se, de acordo com dados exibidos no gráfico 2.38, que esse setor é responsável por grande, senão a maior parte do consumo final de energia, e o que agrava a situação é que o consumo vem crescendo rapidamente a cada ano. Os gráficos a seguir mostram a estrutura do consumo energético desse setor e, mais especificamente, do setor de produção de cimento, que merece destaque pelo seu alto nível de consumo dentro do setor industrial.



**GRÁFICO 24 – Estrutura do consumo no Setor Industrial**  
 FONTE - MME – Balanço Energético Nacional 2006 (ano base 2005)



**GRÁFICO 25 – Estrutura do consumo no Setor de Produção de Cimento**  
 FONTE - MME – Balanço Energético Nacional 2006 (ano base 2005)

Vislumbrando todo esse panorama, chega-se a conclusão que toda iniciativa de diminuição do consumo de energia é válida e principalmente indispensável, pois além

da questão econômica atinge-se também, mesmo que parcialmente, o problema da elevada emissão de CO<sub>2</sub> e outros poluentes que contribuem para a deterioração acelerada do ambiente.

### **2.3.2. Energia na construção civil**

Do ponto de vista energético, o reaproveitamento dos resíduos industriais, minerários, e agrícolas é uma obrigação, essencialmente por duas razões: a gigantesca carga entrópica que contêm e a diminuição do gasto energético que o seu uso é capaz de proporcionar. Por outro lado, o consumo contínuo de matérias primas antes abundantes, a dependência dos atuais processos industriais de elevados aportes energéticos e a poluição gerada pelos mesmos são problemas que a cada dia demandam mais atenção da sociedade.

Mas hoje em dia não é somente a questão do preço do petróleo, do carvão e da energia elétrica que motiva para a sua conservação. A sociedade está cada vez mais preocupada com questões como a escassez de recursos financeiros para investimentos nesse setor, assim como aquelas relativas ao meio ambiente. Qualquer energia que possa ser poupada resulta em economia de recursos financeiros que podem ser aplicados no aumento da oferta de energia com a concomitante preservação ambiental. Além desses aspectos, a conservação de energia certamente é um importante instrumento para a redução de custos nos processos de fabricação com a conseqüente redução dos preços de artigos vendidos aos consumidores.

Percebe-se, então, que a energia é um problema que se torna cada vez mais crítico, principalmente para o setor industrial. Analisando um importante segmento industrial brasileiro, o da cerâmica vermelha, que com cerca de 5,5 mil olarias oficiais, de acordo com a ANICER, representa 4,8% da indústria da construção civil no país, observa-se que esta produz cerca de 4 bilhões de blocos e tijolos, além de 1,5 bilhões de telhas por mês, consumindo aproximadamente  $1,03 \times 10^7$  toneladas de argila por mês, principalmente nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Mato Grosso e Paraná. Em termos de energia, apenas o estado do Rio de Janeiro é responsável por um consumo de mais de 2.160.000 Gcal/ano de óleo combustível e lenha além de 80 Gcal/ano de eletricidade.

A situação atual da indústria cerâmica vermelha no que diz respeito ao consumo de energia e poluição é ainda pior em países como EUA, do Reino Unido e da China, sendo esta última, o maior produtor mundial de tijolos cerâmicos. Em 1994 ela produziu a impressionante quantidade de 800 bilhões de tijolos nas 100500 pequenas olarias mais outras 1200 de grande porte na periferia dos grandes centros urbanos contra 8 e 4 bilhões produzidos nos Estados Unidos e na Inglaterra, respectivamente (ZHANG, 1997).

Na China o principal combustível é o carvão que, em 1990 e 1994, atingiu o consumo médio de (100 e 130) toneladas tec (toneladas equivalente de carvão) por milhão de tijolos, respectivamente, correspondendo a cerca de 9% da sua produção total de carvão (ZHANG, 1997).

A situação da indústria cerâmica na China estava tão crítica que em 2000 o governo chinês, através do Ministério da Construção juntamente com a Indústria de Materiais de Construção do país, decidiram banir o uso de tijolos cerâmicos em novas construções. Com a substituição dos tijolos, em apenas dois anos observou-se a recuperação de 60.000 hectares de terras aráveis em mais de 170 cidades em todo o país, além da economia de energia (carvão) e da considerável diminuição da poluição.

De acordo com o jornal local *The New Light of Myanmar* (2004), estudos chineses mostraram também que, utilizando tijolos vazados, resíduos reciclados e novos materiais de construção no lugar do tijolo cerâmico maciço, o país chega a economizar 47% de energia na produção de materiais de alvenaria e de 30 a 50% da energia para aquecimento das habitações. Em 2004 o número de pequenas olarias fechadas na China girava em torno de 6.000, fazendo a participação de novos elementos construtivos no total do material de alvenaria no país subir de 26% em 1999 para 35%.

O dispêndio de energia na indústria cerâmica é a parcela mais considerável do seu custo final. No setor da cerâmica vermelha o gasto médio da energia elétrica pode ser distribuído do seguinte modo, de acordo com o Manual de Conservação de Energia na Indústria Cerâmica Vermelha – INT (1993):

- Preparo da matéria prima: 14%
- Moldagem: 26%
- Secagem: 26%
- Queima: 34%

Mais especificamente, pode-se dizer que o consumo de energia no setor da Cerâmica Vermelha ocorre em duas etapas do processo de fabricação:

**1)** Energia elétrica para acionar os motores de equipamentos usados na preparação inicial das matérias primas (argila e água), como o dosador, o alimentador, o destorroador, o misturador, o laminador, e a maromba. A potência instalada normalmente varia de 250 kW a 370 kW, mas ainda são muito utilizados como combustíveis nesta etapa, a lenha e o óleo. Devido aos altos teores de umidade (15 a 30)% usualmente necessários à preparação da matéria-prima para o processo de extrusão, o consumo de calor na secagem é normalmente mais elevado do que no processo de queima. Dessa forma, o consumo de lenha nas fornalhas apenas para secar 103 tijolos equivalentes de 6 furos de massa unitária seca igual a 2 kg/tijolo, com teor de umidade igual a 25%, é de 0,57 m<sup>3</sup>, o que corresponde a um consumo de 414 Mcal/milheiro ou 1,76 GJ/milheiro ou a aproximadamente 1,5 GJ/ton (lenha com 25% de umidade e poder calorífico inferior a 3.400 Kcal/kg ou 1.224 Mcal/m<sup>3</sup>). No caso de um forno contínuo com recuperação de calor, o consumo está em torno de 335 Mcal/milheiro, ou 1,40 GJ/milheiro ou 0,70 GJ/ton. Em olarias mais rudimentares a operação de secagem prévia dos tijolos chega a consumir 8 GJ/milheiro ou 195 litros de óleo combustível pesado.

**2)** Energia para a queima das peças conformadas, que depende basicamente do tipo de forno utilizado. Existem vários modelos, mostrados na tabela 4 a seguir:

**TABELA 4**

Tipos de fornos e suas características

<b>Tipo de Forno</b>	<b>Características</b>	<b>Consumo (GJ/ton)</b>	<b>Produtividade Milheiro/homem</b>
Caieira	Típico das olarias de pequeno porte. Opera no regime batelada e seu rendimento é muito baixo.	3,0 a 3,8	7
Chama Reversível	Opera no regime batelada, em termos energéticos é um pouco mais eficiente que o tipo Caieira.	2,5	7
Paulistinha	Forno de operação descontínuo, de rendimento energético também não muito elevado.	2,3	12 a 15
Plataforma	Forno de funcionamento intermitente, o seu rendimento é aproximadamente igual ao Paulistinha	2,7	12 a 15
Hoffmann	O mais utilizado pelas grandes olarias é o que apresenta o menor consumo de energia	1,3	16 a 20

FONTE: Casanova, 2000

Conclui-se que, dependendo do tipo de forno utilizado, a produção de 1 milheiro de tijolos cerâmicos com 8 furos, de massa unitária seca igual a 2Kg, incluindo os processos de secagem e a queima, tem um consumo energético específico equivalente de (1,4 a 3,1) m<sup>3</sup> de lenha ou 5 árvores de porte médio ainda ou (100 a 120) kg de óleo combustível, o que corresponde a (1016 a 2.251) Mcal/milheiro ou (2,4 a 5,3) GJ/ton, sendo que a operação de conformação consome ainda mais (20 KWh; 16 Mcal; 72 MJ) de eletricidade.

Outro exemplo a ser citado é o da indústria da cal. A atmosfera no interior dos fornos de calcinação do calcário deve ser tal que a calcita das camadas superficiais das pedras de calcário se dissocie à temperatura de 830 °C e as de dolomita a 720 °C. Para isso, a faixa de temperatura entre 1100 °C e 1250 °C deve ser mantida para que a calcinação se processe numa velocidade satisfatória, sem prejuízo significativo da

qualidade da cal produzida. Portanto, o consumo energético específico para a fabricação da cal varia, de acordo com o tipo de forno usado, de (2,5 a 8,0) GJ/ton.

Quanto à geração de gases, a produção de 1 tonelada de cal extinta (hidróxido de cálcio), libera cerca de 0,6 toneladas de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), sem levar em conta a parcela proveniente da queima do combustível utilizado.

Já no caso da indústria do cimento, dependendo do tipo de processo usado na fabricação (via úmida ou seca), o consumo de energia primária varia de (5 a 7) GJ/ton a até 2,8 vezes da requerida pela cal.

A produção mundial atual de cimento é significativa, da ordem de 2,2 bilhões de toneladas, de acordo com dados de associações como CEMBUREAU (*The European Cement Industry Association*), OFICIMEN (*Agrupación de Fabricantes de Cemento en España*) e SNIC (*Sindicato Nacional da Indústria do Cimento*). Em 2004 e 2005, manteve-se o predomínio da China como maior produtor mundial de cimento. Enquanto sua produção foi da ordem de 1.049 milhões de toneladas em 2005 (43,64% do total), a dos países do segundo pelotão, como Índia e Estados Unidos, situa-se na ordem de 100 milhões de toneladas. Neste último país, a indústria cimenteira praticamente já atingiu o limite de redução nos gastos de energia, que nas plantas mais modernas está em torno de (4 a 7) GJ/ton.

A colocação do Brasil no ranking mundial oscila em torno da 10<sup>a</sup> a 12<sup>a</sup> posição, com uma produção anual próxima a 40 milhões de toneladas, representando 1,71% do total mundial.

Desse total de cimento produzido mundialmente, poderia ser feita uma divisão em termos de utilização:

- 40% para concretos de alta resistência;
- 20% para produção de argamassas;
- 40% para concretos de baixa resistência.

Entretanto isso não ocorre, pois os 40% da produção de cimento, correspondendo a 0,88 bilhão de toneladas, que seriam destinados aos concretos de resistências

menores, estão superestimados, com resistências em torno de 30 a 35 MPa. Dessa forma, observa-se um enorme desperdício de energia.

Essa parcela mal utilizada de cimento poderia estar sendo usada para a fabricação de CLSM, isto é, *Controlled Low Strength Materials*, que são compostos principalmente de materiais cimentícios e agregados. Para ser classificado como CLSM, o material precisa apresentar resistência entre 345 e 8400 kPa. Como a areia e o cimento são os principais componentes dos CLSM, a substituição parcial de um deles ou de ambos por resíduos industriais é uma opção bastante atrativa.

Esse tipo de mistura é bastante utilizado como material de aterro. Nesses casos, na maioria das vezes prefere-se menores resistências para facilitar futuras escavações. Além disso, os CLSM podem ser utilizados em construções de pavimentos rodoviários e em estruturas de menor responsabilidade, como bancos e passeios. Dentre outras aplicações estão o preenchimento de túneis e bueiros abandonados ou inutilizados e o de vazios sob pavimentos, facilitando o controle de erosões.

Segundo relatório da Agência Ambiental da Holanda, a maior demanda por carvão para geração de eletricidade e uma oscilação na produção de cimento ajudaram a alavancar as emissões de gás carbônico na China, fazendo com que esse país em 2006 ultrapassasse o líder em emissões, os Estados Unidos. As estatísticas, no entanto, incluem somente as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis e da produção de cimento.

O volume de dióxido de carbono gerado pela China a partir da queima de combustíveis fósseis aumentou 8,7% em 2006. Já os americanos reduziram a emissão em 1,4%. Ainda de acordo com o relatório, a produção de cimento é a maior fonte de emissão de CO<sub>2</sub> do planeta, e contribui com 4% do total. Na China, porém, a participação dessa atividade é ainda maior, chegando a 9% das emissões.

A produção de cimento tem um impacto duplo: o produzido pela queima de combustível para a clinquerização, e a liberação de CO<sub>2</sub> pela decomposição da calcita contida no calcário. No total, cada 1 tonelada de cimento produzida, libera de (0,85 a 1,1) toneladas de CO<sub>2</sub> dependendo do combustível e da eficiência do processo, e consome cerca de (0,30 a 0,35) toneladas de argila (solo).

Por outro lado, a produção de elementos construtivos em solo-estabilizado conformados por prensagem hidráulica diminui muito tanto o consumo das matérias primas nobres como o gasto de água, energia, aglomerantes hidráulicos, quanto os custos da produção, além de degradar bem menos o meio ambiente. Por exemplo, a componente energética devida ao cimento para a produção de tijolos estabilizados com 10% de cimento (em massa, com relação ao solo seco) é igual a 0,56 GJ/t em oposição aos (2,8 a 5,3) GJ/t para a cerâmica vermelha. Tais resultados demonstram como fica realmente difícil vislumbrar o modo pelo qual a indústria cerâmica possa vir a reduzir, mesmo a longo prazo, essa significativa diferença, principalmente se levarmos em conta a escassez cada vez maior das fontes energéticas renováveis.

Portanto, em qualquer processo produtivo associado a um sistema industrial deve-se objetivar a otimização da eficiência com relação a cada insumo, e isto é particularmente válido para o consumo energético. Logo, quanto maior for a eficiência energética de uma tecnologia, menor o consumo específico de insumos energéticos; ou simplesmente o consumo específico de energia, definido da seguinte maneira: CEE = [Energia consumida/Produção útil].

Na fabricação de elementos construtivos de solo-estabilizado pelos próprios moradores em comunidades carentes, o balanço energético deve levar em conta a energia necessária para manter os trabalhadores (um regime alimentar de 3.000 kcal/dia com uma perda de 30% na conversão da (bio)energia química em trabalho físico - FAO, 1980), além da jornada de 8 horas/dia, ou seja:

$$[(3.000 \times 4,186)/1.000 \text{ (MJ/dia)} \times 8 \text{ horas}/24 \text{ horas} \times 0,7] = 2,93 \text{ MJ/homem.hora}$$

Logo, se a guarnição de uma prensa manual for composta por 5 homens trabalhando 8h/dia e admitindo-se que a produção diária seja de um milheiro de tijolos, tem-se um dispêndio global de 14,65 MJ/dia de energia humana por prensa. Acrescentando a energia embutida nos 10% de cimento, para o caso do tijolo maciço padrão, ou seja, 1,62 MJ/milheiro, conclui-se que num dia de trabalho são gastos cerca de 16,27 MJ para a fabricação de 1000 tijolos.

Havendo a utilização de equipamentos elétricos (destorroador e/ou de prensa hidráulica), a energia elétrica gasta deve ser computada.

A prensa hidráulica também pode ser acionada por um motor diesel, ao invés de elétrico, com o consumo calculado de acordo com a seguinte expressão: (DECHICHI *et al*,1983; BRANDÃO,1989 *in* FAJARDO,2005)

$$\text{Consumo médio de combustível (CMC)} = [0,26 \times 0,5 \times \text{HP}] = [0,13 \times \text{HP}]$$

Analisando um prensa com produtividade média de 344 tijolos/hora ou 2.752 tijolos/dia (8h) observa-se que seu consumo médio de óleo diesel é de 22,4 litros/dia. A energia embutida nos 22,4 L de óleo diesel (Pci de 10.180 kcal/kg, massa específica igual a 840 kg/m<sup>3</sup>; 35,7 MJ/L) corresponde então, neste caso, a cerca de 800 MJ/dia. Este gasto equivale, portanto a 0,29 MJ/tijolo ou 0,29 GJ/milheiro. Como o milheiro de tijolos com 10% de cimento apresenta 1,40 GJ de energia embutida, quando essa energia agregada ao cimento é acrescentada à consumida pela prensa, tem-se um total de (1,40 + 0,29) = 1,69 GJ/milheiro.

As tabelas abaixo mostram, para efeitos comparativos, as energias embutidas em diversos materiais, além de seus conteúdos energéticos específicos e suas demandas de energia.

**TABELA 5**

Energia embutida em diversos tipos de materiais

<b>MATERIAL OU PRODUTO</b>	<b>ENERGIA EMBUTIDA</b>
Tijolo cerâmico (8 furos)	1,5 Gcal /m <sup>3</sup> ou (1,0-2,5) Gcal/milheiro
Bloco cerâmico (29x19x14)	3,1 Gcal/milheiro ou 13 GJ/milheiro
Bloco de Concreto (15 kg) [1:6]	(1a 2) GJ/ton ou 360 kcal /kg
Telhas cerâmicas	1,05 Gcal / m <sup>3</sup> ou 4,4 GJ/ m <sup>3</sup>
Telhas cimento-amianto	1,6 Gcal / m <sup>3</sup> ou 6,7 GJ/m <sup>3</sup>
Revestimento sintético	30,4 Gcal /m <sup>3</sup> ou 127 GJ/m <sup>3</sup>
Argamassa cimento-areia	1,80 Gcal /m <sup>3</sup> ou 7,5 GJ/m <sup>3</sup>
Argamassa à base de cal	1,05 Gcal /m <sup>3</sup> ou 4,4 GJ/m <sup>3</sup>
Cimento alisado	1,80 Gcal /m <sup>3</sup> ou 7,5 GJ/m <sup>3</sup>
Bloco concreto celular	0,062 Gcal /m <sup>3</sup> ou 0,26 GJ/m <sup>3</sup>
Lajotas cerâmicas (piso)	1,05 Gcal /m <sup>3</sup> ou 4,4 GJ/m <sup>3</sup>
Painéis de concreto	0,313 Gcal /m <sup>3</sup> ou 1,3 GJ/m <sup>3</sup>
Cimento portland – via seca	(0,96 - 1,67) Gcal /m <sup>3</sup>
Cimento portland – via úmida	(4-7) GJ/m <sup>3</sup>
Hidróxido de cal (cal)	(0,6-1,9) Gcal/ton ou (2,5 -8,0) GJ/ton
Concreto armado	(0,70 - 2,75) Gcal/m <sup>3</sup> ou (2,9 - 11,5) GJ/m <sup>3</sup>
Concreto protendido	(0,6 - 2,75) Gcal/m <sup>3</sup> ou (2,5 - 11,5) GJ/m <sup>3</sup>
Concreto simples [350 kg/m <sup>3</sup> ]	0,58 Gcal /m <sup>3</sup> ou 2,45 GJ/m <sup>3</sup>
Areia (fina & grossa)	0,021 Gcal /m <sup>3</sup> ou 0,088 GJ /m <sup>3</sup>
Brita 1 e 2	0,0265 Gcal /m <sup>3</sup> ou 0,111 GJ/m <sup>3</sup>
Vergalhão comum ferro	6,1 Gcal /ton ou 25,5 GJ/ton
Tinta PVA - Galão	0,077 Gcal /gl ou 0,32 GJ/gl

FONTE - Casanova, 2000

**TABELA 6**

Consumo de energia de diversos materiais

MATERIAL	CONSUMO DE ENERGIA	
	Mínimo MJ/kg - [Gcal/ton]	Máximo MJ/kg - [Gcal/ton]
Cimento (processo via seca)	1,2 - [0,29]	2,0 - [0,48]
Cimento (processo via úmida)	4,9 - [0,12]	7,4 - [1,77]
Madeira (natural)	4 - [0,96]	7 - [1,67]
Compensado	18 - [4,30]	---
Tijolo cerâmico (10 furos)	2,4 - [0,58]	5,5 - [1,31]
Tijolo a frio (estabilizado - 10% Ci)	0,56 - [0,13]	1,71 - [0,41]
Gesso	1,5 - [0,36]	7,4 - [1,77]
Vidro plano	10,0 - [2,39]	21,5 - [5,14]
Tintas látex (base seca)	76,0 - [18,1]	78,0 - [18,6]
Poliestireno	105,0 - [25,1]	123 - [29,4]
Aço	(26/30) - [6,2 / 7,2]	39 - [9,3]
Aço inoxidável	(110) - [26,3]	---
Alumínio	150 - [35,8]	262 - [62,6]

FONTE - Casanova, 2000

**TABELA 7**Comparação do conteúdo energético para diferentes tipos de paredes<sup>1</sup>

TIPO DE PAREDE	MASSA/ ÁREA	CONTEÚDO ENERGÉTICO ESPECÍFICO	
		MJ/kg	MJ/m <sup>2</sup>
Tijolos cerâmicos maciços (15 x 12) cm	200 kg/m <sup>2</sup>	5 MJ/kg	635 MJ/m <sup>2</sup>
Tijolos cerâmicos furados (18 x 12) cm	160 kg/m <sup>2</sup>	5 MJ/kg	475 MJ/m <sup>2</sup>
Blocos de concreto vazados (18 x15) cm	170 kg/m <sup>2</sup>	2 MJ/kg	195 MJ/m <sup>2</sup>
Tijolos solo-cimento (10%) (18 x15) cm	220 kg/m <sup>2</sup>	0,5 MJ/kg	125 MJ/m <sup>2</sup>
Blocos de adobe (45 x 40) cm	410 kg/m <sup>2</sup>	0,1 MJ/kg	50 MJ/m <sup>2</sup>

FONTE - Casanova, 2000

<sup>1</sup> Para os tijolos de solo-cimento foi levada em conta a energia embutida no grout, enquanto nos demais casos computou-se aquela embutida na argamassa de assentamento (cimento;cal:areia)

Em 2002, YOHANIS e NORTON elaboraram a seguinte tabela de energia embutida em materiais:

**TABELA 8**

Energia embutida nos materiais

<b>MATERIAL</b>	<b>ENERGIA EMBUTIDA (GJ/ton)</b>
Agregados	0,02 – 0,3
Cimento	3 – 9,5
Tijolo Cerâmico	0,5 – 10
Madeira	0,5 – 10
Aço	10 - 65

FONTE: Yohanis e Norton, 2002

COLE (1999) estudou três sistemas estruturais: concreto, madeira e aço. As conclusões a que ele chegou foram de que o sistema de concreto é o que consome maior quantidade de energia (20-120 MJ/m<sup>2</sup>) e emite mais gases que contribuem para o efeito estufa (5-20 Kg/m<sup>2</sup>). Já para construções em madeira, o consumo de energia variou de 8 a 20 MJ/m<sup>2</sup> e as emissões ficaram entre 0,8 e 2,5 kg/m<sup>2</sup>. O aço foi o sistema construtivo de menor impacto ambiental, pois seu consumo de energia foi o mais baixo (3 a 7 MJ/m<sup>2</sup>) e sua emissão de gases que contribuem para o efeito estufa foi a menor (0,4 a 1 kg/m<sup>2</sup>).

Além da energia embutida, pode-se medir o gás carbônico embutido nos diversos materiais de concreto. A tabela 9 mostra um comparativo entre alguns materiais.

**TABELA 9**

Gás carbônico embutido nos materiais

CONCRETO	GÁS CARBÔNICO EMBUTIDO (Kg CO <sub>2</sub> /ton)		
	Concreto comum	Concreto com 30% de cinza volante	Concreto com 50% de escória
Fundação	80	62	47
Fundação reforçada	132	110	84
Contra piso	113	110	79
Estrutural: superestruturas, alvenarias	513	131	97
Alto desempenho	176	145	112
BLOCOS	GÁS CARBÔNICO EMBUTIDO (Kg CO <sub>2</sub> /ton)		
Bloco de concreto denso	75		
Bloco de concreto aerado	240		
Bloco de concreto leve	120		

FONTE: Casanova, 2000

Pode-se notar que, quando há substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos, ocorre uma diminuição da quantidade de gás carbônico existente.

### 2.3.3. Mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL

Consequência de uma série de eventos iniciada com a *Toronto Conference on the Changing Atmosphere*, no Canadá (1988), seguida pelo *IPCC's First Assessment Report* em Sundsvall, Suécia (1990) e a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática (CQNUMC, ou UNFCCC em inglês) na ECO-92 no Rio de Janeiro (1992), surge o Protocolo de Kyoto como um tratado internacional com compromissos rígidos para a redução da emissão dos gases que provocam o efeito estufa.

Discutido e negociado em Kyoto no Japão em 1997, foi aberto para assinaturas em março de 1998, porém só entrou em vigor oficialmente em fevereiro de 2005, depois que a Rússia o ratificou em novembro de 2004.

O Protocolo de Kyoto abrange a possibilidade de utilização de mecanismos de mercado para que os países desenvolvidos possam atingir os objetivos de redução de gases de efeito estufa. No presente estudo, o que nos interessa é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL. Esse mecanismo admite a participação voluntária de

países em desenvolvimento, que não fazem parte do Anexo I, grupo de países ricos que têm a obrigação de reduzir pelo menos 5% das emissões de 1990 entre 2008 e 2012, quando expira o prazo do Protocolo. Dessa forma, possibilita a certificação de projetos de redução de emissões nos países em desenvolvimento e a posterior venda das reduções certificadas de emissão, para serem utilizadas pelos países desenvolvidos como modo suplementar ao cumprimento de tais metas.

As reduções de emissões são sempre medidas em toneladas de gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Mesmo que o mecanismo vá reduzir outro tipo de gás que também provoca o chamado efeito estufa, essa capacidade de agressão (Global Warming Potencial – GWP) é sempre convertida para CO<sub>2</sub>. Assim, se o projeto envolve a captura do gás metano, comum em criações como a de suínos, haverá uma conversão para toneladas de gás carbônico, para efeito de negociação. Como o metano é 21 vezes mais agressivo à atmosfera que o CO<sub>2</sub>, uma tonelada de metano capturada ou que tenha seu lançamento evitado equivale a 21 toneladas de CO<sub>2</sub>. A tabela 10 mostra a relação entre os diversos gases causadores do efeito estufa e o gás carbônico.

**TABELA 10**

Gases poluentes e sua capacidade de agressão

<b>GÁS POLUENTE</b>	<b>GWP – RELATIVO AO CO<sub>2</sub></b>
Metano – CH <sub>4</sub>	21
Óxido nitroso – N <sub>2</sub> O	310
Hidrofluorcarbonetos – HFCs	140 – 11700
Perfluorcarbonetos – PFCs	6500 – 9200
Hexafluoreto de enxofre – SF <sub>6</sub>	23900

FONTE - O mecanismo de desenvolvimento limpo – Guia de Orientação. FGV, 2002.

Essencialmente, para ser aprovado, o mecanismo deve implicar reduções de emissões adicionais àquelas que ocorreriam na ausência do projeto, garantindo benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo para a mitigação da mudança do clima. O exigente processo de aprovação inclui dois critérios fundamentais: adicionalidade e sustentabilidade. O primeiro requer que o proponente comprove que seu projeto é realmente importante para desacelerar o aquecimento global, demonstrando como era a situação sem o MDL e como passa a ser com ele. Para ser

elegível, é preciso ainda que haja contribuição efetiva para o desenvolvimento sustentável local, promovendo benefícios sócio-econômicos.

Entretanto, para que um projeto resulte em reduções certificadas de emissões (RCEs), as atividades de projeto do MDL devem, necessariamente, passar por seis etapas do ciclo do projeto, descritas a seguir:

- **Elaboração do Documento de Concepção de Projeto (DCP):** é a primeira etapa do ciclo. Esse documento deverá incluir, entre outras coisas, a descrição: das atividades de projeto; dos participantes da atividade de projeto; da metodologia da linha de base; das metodologias para cálculo da redução de emissões de gases de efeito estufa e para o estabelecimento dos limites da atividade de projeto e das fugas; e do plano de monitoramento. Deve conter, ainda, a definição do período de obtenção de créditos, a justificativa para adicionalidade da atividade de projeto, o relatório de impactos ambientais, comentários e informações quanto à utilização de fontes adicionais de financiamento. Os responsáveis por essa etapa do processo são os participantes do projeto.

- **Validação/Aprovação:** a validação corresponde ao processo de avaliação independente de uma atividade de projeto por uma Entidade Operacional Designada (EOD) com base no DCP, verificando se o projeto está em conformidade com a regulamentação do Protocolo de Kyoto. A aprovação, por sua vez, é o processo pelo qual a AND (Autoridade Nacional Designada) das Partes envolvidas confirmam a participação voluntária e a AND do país onde são implementadas as atividades de projeto do MDL atesta que dita atividade contribui para o desenvolvimento sustentável do país. No caso do Brasil, os projetos são analisados pelos integrantes da Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima – CIMGC, que avaliam o relatório de validação e a contribuição da atividade de projeto para o desenvolvimento sustentável do país, segundo cinco critérios básicos: distribuição de renda; sustentabilidade ambiental local; desenvolvimento das condições de trabalho e geração líquida de emprego; capacitação e desenvolvimento tecnológico; integração regional e articulação com outros setores.

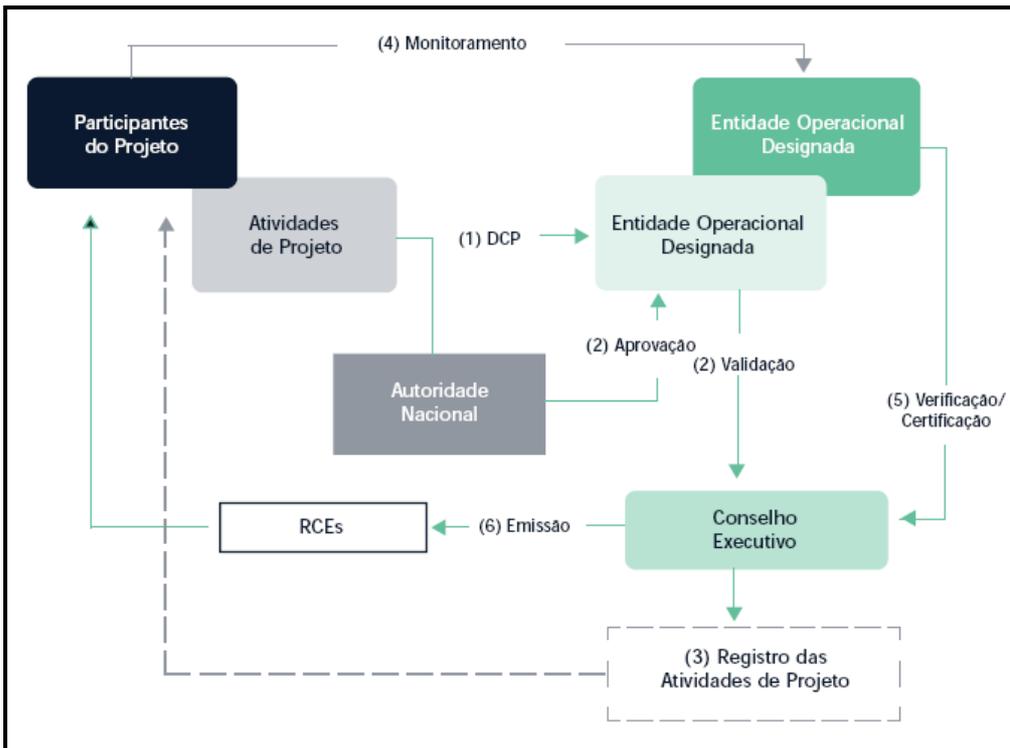
- **Registro:** é aceitação formal, pelo Conselho Executivo, de um projeto validado como atividade de projeto do MDL. A aprovação de projetos no Conselho Executivo é subsequente à aprovação pela Autoridade Nacional Designada. A aprovação pela

CIMGC é necessária para a continuidade dos projetos, mas não é suficiente para sua aprovação pelo Conselho Executivo, que analisa também a metodologia escolhida, a adicionalidade do projeto, entre outros aspectos. O registro é o pré-requisito para o monitoramento, a verificação/certificação e emissão das RCEs relativas à atividade de projeto no âmbito do MDL.

- Monitoramento: processo que inclui o recolhimento e armazenamento de todos os dados necessários para calcular a redução das emissões dos gases de efeito estufa, de acordo com a metodologia de linha de base estabelecida no DCP, que tenham ocorrido dentro dos limites da atividade de projeto e dentro do período de obtenção de créditos. Os participantes do projeto serão os responsáveis pelo processo de monitoramento.

- Verificação/certificação: verificação é o processo de auditoria periódico e independente para revisar os cálculos acerca da redução de emissões de gases de efeito estufa ou de remoção de CO<sub>2</sub> resultantes de uma atividade de projeto do MDL que foram enviados ao Conselho Executivo por meio do DCP. Esse processo é feito com o intuito de verificar a redução de emissões que efetivamente ocorreu. Após a verificação, o Conselho Executivo certifica que uma determinada atividade de projeto atingiu um determinado nível de redução de emissões de gases de efeito estufa durante um período de tempo específico.

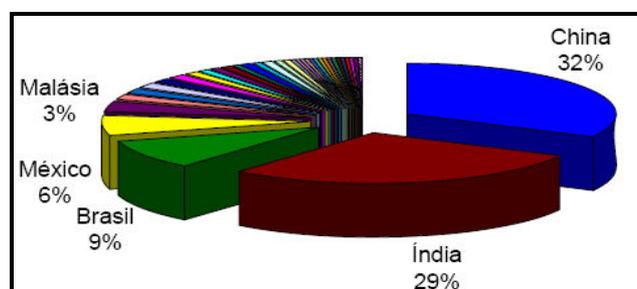
- Emissão e aprovação das RCEs: o passo final é quando o Conselho Executivo tem certeza de que, cumpridas todas as etapas, as reduções de emissões de gases de efeito estufa decorrentes das atividades de projeto são reais, mensuráveis e de longo prazo e, portanto, podem dar origem às RCEs, que são emitidas pelo Conselho Executivo e creditadas aos participantes de uma atividade de projeto na proporção por eles definida e, dependendo do caso, podendo ser utilizadas como forma de cumprimento parcial das metas de redução de emissão de gases de efeito estufa.



**FIGURA 20** - Etapas do ciclo de projetos

FONTE - O mecanismo de desenvolvimento limpo – Guia de Orientação. FGV, 2002.

Uma atividade de projeto entra no sistema do MDL quando o seu documento de concepção de projeto (DCP) correspondente é submetido para validação a uma Entidade Operacional Designada (EOD). Ao completar o ciclo de validação, aprovação e registro, a atividade registrada torna-se efetivamente uma atividade de projeto no âmbito do MDL. Em novembro de 2007, um total de 2698 projetos encontrava-se em alguma fase do ciclo de projetos do MDL, sendo 800 já registrados pelo Conselho Executivo do MDL e em outras fases do ciclo. O Brasil ocupa o 3º lugar em número de atividades de projeto, com 255 projetos (9%), sendo que em primeiro lugar encontra-se a China, com 874, e em segundo a Índia, com 776 projetos.

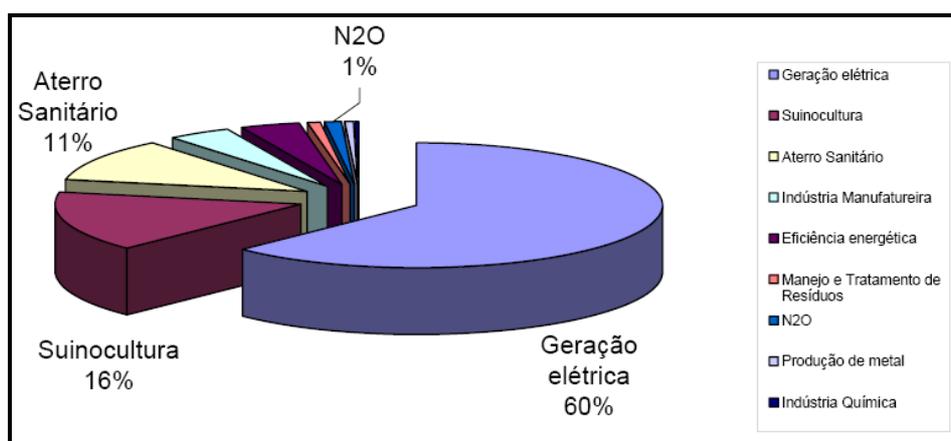


**GRÁFICO 26** - Total de atividades de projeto de MDL no Mundo

FONTE - Ministério de Ciência e Tecnologia. Status atual das atividades de projeto do MDL no Brasil e no Mundo, 2007.

Em termos de reduções de emissões projetadas, o Brasil também ocupa a terceira posição, sendo responsável pela redução de 269.035.082t de CO<sub>2e</sub>, o que corresponde a 7% do total mundial. A China ocupa o primeiro lugar com 2.051.977.743t de CO<sub>2e</sub> a serem reduzidas (50%), seguida pela Índia com 943.419.172t de CO<sub>2e</sub> (23%) de emissões projetadas para o primeiro período de obtenção de créditos, que pode ser de no máximo 10 anos para projetos de período fixo ou 7 anos para projetos de período renovável (os projetos são renováveis por, no máximo, três períodos de 7 anos, dando um total de 21 anos).

No que diz respeito à contribuição global dos gases de efeito estufa reduzidos pelas atividades de projeto no âmbito do MDL desenvolvidas no Brasil, nota-se que o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) é atualmente o mais relevante, seguido pelo metano (CH<sub>4</sub>) e pelo óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Observa-se também que a maior parte das atividades de projeto desenvolvidas no Brasil está no setor energético, o que explica a predominância do CO<sub>2</sub> na balança de reduções de emissões brasileiras.



**GRÁFICO 27 - Número de Projetos Brasileiros por Escopo Setorial**

Fonte - Ministério de Ciência e Tecnologia. Status atual das atividades de projeto do MDL no Brasil e no Mundo, 2007.

O Conselho Executivo do MDL numerou, baseado no Anexo A do Protocolo de Kyoto, os seguintes setores onde projetos MDL podem ser desenvolvidos, sendo que uma atividade de projeto MDL pode estar relacionada a mais de um setor:

- I. Geração de energia (renovável e não-renovável)
- II. Demanda de energia (projetos de eficiência e conservação de energia)
- III. Distribuição de energia

- IV. Indústrias de produção
- V. Indústrias químicas
- VI. Construção
- VII. Transporte
- VIII. Mineração e produção de minerais
- IX. Produção de metais
- X. Emissões de gases fugitivos de combustíveis
- XI. Emissões de gases fugitivos na produção e consumo de halocarbonos e hexafluoreto de enxofre
- XII. Uso de solventes
- XIII. Gestão e tratamento de resíduos
- XIV. Reflorestamento e florestamento
- XV. Agricultura

Além da divisão por setor, as atividades de projeto estão separadas em pequena e larga escala. São consideradas de pequena escala as seguintes atividades de projeto:

- atividades de projeto de energia renovável com capacidade máxima de produção equivalente a até 15 MW;
- atividades de projeto de melhoria da eficiência energética, que reduzam o consumo de energia do lado da oferta e/ou da demanda, até o equivalente a 15 GWh por ano;
- outras atividades de projeto que tanto reduzam emissões antrópicas por fontes quanto emitam diretamente menos do que 15 Kt equivalentes de dióxido de carbono por ano.

As outras atividades serão, então, classificadas como atividades de projeto de larga escala. No Brasil, 57% dos projetos são de larga escala, e os 43% restantes de pequena escala.

Vislumbra-se, então, a possibilidade do enquadramento do presente trabalho, desde que colocado em prática em escala industrial, no setor II – Eficiência Energética -, uma vez que, de acordo com o Conselho Executivo do MDL,

esta categoria compreende qualquer medida de eficiência energética e troca de combustível executada em uma única indústria ou mineradora (...). Abrange atividades de projetos que

visem, primeiramente, à eficiência energética. Entre os exemplos estão as medidas de eficiência energética (como motores eficientes), medidas de troca de combustível (como a troca de vapor ou ar comprimido por eletricidade) e medidas de eficiência para processos industriais ou de mineração específicos (como fornalhas de aço, secagem de papel, secagem de tabaco, etc.). As medidas podem substituir, modificar ou modernizar os equipamentos existentes ou ser adotadas em novas instalações. As economias agregadas de energia de um único projeto não podem exceder o equivalente a 60 GWh<sub>e</sub> por ano. Uma economia total de 60 GWh<sub>e</sub> por ano equivale a uma economia máxima de 180 GWh<sub>th</sub> por ano de consumo de combustível.

Portanto, ao agregar valor comercial aos resultados de redução de emissões, o MDL confere, de imediato, maior competitividade às práticas de conservação e uso de fontes renováveis de energia. No momento em que o país é pressionado pelo aumento da demanda por recursos energéticos (em especial de eletricidade), abre-se um importante leque de novas oportunidades de absoluta consistência econômica e ambiental, que poderão ser decisivas para a oferta dos recursos energéticos necessários ao desenvolvimento e à urgente diminuição das desigualdades regionais do Brasil.

O MDL se mostra, também, um instrumento poderoso para a difusão e aquisição de tecnologias mais produtivas e “limpas” que, em outro contexto, teriam custos de transferência e aquisição bem mais altos. O interesse geral na eficiência dos resultados dos projetos de MDL abre uma porta importante de acesso a práticas inovadoras e modernas, resultando em evidentes ganhos de produtividade e competitividade em todo o país.

---

## **CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS**

---

### **3.1. MATERIAIS UTILIZADOS**

#### **3.1.1. Resíduo proveniente do craqueamento catalítico do petróleo**

O resíduo utilizado foi o mesmo estudado por FAJARDO (2005), exceto pela cominuição mecânica que o material do presente trabalho sofreu. Portanto, aqui serão apresentados dados resumidos.

##### *3.1.1.1. Introdução*

No processo de refinamento do petróleo são gerados diversos tipos de resíduos, sendo um deles um catalisador utilizado para quebrar cadeias de hidrocarbonetos em duas ou mais moléculas. Esse catalisador é formado por uma zeólita sintética, composta basicamente de sílica e alumina, que apresenta elevada superfície específica, principalmente devido a sua porosidade, como matriz ativa.

O processo de craqueamento é dado da seguinte maneira: o gasóleo é injetado em um reator cilíndrico vertical (“riser”) sob a forma de gotículas por um bico dispersor e entra em contato com um pó catalisador (zeólita). A alta temperatura vaporiza o gasóleo e em contato com o catalisador ativa a reação de catálise. A mistura é então impulsionada para cima por vapor d’água aquecido, e a produção de gasolina e outros produtos nobres – na forma de gases – ocorre seqüencialmente ao longo do “riser”. A reação gera também um subproduto indesejável, o coque, que recobre o catalisador e diminui o rendimento do processo. Na saída do reator, a mistura de gases e catalisador recoberto de coque é direcionada para um outro aparelho, o ciclone, que inicia o processo de recuperação do catalisador.

O ciclone é formado por um cilindro vertical com um cone na parte inferior e imprime alta velocidade de rotação à mistura. A força centrípeta faz com que o catalisador se separe dos gases, que escapam pela área superior do ciclone para serem recolhidos e

reaproveitados. O catalisador com coque passa pelo cone inferior e chega a outro aparelho denominado “*stripper*”, que capta o resíduo de gasolina impregnado no catalisador e, finalmente, chega ao regenerador e entra em combustão à temperatura de 700°C. O tratamento queima o coque e regenera o catalisador, possibilitando então que ele seja reaproveitado em uma nova etapa de craqueamento. Para que seja mantida a atividade catalítica, parte dos catalisadores com baixa atividade precisa ser substituída por um novo catalisador.

O catalisador removido é denominado Catalisador Equilíbrio (Ecat), resíduo utilizado no presente estudo. Alguns catalisadores são regenerados e coletados à parte por um precipitador eletrostático, sendo então chamados de Catalisador Precipitador Eletrostático (Epcat). Estes resíduos gerados no processo de craqueamento do petróleo tornam-se poluentes em potencial devido principalmente a três fatores:

- teor considerável de metais pesados;
- elevada acidez;
- presença de compostos altamente cancerígenos nos depósitos carbonáceos (coques) remanescentes.

Estima-se que a produção mundial de zeólita sintética seja da ordem de 1,5 milhões t/ano, sendo grande parte destinada à manufatura de detergentes e cerca de 1/3 do total aos processos catalíticos, segundo LUZ (1995). A produção brasileira, pela Fábrica Carioca de Catalisadores, é de cerca de 25 mil t/ano, sendo integralmente destinada à síntese de catalisadores utilizados no craqueamento do petróleo.

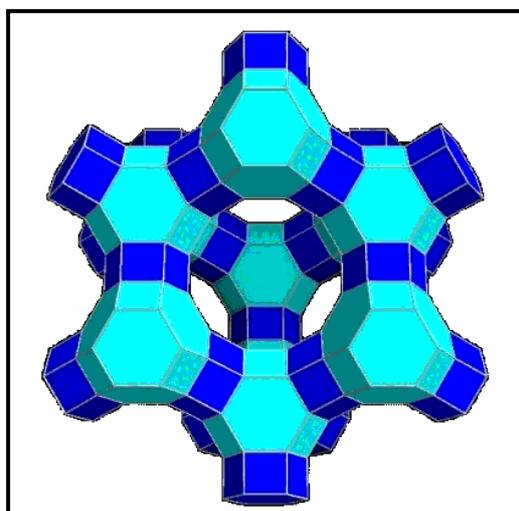
### 3.1.1.2. Zeólitas

O termo zeólita (do grego *Zhéō* e *Lithos* – pedra que ferve) tem sua origem no século XVIII, quando foi constatado que certos materiais, quando calcinados a elevadas temperaturas, pareciam simultaneamente fundir e ferver com a abundante liberação de vapor de água. Entretanto, somente na segunda metade do século XIX e início do XX começaram a surgir os primeiros trabalhos sobre as suas propriedades de troca iônica e de adsorção.

As zeólitas são aluminossilicatos hidratados de metais alcalinos ou alcalinos terrosos, principalmente sódio, potássio, magnésio e cálcio. Estão estruturadas em redes cristalinas tridimensionais compostas de tetraedros e unidas nos vértices através de átomos de oxigênio.

A maior aplicação das zeólitas é na área da catálise heterogênea, vindo a substituir os catalisadores clássicos de sílica-alumina amorfa. Embora exista uma enorme gama de zeólitas naturais e sintéticas, apenas um número reduzido teve sucesso em catálise, destacando-se a zeólita Y, a mordenite e, mais recentemente, as zeólitas da série ZSM. No “cracking” catalítico utilizam-se as zeólitas tipo Y adicionadas de cátions de terras raras para obter maior estabilidade e atividade. Cerca de 90% das unidades industriais que utilizam zeólitas são do tipo FCC (*fluid catalytic cracking*).

Quimicamente, as zeólitas englobam aluminossilicatos hidratados de metais alcalinos ou alcalinos terrosos (principalmente sódio, potássio, magnésio e cálcio), estruturados em redes cristalinas tridimensionais, compostas de tetraedros do tipo  $TO_4$  ( $T = Si, Al, B, Ge, Fe, P, Co, etc$ ) unidos nos vértices através de átomo de oxigênio. Nas zeólitas mais comuns, na fórmula  $TO_4$ , o T representa o Si ou o Al. (FAJARDO, 2005)



**FIGURA 21** – Estrutura da zeólita  
FONTE: <http://server2.iq.ufrj.br/larhco/zeo.gif>

A estrutura das zeólitas apresenta canais e cavidades interconectadas de dimensões moleculares, nas quais se encontram os íons de compensação, moléculas de água ou outros adsorvatos e sais, conferindo ao material uma superfície interna muito grande,

quando comparada à sua superfície externa. Dessa forma, as zeólitas apresentam propriedades de grande importância para os processos industriais, como: alto grau de hidratação; baixa densidade e grande volume de vazios quando desidratada; propriedades de troca catiônica; canais uniformes nos cristais desidratados; condutividade elétrica; estabilidade da estrutura cristalina quando desidratada; adsorção de gases e vapores e propriedades catalíticas.

### 3.1.1.3. Estudos do Ecat como pozolana

PAYÁ *et al* (1999; 2002) avaliaram a viabilidade técnica da utilização do Ecat proveniente de uma refinaria na Espanha na produção de argamassas. A fração de Ecat com diâmetro maior que 20  $\mu\text{m}$  foi retirada por peneiramento, e o material não retido foi então moído 40 minutos em moinho de bola. Os resultados demonstraram que as argamassas aditivadas com o resíduo apresentam menor trabalhabilidade do que sem o mesmo, sendo tal comportamento explicado pela alta superfície específica do Ecat ( $SE=83000 \text{ m}^2/\text{kg}$ ), a qual provoca uma maior absorção de água. Observou-se que, como esperado, a moagem melhorou as suas propriedades pozolânicas. Todas as argamassas contendo o resíduo moído apresentaram resistência à compressão maior do que a argamassa de controle, sendo que o máximo valor de resistência foi encontrado para amostras com 10 e 15% de substituição do cimento pelo resíduo moído. Segundo esses autores, misturas contendo alta porcentagem de substituição (25 a 30%) do cimento pelo Ecat apresentam menor trabalhabilidade, alta porosidade e menor teor de hidróxido de cálcio disponível para a formação dos silicatos de cálcio hidratados, já que grande parte do cimento foi substituído pelo resíduo. Um fato interessante foi a manutenção da densidade real dos grãos de Ecat após a moagem ( $d_a = 2,45$  e  $d_d = 2,45$  a  $2,51$ ), o que indica que a estrutura cristalina da zeólita a nível molecular não foi afetada pela moagem.

PACEWSKA *et al* (2002) analisaram o efeito da utilização de resíduos catalíticos no processo de hidratação de pastas de cimento com relação ao tamanho do grão. Porcentagens variáveis de Epcat (o tamanho médio dos grãos igual a 34  $\mu\text{m}$ ) e Ecat (diâmetro médio de 76  $\mu\text{m}$ ) foram adicionadas como substitutos parciais do cimento ou da areia. Foram preparadas pastas com fator água/cimento constante igual a 0,5. Os resultados obtidos mostraram que o Epcat apresentou maior atividade pozolânica e que quando utilizado em baixa quantidade (5 a 10% em massa) pode ser considerado

como substituto do cimento. Porém, quando utiliza-se 20% de Epcat em substituição ao cimento reduz a resistência das argamassas. Entretanto, quando usado como substituto da areia fornece resistência mais alta do que a de referência, obtendo-se neste caso os melhores resultados.

SUE *et al* (2000) estudaram o Ecat e o Epcat como substitutos de parte do cimento utilizado na fabricação do concreto sem perda de resistência. As análises mostraram que o Ecat apresenta maior superfície específica que o Epcat (249,65 contra 98,77 m<sup>2</sup>/g). Por outro lado, o Epcat apresenta maior quantidade de metais e de água que o Ecat, além de ser mais ácido. Assim, o Epcat absorve mais água. Foram testadas argamassas com diferentes valores da relação água/cimento (w/c) – 0,55, 0,485 e 0,42 – e variados teores de substituição de cimento por Ecat ou Epcat (0, 5, 10 e 15%). Os resultados obtidos foram os seguintes: Com 5% de substituição de cimento por Ecat, para todos os teores de água, houve um pequeno incremento nas resistências em relação ao grupo de controle para 7 e 56 dias. Para teores de 10 e 15% de Ecat, obteve-se ligeira diminuição de resistência para 7 dias para todas as variações da relação água/cimento, sendo que para w/c = 0,55 e w/c = 0,485 as resistências aumentaram levemente em 56 dias. Somente para w/c = 0,42 é que mesmo aos 56 dias não houve aumento de resistência com relação à argamassa de controle. Já em argamassas com introdução de Epcat obteve-se aumento de resistência para 5, 10 e 15% de substituição do cimento para todos os teores de água, tanto para pequenos quanto grandes períodos de cura, exceto para w/c = 0,42 e Epcat = 15%, que apresentou queda de resistência a longo prazo provavelmente devido à quantidade insuficiente de água na mistura. Percebeu-se também que as argamassas substituídas com Epcat apresentaram maiores resistências do que aquelas substituídas com Ecat, possivelmente porque as partículas do primeiro são menores e, conseqüentemente, melhor distribuídas na argamassa do que as partículas de Ecat. Portanto, conclui-se que é viável a substituição de até 15% do cimento presente em argamassa sem prejuízo de sua qualidade. Na verdade, com a substituição é possível obter um aumento de cerca de 15% na Resistência à Compressão Simples.

WU *et al* (2003) estudaram o aproveitamento do resíduo catalítico da China Petroleum como substituto parcial do cimento Portland na produção de argamassas. As porcentagens de substituição do cimento pelo Epcat foram de 0, 5, 10, e 15% e as relações água/sólidos (a/s) foram de 0,2, 0,25 e 0,3. Uma quantidade adequada de

surperplastificante era adicionada em cada mistura para garantir a trabalhabilidade. Os resultados obtidos indicaram que a presença do Epcat aumenta significativamente a resistência à compressão das argamassas. A resistência à compressão das argamassas foi maior para a relação água/mistura de 0,25, efeito esse que aumentou com a quantidade do catalisador adicionado. Argamassas com a relação a/s de 0,25 incorporadas com 15% de Epcat apresentavam resistência a compressão de 92,3 MPa no 28º dia de cura. Quando a relação a/s foi de 0,2 e a adição de Epcat era de 10% ou maior a resistência diminuiu, fato segundo os autores explicado pelo maior conteúdo de surperplastificante gasto para alcançar a mesma trabalhabilidade que conseqüentemente afetou negativamente a resistência. De acordo com a pesquisa, pôde-se concluir que o melhoramento das propriedades mecânicas das argamassas incorporadas de Epcat deve-se à alta atividade pozolânica do resíduo e, principalmente, pelas partículas do Epcat serem de tamanho muito pequeno e atuarem como um “*filler*” reduzindo os vazios entre a pasta do cimento e o agregado.

HSU *et al.* (2001) estudaram a utilização de Epcat em argamassas superplastificantes e observaram que elas apresentam resistência à compressão maior do que sem a adição do resíduo. Foram analisadas pastas com substituição de cimento por Epcat de 0, 5, 10 e 15% em massa. No terceiro dia de cura foi observada por microscopia a formação de Etringita e com o passar dos dias o aparecimento de monossulfato. Com 28 dias podem ser encontradas ambas as formas supracitas. Foi, então, verificado que a adição de 10 a 15% de Epcat provoca um aumento (aos 7 e 28 dias de cura) em relação à argamassa de controle de 20 a 30%. Outra conclusão do estudo foi que, quanto mais fina a pozolana, mais rápida é a sua reação com o hidróxido de cálcio, provocando, portanto, o aumento da resistência e da durabilidade dos materiais aos quais são incorporados.

HSU *et al* (2003) estudaram a utilização de Ecat e Epcat como material pozolânico em argamassas de alta performance e os resultados foram comparados ao da microsilica. A primeira observação do estudo foi com relação à elevada superfície específica tanto do Ecat (114 m<sup>2</sup>/g) quanto do Epcat (47,3 m<sup>2</sup>/g), principalmente quando relacionada ao tamanho médio de suas partículas (67,2 e 1,7 µm, respectivamente). Foram então confeccionadas argamassas com a mistura de água, cimento, areia e aditivos (pozolanas), além da argamassa de controle, i.e, sem aditivos. A substituição do cimento pelo material pozolânico foi de 10% em volume. Foi

também acrescentada uma pequena quantidade de superplastificante para conferir melhor trabalhabilidade às misturas. Foi calculado então o Índice de Atividade (AI) dos resíduos estudados, tomando como referência a argamassa de controle, ou seja, dividindo-se a Resistência à Compressão Simples da argamassa de interesse pela da de controle. Para o Ecat encontrou-se AI = 86, já para o Epcat AI = 91 e para a microsilica obteve-se AI = 92. Os autores acreditam que o menor Índice de Atividade do Ecat se deva ao maior tamanho de suas partículas. A pesquisa mostrou também que, quando comparadas argamassas com e sem resíduos, o acréscimo de Epcat e Sílica Ativa para tempos curtos de cura (3, 7 e 28 dias) confere um aumento de até 36% de resistência à compressão ao material. Já para a adição de Ecat, observou-se que o aumento de resistência se dá em tempos de cura mais longos (56 e 91 dias).

Já em 2004, HSU *et al* pesquisaram sobre os efeitos da calcinação do Ecat na resistência à compressão dos materiais cimentícios. Foram preparadas argamassas e concretos com água, cimento, areia e/ou brita para controle e posteriormente adicionado Ecat com e sem tratamento (calcinação). Ficou claro que o Ecat calcinado a 650°C por 1h apresentou um maior Índice de Atividade (AI) do que aquele sem prévio tratamento. Segundo os autores, isso se deve a principalmente dois fatores: a mudança na mineralogia do material e a alteração das características das partículas. As argamassas com incorporação de 10% de Ecat *in natura* apresentaram valores de resistência ligeiramente menores do que da argamassa de controle. Já aquelas com adição de Ecat calcinado tiveram um aumento de até 13% em relação à argamassa de controle, devido ao aumento da atividade pozolânica causada pela calcinação. Foi testada também uma argamassa com 10% de Ecat calcinado e moído, causando uma redução do diâmetro médio de suas partículas de 67,4 para 3,2 mm. O resultado foi uma argamassa com uma resistência 26% superior à de controle. Já para o concreto, foram analisados aqueles com 10% de Ecat sem tratamento (C0), com 10% de Ecat calcinado (C1) e com 10% de Ecat calcinado e moído (C2). Os resultados obtidos foram aumentos de até 11% na resistência de C1 em relação à C0 e de 16% de C2 também em relação à C0, todos com 7 dias de cura.

#### **3.1.1.4. Características do Ecat estudado**

O resíduo foi fornecido pela Petrobrás para que fosse estudada uma forma de reaproveitamento. A coleta do material foi realizada conforme a NBR 1007 (ABNT,

1987) – Amostragem de Resíduos - em amostras contidas em “big bags” de 1 tonelada.

Como a composição do material é bastante variável, devido à inconstante quantidade de coque presente na mistura, optou-se pela utilização de um único lote, para que todas as características permanecessem constantes. Verificou-se que o resíduo utilizado apresenta maior teor de carbono, isto é, maior quantidade de coque do que o material previamente estudado por FAJARDO (2005). Este fato ocasiona um abrandamento na potencial atividade pozolânica do resíduo.

As amostras foram previamente secas em estufa a 105°C para a determinação de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, bem como de seu potencial de risco ambiental. Para efeito de comparação, são apresentados também resultados obtidos por outros pesquisadores.

#### 3.1.1.5. Características físicas

##### Análise granulométrica

Como já foi anteriormente citado, o material foi submetido à cominuição mecânica, utilizando para tal moinho de barras. O resíduo foi moído até que sua totalidade fosse passante na peneira 325, ou seja, até que o diâmetro de suas partículas ficasse menor que 45 µm. Portanto, tornou-se dispensável a obtenção da curva granulométrica do material.

##### Massa específica real

A massa específica real foi determinada pelo método convencional do picnômetro (DNER 093/94) e o valor obtido foi de 2,54 g/cm<sup>3</sup>. A tabela a seguir mostra resultados obtidos em outros estudos.

**TABELA 11**

Comparativo da Massa Específica Real do Ecat

<b>Resíduo Analisado</b>	<b>Picnômetro (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Ecat - Presente estudo	2,54
Ecat - SU <i>et al.</i> (2000)	2,48
Epcat - SU <i>et al.</i> (2000)	2,34

### Massa específica unitária

A massa específica unitária do Ecat foi determinada de acordo com a NBR 7251 (ABNT 1982) e o valor encontrado foi de  $0,73 \text{ g/cm}^3$ .

### Superfície específica

A superfície específica do material em estudo foi determinada pela adsorção de  $\text{Ca(OH)}_2$  e o valor encontrado foi de  $195 \text{ m}^2/\text{g}$ . Na tabela abaixo estão valores para efeitos de comparação.

**TABELA 12**

Comparativo da Superfície Específica do Ecat

<b>Resíduo Analisado</b>	<b>Superfície Específica (<math>\text{m}^2/\text{g}</math>)</b>
Ecat Moído – Presente estudo	195
Ecat <i>in natura</i> – Presente estudo	210
Ecat – FAJARDO (2005)	254
Ecat – SU <i>et al.</i> (2000)	248
Epcat – SU <i>et al.</i> (2000)	234
Ecat – HSU <i>et al.</i> (2005)	114

Era de se esperar que, com a cominuição do material e conseqüente redução do diâmetro de suas partículas, sua superfície específica aumentasse em relação ao material “*in natura*”. Porém, não foi o que se verificou, constatando-se na verdade uma redução da mesma. Essa diminuição de superfície específica pode ser explicada pela possível perda de porosidade interna do material em decorrência da moagem sofrida.

#### 3.1.1.6. Características químicas

### Análise Química

De acordo com a análise química realizada no programa de Engenharia Química da COPPE – Núcleo de Catálise (NUCAT), por meio de fluorescência de Raios X, determinou-se a composição química do resíduo apresentada a seguir.

**TABELA 13**

Composição química do resíduo (Ecat)

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO</b>			
<b>Componentes Químicos (%)</b>	<b>Ecat (Presente estudo)</b>	<b>Ecat (SUE et al, 2000)</b>	<b>Epcat (SUE et al, 2000)</b>
SiO <sub>2</sub>	53,9	51,69	45,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,0	41,12	32,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	1,08	3,04
Na <sub>2</sub> O	9,4	0,42	0,37
CaO	-	1,73	2,30
K <sub>2</sub> O	-	0,06	0,06
SO <sub>3</sub>	-	0,48	8,09
MgO	-	0,41	1,1
Perda ao Fogo	4,04	3,31	7,57

Apesar de a composição química ser a mesma do Ecat utilizado por FAJARDO (2005), por serem de lotes distintos, a perda ao fogo determinada no Laboratório de Química da Geotecnia foi diferente para os dois materiais (tabela 14). Isso reflete a quantidade de carbono presente no Ecat, caracterizando uma maior ou menor pureza do material. Quanto maior a perda ao fogo, maior a quantidade de carbono presente e menor a pureza.

**TABELA 14**

Comparativo da Perda ao Fogo

<b>Material</b>	<b>Perda ao fogo (%)</b>
Ecat (presente estudo)	4,04
Ecat (FAJARDO, 2005)	3,67

A diferença da perda de peso entre os dois lotes de Ecat (FAJARDO, 2005 *versus* presente estudo) é igual a 0,37%, valor aparentemente pequeno. Entretanto, como o carbono é finamente dividido e admitindo-se sua superfície específica igual a 800 m<sup>2</sup>/g, tem-se que seu poder de cobertura é cerca de 300 m<sup>2</sup>/g, valor mais que suficiente para recobrir toda a superfície exposta dos grãos de Ecat (195 m<sup>2</sup>/g). Esse recobrimento é um dos responsáveis pela redução da atividade pozolânica do material em estudo.

### 3.1.1.7. Características mineralógicas

#### Difração de raio X (DRX)

Ainda segundo FAJARDO (2005), a análise mineralógica do Ecat realizada no Programa de Engenharia Química da COPPE/UFRJ – Núcleo de Catálise (NUCAT) mostra resultados que correspondem à estrutura cristalina de uma zeólita do tipo Y, podendo-se ainda identificar minerais como a caolinita e o quartzo.

### 3.1.1.8. Características ambientais

#### Potencial de risco ambiental

O resíduo foi submetido a ensaios de lixiviação e solubilização no laboratório de Geotécnica da COPPE/UFRJ de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004), respectivamente, para que fosse avaliado o potencial risco ambiental do material. Os resultados mostraram que o resíduo pode ser classificado como Classe II B – inerte, uma vez que nenhum dos seus constituintes apresentou concentração superior ao permitido. Portanto, o Ecat não é considerado um material tóxico ou perigoso.

**TABELA 15**

Resultados de ensaios de lixiviação e solubilização (Ecat)<sup>2</sup>

METAIS SOLUBILIZADOS			METAIS LIXIVIADOS		
Elemento	Ecat (mg/l)	Limite Máx. no Solubilizado (mg/l)	Elemento	Ecat (mg/l)	Limite Máx. no Lixiviado (mg/l)
Co	N.D.	-	Co	0,007	5,0
Cd	<0,001.	0,005	Cd	N.D.	0,5
Cr	0,001	0,05	Cr	N.D.	5,0
Pb	N.D.	0,05	Pb	N.D.	5,0
Ni	0,01	-	Ni	0,068	-
V	5,15	-	V	0,682	
Cu	N.D.	1,0			
Nb	0,05	-			
Ta	N.D.	-			
W	N.D.	-			
Se	N.D.	-			
As	0,013	-			
Hg	N.D.	-			
Dureza	12	500			

2 (-)= elementos não incluídos na norma. ND = Não detectado, ou seja, se presente, o elemento químico está abaixo do limite de detecção da técnica de análise química (absorção atômica).

### 3.1.2. Cal

No presente estudo, optou-se pela utilização da cal hidratada CH-III, já que esta pode ser obtida sem dificuldade no comércio por preços relativamente baixos. Dessa forma, a CH-III se tornou a mais utilizada na fabricação de artefatos de solo estabilizado. A marca da cal utilizada no estudo foi Vetec/Brasil.

Foi determinado o valor do pH de saturação do  $\text{Ca(OH)}_2$  cujo valor para a temperatura de 25°C é igual a  $\text{pH}=12,4$ , ocorrendo uma variação entre ( $9,06 < \text{pH} < 12,05$ ) no mecanismo experimental.

### 3.1.3. Sulfato de cálcio

Utilizou-se no estudo o Sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) P.A. da marca Vetec/Brasil.

### 3.1.4. Cimento

O cimento utilizado foi o ARI da Holcim. Na tabela 16 estão as propriedades físicas e químicas do material fornecidas pelo fabricante.

**TABELA 16**

Características do cimento utilizado

Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	3,1	
Massa unitária ( $\text{m}^3/\text{g}$ )	0,85	
SE Blaine ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	550	
$\text{pH}_{\text{máximo}}$ (1Ci:5 $\text{H}_2\text{O}$ )	12,63	
CEE [ $\text{mS/cm}$ ]	7,5 – 8,5	
$[\text{Ca(OH)}_2]_{\text{sol}}$ [ $\text{g/l}$ ]	1,30	
Composição química ponderal percentual (%)	$\text{SiO}_2$	53,9
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,4
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	32
	$\text{SO}_4$	6,03

Nota: SE – Superfície Específica

CEE – Condutância Elétrica Específica (Condutividade Elétrica)

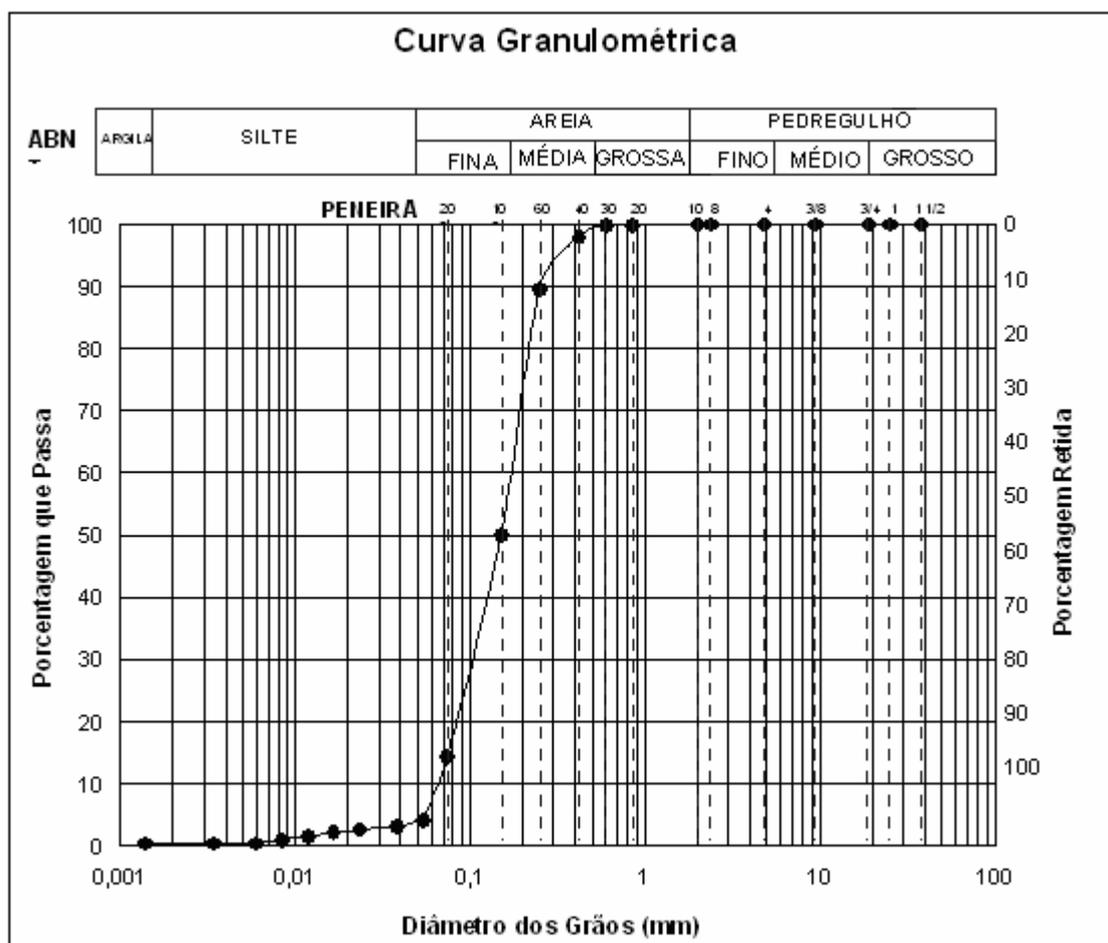


### 3.1.6. Areia

A areia utilizada na pesquisa foi obtida como resíduo do processo de fabricação do vidro da marca Blindex e vidros temperados. É uma areia com alto teor de sílica (SiO<sub>2</sub>). Suas características principais estão listadas a seguir. Para a confecção dos corpos de prova utilizou-se apenas a fração passante na peneira #100 (0,125 mm).

#### Análise granulométrica

Foi verificada a granulometria do resíduo, através do peneiramento e sedimentação, conforme a NBR 7181 (ABNT 1984). A curva granulométrica é apresentada abaixo.



**FIGURA 23** - Curva granulométrica da areia

A massa específica unitária da areia estudada é  $\rho_u = 1,230 \text{ g/cm}^3$  e a massa específica real  $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ .

### Análise química

É importante ressaltar que a areia passa por um processo de purificação para a retirada de todo o ferro residual para então ser utilizada na fabricação de vidro evitando interferência na coloração do produto. Portanto, a areia utilizada apresenta uma quantidade de óxido de ferro III (0,479%) superior à recomendada para produção de vidros (0,1%), sendo por isso não utilizada pela indústria desse material. O grau de pureza da areia estudada é de 99,05% de SiO<sub>2</sub>, segundo análise realizada no Laboratório de Geotecnia da COPPE e mostrada na tabela a seguir.

**TABELA 17**

Composição química da areia

<b>Composto</b>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CoO
<b>Quant (%)</b>	97,05	1,24	0,48	0,02	0,09	0,07	0,17	0,07	0,001	0,045

## **3.2. MÉTODOS E EXPERIMENTOS**

### **3.2.1. Método físico-químico**

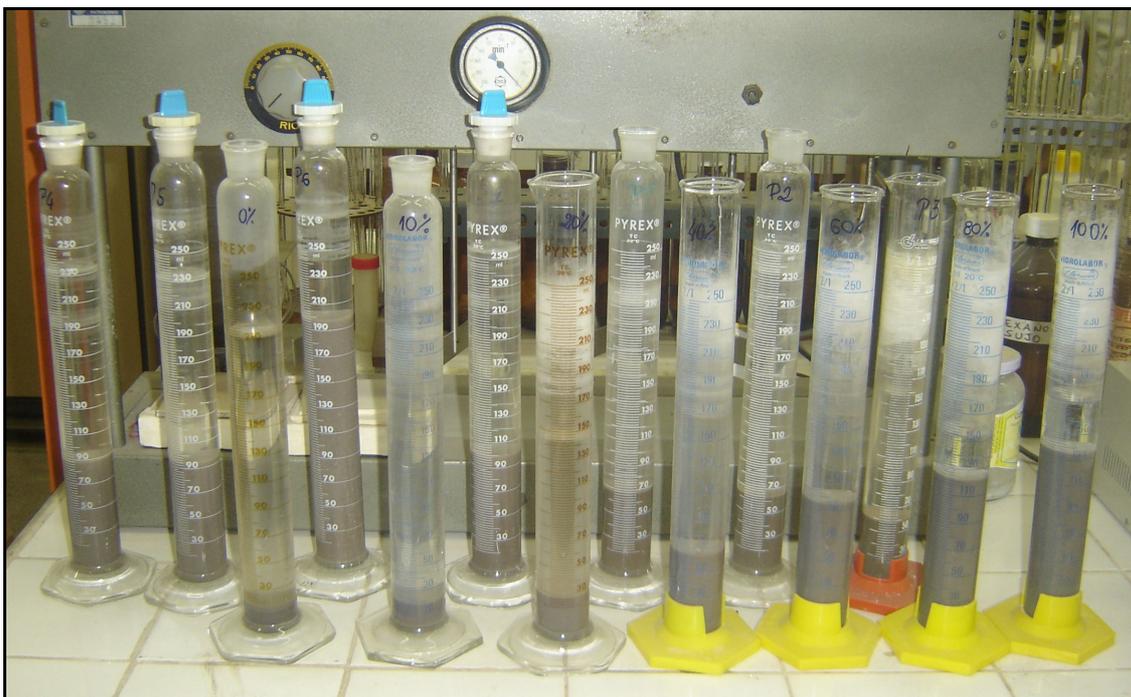
O método físico-químico, concebido pelo indiano CHADA (1971) para a dosagem do solo-cimento, foi posteriormente modificado por CASANOVA e CERATTI (1986) e CASANOVA (1994), que constatou ser possível sua utilização para a determinação da atividade pozolânica.

De acordo com o método, coloca-se 25g de pozolana secos ao ar, destorroados e passando na peneira nº 10 em provetas graduadas (precisão de leitura de 2ml) de 250ml. Porém, considerando-se que o material pozolânico em estudo foi moído e por isso apresentaria uma atividade pozolânica maior, conseqüentemente uma elevada variação volumétrica, optou-se pela colocação de apenas 10g de material na proveta. A seguir, adiciona-se cimento, cal ou ambos, à pozolana. Esta pode ser aditivada com porcentagens variáveis de CaSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, NaOH, CaCl<sub>2</sub>, entre outras substâncias. Introduce-se, então, cerca de 50ml de água destilada em cada proveta, que são em seguida vigorosamente agitadas visando a homogeneização total da mistura. Por fim, o volume é completado novamente com água destilada até alcançar a marca de 150ml, tendo-se o cuidado de lavar as paredes das provetas para que não fique material agarrado.

Após um repouso de 24 horas em bancada isolada de vibrações, realiza-se a primeira leitura do volume aparente ocupado pelo sedimento em suspensão. Depois de cada leitura, utilizando-se uma haste de baquelite agita-se manualmente a suspensão, durante o mesmo intervalo de tempo e com a mesma intensidade em cada proveta. As leituras são então repetidas a cada 24 horas, até que se chegue a valores de leituras constantes ou decrescentes. O tempo de duração do ensaio varia de acordo com o sistema estudado. Para sistemas pozolânicos, varia de alguns dias a semanas, dependendo da reatividade do material.

O teor mínimo recomendado de cimento ou de cal para estabelecer o equilíbrio entre a pozolana e o aditivo, corresponde àquele que apresentar a maior variação volumétrica da suspensão em relação ao seu volume inicial ao longo do período de ensaio.

No presente estudo, objetivando a determinação da atividade pozolânica e do teor mínimo de cal ou cimento, foram testados os sistemas [Ecat + Cal] e [Ecat + Cimento].



**FIGURA 24 - Provetas utilizadas no Método Físico-Químico**

### 3.2.2. Corpos de prova e Resistência à Compressão Simples

Primeiramente foram selecionadas misturas potencialmente ideais, tomando como referência os resultados obtidos pelo Método Físico-Químico, para a confecção de corpos de prova cilíndricos em moldes metálicos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os corpos de prova eram então preenchidos com massa úmida de mistura suficiente para que, quando seca, atingisse uma massa específica aparente seca (MEAS) desejada. Essa quantidade de material úmido ( $M_u$ ) é calculada da seguinte forma:

$$M_u = V \cdot (1 + w) \cdot \rho_d$$

Onde:

$V$  = Volume interno do cilindro metálico (molde);

$w$  = umidade da mistura dividida por 100;

$\rho_d$  = Massa Específica Aparente Seca (MEAS) desejada.

Imediatamente após ser totalmente preenchido, o corpo de prova era submetido a uma compactação (*quasi*) estática, pois sabe-se que a demora na compactação de misturas cimentíceas, com todos os outros fatores iguais, leva a menores valores de massa específica aparente e conseqüentemente de resistência. Por exemplo, sabe-se que no caso do solo-cimento, um atraso de meia hora pode chegar a provocar uma diminuição de 30% ou mais no valor da Resistência à Compressão Simples.



**FIGURA 25** - Corpo de prova (5 x 10) cm e o molde utilizado

Em seguida, procedia-se a extração do corpo de prova do molde com o auxílio de um macaco hidráulico adaptado para tal função.

Os corpos de prova eram então pesados, para que fosse possível determinar precisamente sua MEAS, devidamente identificados, embalados em sacos plásticos e colocados da câmara úmida para cura. O tempo de cura variava entre 7 e 28 dias.

Após 7 ou 28 dias, os corpos de prova eram submetidos ao ensaio de Resistência à Compressão Simples propriamente dito. Foi utilizada uma prensa eletromecânica da marca Wykeham Farrance e a carga foi aplicada com uma velocidade constante de 1,5 mm/min. Quando o corpo de prova se rompia, procedia-se a leitura no anel dinamométrico fixado à prensa com capacidade máxima de 10 toneladas, e esse valor era então convertido para valores de resistência em MPa.



**FIGURA 26** - Rompimento de corpo de prova na prensa eletromecânica

Para cada teor de água utilizado foram confeccionados dois corpos de prova. Adotou-se para o valor de Resistência à Compressão Simples a média da determinação dos dois corpos de prova analisados, desde que não houvesse diferença de mais de 10% entre os resultados. Caso isso ocorresse, mais um corpo de prova era confeccionado e a média era feita com os dois valores que estivessem dentro da margem permitida.

Para se obter o teor de umidade ideal para cada tipo de mistura era feita a chamada Curva de Umidade, que consistia na confecção de corpos de prova de composição idêntica e com a mesma MEAS, variando-se apenas a quantidade de água utilizada. A maior quantidade de água correspondia àquela que provocasse exsudação no corpo de prova ao ser compactado. Já a menor era a mínima necessária para dar coesão à mistura e proporcionar uma trabalhabilidade adequada para a moldagem do corpo de prova. Dessa forma, todos os corpos de prova eram então submetidos ao ensaio de Resistência à Compressão Simples, e aquele que obtivesse o melhor resultado era considerado o teor ótimo de água para aquela mistura.

De forma semelhante, eram confeccionados corpos de prova com mesmo teor de umidade e formulações diferentes, o que possibilitava uma avaliação do comportamento de diversas composições de materiais.

No entanto, esse processo teve que sofrer algumas modificações para atender às necessidades verificadas no decorrer do período, a saber: por ser um resíduo de

composição variável, optou-se pela utilização de um único lote do material, visando à homogeneização dos resultados. Porém observou-se que a quantidade disponível de material era pequena, nos obrigando a adaptar os procedimentos. Foi então construído um molde para a confecção de corpos de prova menores. Tomou-se o cuidado de manter as mesmas proporções do cilindro anterior, optando-se por medidas de 2 cm de diâmetro e 4 cm de altura. Continuou-se utilizando a mesma fórmula de obtenção de Massa Úmida, sendo a única diferença o volume do cilindro. O macaco hidráulico também foi adaptado para extrair adequadamente os corpos de prova. Além disso, modificou-se também a velocidade de aplicação de carga na prensa, uma vez que com uma área menor, o valor da carga que provoca a ruptura do corpo de prova também fica reduzido. Optou-se então pela adoção da velocidade de 0,3 mm/min e de um anel dinamométrico de menor capacidade (cerca de 1 tonelada) para que se obtivesse uma melhor precisão dos resultados.



**FIGURA 27** – Corpos de prova (5x 10) cm e (2 x4) cm

A representatividade do corpo de prova, mesmo com tamanho reduzido, se deve ao fato de que o tamanho máximo das partículas utilizadas é 0,10 mm, isto é, 20 vezes menor do que a menor dimensão do corpo de prova, o que garante a proporcionalidade adequada. Além disso, é fundamental ressaltar que corpos de prova com uma mesma formulação eram sempre mantidos com a mesma dimensão, de forma que a comparação fosse feita corretamente.



**FIGURA 28** – Corpo de prova (2 x 4) cm e o molde utilizado



**FIGURA 29** - Molde utilizado para a confecção de corpo de prova (2 x 4) cm

GOLYNKO-VOL'FSON e SUDAKA já em 1964 se referiam com sucesso ao uso de moldes de magnitude diminuta. Em seu estudo sobre massas cimentantes à base de ácido fosfórico, utilizaram corpos de prova cúbicos com dimensões de 1 x 1 x 1 cm submetidos a cura a temperatura ambiente ou elevada (dependendo do material utilizado) e a ensaios de compressão simples em 1, 3, 7 e 28 dias. Foram analisados 24 misturas, compostas de óxidos, hidróxidos ou fosfatos. Foram obtidas altas resistências, sendo inclusive algumas em curto intervalo de tempo (por exemplo, com a utilização de CuO a temperatura ambiente chegou-se a resistência de  $630 \text{ kg/cm}^2$  em apenas 30 minutos). A conclusão a que os autores chegaram é que a habilidade

dos óxidos manifestarem propriedades cimentantes está diretamente ligada à capacidade iônica do cátion associado, isto é, com a diminuição do potencial iônico, observa-se uma aceleração na reação entre o óxido e o ácido fosfórico. Por outro lado, com o aumento do raio iônico, ocorre uma desaceleração nos processos de interação óxido/ácido fosfórico e de endurecimento da pasta.

Mais recentemente, ALLAHVERDI e GHORBANI (2006), em estudo já citado no presente trabalho, também lançaram mão de moldes de pequenas dimensões. Os corpos de prova de dimensões 2 x 2 x 2 cm eram compostos de 30% cal hidratada e 70% de pozolana natural (Pumicito), com e sem aditivos – NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O e clínquer do Cimento Portland. Os melhores resultados sem aditivos foram de 7,25 MPa aos 50 dias e 10,03 MPa aos 90 dias. Já com a introdução dos compostos supracitados chegou-se, com 90 dias, a uma resistência de 19,83 MPa, utilizando 6% de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

---

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

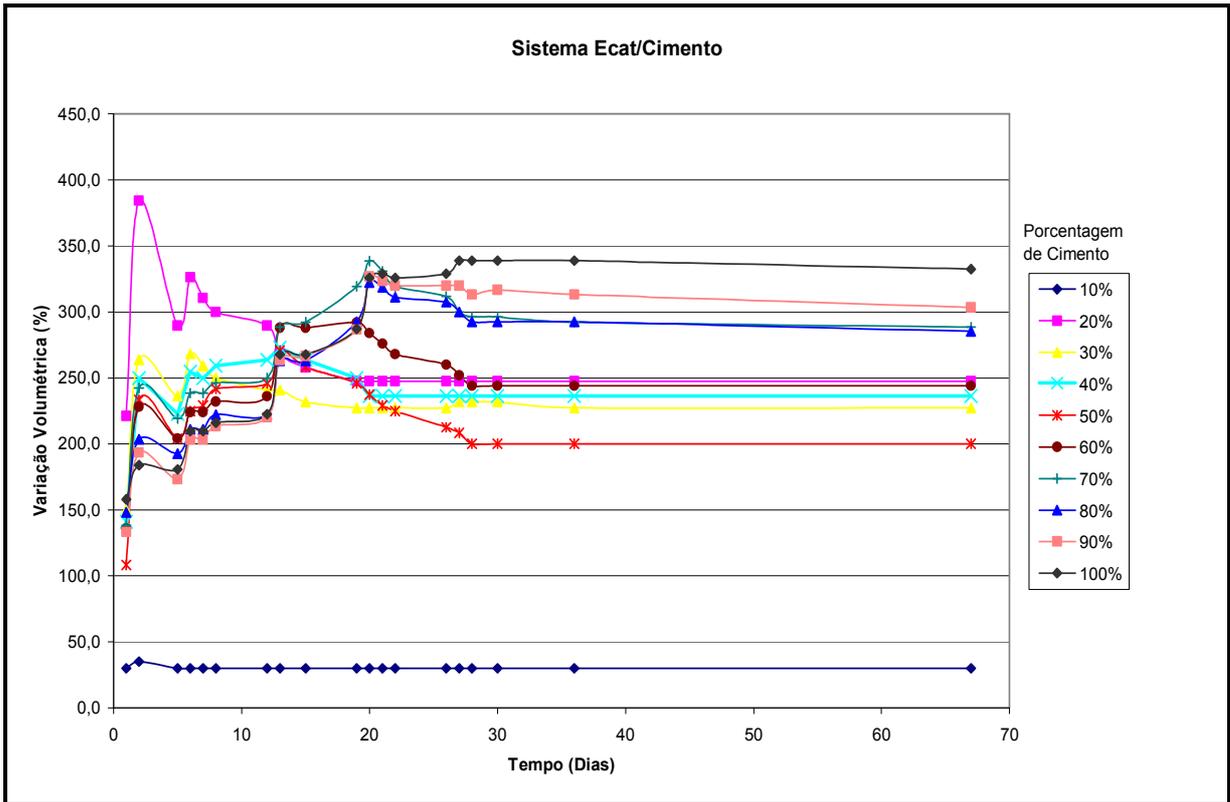
---

### **4.1. MÉTODO FÍSICO-QUÍMICO**

#### **4.1.1 Sistema Ecat/cimento**

O sistema Ecat/cimento vem sendo estudado e reportado na literatura por apresentar nítida atividade pozolânica. Foram colocados 10 g de Ecat e porcentagens crescentes de cimento nas provetas graduadas. Os gráficos 30 e 31 mostram os resultados obtidos através da utilização do método físico-químico.

O gráfico 30 mostra a variação volumétrica de cada quantidade de cimento adicionada com o passar do tempo. Observa-se que as reações entre o Ecat e o cimento ocorrem mais acentuadamente nos 10 primeiros dias. Após 30 dias, verifica-se que o Ecat já consumiu toda a cal presente no cimento (processo de hidrólise), o que faz com que a variação volumétrica tenha um comportamento tendendo à constante.



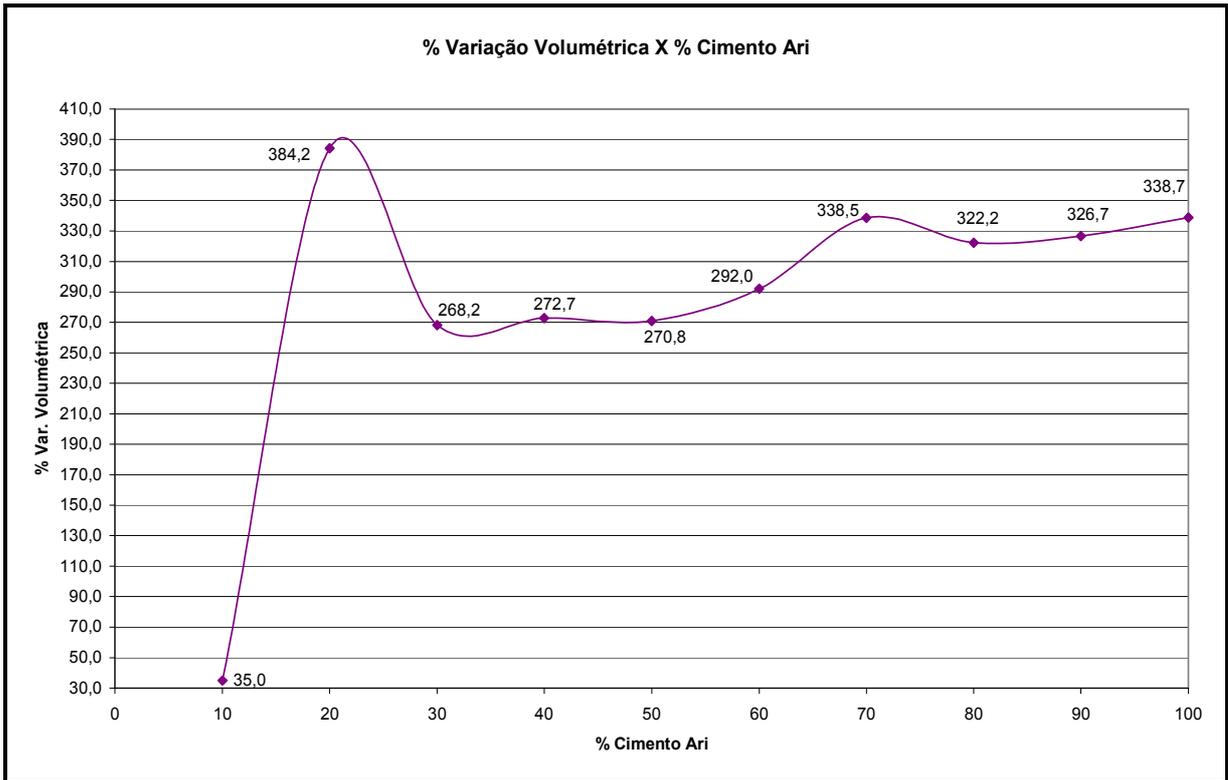
**GRÁFICO 28** – Cinética da Variação volumétrica X tempo de mistura do sistema Ecat/Cimento

De acordo com o gráfico 28, conclui-se que o teor de 20% de cimento foi o que proporcionou maior variação volumétrica (384%). Nos estudos de FAJARDO (2005), os melhores teores encontrados foram 60% e 70% (variação volumétrica de 250%). Essas diferenças podem ser explicadas da seguinte forma: a moagem do Ecat no presente estudo provoca o aumento da variação volumétrica e a redução da superfície específica, o que implica na perda parcial de reatividade, com a consequente obtenção do equilíbrio químico para um menor teor de cimento.

**TABELA 18**

Variação volumétrica máxima X teor de cimento no sistema Ecat/Cimento

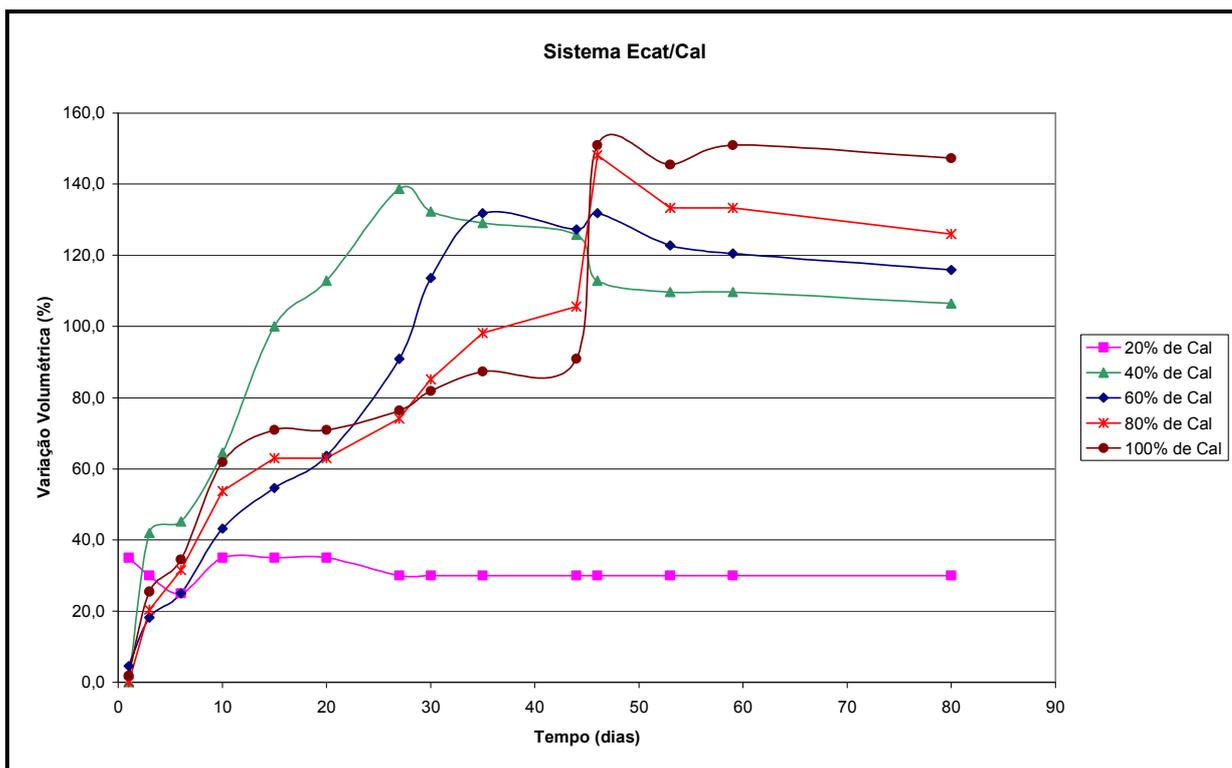
%Cimento	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
% $\Delta V$	35	384	268	273	271	292	338	322	327	339



**GRÁFICO 29** – Variação volumétrica X teor de cimento no sistema Ecat/Cimento

#### 4.1.2. Sistema Ecat/cal

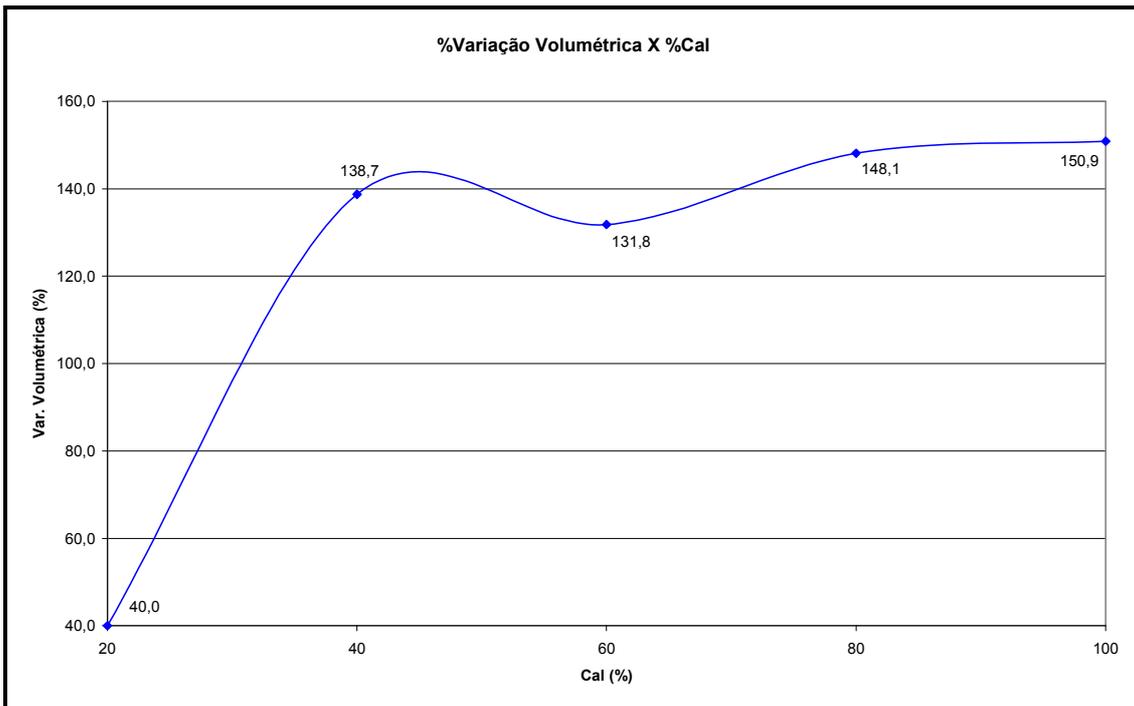
No sistema Ecat/cal foi possível observar uma demora maior na ocorrência das reações quando comparado ao sistema Ecat/cimento, como mostra o gráfico 32. Entretanto, isso está de acordo com o esperado, pois no sistema Ecat/cimento, além da ação da cal presente, existe aquela intrínseca ao cimento.



**GRÁFICO 30** – Cinética da variação volumétrica X tempo de mistura do sistema Ecat/cal

O teor de cal adotado como mínimo foi de 40%, pois embora outros teores tenham apresentado maior variação volumétrica, isso ocorreu em um tempo muito longo (mais de 40 dias). A variação de 138,7% alcançada pela adição de 40% de cal se deu em cerca de 25 dias, o que foi considerado mais apropriado por ser uma reação mais rápida.

Constatou-se que a variação máxima de volume considerada obtida com a adição de cal (138%) foi ligeiramente menor que a obtida por FAJARDO (208%), apesar de o material ter sofrido cominuição mecânica, fato que possivelmente está ligado à perda de parte da superfície específica interna. De fato, o valor desta medida pela adsorção de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  foi 22% menor que a do Ecat *in natura*. É interessante notar, contudo, que o teor de cal indicado pelo método físico-químico (40%) foi o mesmo para ambos os materiais – moído e *in natura*.



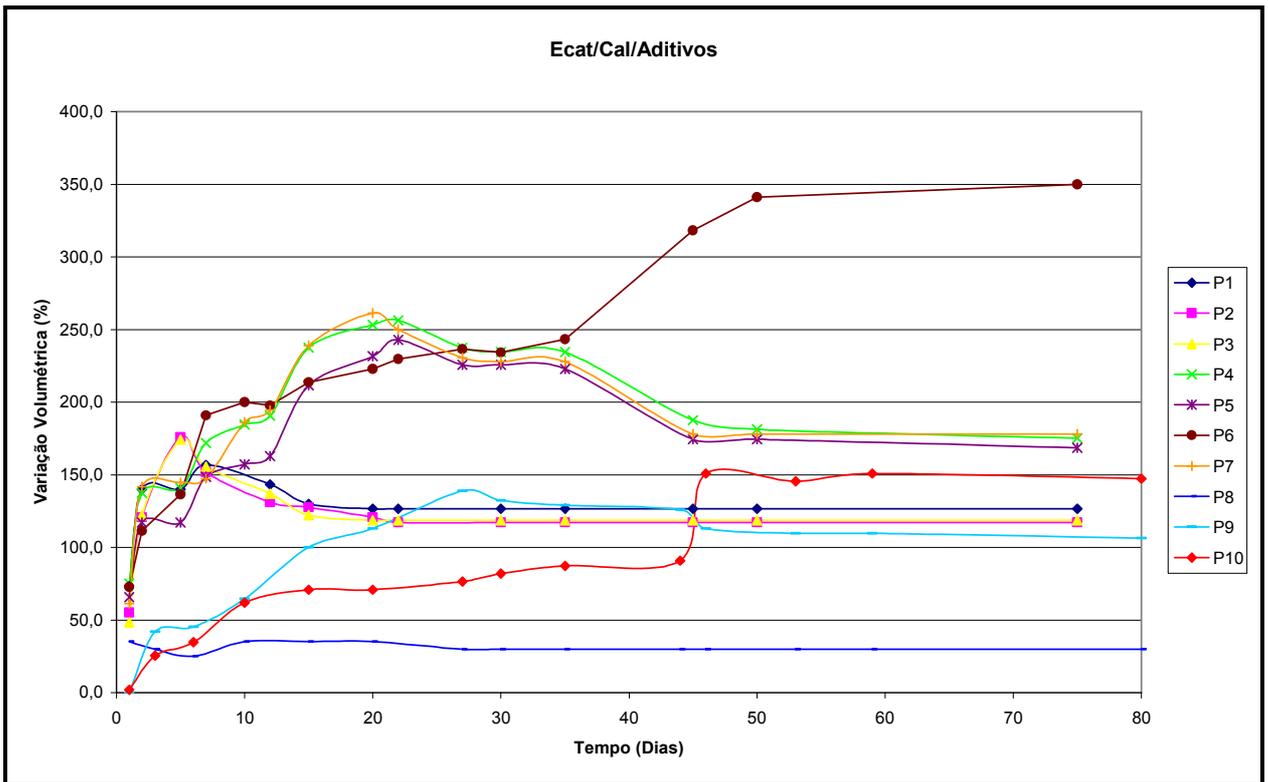
**GRÁFICO 31** – Variação volumétrica X teor de cal no sistema Ecat/Cal

Ainda no sistema Ecat/cal foram estudadas adições de dois compostos para verificar como estes interferiam na reatividade da mistura. Os aditivos utilizados foram o Sulfato de Cálcio bi-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e o Aluminato de Sódio ( $\text{NaAl}_2\text{O}$ ). Os teores de cal escolhidos para comparação foram de 20%, 40% e 100% e, em cima desses valores, o método físico-químico foi então realizado com três tipos de misturas:

- Ecat + Cal
- Ecat + Cal + 4% de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Ecat + Cal + 4% de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  + 3%  $\text{NaAl}_2\text{O}$

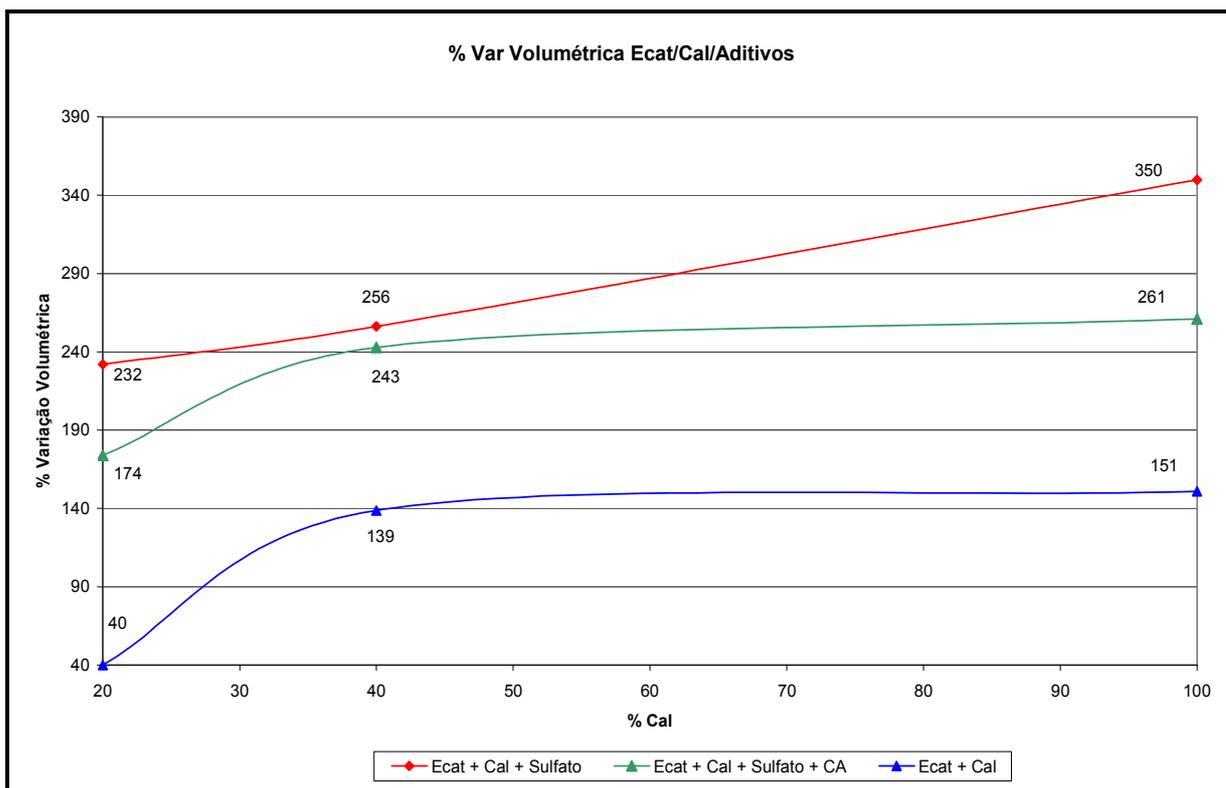
No gráfico 32<sup>3</sup> são mostrados os resultados da variação volumétrica com o tempo. Observa-se que as reações são mais intensas nos primeiros 10 dias.

- 
- 3
- P1 = Ecat + 20% Cal + 4%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
  - P2 = Ecat + 20% Cal + 10%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
  - P3 = Ecat + 20% Cal + 10%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  + 3%  $\text{NaAl}_2\text{O}$
  - P4 = Ecat + 40% Cal + 4%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
  - P5 = Ecat + 40% Cal + 4%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  + 3%  $\text{NaAl}_2\text{O}$
  - P6 = Ecat + 100% Cal + 4%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
  - P7 = Ecat + 100% Cal + 4%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  + 3%  $\text{NaAl}_2\text{O}$
  - P8 = Ecat + 20% Cal
  - P9 = Ecat + 40% Cal
  - P10 = Ecat + 100% Cal



**GRÁFICO 32** – Variação volumétrica X tempo de mistura do sistema Ecat/Cal/Aditivos

Já no gráfico 33 pode-se ter uma visão mais clara de como os aditivos interferem positivamente no comportamento do sistema. Embora a introdução de Sulfato e Aluminato cause uma melhora nos resultados, a adição somente de Sulfato é a que proporciona maior aumento de variação volumétrica, correspondendo a uma maior atividade pozolânica, a qual por sua vez está ligada à formação do trissulfato aluminato de cálcio, a etringita ( $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ).



**GRÁFICO 33** – Variação volumétrica X teor de cal no sistema Ecat/Cal/Aditivos

**TABELA 19**

Variação volumétrica X teor de cal no sistema Ecat/Cal/Aditivos

Teor de Cal	Variação Volumétrica (%)		
	Ecat + Cal	Ecat + Cal + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	– Ecat + Cal + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + $\text{NaAl}_2\text{O}$
20%	40	232	174
40%	139	256	243
100%	151	350	261

Olhando atentamente para os dados da tabela, mais especificamente para o teor de 40% de cal - já que este foi considerado o melhor teor a ser utilizado -, nota-se que, com a introdução do Sulfato, o aumento de volume chegou a ser cerca de 85% maior do que sem o aditivo. Dessa forma, optou-se pelo estudo da adição de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  na mistura para confecção de corpos de prova em busca de aumento de resistência.

## 4.2. ENSAIOS MECÂNICOS - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

### 4.2.1. Sistema solo/cimento

Para a avaliação da resistência mecânica desse sistema, foram confeccionados corpos de prova com 10% de cimento, 20% de caolinita e 70% de areia, simulando um solo. A escolha do teor de cimento foi baseada na viabilidade econômica e no conhecimento sobre o assunto, estando de acordo com a literatura. (FAJARDO, 2005)

As misturas tiveram o teor de água variando entre 8% e 14%, faixa de valores que proporcionam a adequada capacidade de compactação ao material e sem que haja exsudação da água. Os corpos de prova foram compactados estaticamente e sua Massa Específica Aparente Seca foi mantida em  $2,0 \text{ g/cm}^3$ . Os tempos de cura estudados foram de 7 e 28 dias, à temperatura ambiente.

Para que se tenha uma referência dos valores de Resistência à Compressão Simples desejados, mostra-se a seguir o que determinam as normas brasileira e inglesa sobre o assunto:

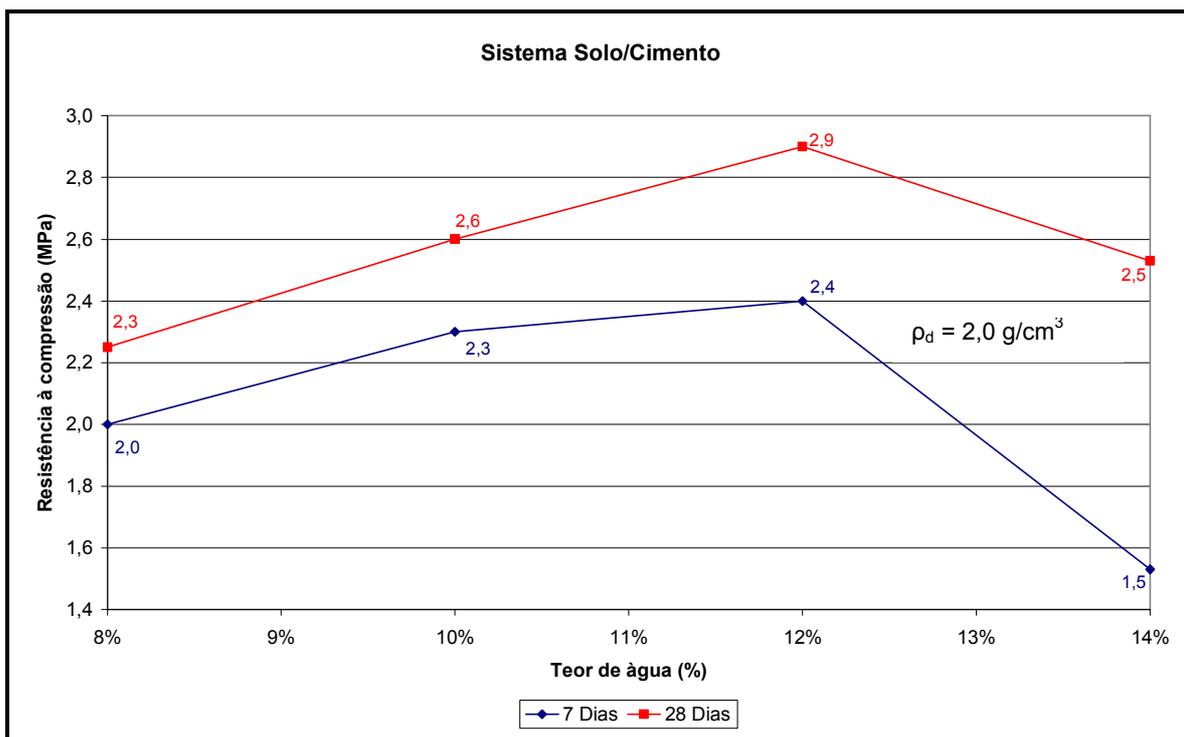
- NBR-10834: especifica como valores mínimos de resistência à compressão de blocos de solo cimento sem função estrutural com idade mínima de 7 dias para os corpos de prova:

- Individual: 2,0 MPa;

- Média: 2,5 MPa;

- A norma inglesa: especifica para tijolos de solo-cimento o mínimo de 2,75 MPa.

O gráfico 36 mostra os resultados obtidos. Pode-se observar que o melhor teor de água para a mistura é de 12%, com resistências de 2,4 MPa e 2,9 MPa para 7 e 28 dias, respectivamente. Nota-se que o aumento de resistência de 7 para 28 dias é de apenas 20%. Conclui-se que os valores encontrados estão abaixo dos indicados pelas normas. Isso mostra que a atividade pozolânica do solo (mistura de caolinita com areia) é baixa. Dessa forma, pode-se ver a clara necessidade da incorporação de material pozolânico à mistura para a melhoria do desempenho mecânico da mesma.



**GRÁFICO 34** – Resistência à compressão X teor de água no sistema Solo/Cimento

A tabela 20 mostra mais detalhadamente a formulação utilizada e os resultados obtidos.

**TABELA 20**

Resistência à Compressão Simples (RCS) do sistema Solo/Cimento

Formulação	Cura (dias)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de água (%)	RCS (MPa)
10% de cimento, 20% de caolinita e 70% de areia (1:2:7)	7	2,0	8	2,0
			10	2,3
			12	<b>2,4</b>
			14	1,5
	28		8	2,3
			10	2,6
			12	<b>2,9</b>
			14	2,5

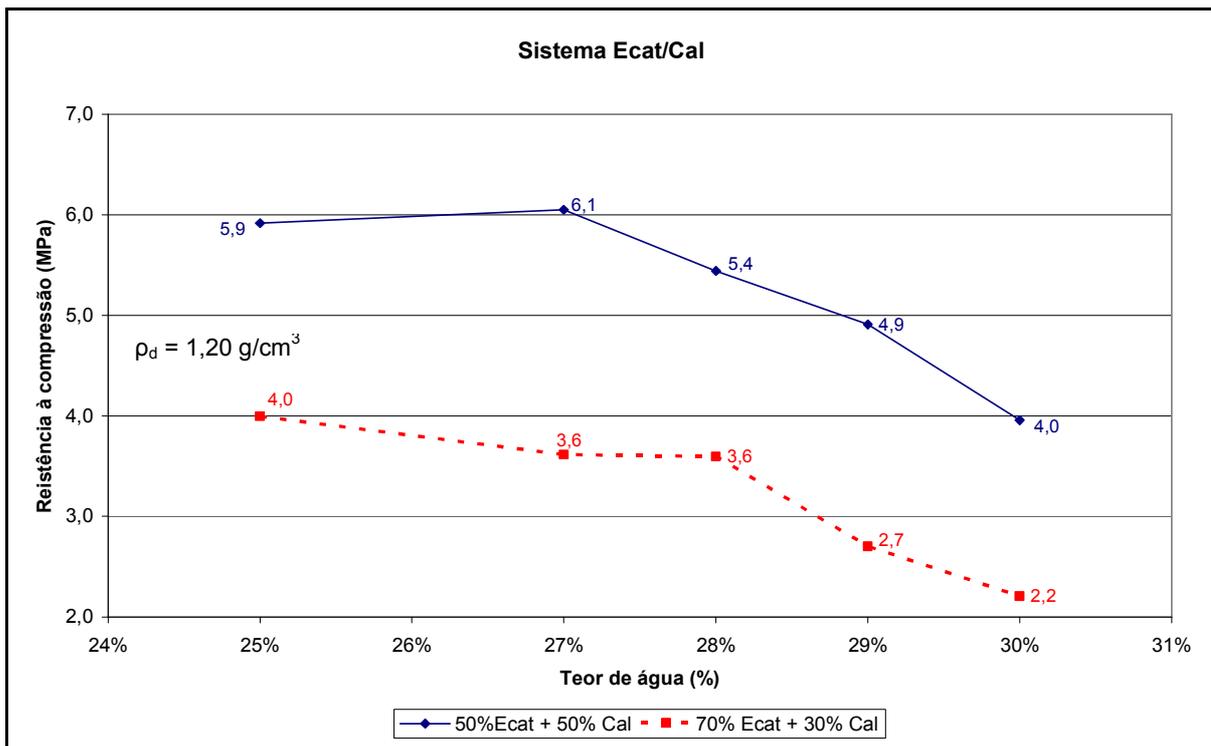
Os máximos valores de resistência encontrados ficaram bem abaixo daqueles apresentados por FAJARDO (2005), que chegou a obter com misturas de mesma proporção (10% de cimento) resistências de 7 MPa e 8 MPa para 7 e 28 dias, respectivamente. Mais uma vez fica comprovada a baixa pozolanicidade da caolinita utilizada no presente estudo.

#### **4.2.2. Sistema Ecat/cal**

Para o estudo do sistema Ecat/cal os teores utilizados foram baseados nos resultados do método físico-químico. Este ensaio mostrou que o teor adequado de cal para ativar a pozolanicidade do Ecat é de 40%. Dessa forma, optou-se pela utilização de um teor acima (50%) e um abaixo (30%) do encontrado pelo físico-químico.

Os corpos de prova foram confeccionados com Massa Específica Aparente Seca de  $1,20 \text{ g/cm}^3$ , em vista da dificuldade de obtenção de maiores valores através da compactação estática. Os teores de água foram escolhidos de forma a proporcionar compactação adequada à mistura e sem que houvesse exsudação durante a compactação estática. Os valores ficaram, então, entre 25% e 30%. O tempo de cura estudado foi de 7 dias.

O gráfico 35 mostra que os melhores resultados são para a mistura com 50% de cal, chegando a um aumento de 70% de Resistência à Compressão Simples em relação à composição com 30% de cal.



**GRÁFICO 35 – Resistência à compressão X teor de água no sistema Ecat/cal**

A tabela 21 mostra em detalhes as características dos corpos de provas confeccionados. O valor máximo de resistência encontrado foi de 6,1 MPa, para um teor de água de 27% e com a relação Ecat/cal igual a 50/50. Essa conclusão é compatível com os estudos realizados por FAJARDO (2005). Seu melhor resultado foi com 50% de cal, atingindo 7 MPa aos 7 dias, além de concluir que a mistura de 70% de Ecat com 30% de cal é deficiente, pois só alcançou 1,61 MPa aos 7 dias. No presente estudo, para essa mesma mistura, o máximo a que se chegou foi 4,0 MPa, representando uma melhoria nos resultados. É importante ressaltar que nos dois estudos a massa específica aparente seca foi a mesma ( $\rho_d = 1,20 \text{ g/cm}^3$ ).

**TABELA 21**

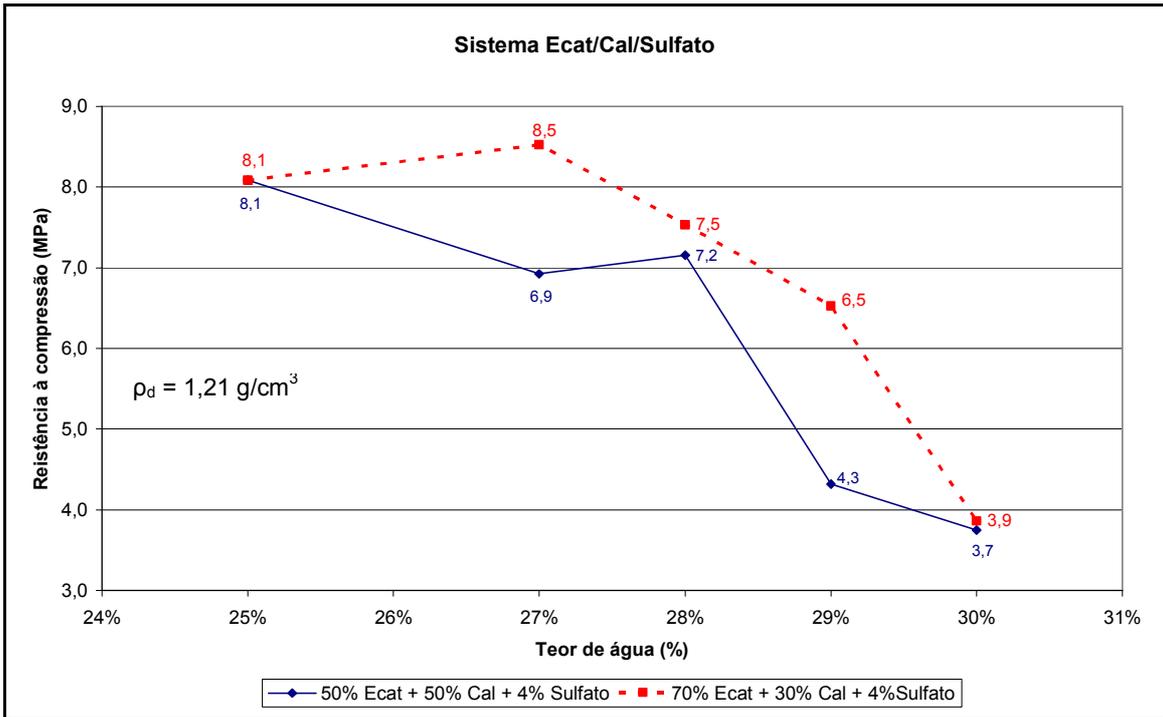
Resistência à Compressão Simples (RCS) do sistema Ecat/Cal

Formulação	Cura (dias)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de água (%)	RCS (MPa)
50% de Ecat + 50% de Cal (1:1)	7	1,20	25	5,9
			27	<b>6,1</b>
			28	5,4
			29	4,9
			30	4,0
70% de Ecat + 30% de Cal (1:0,43)	7	1,20	25	<b>4,0</b>
			27	3,6
			28	3,6
			29	2,7
			30	2,2

**4.2.3. Sistema Ecat/cal/sulfato**

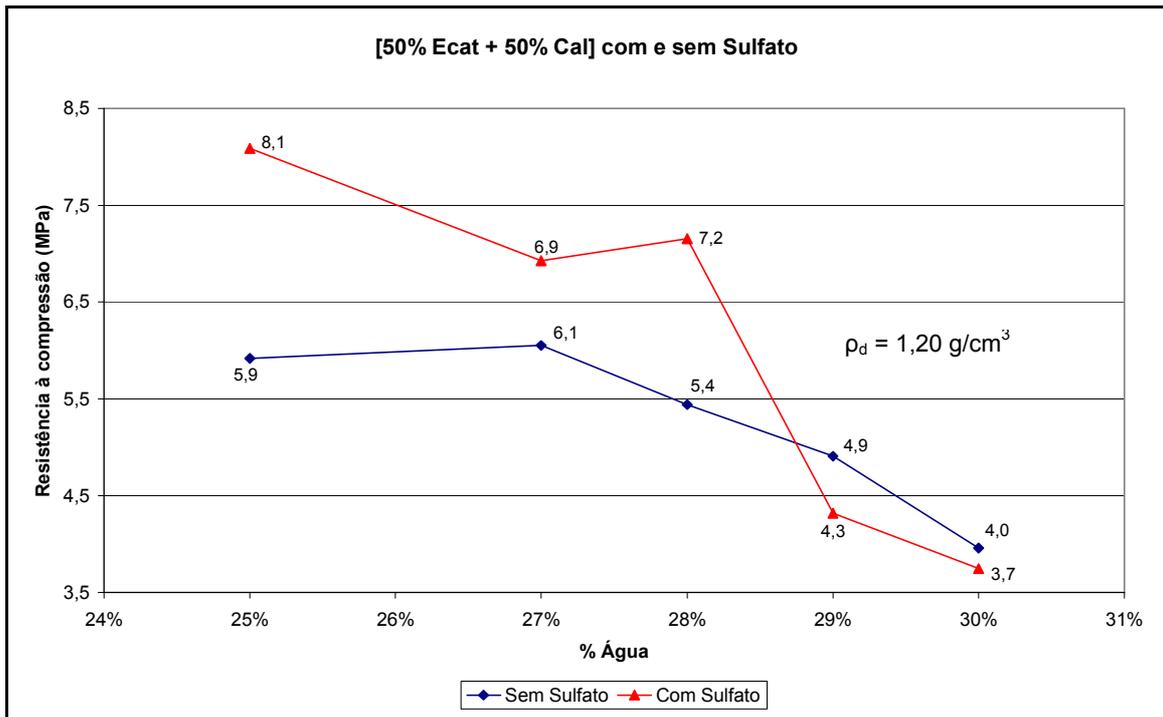
Como o método físico-químico indicou melhora nos resultados com a incorporação de sulfato à mistura de Ecat e cal, optou-se pela confecção de corpos de prova com os dois teores de cal já estudados (30% e 50%) e adição de 4% de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Através dos resultados mostrados no gráfico 36 é possível notar uma acentuada melhora nos valores máximos de resistência atingidos.



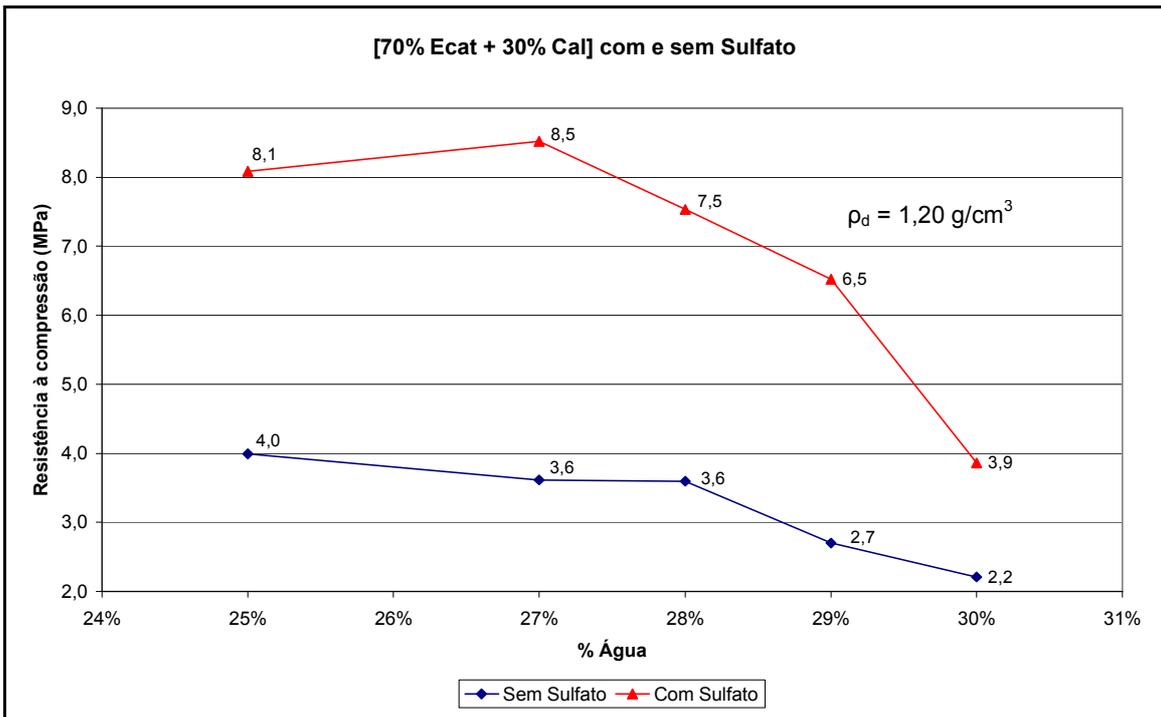
**GRÁFICO 36** – Resistência à compressão X teor de água no sistema Ecat/Cal/Sulfato

Para efeito de comparação, os gráficos a seguir (37 e 38) mostram as resistências das misturas com e sem a adição de sulfato. Quando se trata da relação Ecat/cal igual a 50/50, o aumento máximo de resistência é de 37%, passando de 5,9 MPa sem sulfato para 8,1 MPa com a incorporação do mesmo.



**GRÁFICO 37** – Resistência à compressão X teor de água no sistema [50%Ecat+50%Cal] com e sem Sulfato

Quando se trata da composição com 70% de Ecat e 30% de cal, observa-se que a utilização de sulfato proporciona um considerável incremento nos valores de resistência que, em seu melhor desempenho, passa de 3,6 MPa para 8,5 MPa, correspondendo a um aumento de 136%.



**GRÁFICO 38** – Resistência à compressão X teor de água no sistema [70%Ecat+30%Cal] com e sem Sulfato

Com essa melhora de resultados, a mistura 70/30 passa então a superar a anterior (50/50) e, por isso, foi escolhida como a relação ideal para ser utilizada na confecção de corpos de prova com acréscimo de areia e caulinita. A tabela 22 mostra os resultados obtidos com as devidas descrições.

**TABELA 22**

Resistência à Compressão Simples (RCS) do sistema Ecat/Cal/Sulfato

Formulação	Cura (dias)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de água (%)	RCS (MPa)
[50% de Ecat + 50% de Cal] +4% CaSO <sub>4</sub> (1:1:0,08)	7	1,21	25	8,1
			27	6,9
			28	7,2
			29	4,3
			30	3,7
[70% de Ecat + 30% de Cal] +4% CaSO <sub>4</sub> (1:0,43:0,06)	7	1,21	25	8,1
			27	8,5
			28	7,5
			29	6,5
			30	3,9

**4.2.4. Sistema completo: Ecat/cal/sulfato/caolinita/areia/cimento**

Para o estudo do sistema completo, escolheu-se o que no presente estudo chamou-se de mistura pozolânica (Ecat + Cal + Sulfato) que apresentou o melhor resultado. Como já mencionado anteriormente, a melhor resistência para essa mistura foi obtida com o acréscimo de 4% de sulfato sobre a relação 70/30 de Ecat/cal. Partiu-se então para a adição de material que representasse um solo, no caso a areia com a caolinita. Optou-se pela adição do mínimo de caolinita necessário para que houvesse coesão do sistema, pois uma vez que tanto o Ecat quanto a cal também são substâncias finas, o excesso de materiais com esse tipo de granulometria poderia prejudicar a trabalhabilidade do sistema. Principalmente quando se pensa em escala industrial, deve-se estar atento às limitações do processo. Por exemplo, se o material a ser utilizado for fino demais, quando a mistura de grandes quantidades fosse realizada, provavelmente haveria formação de grumos que provocariam certamente a queda de resistência mecânica do sistema em questão.

Fixou-se, portanto, o valor de 10% de caolinita. O teor de areia variou de acordo com a quantidade de mistura pozolânica incorporada à mistura. O critério de escolha do percentual de cimento também foi de utilização do mínimo para conferir aumento de resistência ao sistema. Para analisar esse aumento decidiu-se pela confecção de

corpos de prova idênticos com e sem cimento. A partir daí, foram criadas três formulações distintas, com variação do teor de água e com a maior Massa Específica Aparente Seca que se conseguiu para cada mistura. A tabela 23 mostra quais foram as formulações adotadas.

**TABELA 23**

Formulações completas analisadas

<b>FORMULAÇÕES ANALISADAS</b>		
<b>Rel A/K</b>	<b>Sem Cimento</b>	<b>Com Cimento (5% sobre a massa total)</b>
3	<b>FORMULAÇÃO I (FI)</b>	<b>FORMULAÇÃO I-C (FI-C)</b>
	60% Mistura Pozolânica { <ul style="list-style-type: none"> <li>40,3% Ecat</li> <li>17,3% Cal</li> <li>2,4% CaSO<sub>4</sub></li> </ul> 10% Caolinita (K) 30% Areia (A)	57,1% Mistura Pozolânica { <ul style="list-style-type: none"> <li>38,4% Ecat</li> <li>16,4% Cal</li> <li>2,3% CaSO<sub>4</sub></li> </ul> 9,5% Caolinita (K) 28,6% Areia (A) 4,8% Cimento
5	<b>FORMULAÇÃO II (FII)</b>	<b>FORMULAÇÃO II-C (FII-C)</b>
	40% Mistura Pozolânica { <ul style="list-style-type: none"> <li>26,9% Ecat</li> <li>11,5% Cal</li> <li>1,6% CaSO<sub>4</sub></li> </ul> 10% Caolinita (K) 50% Areia (A)	38% Mistura Pozolânica { <ul style="list-style-type: none"> <li>25,5% Ecat</li> <li>11% Cal</li> <li>1,5% CaSO<sub>4</sub></li> </ul> 9,5% Caolinita (K) 47,7% Areia (A) 4,8% Cimento
7	<b>FORMULAÇÃO III (FIII)</b>	<b>FORMULAÇÃO III-C (FIII-C)</b>
	20% Mistura Pozolânica { <ul style="list-style-type: none"> <li>13,4% Ecat</li> <li>5,8% Cal</li> <li>0,8% CaSO<sub>4</sub></li> </ul> 10% Caolinita (K) 70% Areia (A)	19% Mistura Pozolânica { <ul style="list-style-type: none"> <li>12,8% Ecat</li> <li>5,5% Cal</li> <li>0,7% CaSO<sub>4</sub></li> </ul> 9,5% Caolinita (K) 66,7% Areia (A) 4,8% Cimento

Os corpos de prova foram confeccionados e curados por sete dias. Após o primeiro dia de cura, os CPs eram então saturados para que a perda de água não prejudicasse as

reações. Somente aqueles com os melhores resultados foram repetidos e curados por 28 dias.

Como não existe norma específica para blocos estruturais vazados de solo-cimento, para que se pudesse ter um parâmetro de comparação dos valores obtidos, na tabela 24 encontram-se os requisitos de resistência à compressão para blocos estruturais e de vedação cerâmicos e de concreto.

**TABELA 24**

Valores mínimos de resistência à compressão simples segundo Normas

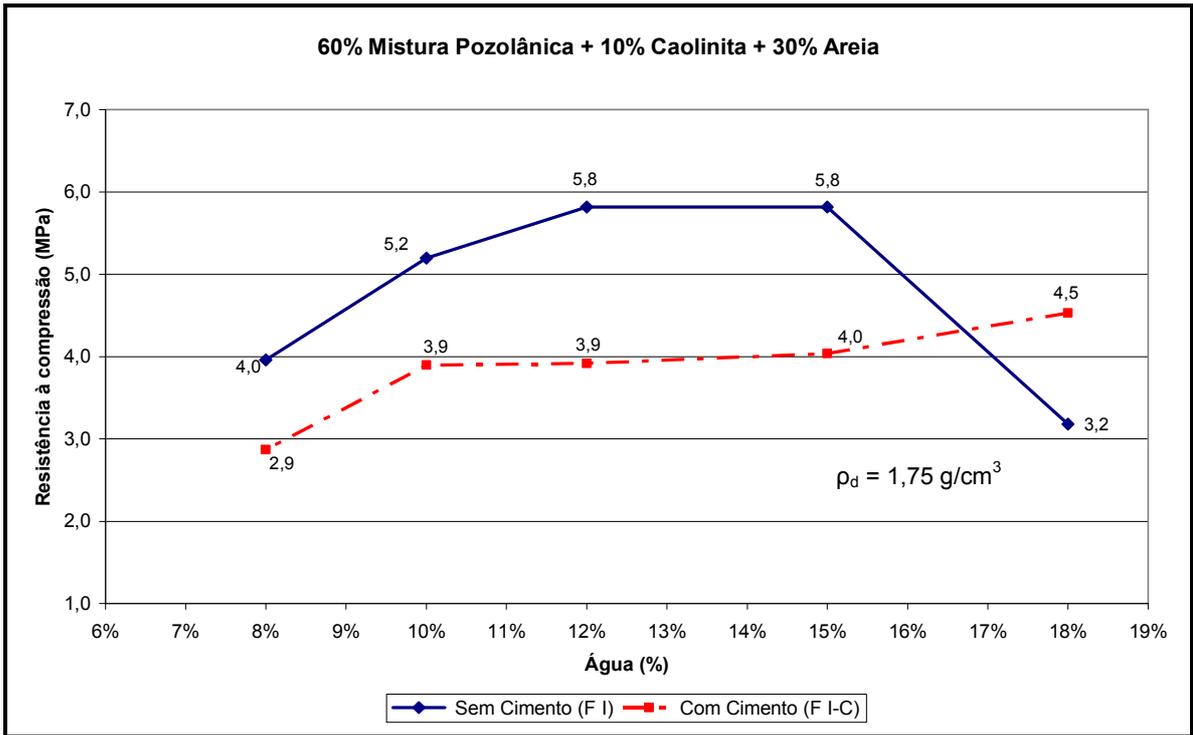
PRODUTO		REQUISITO	NORMA DE REFERÊNCIA
<b>Blocos de concreto</b>	Vedação	$f_i \geq 2,0\text{MPa}$ , $f_m \geq 2,5\text{Mpa}$	NBR - 7173
	Estrutural A	$f_{bk} \geq 6,0\text{MPa}$	NBR - 6136
	Estrutural B	$f_{bk} \geq 4,5\text{MPa}$	NBR - 6136
<b>Blocos cerâmicos</b>	Vedação (furos na horizontal)	$f_b \geq 1,5\text{ MPa}$	NBR -15270-1
	Vedação (furos na vertical)	$f_b \geq 3,0\text{ MPa}$	NBR -15270-1
	Estrutural	$f_{bk} \geq 3,0\text{ MPa}$	NBR -15270-2
<b>Bloco sílico-calcário</b>	75	$f_m \geq 7,5\text{ MPa}$	DIN - 106
	150	$f_m \geq 15\text{ MPa}$	DIN - 106
	250	$f_m \geq 25\text{ MPa}$	DIN - 106
	350	$f_m \geq 35\text{ MPa}$	DIN - 106
<b>Bloco concreto celular autoclavado</b>	G25	$f_i \geq 2,0\text{ MPa}$ , $f_m \geq 2,5\text{ Mpa}$	DIN - 4165
	G50	$f_i \geq 4,0\text{ MPa}$ , $f_m \geq 5,0\text{ Mpa}$	DIN - 4165
	G75	$f_i \geq 6,0\text{ MPa}$ , $f_m \geq 7,5\text{ Mpa}$	DIN - 4165

A tabela 25 e gráficos a seguir (39 a 41) apresentam o desempenho das formulações.

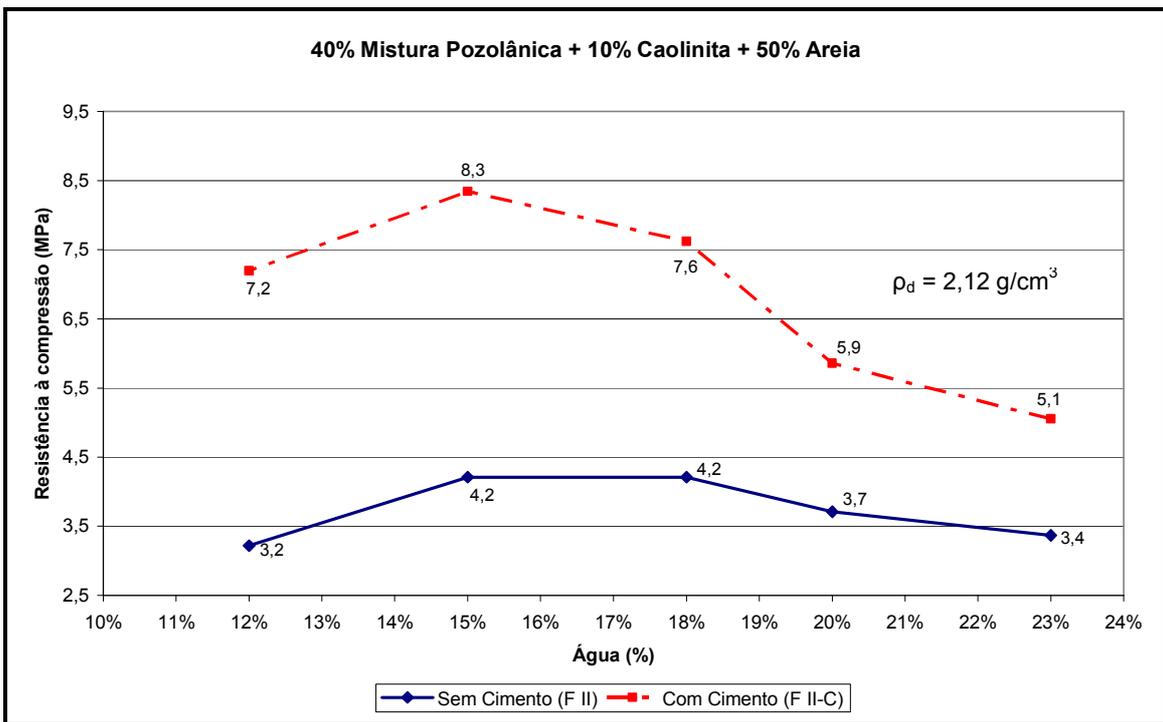
**TABELA 25**

Resistência à Compressão Simples (RCS) do sistema completo

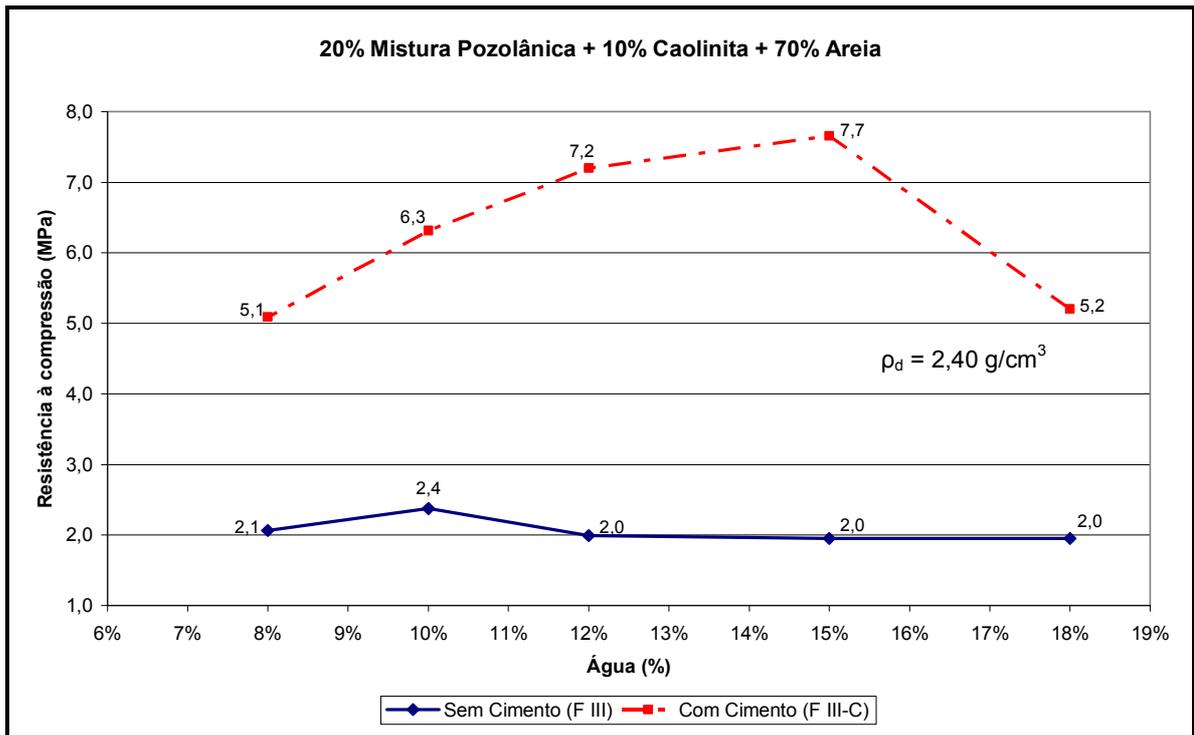
Rel A/K	Formulação	Cura (dias)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de água (%)	RCS (MPa)	% Solo
3	FORMULAÇÃO I 40,3% Ecat + 17,3% Cal + 2,4% CaSO <sub>4</sub> + 10% Caolinita + 30% Areia	7	1,75	23	3,2	40
				20	<b>5,8</b>	
				18	<b>5,8</b>	
				15	5,2	
				12	4,0	
5	FORMULAÇÃO II 26,9% Ecat + 11,5% Cal + 1,6% CaSO <sub>4</sub> + 10% Caolinita + 50% Areia	7	2,12	23	3,4	60
				20	3,7	
				18	<b>4,2</b>	
				15	<b>4,2</b>	
				12	3,2	
7	FORMULAÇÃO III 13,4% Ecat + 5,8% Cal + 0,8% CaSO <sub>4</sub> + 10% Caolinita + 70% Areia	7	2,40	18%	2,0	80
				15%	2,0	
				12%	2,0	
				10%	<b>2,4</b>	
				8%	2,1	
3	FORMULAÇÃO I-C 38,4% Ecat + 16,4% Cal + 2,3% CaSO <sub>4</sub> + 9,5% Caolinita + 28,6% Areia + 4,8% Cimento	7	1,75	23	<b>4,5</b>	38,5
				20	4,0	
				18	3,9	
				15	3,9	
				12	2,9	
5	FORMULAÇÃO II-C 25,5% Ecat + 11% Cal + 1,5% CaSO <sub>4</sub> + 9,5% Caolinita + 47,7% Areia + 4,8% Cimento	7	2,12	23	5,1	57,2
				20	5,9	
				18	7,6	
				15	<b>8,3</b>	
				12	7,2	
7	FORMULAÇÃO III-C 12,8% Ecat + 5,5% Cal + 0,7% CaSO <sub>4</sub> + 9,5% Caolinita + 66,7% Areia + 4,8% Cimento	7	2,40	18%	5,2	76,2
				15%	<b>7,7</b>	
				12%	7,2	
				10%	6,3	
				8%	5,1	



**GRÁFICO 39** – Resistência à compressão X teor de água no sistema [60% Mistura Pozolânica + 10% Caolinita + 30% Areia] com e sem Cimento (FI e FI-C)



**GRÁFICO 40** – Resistência à compressão X teor de água no sistema [40% Mistura Pozolânica + 10% Caolinita + 50% Areia] com e sem Cimento (FII e FII-C)

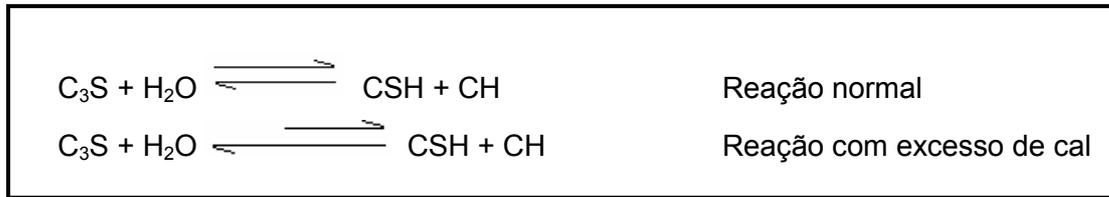


**GRÁFICO 41** – Resistência à compressão X teor de água no sistema [20% Mistura Pozolânica + 10% Caolinita + 70% Areia] com e sem Cimento (FIII e FIII-C)

Observa-se que, para as misturas sem cimento, o melhor resultado se dá com a Formulação I, com 12% ou 15% de teor de água, chegando a 5,8 MPa em ambos os casos em 7 dias. Para as demais formulações, os maiores valores de resistência obtidos foram 4,2 MPa (com 15% ou 18% de água) e 2,4 MPa (com 10% de água) para FII e FIII, respectivamente. Conclui-se, portanto, que esta última formulação (FIII) é ineficiente por apresentar valores muito baixos de resistência à compressão. Levando-se em conta que esses valores foram obtidos sem a adição de cimento, considera-se que os resultados estão plenamente adequados, uma vez que podem ser comparados aos melhores resultados de FAJARDO obtidos em misturas com 10% de cimento. Nesses casos, em 7 dias, o máximo valor foi de 4,9 MPa.

Entretanto, quando se analisa a introdução de cimento no sistema, a Formulação I-C não mantém os melhores resultados. Aliás, muito pelo contrário, com a adição de cimento seus valores de resistência caíram acentuadamente (cerca de 31%). Isso pode ser explicado pelo fato do excesso de cal inibir a hidratação do cimento, pois na reação de hidratação é necessário que o equilíbrio seja mantido. Isto é, quando um dos componentes está em quantidade maior que a estequiométrica, ocorre o

deslocamento da reação para que a constante de equilíbrio da reação não se altere, como mostrado abaixo:

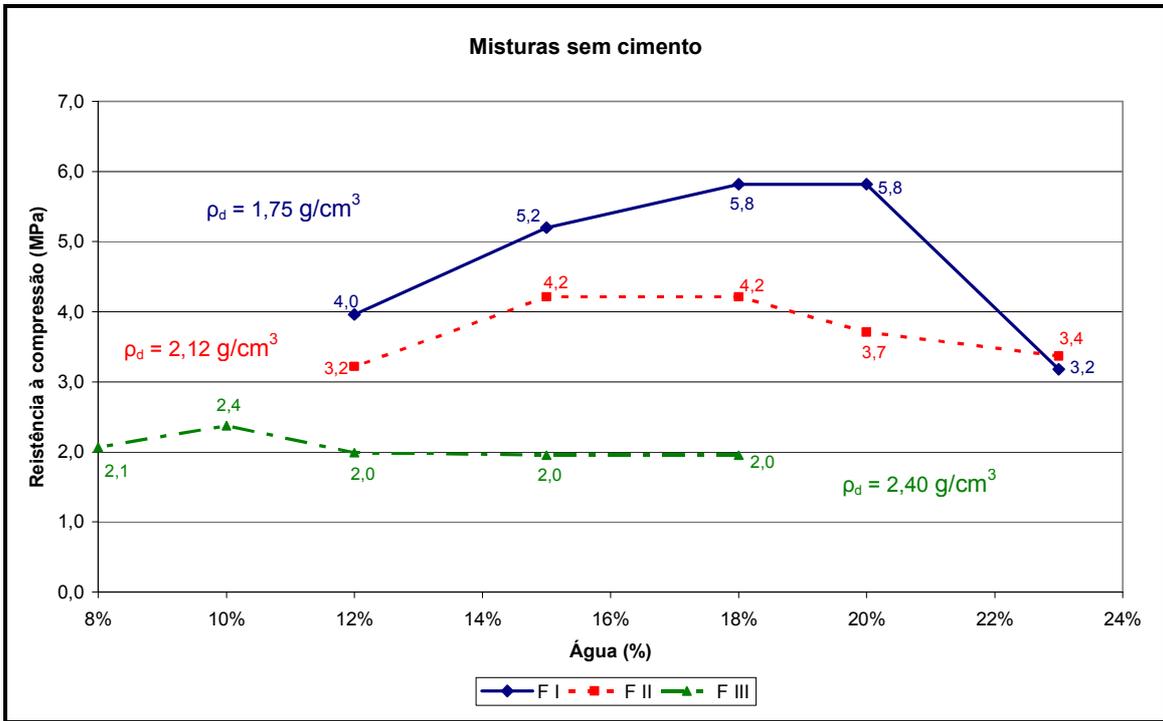


Já nos demais casos, ocorreu exatamente como se esperava, ou seja, a introdução de apenas 5% de cimento ocasionou aumentos consideráveis de resistência mecânica nos corpos de prova. Analisando as formulações II e II-C, pode-se notar que a resistência dobrou, passando de 4,2 MPa para 8,3 MPa (15% de água), sendo este o melhor resultado para 7 dias. Porém, em termos de incremento, a Formulação III-C foi a que melhor se apresentou, pois proporcionou um aumento de 260% nos valores obtidos sem cimento. Foi de 2,0 MPa para 7,2 MPa, também com 15% de água, o que representa um excelente resultado e mostra a importância da utilização do cimento, mesmo em teores considerados baixos. Esses valores ficaram bem acima daqueles encontrados por FAJARDO (2005) em sua pesquisa. Seu melhor resultado foi para uma formulação (51% de Solo, 22% de Ecat, 5% de cimento e 22% de cal) que se assemelha à FII do presente estudo, chegando a 6,3 MPa com  $\rho_d = 1,44 \text{ g/cm}^3$  e relação água/sólidos (a/s) de 0,275. Essa diferença pode ser creditada a três fatores principais:

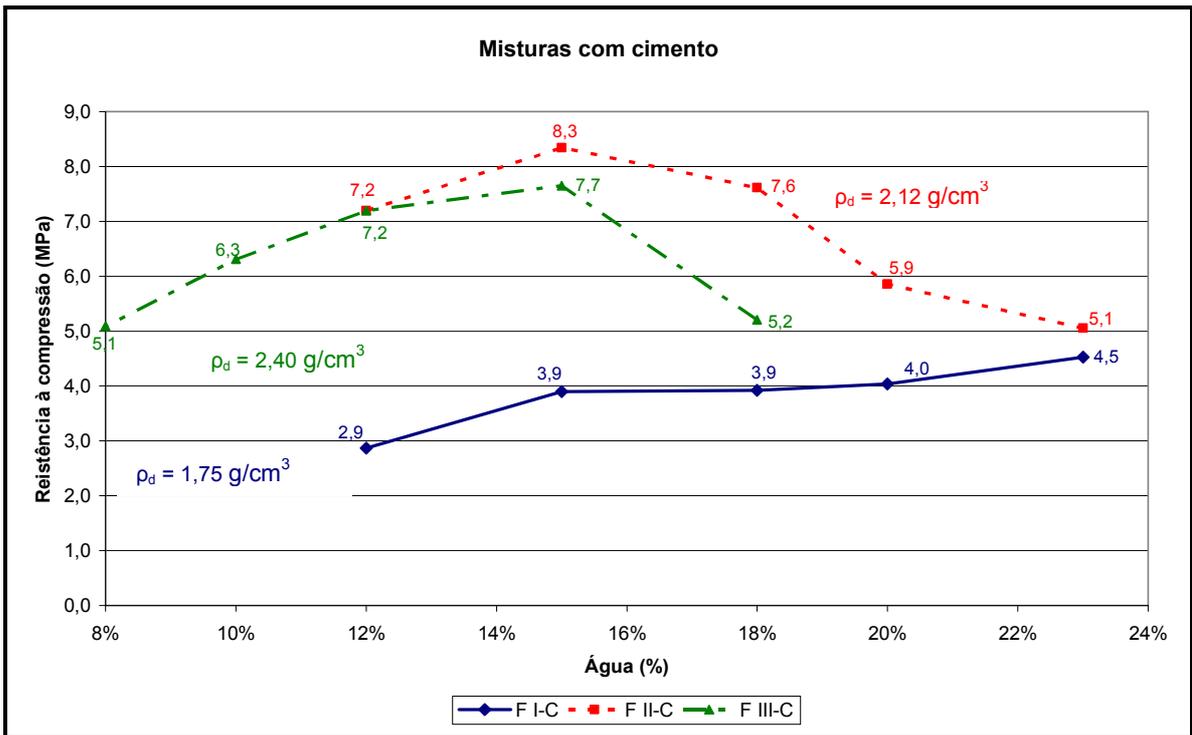
- maior reatividade a curto prazo do Ecat moído quando comparado ao não moído;
- menor quantidade de água utilizada em FIII, pois quanto menor a relação a/s, maior a resistência;
- maior massa específica aparente seca de FIII, pois é sabido que pequenos acréscimos de massa específica podem gerar grandes aumentos de resistência.

Ainda sobre os gráficos, é possível dizer que quanto menor a quantidade de mistura pozolânica utilizada (Ecat, Cal e Sulfato), menor é o teor de água requerido pelo sistema. E quanto maior a quantidade de areia, maior é a massa específica aparente seca que se consegue obter sem prejuízo à compactação dos corpos de prova.

Para efeitos de comparação, os gráficos abaixo (42 e 43) mostram o comportamento das misturas com e sem cimento separadamente.



**GRÁFICO 42** – Resistência à compressão X teor de água nos sistemas **sem cimento** (FI, FII e FIII)



**GRÁFICO 43** – Resistência à compressão X teor de água nos sistemas **com cimento** (FI-C, FII-C e FIII-C)

Para a confecção de corpos de prova com 28 dias, foram escolhidos os melhores resultados para cada tipo de mistura. Para a primeira formulação, o maior valor de resistência obtido foi 5,8 MPa, sem cimento e com 18% de água. Para a segunda, chegou-se a 8,3 MPa com cimento e 15% de água. E, por fim, para a terceira formulação o melhor resultado foi 7,7 Mpa, com cimento e 15% de água.

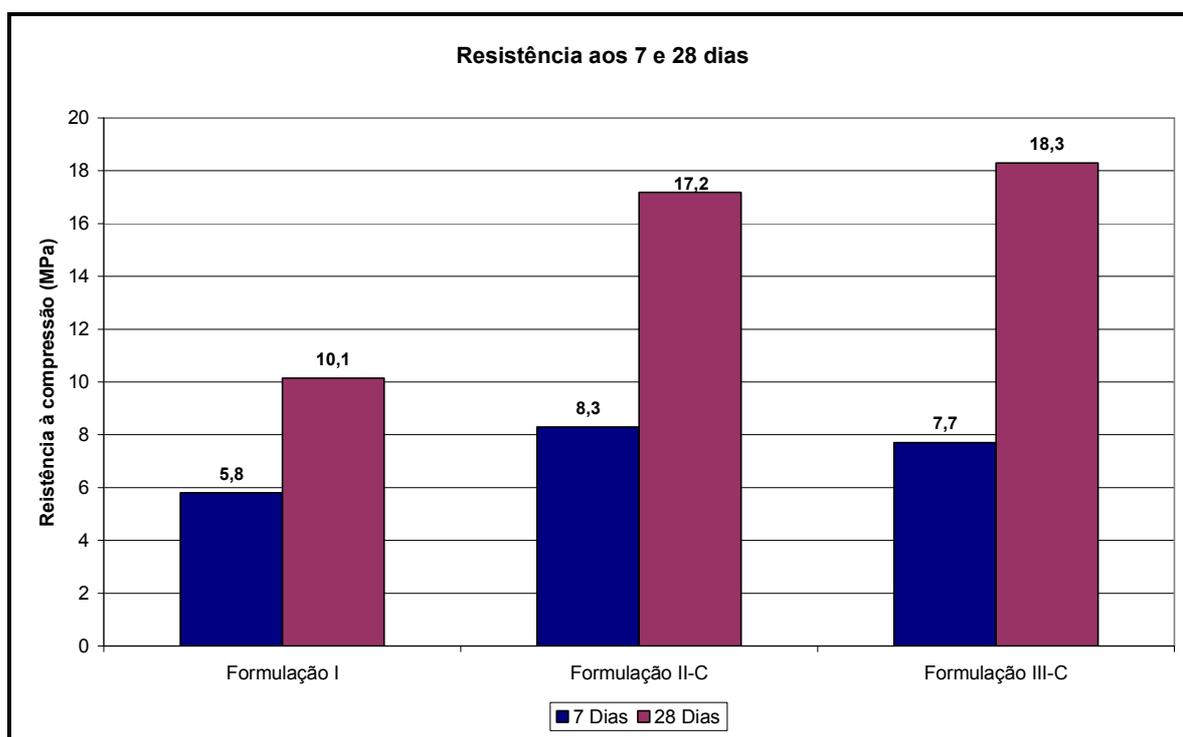
Dessa forma, após selecionar os três tipos de composição a serem analisadas, foram confeccionados corpos de prova idênticos aos utilizados para 7 dias e curados até 28 dias. Mais uma vez, após o primeiro dia de cura, os corpos de prova foram saturados.

Os resultados obtidos em termos comparativos são apresentados na tabela 26 e no gráfico 44.

**TABELA 26**

Resistência à Compressão Simples (RCS) do sistema completo

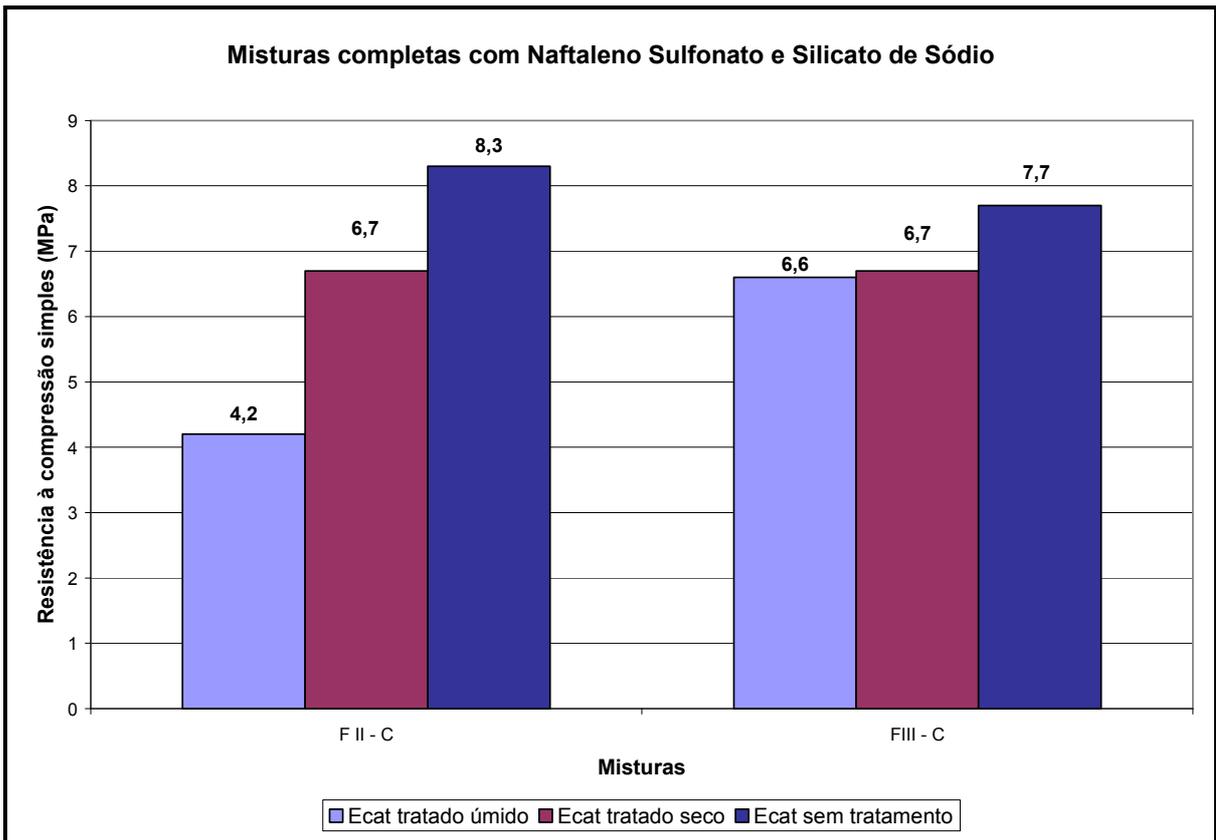
Formulação	Cura (dias)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de água (%)	RCS (MPa)
FORMULAÇÃO I	7	1,75	18	5,8
	28			10,2
FORMULAÇÃO II-C	7	2,12	15	8,3
	28			17,2
FORMULAÇÃO III-C	7	2,40	15	7,7
	28			18,3

**GRÁFICO 44** – Resistência à compressão (FI, FII-C e FIII-C) aos 7 e 28 dias

É notável o aumento de resistência em todos os casos com o passar do tempo. A Formulação I foi a que apresentou menor elevação (48,5%), passando de 6,8 MPa para 10,1 MPa. Já para a Formulação II-C o aumento foi de 107%, isto é, mais que o dobro, saindo de 8,3 MPa para 17,2 MPa. Entretanto, o maior incremento ocorreu na Formulação III-C (138%) que de 7,7 MPa aos 7 dias chegou a 18,3 MPa, sendo este o maior valor obtido no presente estudo. Todos os valores atingidos foram superiores aos resultados de FAJARDO (2005), cujo máximo foi de 7,55 MPa.

Para efeitos de testes, foram adicionados às melhores misturas dois produtos: Naftaleno Sulfonato de Sódio e Silicato de Sódio. O primeiro é um plastificante e serve para dispersar o ligante hidráulico e auxiliar na compactação da mistura. Já o Silicato, segundo ZIMBELMANN (1987), ajuda a melhorar interação química na interface cimento/agregado. Dessa forma, a Formulação I foi excluída, uma vez que não contém cimento. O Naftaleno foi utilizado na proporção de 0,15% sobre a quantidade de mistura pozolânica (Ecat, cal e sulfato). O Silicato de sódio foi empregado para tratar o Ecat usado na confecção dos corpos de prova. O tratamento se deu de duas formas: na primeira o Ecat foi imerso em solução de água com Silicato (1:4) e posteriormente filtrado a vácuo; na segunda, o Ecat também foi imerso na mesma solução, porém foi seco na estufa a 105°C.

Os novos corpos de prova foram confeccionados da mesma maneira que os demais, compactados e curados por 7 dias. Para que houvesse uma comparação adequada, a Massa Aparente Específica Seca adotada foi a mesma dos corpos de provas anteriores, isto é, 2,12 g/cm<sup>3</sup> e 2,40 g/cm<sup>3</sup> para Formulação II-C e Formulação III-C, respectivamente. O gráfico 45 mostra o comparativo entre os corpos de prova tratados e não tratados com Silicato de Sódio.



**GRÁFICO 45** – Resistência à compressão (FII-C e FIII-C) aos 7 dias com e sem Naftaleno Sulfonato e tratamento com Silicato de Sódio

Como pode-se observar pelo gráfico, não há benefícios diretos na utilização dos novos produtos. Na realidade, nota-se que ocorre uma queda na resistência quando tais compostos são adicionados, não sendo, portanto registrada a melhora na interface cimento/agregado. Como os corpos de provas foram feitos apenas para teste, não é possível ainda explicar o motivo da piora de desempenho, ficando isso como sugestão para futuros estudos.

---

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

---

### 5.1 CONCLUSÕES

A utilização do Método Físico-Químico foi bastante eficaz, pois através de seus resultados foi possível determinar o teor de cal necessário ao equilíbrio do sistema, ou seja, de tal modo que agregue resistência mecânica ao mesmo. Observou-se também que o sistema Ecat/cimento responde bem mais rápido que o Ecat/cal, principalmente devido à ação intrínseca do cimento.

Foi através da realização desses ensaios que verificou-se a melhora no desempenho do sistema Ecat/cal com a introdução do Sulfato de Cálcio bi-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), fazendo com que esse composto fosse posteriormente adicionado às misturas para confecção de corpos de prova, visando um ganho de resistência mecânica.

Deve-se ressaltar que os resultados obtidos nestes ensaios estavam em pleno acordo com a literatura sobre o assunto.

É possível dizer, então, que o Método Físico-Químico aplicado a pozolanas em geral, pode ser utilizado como um indicador da reatividade de um material frente à cal.

No que diz respeito aos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS), pode-se inferir que, para o sistema denominado Solo/Cimento (Caolinita + Areia + Cimento), observou-se que a caolinita não era tão reativa pozolanicamente quanto se esperava, uma vez que o valor máximo de RCS alcançado aos 7 dias foi de 2,4 MPa, mesmo com uma massa aparente específica seca bastante alta ( $\rho_d = 2,0 \text{ g/cm}^3$ ) e um teor de água relativamente baixo (12%). Verifica-se que esse valor fica bem próximo do limite imposto pela NBR-10834/94 que especifica valores mínimos para tijolos de solo-cimento. Destaca-se ainda que para 28 dias o aumento de resistência foi de apenas 20%, chegando a 2,9 MPa, corroborando a baixa pozolanicidade do material em questão. Observou-se que essa mistura é bastante sensível à quantidade de água

adicionada ao sistema, pois uma pequena variação (de 12% para 14%) pode provocar queda significativa de resistência (de 2,4 MPa para 1,5 MPa).

Além disso, destaca-se o papel do solo de atuar como auxiliar de compactação, pois uma grande vantagem da sua incorporação nas formulações foi a constatação da possibilidade da conformação de corpos de prova com significativo aumento da massa específica aparente seca e diminuição do teor de água utilizado, o que levou à obtenção de misturas facilmente manuseáveis (fato de suma importância para a fabricação de tijolos prensados a frio), sem prejuízo para a resistência mecânica desejada.

Para o sistema Ecat/cal foram estudadas duas formulações: [50%Ecat + 50%Cal] e [70%Ecat + 30%Cal], ambas com  $\rho_d = 1,20 \text{ g/cm}^3$ . A conclusão a que se chegou após análises das misturas foi que a primeira era mais resistente que a segunda, chegando a 6,1 MPa com 7 dias. Entretanto, após a introdução de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  no sistema, o comportamento se inverteu completamente: a mistura [70%Ecat + 30%Cal] passou a apresentar maiores resistências, atingindo 8,5 MPa com 7 dias ( $\rho_d = 1,21 \text{ g/cm}^3$ ). Fica então evidente a ação benéfica do Sulfato de Cálcio quando adicionado em quantidade adequada.

Quando as formulações completas (Ecat + Cal + Sulfato + Caolinita + Areia) com e sem cimento foram estudadas, observou-se que quanto maior a proporção de mistura pozolânica (Ecat + Cal + Sulfato), maior era a quantidade de água requerida pelo sistema e menor o valor de Massa Específica Aparente Seca que se conseguia atingir através da compactação estática.

Os resultados mostraram que quando o teor de mistura pozolânica é elevado (Formulação I), a adição de cimento não provoca efeitos benéficos. Pelo contrário, chega a provocar queda de resistência (de 5,8 MPa para 3,9 MPa), pois o excesso de cal acaba inibindo as reações de hidratação do cimento.

Já nos casos em que a quantidade de mistura pozolânica era menor, o comportamento com a presença de cimento foi o esperado, isto é, aumentos consideráveis de resistência. As duas formulações que apresentaram esse

comportamento tiveram incrementos de 98% (Formulação II –  $\rho_d = 2,12 \text{ g/cm}^3$ ) e 260% (Formulação III –  $\rho_d = 2,40 \text{ g/cm}^3$ ), chegando a 8,3 MPa e 7,2 MPa, respectivamente.

Os melhores resultados foram então testados para 28 dias, obtendo-se significativos aumentos de desempenho. A Formulação I chegou a 10,2 MPa, A Formulação II a 17,2 MPa e a Formulação III atingiu 18,3 MPa.

Nota-se que os melhores resultados foram obtidos por FII e FIII, com uma diferença de resistência de apenas 6%. Isto mostra que essas formulações apresentam comportamento semelhante. Conclui-se, portanto, que a Formulação II é a mais indicada para uso quando se considera o aspecto econômico, pois apresenta maior quantidade do resíduo em questão (Ecat) sem prejuízo de resistência mecânica.

Destaca-se ainda que, a priori, não foi observada nenhuma vantagem, em termos de melhora de resistência, na utilização de Naftaleno Sulfonato e Silicato de Sódio na confecção dos corpos de prova.

É de suma importância ressaltar que todas as formulações estudadas apresentaram resultados bem acima dos recomendados por norma para a fabricação de elementos construtivos, tanto para vedação quanto para o desempenho de função estrutural. Isso significa que o Ecat, juntamente com os demais aditivos (Cal e Sulfato de Cálcio), pode perfeitamente substituir parcialmente o cimento e apresentar resultados satisfatórios, estando apto à aplicação em escala industrial e à utilização segura na construção civil.

No que diz respeito à cominuição mecânica sofrida pelo material, pode-se dizer que para resultados satisfatórios obtidos com o material *in natura*, os benefícios da moagem não eram muito significativos. Por outro lado, quando os resultados apresentados eram ruins, ocorria uma expressiva melhora de comportamento. Isso mostra que o efeito da moagem não foi tão positivo quanto se esperava, essencialmente por dois fatores que contribuem para a diminuição da reatividade superficial do material: a diminuição da porosidade mais grossa e o recobrimento da superfície dos grãos de Ecat por carbono. Entretanto, observa-se um predomínio do efeito positivo da cominuição mecânica, uma vez que os melhores resultados obtidos foram representativamente maiores que os obtidos por FAJARDO (2005).

## 5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

São sugeridos como temas para posteriores estudos os seguintes tópicos:

- verificação do comportamento do Ecat a longo prazo;
- estudo mais aprofundado sobre a economia de energia gerada pela substituição parcial do cimento pelo Ecat na fabricação de elementos estabilizados para a construção civil;
- pesquisas sobre a aplicabilidade dos critérios para projetos de MDL nos casos de produção de tijolos confeccionados com resíduos;
- verificação da influência do Naftaleno Sulfonato e Silicato de Sódio na Resistência à Compressão Simples;
- estudos de viabilidade econômica para adequação da presente pesquisa para projeto de grande escala (industrial).

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos. Disponível em: <http://www.abetre.org.br/> Acesso em 20 de junho de 2006.

ABIQUIM – Associação brasileira da indústria química. **Relatório de atuação responsável**. São Paulo, 2006.

ABRELPE – Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2006

ABVE. Disponível em: <http://www.abve.org.br/destaques/destaque81.shtml> Acesso em 15 de julho de 2006.

AGÊNCIA AMBIENTAL DA HOLANDA – Netherlands Environmental Assessment Agency. Disponível em: <http://www.mnp.nl/en/index.html> Acesso em 18 de novembro de 2007.

AGENDA 21. Disponível em: [http://www.mp.sp.gov.br/portal/page/portal/cao\\_urbanismo\\_e\\_meio\\_ambiente/legislacao/leg\\_federal/leg\\_fed\\_agenda21\\_rio92](http://www.mp.sp.gov.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/legislacao/leg_federal/leg_fed_agenda21_rio92) Acesso em 10 de abril de 2007.

AGUIAR, Wilson Mansur de. **Compromisso ambiental ou social como objetivo da eficiência energética**: proposta de incentivo as fontes alternativas de energia. 2004. Dissertação (MSc) – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2004, 91p. [Orientador: Roberto Schaeffer]

ALLAHVERDI, A; GHORBANI, J. Chemical activation and set acceleration of lime-natural pozzolan cement. **Ceramics-Silikáty**. Vol 50 (4) pp.193-199 (2006)

AMBIENTE BRASIL - CUT – RJ – Comissão de Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/> Acesso em 03 de julho de 2006.

ANICER - Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Disponível em: <http://www.anicer.com.br/> Acesso em 16 de setembro de 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136/1994**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 6474**. Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7173/1982.** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181.** Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7224.** Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da área específica. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 7251.** Solo: determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004.** Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005.** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006.** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007.** Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10834.** Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Especificação. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270/2005.** Componentes cerâmicos - parte 1: blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270/2005.** Componentes cerâmicos - parte 2: blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270/2005.** Componentes cerâmicos - parte 3: blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

CASANOVA, F.J. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio:** aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização). Tese (DSc) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **Notas de aula.** 2000.

CAVALCANTI, C. **Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma sociedade sustentável.** São Paulo: Cortez; Recife, Fundação Joaquim Nabuco. 2ª ed., 1998.

CEMBUREAU – **The European Cement Association.** Disponível em: <http://www.cembureau.be/> Acesso em: 20 de maio de 2007.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental Secretaria de Estado do Meio Ambiente- SP. **Resíduos sólidos industriais.** Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/residuos/industriais.asp> Acesso em 10 de agosto de 2006.

CHADDA, L.R. A Rapid Method of Assessing the Cement Requirement for the Stabilization of Soils. **India Concrete Journal**, 45(7), pp.298, 1970.

Chengzhi, Z. et al. The filling role of pozzolanic material. **Cement and Concrete Research**, Volume 26, Issue 6, June 1996, Pages 943-947

CIMENTO MUNDO. Disponível em: <http://www.cimento.org/cimentomundo.htm> Acesso em 10 de julho de 2006.

COLE, Raymond J. Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems. **Building and Environment** 34 (1999) 335-348 p.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA N° 257.1999

\_\_\_\_\_. Resolução CONAMA N° 258.1999

\_\_\_\_\_. Resolução CONAMA N° 263.1999

Constituição da República Federativa do Brasil. Artigo 225. 1988

CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (CQNUMC) MDL – Conselho Executivo II.D./Versão 9 Escopo setorial: 4 31a reunião do Conselho Executivo. **Metodologias indicativas simplificadas de linha de base e monitoramento para categorias selecionadas de atividades de projetos de pequena escala no âmbito do MDL - tipo II** – Projetos de melhoria da eficiência energética, s/d.

COSTA, Cláudia do Valle. **Políticas de promoção de fontes novas e renováveis para geração de energia elétrica: lições da experiência europeia para o caso brasileiro**. Tese (Dsc – Planejamento energético) – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2006, 233 p. [Orientadores: Prof. Emilio Lèbre La Rovere, Dr. Spé]

DA FONSECA, Margarete G. **Tijolos de cinzas. Cinza de carvão mineral e cinza da casca de arroz. Alternativas tecnológicas na fabricação de novos elementos construtivos para alvenarias**. Pelotas, Rio Grande do Sul. S/d

DAN, T.K; Chatterjee, M.K. Role of lime-gypsum mixed activators on the strength development of an Indian blast furnace slag. **Indian Journal of Technology**. Vol.20, 1982, pp. 349-355

DIN 106 - Sandlime bricks and blocks; facing bricks and hard-burnt facing bricks (Blocos de silício - calcário). Beuth Verlag GmbH. Alemanha

DIN 4165 – Autoclaved aerated concrete blocks and flat elements (Blocos de concreto celular). Beuth Verlag GmbH. Alemanha

DNER - ME 093/94. Solos - determinação da densidade real. 1994.

DONGXU, Li *et al.* The activation and hydration of glassy cementitious materials. **Cement & Concrete Research** 32 (2002) 1145–1152

FAJARDO,B. **Aproveitamento de dois resíduos Industriais – Pó do corte do granito e do Catalisador do craqueamento dopetróleo - na fabricação de**

**elementos construtivos estruturais.** Dissertação (MSc – Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005, 312 p. [Orientador: Francisco José Casanova de Oliveira e Castro]

FARIA, F. S. **Índice da Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos – IQA.** Dissertação. 2002. (MSc) – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2002.

FAO. **Energia para la agricultura mundial.** Roma, 1980.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Disponível em: [www.feam.br](http://www.feam.br) Acesso em 25 de agosto de 2006.

\_\_\_\_\_. **Inventário estadual de resíduos sólidos industriais de Minas Gerais:** relatório final. Belo Horizonte: outubro, 2003.

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.feema.rj.gov.br/gerenciamento-residuos-inventario.asp?cat=90&subcat=100> Acesso em 01 de julho de 2007.

FRIAS, M.; ROJAS, M. I. Sanchez. The pozzolanic activity of different materials, its influence on the hydration heat in mortars. **Cement & Concrete Research**, Vol. 26, No. 2, pp. 203-213, 1996.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO - Centro de Estatística e Informações. Déficit habitacional no Brasil 2005. **Projeto PNUD-BRA-00/019 Habitar Brasil – BID.** Ministério das Cidades – Secretaria Nacional de Habitação. Belo Horizonte, 2006. 120p.

GOLYNKO-VOL'FSON, S. L., SUDAKA, L. G., *J. Appl. Chem. USSR*, 38, 1441 (1964).

HELLER, L. **Saneamento e saúde.** Brasília: OPAS/OMS, 1997.

HENRIQUE Jr., M. F. **Manual de Conservação de Energia na Indústria Cerâmica Vermelha.** Rio de Janeiro: INT, 1993.

HOSSAIN, Khandaker M. Anwar. Volcanic ash and pumice as cement additives: pozzolanic, alkali-silica reaction and autoclave expansion characteristics. **Cement & Concrete Research** 35 (2005) 1141– 1144.

HSU, Kung-Chung; HUANG, Chen-Li; TSENG, Yun-Sheng. Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high-performance mortars. **Cement & Concrete Composites** 26 (2004) 657–664.

\_\_\_\_\_. The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials. **Cement & Concrete Research** 35 (2005) 782–787.

HSU, Kung-Chung *et al.* Oil cracking waste catalyst as an active pozzolanic material for superplasticized mortars. **Cement & Concrete Research** 31 (2001) 1815–1820.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2000.** Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria

de Pesquisas. Departamento de População e Indicadores Sociais. Disponível em: [www.ibge.org.br/](http://www.ibge.org.br/) Acesso em 1 de agosto de 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br> Acesso em 22 de maio de 2007.

INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK 2006. Energy Information Administration. U.S. Department of Energy. Washington, DC. June 2006

IPT/CEMPRE - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 1ª ed. São Paulo, Brasil: 2000.

JORNAL O GLOBO – Arquivo. Disponível em : <http://banco.agenciaoglobo.com.br/Pages/Capa/> Acesso em 20 de outubro de 2007.

KLIKSBERG, B. Capital Social e Cultura: Claves Esquecidas do Desenvolvimento. In: **O desenvolvimento sustentável no século XXI**. pp. 02- 10, Rio de Janeiro, 14-15 Maio de 2003.

KRAEMER, Maria Elisabeth Pereira (Professora e integrante da Equipe de Ensino e Avaliação na Pró-Reitoria de Ensino da UNIVALI – Universidade do Vale do Itajaí. Mestre em Relações Econômicas Sociais e Internacionais pela Universidade do Minho-Portugal). **Resíduos Industriais e a Questão Ambiental**. 20 de junho de 2007.

KUMAR, S. Fly ash-lime- phosphogypsum cementitious binder: a new trend in bricks. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, Vol. 33, January-February 2000, pp 59-64.

LEI 6.803. **Diretrizes Básicas para o Zoneamento Industrial nas Áreas Críticas de Poluição**. Julho de 1980.

LEI 6.938. **Política Nacional do Meio Ambiente**. Agosto de 1981

LEI 9.605. **Lei de Crimes Ambientais**. Fevereiro de 1998

LERIPIO, A. A. **Gerenciamento de resíduos**. Disponível em: <http://www.eps.ufsc.br/~lgqa/Coferecidos.html> Acesso em 05 de Maio de 2007.

LI, Beixing; LIANG, Wenquan; HE, Zhen. Study on high-strength composite portland cement with a larger amount of industrial wastes. **Cement & Concrete Research** 32 (2002) 1341–1344

LOPES, Ignez Vidigal.(coord. Geral). **O mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL**: guia de orientação. Rio de Janeiro : Fundação Getúlio Vargas, 2002. 90 p. Editado sob o patrocínio do BNDES e da Unctad.

LUCENA, André Frossard Pereira de. **Estimativa de uma curva de Kuznets ambiental aplicada ao uso de energia e suas implicações para as emissões de carbono no Brasil**. Dissertação. 2005. (MSc - Planejamento Energético) - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005, 124p. [Orientadores: Roberto Schaeffer e Giovani Vitória Machado]

LUZ, A.B. Zeólitas: Propriedades e Usos Industriais. n.68, **Série Tecnológica Mineral**. CETEM. Rio de Janeiro, 1995.

LUZ *et al.* À beira do abismo. **Revista Época** (211), Junho de 2002.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Brasil. Empresa de Pesquisa Energética **Balanco Energético Nacional 2003**: ano base 2002. Relatório final/Ministério de Minas e Energia.

\_\_\_\_\_. Brasil. Empresa de Pesquisa Energética **Balanco Energético Nacional 2006**: ano base 2005. Relatório final/Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro : EPE, 2006.188 p.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Emissões de gases de efeito estufa do sistema energético – Abordagem bottom-up**, in: Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa, Brasília, 2002.

\_\_\_\_\_. **Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no mundo**. Disponível em: [http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0023/23473.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0023/23473.pdf) Acesso em 22 de Outubro de 2007.

MONTEIRO, José Henrique Penido *et al.* **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Coordenação técnica: Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Administração Municipal - IBAM, 2001. 200 p. Patrocínio: Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República – SEDU/PR.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara S.A. 1983.

OFICEMEN - La Agrupación de Fabricantes de Cemento de España. Disponível em: <http://www.oficemen.com/eventos/inicio.php> Acesso em: 20 de maio de 2007.

PACEWSKA, B; BLONKOWSKI, G; WILINSKA, I. Investigations of the influence of different fly ashes on cement hydration. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Vol. 86 (2006) 1, 179–186

PACEWSKA, B.; BUKOWSKA, M.; WILINSKA, I. Effect of waste aluminosilicate material on hydration and properties of cement mortars. **Cemente & Concret Researche**, v.32, pp. 1823-1830, 2002.

PAYÁ, J., MONZÓ, J., BORRACHERO, M.V. Fluid catalytic cracking catalytic residue (FC3R). An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cements mixture. **Cemente & Concret Researche**, v.29, pp. 1777-1779, 1999.

PAYÁ, J. *et al.* Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R–lime pastes. **Cement & Concrete Research** 33 (2003) 1085–1091.

POZOLANA. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Pozolana> Acesso em 02 de julho de 2006.

PRICE, W.H. Pozzolan – A Review. **ACI Journal**, pp. 225-232, 1975

PROGRAMA DE MODERNIZAÇÃO DO SETOR SANEAMENTO. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento(SNIS)**: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos 2004. Brasília: Ministério das Cidades, SNSA, 2006. 381 p.: gráficos, tabelas.

ROBBINS, Alicia *et al.* **China Sourcebook**: an introduction to the chinese residential construction and building materials market. April 2004

ROSEN, G. **Uma história da saúde pública**. (Saúde em debate; 74) São Paulo: HUCITEC, 1994.

SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA DE SAÚDE PÚBLICA, 1., 21 e 22/03/2002, Recife. Oficina de trabalho: moradia e saúde. **Rede brasileira de habitação para a saúde**. Documento base.

SHI, C; DAY, R.L. Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans **Cement and Concrete Research**, Vol 23, Issue 6, 1993, Pages 1389-1396

SLAG CEMENT AND CONTROLLED LOW STRENGTH MATERIAL. **Slag Cement in Construction** nº 24. Slag Cement Association, 2005.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Disponível em: <http://www.snic.org.br/> Acesso em 30 de maio de 2007.

SOARES, J. H. P. **Resíduos sólidos módulo IV**: parâmetros para a gestão ambiental. Curso de Especialização em Gestão Ambiental em Municípios. Programa Interdisciplinar de Gestão Ambiental e Biodiversidade (PIGAB). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, 1999, 123 p.

SU, Nan *et al.* Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution. **Cement & Concrete Research** 30 (2000) 1773±1783.

TETTI, Laura (red.); CARDOSO, Paulo Henrique (coord.); DROLSHAGEN, Marcia e JÚNIOR, Eduardo Leão (colab.). **Mecanismo de desenvolvimento limpo** - conselho empresarial brasileiro para o desenvolvimento sustentável. Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no mundo. Última compilação do site da CQNUMC: 13 de novembro de 2007

THE NEW LIGHT OF MYANMAR Friday, 19 march, 2004

THOMARK, Catarina. A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. **Building and Environment** 37 (2002) 429 – 435.

\_\_\_\_\_. Conservation of energy and natural resources by recycling building waste. **Resources, Conservation and Recycling** 33 (2001) 113–130.

VIDAL, José Walter Bautista. A posição do Brasil frente ao novo ambiente mundial. **Revista Eco** 21, Ano XIII, nº 75, fevereiro de 2003.

WACHSMANN, Ulrike. **Mudanças no consumo de energia e nas emissões associadas de CO2 no Brasil entre 1970 e 1996** - uma análise de decomposição natural. 2005. Tese (DSc – Planejamento energético) – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005 – 207p. [Orientador: Roberto Schaeffer]

WILD, S. et al. Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils. **Engineering Geology** **51** (1998) 37–53.

WU, J.-H. et al. The effect of oil-cracking on catalyst on the compressive strength of cement paste and mortars. **Cemente and Concret Research**, v.30, pp. 245-253, 2003.

YOHANIS, Y. G.; NORTON, B. Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK. **Energy** **27** (2002) 77–92.

ZHANG, Z., Energy efficiency and environmental pollution of brickmaking in China, **ENERGY**, vol.22, pg. 33-42, 1997.

ZIMBELMANN, R. A method for strengthening the bond between cement and aggregate. **Cement & Concret Research**, vol. 17(4), pp. 651-660, 1987.

---

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

---

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Índice de atividade pozolânica com a cal. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752**. Materiais pozolânicos: determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com a cal. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5753**. Cimento Portland pozolânicos: determinação da pozolânicidade. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457**. Solo: determinação da umidade natural. Rio de Janeiro. 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**. Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**. Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

BAIRD, George et al. The energy embodied in building materials- updated New Zealand coefficients and their significance. **IPENZ Transactions**, Vol. 24, N°. 1/CE, 1997.

CASANOVA, F.J. **Fundamentos (mecanismo) da dosagem físico-química do solocimento**, 26ª. RAPv, vol 1, pp 87, Aracajú-SE, 1992.

\_\_\_\_\_. **Reatividade e tamanho de partículas de caolinita em latossolos**. 25ª. RAPv, pg. 537, São Paulo, s/d.

\_\_\_\_\_. **Um estudo físico químico matemático da estabilização alcalina de solos argilosos**. Tese (MSc) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1981.

COSTA, Edson Álvares da; DAINESE, Ivonéte; MONTEIRO, Ricardo. Energia: distribuidoras suspendem contratos para elevar preços. **Gazeta Mercantil**. Sexta, 11 de janeiro de 2008.

ENGWERE. Disponível em:

[http://www.engwhere.com.br/engenharia/dicas\\_orcamentista.htm](http://www.engwhere.com.br/engenharia/dicas_orcamentista.htm) Acesso em 10 de julho de 2006.

FAPESP. Disponível em:

<http://www.revistapesquisa.fapesp.br/?art=1173&bd=1&pg=1&lg=> Acesso em 20 de agosto de 2006.

FERREIRA, Rosângela. **Avanços tecnológicos na recuperação de materiais provenientes dos resíduos sólidos industriais**. São Paulo: Golder Associates Brasil, 2004

HARRIS, D. J. A quantitative approach to the assessment of the environmental impact of building materials. **Building and Environment** **34** (1999) 751-758. Received 7 July 1998; accepted 14 September 1998.

HE, Changling (a); OSBZCK, Bjarne (b); MAKOVICKY, Emil. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects. **Cement & Concrete Research**, Vol. 25. No. 8, pp. 1691-1702.1995.

KENAI, S; BAHAR, R.; BENAZZOUG, M. Performance of compacted cement-stabilised soil. **Cement & Concrete Composites** **26** (2004) 811–820. Received 6 November 2002; accepted 12 January 2004.

MONTANHEIRO, Tarcísio José; YAMAMOTO, Jorge Kazuo; KIHARA, Yushiro. Proposta de pré-qualificação pozolânica de materiais geológicos: difratometria de raios x como método alternativo. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo, 24(1/2), 1-9, 2003.

NASCIMENTO, Roberta do. **Brasil é o terceiro em projetos MDL no mundo**. Disponível em: [www.terra.com.br](http://www.terra.com.br) Acesso em 16 de abril de 2006.

PEDROZO, Soraia Abreu. **Saiba o que é um projeto de MDL**. Disponível em: [www.terra.com.br](http://www.terra.com.br) Acesso em 1 de junho de 2006.

SECIL. Disponível em: [http://www.secil.pt/default.asp?pag=historico\\_cimento](http://www.secil.pt/default.asp?pag=historico_cimento) Acesso em 02 de julho de 2006.

SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4.,2001 **Anais**: materiais reciclados e suas aplicações. Comitê Técnico – 206 Meio Ambiente. IBRACON - Instituto Brasileiro de Concreto, junho de 2001.

TAHA, R. A. *et al.* Evaluation of controlled low strength materials containing industrial by-products. **Building and Environment** **42** (2007) 3366–3372.

TSIMAS, S; MIRA, P.; PAPADAKIS, V. G. Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete. **Cement & Concrete Research** **32** (2002) 683–689.

TSIVILIS, S *et al.* Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements. **Cement & Concrete Composites** **27** (2005) 191–196.