

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS

**DESENVOLVIMENTO DE AGREGADOS LEVES A PARTIR  
DE SUBPRODUTO DA MINERAÇÃO DE CARVÃO E DE  
LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES  
DE INDÚSTRIA TÊXTIL**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
SANTA CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM ENGENHARIA

**MARA REGINA MENDES**

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1998

**DESENVOLVIMENTO DE AGREGADOS LEVES A PARTIR DE  
SUBPRODUTO DA MINERAÇÃO DE CARVÃO E DE LODO DE  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE  
INDÚSTRIA TÊXTIL**

**MARA REGINA MENDES**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do Título de

**MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Especialidade Ciência e Engenharia de Materiais e aprovada em sua forma final  
pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.



---

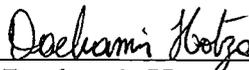
Prof. Humberto Gracher Riella, Dr. Ing.  
Orientador



---

Prof. Carlos V. Speller, Dr. és-Sc.  
Coordenador

Banca Examinadora:



---

Prof. Dachamir Hotza, Dr. Ing.  
(Presidente)



---

Prof.ª Janaíde Cavalcante Rocha, Dr. Ing.



---

Prof. Hugo Moreira Soares, Ph.D

# **AGRADECIMENTOS**

A todas as pessoas que de uma forma ou de outra auxiliaram neste trabalho, seja através de algum auxílio direto, ou pela simples presença amiga...

Aos meus pais e irmão pelo constante incentivo, confiança, paciência e carinho.

Ao professores Humberto Gracher Riella e Janaíde Cavalcante Rocha  
pela orientação e apoio.

Todos foram importantes... a sua maneira.

Ao Centro de Tecnologia em Cerâmica (CTC), ao Laboratório de Materiais (LABMAT/UFSC), ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), ao Laboratório de Química Ambiental (LQA/UFSC), ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC/UFSC), ao Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE/UFSC), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Mineradora Metropolitana.

*Aos meus pais, José e Norma, e  
irmão, Carlos Alberto Mendes.*

*Aos amigos, Ingeborg Kühn e Etney  
Neves.*

# SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE TABELAS .....	x
ABREVIATURAS.....	xi
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. Introdução .....	1
1.1 Problemática da geração de lodo .....	2
1.2 Subprodutos do beneficiamento do carvão .....	3
1.3 Objetivos .....	4
2. Fundamentação teórica .....	6
2.1 Indústria têxtil .....	6
2.1.1 Matérias-primas .....	7
2.1.2 Processamento têxtil .....	8
2.2 Lodos de estação de tratamento de efluentes .....	12
2.3 Destino final do lodo .....	13
2.3.1 Uso na agricultura .....	14
2.3.2 Deposição em aterro industrial .....	15
2.3.3 Estabilização .....	16
2.3.4 Incineração .....	16
2.3.5 Reutilização .....	18
2.4 Agregados leves .....	18
2.4.1 Concretos leves .....	19
2.4.2 Classificação dos concretos com agregados leves .....	20
2.4.3 Classificação e terminologia dos agregados leves .....	20
2.4.4 Propriedades dos agregados leves .....	22
2.5 Fenômeno de expansão pirolástica .....	23
2.5.1 Influência da composição química .....	26
2.5.2 Influência da composição mineralógica .....	28
2.5.3 Influência da composição granulométrica .....	29
2.5.4 Verificação da expansão .....	29
2.6 Lodo na fabricação de agregados leves .....	30
2.6.1 Sinterização de lodo .....	30
2.6.2 Sinterização de cinza de lodo .....	31
2.6.3 Sinterização de mistura lodo-argila .....	32
2.7 Características do lodo utilizado neste trabalho .....	33
2.8 Subprodutos do beneficiamento do carvão .....	36
3. Procedimento experimental .....	39
3.1 Definição da metodologia .....	39
3.2 Coleta e procedimento adotado para a caracterização das matérias-primas .....	41
3.3 Metodologia para obtenção de agregados a partir da mistura lodo-R3-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	43
3.3.1 Procedimento para o beneficiamento do R3 .....	45
3.3.2 Formulação e preparo dos corpos de prova .....	45
3.3.3 Tratamento térmico .....	46
3.4 Caracterização dos corpos de prova queimados .....	47
3.4.1 Absorção de água .....	47
3.4.2 Densidade aparente .....	47

3.4.3	Análises química, cristalográfica e microestrutural.....	48
3.4.4	Resistência à compressão .....	49
4.	Caracterização das matérias-primas.....	50
4.1	Caracterização do lodo.....	50
4.1.1	Composição química.....	50
4.1.2	Análises térmica e de fases.....	52
4.1.3	Análise por microscopia eletrônica de varredura e microsonda .....	54
4.2	Caracterização do R3.....	56
4.2.1	Composição química.....	56
4.2.2	Análises térmica e mineralógica.....	57
4.2.3	Caracterização física.....	60
4.3	Caracterização do carbonato de sódio.....	60
5.	Caracterização do agregado leve .....	62
5.1	Resultados preliminares .....	62
5.2	Análise térmica .....	63
5.2.1	Influência do teor de lodo .....	64
5.2.2	Influência da taxa de aquecimento.....	66
5.3	Morfologia.....	68
5.3.1	Amostras contendo 10% de lodo.....	68
5.3.2	Amostras contendo 30% de lodo.....	71
5.4	Densidade aparente .....	75
5.5	Absorção de água .....	76
5.6	Resistência à compressão .....	78
5.7	Composição química e de fases.....	80
5.7.1	Composição química.....	80
5.7.2	Composição das fases cristalinas .....	81
5.7.3	Diagrama de Riley-Wilson.....	88
6.	Conclusões .....	91
	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	95
	BIBLIOGRAFIA .....	96
	ANEXOS .....	104

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2.1 - Despejos provenientes do processamento de tecidos de algodão e sintéticos (Braile, 1979; CETESB, 1991). .....	10
Figura 2.2- Possibilidades para destino do lodo de estações de tratamento de efluentes. ....	13
Figura 2.3 - Formação de uma fase vítrea contínua que favorece o fenômeno de expansão (Mendes, 1998). ....	25
Figura 2.4 - Pressão interna exercida pelos gases contra a pressão opositora ( $P_{op}$ ) da camada superficial (Mendes, 1998). ....	26
Figura 2.5 – Diagrama de Riley/Wilson. Mostra a região de composição que permite formar uma massa viscosa o suficiente para a expansão, segundo Riley (1951) e Wilson (1954).....	27
Figura 2.6 – Coleta do lodo em contêiner na saída do filtro prensa de cinto.....	35
Figura 2.7 – Representação de uma camada de carvão .....	36
Figura 2.8 – Esquema do beneficiamento do carvão, mostrando a geração de subprodutos. ....	37
Figura 3.1 – Matérias-primas empregadas e suas características. ....	39
Figura 3.2 – Fluxograma de caracterização do lodo. ....	41
Figura 3.3 – Metodologia adotada neste estudo para obtenção de agregados leves.....	43
Figura 3.4 - Equipamento para a medida da densidade aparente .....	47
Figura 4.1 - Curvas de análise térmica (ATD/TG) simultânea do lodo. ....	51
Figura 4.2 - Difratomia de raios-X do lodo sem tratamento térmico (a), calcinado a 750°C (b) e calcinado a 1050°C (c). ....	52
Figura 4.3 – Perfis de concentração do lodo, seco (a), calcinado a 750°C (b), e calcinado a 1050°C (c), obtidos por microsonda. ....	54

Figura 4.4 - Difratoograma de Raios-X do R3.....	56
Figura 4.5 - Curva de análise térmica simultânea (ATD/TG) do R3.....	57
Figura 4.6 - Distribuição granulométrica das partículas do R3 beneficiado.....	59
Figura 4.7 – Curva de análise térmica do carbonato de sódio.....	60
Figura 5.1 – Corpos de prova antes da queima.....	62
Figura 5.2 – Curvas de (a) ATD e (b) TG das formulações C10, C30 e R3- 10%Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	63
Figura 5.3 – Curvas de análise térmica (a) diferencial (ATD) e (b) gravimétrica (TG) da formulação C10, variando-se a taxa de aquecimento (10°C/min e 30°C/min).....	66
Figura 5.4 – Agregados leves de R3-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -lodo, contendo 10% de lodo.....	67
Figura 5.5 – Agregados leves de R3-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -10% de lodo (queima à 20°C/min, 1250°C, 30 minutos): (a) corpo de prova inteiro, e (b) seccionado após embutimento, mostrando as diferentes regiões ao longo de sua seção transversal.....	68
Figura 5.6 – Micrografias, obtidas por MEV, de agregados contendo 10% de lodo: (a) núcleo interno, (b) região interna e intermediária, (c) superfície de um corpo (queima à taxa de 20°C/min, 1200°C, 15 min); (d) região interna do corpo de prova (queima à 20°C/min, 1250°C, 30 min).....	69
Figura 5.7 – Região interna de um corpo de prova contendo 10% de lodo.....	70
Figura 5.8 – Agregados leves de R3-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -lodo, contendo 30% de lodo.....	70
Figura 5.9 – Agregados contendo 30% de lodo: (a) indicação de <i>crateras</i> na superfície, e (b) corpo de prova embutido em resina e seccionado.....	71
Figura 5.10 – Agregados leves: (a) argila expandida Cinasita e (b) agregado a base de R3-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -30% de lodo.....	72
Figura 5.11 – Micrografias, obtidas por MEV, mostrando a região (a) interna e (b) externa de um corpo de prova contendo 30% de lodo.....	73
Figura 5.12 – Densidade aparente (D <sub>ap</sub> ) e desvio padrão (DP) de corpos de prova contendo 10% e 30% de lodo para diferentes condições de queima.....	74

Figura 5.13 – Absorção de água (AA), pelo método da fervura, e desvio padrão (DP) de corpos contendo 10% e 30% de lodo para diferentes condições de queima. ....	76
Figura 5.14 - Resistência à compressão para argila expandida e para diferentes amostras de agregado de Lodo-R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . ....	78
Figura 5.15 - Difratoograma de agregado leve contendo 10% de lodo. ....	81
Figura 5.16 - Difratoograma da camada superficial de corpos com 10% de lodo. ....	82
Figura 5.17 - Difratoograma de agregado leve contendo 30% de lodo. ....	82
Figura 5.18 – Micrografia, obtida em MEV por elétrons retro-espalhados, mostrando a região central de um agregado contendo 10% de lodo. ....	83
Figura 5.19 – Perfis de concentração de um corpo de prova contendo 10% de lodo: (a) região central, e (b) região próxima à superfície. ....	84
Figura 5.20 – Perfis de concentração de um corpo contendo 30% de lodo: (a) região central e (b) superfície. ....	85
Figura 5.21 – Micrografia da camada superficial, de um agregado contendo 30% de lodo, apresentando cristais hexagonais dispersos desordenadamente numa matriz. ....	85
Figura 5.22 – Diagrama ternário, apresentando as regiões de expansão segundo Riley (linha contínua) e Wilson (linha pontilhada) e o plote das formulações C10 e C30 e dos agregados desenvolvidos neste estudo. ....	88

## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Produtos químicos auxiliares têxteis utilizados na unidade fornecedora de lodo. ....	34
Tabela 2.2 – Identificação dos efluentes líquidos e resíduos sólidos da unidade fabril (adaptado de Coelho, 1996). ....	35
Tabela 3.1 – Relação de equipamentos e das análises correspondentes para a caracterização físico-química das matérias-primas. ....	40
Tabela 3.2 – Denominações e quantidades empregadas para cada formulação.....	44
Tabela 3.3 - Condições de tratamento térmico e denominações adotadas.....	46
Tabela 4.1 - Análise semi-quantitativa do lodo por FR-X, percentual em massa. ....	49
Tabela 4.2 – Análise semi-quantitativa do lodo por espectroscopia de emissão, percentual em massa. ....	50
Tabela 5.1 – Composição química de agregados de Lodo-R3-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> via FR-X.....	79
Tabela 5.2 – Composição química adaptada de formulações e agregados.....	87

## **ABREVIATURAS**

AA	- Absorção de água
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AICE	- Asociacion de Investigacion de la Industrias Ceramicas / Espanha
ATD	- Análise Térmica Diferencial
ATS	- Análise Térmica Simultânea
CETESB	- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental / SP
CTC	- Centro de Tecnologia em Cerâmica
D <sub>ap</sub>	- Densidade aparente
DP	- Desvio padrão
DR-X	- Difração de Raio-X
E.T.E	- Estação de Tratamento de Efluentes
EDS	- Espectrômetro de energia dispersiva de raios-X
ECV	- Departamento de Engenharia Civil / UFSC
EMC	- Departamento de Engenharia Mecânica / UFSC
EPA	- Environmental Protection Agency
FIESC	- Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas / SP
IPEN	- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares / SP
ISO	- International Standards Organization
LABMAT	- Laboratório de Materiais / EMC / UFSC
LARESO	- Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos / ENS / UFSC

- LMCC** - Laboratório de Materiais de Construção Civil / ECV / UFSC
- MEV** - Microscopia Eletrônica de Varredura
- NPC** - Núcleo de Pesquisa em Construção / ECV / UFSC
- SABESP** - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
- s.d** - sem data
- TG** - Análise termogravimétrica
- UFSC** - Universidade Federal de Santa Catarina

## **RESUMO**

No presente trabalho desenvolveu-se, em escala laboratorial, agregados leves para a construção civil a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes de uma indústria têxtil. Ao lodo, adicionou-se um subproduto da mineração do carvão, o R3 e um fundente,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , obtendo-se uma massa, que após extrusão e queima, expandiu piroplasticamente. Os corpos de prova obtidos apresentaram estrutura interna porosa, recoberta por uma camada vítrea. Avaliou-se a influência da formulação (10% e 30% de lodo) na morfologia, resistência mecânica, composição química e de fases cristalinas, densidade aparente e absorção de água dos agregados. Em relação aos parâmetros de tratamento térmico (taxa de aquecimento, temperatura e tempo de patamar), avaliou-se o seu efeito sobre a densidade aparente e a absorção de água. Os agregados desenvolvidos apresentam baixa densidade aparente, entre 1 e 1,6  $\text{g/cm}^3$  para os corpos formulados com 10% de lodo, e menor que 1  $\text{g/cm}^3$ , naqueles com 30% de lodo. Verificou-se, ainda, que a resistência mecânica é adequada (mesma ordem de grandeza de agregados comerciais), a absorção de água é elevada, e as fases formadas são estáveis. Eventuais componentes poluentes do lodo são estabilizados pela fase vítrea formada. O conjunto de observações indica que a produção de agregados leves é uma interessante alternativa, em termos técnicos e ambientais, para o problema de disposição do lodo.

## **ABSTRACT**

In the present work lightweight aggregates for the civil construction starting from wastewater treatment plant sludge of a textile industry were developed in laboratory scale. To the sludge, it was added R3, a by-product of the coal mining, and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , a fluxing agent, obtaining a mass that bloated, after extrusion and burning. The obtained aggregates presented vesicular structure, covered by a glassy layer. The influence of the formulation (10% and 30% sludge) on the morphology, mechanical strength, chemical and crystalline phases composition, bulk density and water absorption of the aggregates was evaluated. The parameters of thermal treatment (heating rate, temperature and time of landing) were varied and their effect on bulk density and water absorption was studied. The developed aggregates presented low bulk density, between 1 and  $1.6 \text{ g/cm}^3$  for the bodies formulated with 10% sludge, and smaller than  $1 \text{ g/cm}^3$ , in those with 30% sludge. It was also verified that the mechanical strength is appropriate, and the formed phases are stable. Eventual pollutant components of the sludge were stabilised by the glassy phase. This indicates that the use of sludge in production of lightweight aggregates is an interesting alternative to the problem of sludge disposal, considering technological and environmental aspects.

# **1. INTRODUÇÃO**

O meio ambiente, seja associado a imagem de marca, redução de perdas ou imposição regulamentar, transformou-se num critério necessário para as estratégias de desenvolvimento empresarial. Em relação aos resíduos, pode-se dizer que mais importante que tratá-los é saber evitar sua produção e, desde que essa produção seja inevitável, deve-se escolher a melhor forma de tratamento, visando sua reutilização ou deposição adequada.

A reutilização de certos materiais considerados como resíduos, permite que estes retornem ao ciclo de processamento para uso posterior, otimizando a relação energia/meio ambiente/materiais, o que acarreta num melhor aproveitamento dos recursos, sejam eles materiais ou energéticos. No entanto, é necessário um alto nível de tecnologia e de desenvolvimento de materiais, a fim de poder competir com os materiais convencionais. O mérito se prende aos casos nos quais os materiais obtidos são comparáveis aos materiais convencionais em aparência, propriedades e qualidade de serviço - sem a penalidade de custo adicional (Cohen, 1979). Dar um destino nobre para estes subprodutos constitui um grande desafio.

Em Santa Catarina está situado um dos maiores pólos têxteis do Brasil e um importante parque carbonífero.

As indústrias têxteis, nos processos de alvejamento e tingimento, geram considerável volume de efluentes líquidos. Os efluentes líquidos e sanitários são tratados em estações de tratamento biológico, de onde resulta o lodo, um subproduto semi-sólido. Devido à inexistência de uma estrutura adequada à deposição final, os lodos geralmente são depositados em aterros sanitários ou clandestinos. Desta maneira, a disposição destes acarreta em uma elevação dos custos de produção ou em problemas ambientais, com riscos de contaminação do lençol freático. Por outro lado, o reaproveitamento como matéria-prima em outro processo parece ser uma solução interessante, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico.

O lodo de estações de tratamento de efluentes tem sido utilizado na produção de materiais para a construção civil. Destaca-se que o emprego de lodo na produção de

agregado leve, já vem sendo abordado em pesquisas existentes no Brasil, mais precisamente a respeito da utilização de lodo de estações municipais de tratamento de efluentes para obtenção de agregado leve.

Por outro lado, o beneficiamento do carvão produz inúmeros subprodutos em quantidade considerável (cerca de 55% do carvão minerado). São subprodutos da mineração do carvão: os finos do carvão e os rejeitos piritosos (R1), argilosos (R2) e carbonosos (R3). Estes costumam ser depositos inadequadamente e por serem ricos em sulfeto de ferro acarretam em poluição do meio (Projeto Siderópolis, 1991). O rejeito carbonoso R3 constitui um folhelho xistoso, rico em sílica, cujo reaproveitamento praticamente não foi abordado. Entretanto, verifica-se na literatura que folhelhos e xistos argilosos costumam ser utilizados como matéria-prima de agregados leves obtidos por expansão pirolástica (Tezuka, 1973; Souza Santos, 1992).

Diversos estudos mostram que o emprego de agregado leve no concreto traz diversas vantagens para o mesmo, como menor peso da obra, menor custo da estrutura, isolamento térmico e acústico (Tezuka, 1973). Porém seu uso no Brasil é restrito, entre outros motivos, pela escassez de matérias-primas naturais para sua obtenção, e principalmente, pelo desconhecimento tecnológico das propriedades desse produto.

Atualmente existe uma empresa no Brasil, localizada em Jundiaí (SP), que produz agregado leve a partir de argila expandida.

Neste trabalho propõe-se caracterizar o lodo produzido numa estação de tratamento de efluentes, do tipo lodo ativado, de uma indústria têxtil do Estado, assim como o rejeito R3 do beneficiamento do carvão, e utilizá-los como matérias-primas para obtenção de agregados leves para uso na construção civil.

## **1.1 PROBLEMÁTICA DA GERAÇÃO DE LODO**

Santa Catarina apresenta um expressivo parque fabril, no qual se destaca o setor têxtil. O complexo têxtil catarinense é o terceiro maior do país e inclui algumas

das principais indústrias têxteis brasileiras. Na região do Vale do Itajaí, e mais especificamente em Blumenau (SC), está concentrada grande parte da produção.

As indústrias têxteis, no geral, produzem grande volume de subprodutos, sob forma de emanações gasosas, líquidas e subprodutos sólidos. Os despejos líquidos são tratados em estações de tratamento de efluentes, de onde origina-se o lodo. De acordo com o levantamento de Prim (1998), são gerados em Santa Catarina 20 mil toneladas por mês de lodo.

O setor têxtil tem realizado um grande esforço para reduzir o impacto ambiental por ele provocado. Apesar da adoção de novas tecnologias e matérias-primas menos poluentes, o lodo produzido nas estações de tratamento apresenta grande potencial poluente, necessitando de destino adequado.

Atualmente algumas indústrias têxteis de Blumenau depositam o lodo no Aterro Sanitário Municipal daquela cidade, ao custo de R\$ 6,00 a tonelada. Entretanto, este aterro não é adequado para a deposição desses resíduos industriais, tendo sido estabelecido pela Prefeitura Municipal de Blumenau o limite até início de 1999 para depósito do lodo neste local. A partir do vencimento deste prazo, o lodo terá que ser enviado a um aterro industrial, localizado num município próximo a Blumenau. No aterro industrial, o custo para a deposição do lodo será consideravelmente mais elevado, dependendo do teor de umidade: R\$ 70,00 por tonelada para o lodo com 60-80% de umidade; e, R\$ 75,00 por tonelada para o lodo com umidade superior a 80%. Ressalta-se também que o custo do transporte do lodo também aumentará.

Tendo em vista este considerável aumento no custo de deposição do lodo, as empresas geradoras procuram tanto diminuir o volume de lodo gerado, como dar novo destino para o lodo.

## **1.2 SUBPRODUTOS DO BENEFICIAMENTO DO CARVÃO**

No sul do Estado de Santa Catarina está localizado um importante parque carbonífero, onde se produz a maior parte de carvões do Brasil. É formado por minas,

grande quantidade de subprodutos. Cerca de 55% do carvão extraído da mina constituí-se em subprodutos do beneficiamento.

Visto que há sulfetos, como a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), nas camadas de carvão e rochas adjacentes, os subprodutos do beneficiamento e queima do carvão costumam ser ricos nestes constituintes. A oxidação dos sulfetos, quando expostos ao ar e a água, acarreta em degradação dos solos e dos recursos hídricos (Projeto Siderópolis, 1991). O grande volume de subprodutos gerados, associado ao forte potencial poluente dos mesmos e à inexistência de destino final adequado, acarretou em degradação ambiental de proporções alarmantes nesta região no passado. Foram adotadas medidas visando diminuir o grau de degradação na região, o que trouxe melhorias consideráveis. Porém, a maioria dos subprodutos da mineração e beneficiamento do carvão ainda são depositados indiscriminadamente a céu aberto, como nas margens de corpos d'água, sobre os mesmos e em áreas planas inundáveis.

São subprodutos do beneficiamento do carvão: os finos de carvão e os folhelhos piritoso, argiloso, e carbonoso, denominados respectivamente como Rejeitos 1, 2 e 3 (R1, R2 e R3).

A deposição dos subprodutos do beneficiamento do carvão representa um problema para a região carbonífera. Tanto do ponto de vista econômico, como ambiental, é muito importante a reutilização dos mesmos. Na região carbonífera catarinense, o R3 tem sido utilizado apenas como base de estrada.

### 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral o desenvolvimento em escala laboratorial de agregado leve a partir do lodo de estação de tratamento de efluentes de uma indústria têxtil e do subproduto R3 da mineração do carvão. Para tal, utilizam-se ainda fundentes. As razões para escolha das matérias-primas são discutidas no capítulo 3.

Especificamente, pretende-se:

- (1) caracterizar o lodo e o R3, que são as matérias-primas empregadas no estudo;

- (2) desenvolver formulação e ciclo de tratamento térmico que possibilitem obtenção de agregado com características que correspondam às especificações técnicas; e, por fim,
- (3) caracterizar o agregado leve desenvolvido, em termos de composição química e de fases, micro e macroestrutura desenvolvida, densidade aparente e absorção de água.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Para alcançar os objetivos propostos, faz-se necessário um entendimento dos processos que levam à obtenção do lodo, de suas características e de suas possíveis aplicações. Este capítulo procura traçar vinculações entre estes temas, enfatizando os aspectos referentes ao lodo gerado nas estações de tratamento de efluentes de indústrias têxtil, uma vez que este é o material básico deste trabalho.

Na medida em que se desenvolve o capítulo, dados de volume de produção e grau de toxidez são mostrados, objetivando caracterizar a importância efetiva da busca de soluções para minimizar a produção de lodo, bem como utilizá-lo de forma conveniente.

O uso do lodo ou de sua cinza como matéria-prima para agregados leves tem uma aplicação particularmente interessante na construção civil, levando a consideráveis benefícios econômicos e técnicos nesta área, bem como ao efetivo aproveitamento deste resíduo. O uso de concreto com agregado leve obtido a partir da pelotização de lodo (ou cinzas), convenientemente processado, bem como agregado leve convencional, conduz a um aumento de produtividade relacionado à perda de peso, ao melhor isolamento térmico e acústico e assim à otimização do conforto ambiental, a possibilidade de construir estruturas de grande vão livre, ideal para grandes espaços, pontes e aplicações congêneres.

Apresentam-se informações sobre a empresa fornecedora do lodo utilizado nesta dissertação, bem como do processo empregado na sua geração. Ao final, apresentam-se dados sobre os subprodutos do beneficiamento do carvão.

### **2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL**

O processamento industrial e os despejos líquidos gerados pela indústria têxtil variam à medida que a pesquisa e o desenvolvimento produzem novos reagentes,

novos processos, novos maquinários, novas técnicas e, ainda são também função da demanda de consumo por determinados tipos de tecidos e/ou cores (CETESB, 1991).

Nos últimos anos, como decorrência de políticas econômicas e ambientais, muitas indústrias têxteis têm procurado utilizar matérias-primas e processos menos poluentes. Verifica-se uma forte demanda por técnicas que visem: (a) diminuir o consumo de produtos químicos e de água; e (b) modificar o processo de forma a reutilizar produtos químicos na própria planta. Apesar das mudanças, já feitas e ainda por vir, a geração de resíduos no processamento têxtil continua (e certamente continuará) sendo significativa. Desta maneira, processos visando tratamento e destino adequado para estes resíduos apresentam uma inestimável contribuição para a técnica e para a sociedade, no seu sentido mais amplo.

### **2.1.1 Matérias-primas**

Segundo Araújo (1984), as matérias-primas utilizadas no processo têxtil são:

- material têxtil propriamente dito;
- água, que em termos de quantidade é a principal matéria-prima;
- corantes e pigmentos;
- branqueadores ópticos;
- tensoativos, como sabões, detergentes e emulsionadores;
- espessantes, como os amidos, gomas e espessantes sintéticos;
- produtos de acabamento, como amaciantes, fungicidas, impermeabilizantes, antiestáticos; e
- produtos químicos diversos, como ácidos, sais, oxidantes, bases, solventes e redutores.

O mercado de corantes, pigmentos e auxiliares têxteis é bastante competitivo. Constantemente são lançados produtos novos, visando melhorar a qualidade do produto final e diminuir custos.

Os corantes têm a propriedade de absorver apenas determinadas radiações, difundindo as restantes, provocando assim uma sensação de cor. Em relação à classificação dos corantes, se para os químicos interessa fundamentalmente a constituição química, para os têxteis interessa predominantemente o seu comportamento tintorial, relacionado com as condições de aplicação (Araújo, 1984).

Do ponto de vista das propriedades tintoriais, as fibras têxteis podem ser agrupadas em: (a) proteínicas, como lã e seda; (b) celulósicas, como algodão e viscose; (c) hidrófobas, como acetatos de celulose, poliamidas e poliéster (Araújo, 1984). Cada tipo de fibra adequa-se a corantes específicos.

Este estudo enfocará mais detalhadamente as fibras celulósicas, em especial as de algodão, dada sua importância mercadológica e volume de consumo. Segundo Araújo (1984), para estas fibras podem ser utilizados corantes diretos, corantes de cuba, de cuba solubilizados, sulfurosos, reativos, azóicos (insolúveis), de oxidação e ftalocianinas.

*Corantes sulfurosos* são utilizados principalmente para tonalidades escuras. Têm constituição química pouco definida, mas possuem, como característica fundamental, a presença de enxofre (Araújo, 1984).

*Corantes reativos* contêm um grupo diclorotriazinil que pode reagir com a celulose, formando uma ligação covalente que conduz uma boa solidez. A reação do corante com a celulose dá-se em meio alcalino. São os mais freqüentes atualmente para tingir fibras celulósicas (Araújo, 1984).

### 2.1.2 Processamento têxtil

A transformação da fibra crua em tecido acabado ou em fios é essencialmente uma operação a seco, com exceção da fase de lavagem da lã crua (Braile, 1979; CETESB, 1991).

As operações de *acabamento têxtil* constituem a parte mais importante em termos de geração de despejos líquidos. Segundo Araújo (1984), *acabamento* ou *enobrecimento* têxtil engloba o conjunto de operações a que um material têxtil é

submetido após sua fabricação até estar pronto para a confecção. Pode ser subdividido em:

- **Tratamento Prévio:** prepara o material para ser tingido, estampado, ou receber um dado acabamento. Costuma ser designado genericamente de *branqueamento*.
- **Tingimento:** operação destinada a dar coloração uniforme ao material têxtil.
- **Estamparia:** consiste na aplicação de corantes e pigmentos sobre o tecido.
- **Acabamentos:** objetiva tornar o tecido já branqueado, tingido ou estampado, conforme o caso, mais adequado para a utilização.

Nas fases de enobrecimento têxtil empregam-se diversas matérias-primas. No branqueamento, utilizam-se alvejantes, como hidróxido de sódio e o peróxido de hidrogênio. Corantes e pigmentos são usados nas etapas de tingimento e estamparia. Em todas as operações empregam-se produtos auxiliares. Os auxiliares têxteis preparam o tecido para tingimento e melhoram a qualidade do produto final.

Um fluxograma do processamento industrial e dos despejos gerados em cada fase do processo é apresentado de forma simplificada na Figura 2.1.

Observa-se neste fluxograma que são muitas as etapas que geram despejos líquidos no processamento têxtil. Cada unidade fabril apresenta características próprias, podendo apresentar variações no fluxograma de produção.

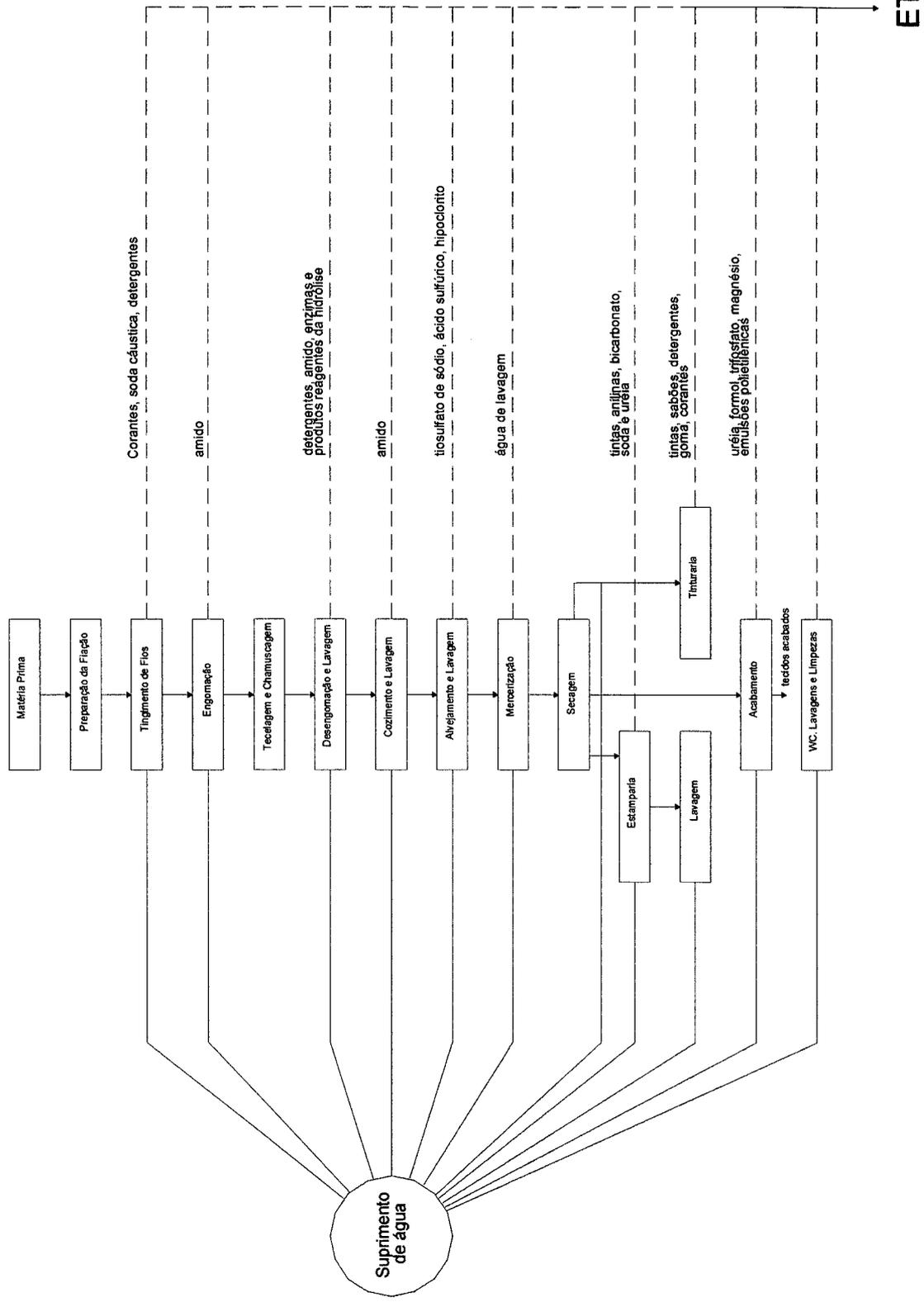


Figura 2.1 - Despejos provenientes do processamento de tecidos de algodão e sintéticos (Braille, 1979; CETESB, 1991).

Segundo a CETESB (1991), os principais rejeitos produzidos nas diferentes etapas de enobrecimento têxtil são:

- *Tingimento*: soluções contendo corantes, soda cáustica, detergentes e sabões.
- *Engomagem*: soluções de amido.
- *Desengomagem*: o despejo contém produtos da decomposição da goma de amido e dos reagentes de hidrólise (enzimas, detergentes alcalinos ou sabões e emolientes).
- *Cozimento e Lavagem*: soda cáustica e sabões.
- *Alvejamento*: os despejos contém cloro, hipoclorito ou peróxido de hidrogênio, bem como, matérias orgânicas removidas do algodão.
- *Mercerização*: o despejo contribui com pequena carga de poluentes. Contém soda cáustica.
- *Estampagem*: corantes e, eventualmente, soda cáustica e goma.
- *Tinturaria*: despejos variados, dependendo dos corantes e forma de aplicação. São volumosos, com forte coloração, e alguns podem ser tóxicos.
- *Lavagem*: os despejos são altamente concentrados, contendo gomas, corantes e outros produtos químicos.
- *Acabamento*: podem conter uréia, formol, trifosfato, amido, estereato, óleos, emulsões, resinas polivinílicas e sais de magnésio.

Desta forma, pode-se verificar que os efluentes têxteis apresentam composição extremamente variável, representando assim um grande impacto quando lançado ao corpo receptor (Kunz, 1997).

## 2.2 LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Os produtos finais principais do tratamento de águas residuais são: a) a água tratada, e b) os lodos ou suspensões de sólidos obtidos como subprodutos (Fair, 1976).

O lodo proveniente de sistemas de tratamento, apesar de ter consistência semi-sólida, é considerado como um resíduo sólido, de acordo com as definições da Environmental Protection Agency (EPA), da CETESB, e da NBR 10004 (Estrella, 1996). A CETESB define *resíduos sólidos industriais* aqueles resíduos sólidos, semi-sólidos ou líquidos, resultantes de processo industrial que, por suas características peculiares, não podem ser lançados na rede de esgoto ou em corpos d'água (Estrella, 1996).

De acordo com a NBR 10004, o lodo proveniente da estação de tratamento de indústria têxtil é classificado como resíduo de classe II – não-inerte e de baixa toxidez (Prim, 1998).

Quanto à forma de obtenção, os lodos são classificados em primários e secundários. Os primários são aqueles obtidos naturalmente por sedimentação, ou flotação, de parte do material sólido em suspensão, sem utilização de produtos químicos. Na classe dos lodos químicos estão aqueles cuja obtenção se dá com auxílio de produtos químicos. Os lodos ativados são classificados como secundários, visto que são obtidos com o auxílio de floculantes.

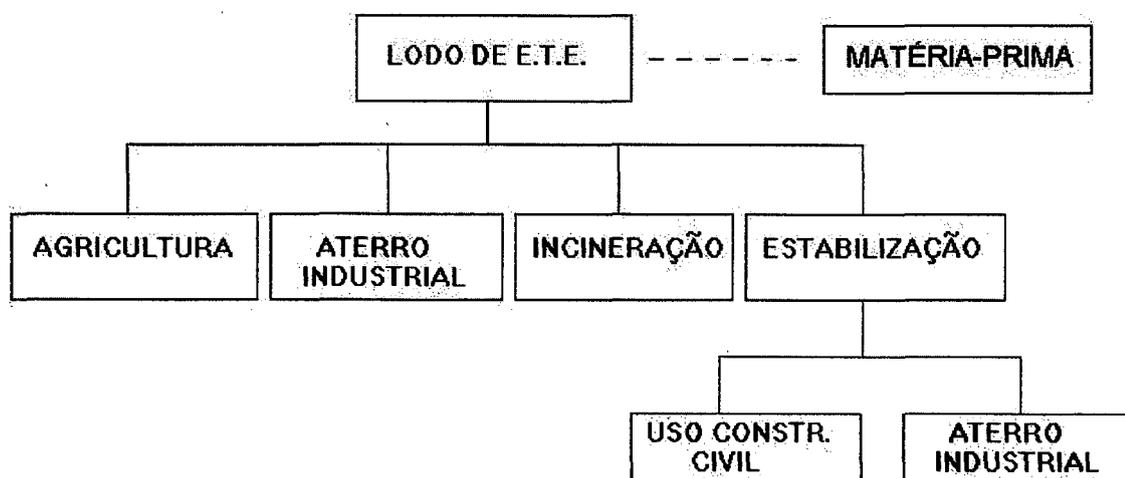
Os lodos podem ser provenientes de estações de tratamento de efluentes domésticos ou industriais. As estações de tratamento domésticas recebem efluentes de residências, edifícios comerciais, instituições ou quaisquer edificações que contenham instalações para utilização de água para fins domésticos. Os lodos provenientes de estações industriais variam de acordo com o tipo de atividade desenvolvida em cada grupo específico de atividade industrial. Cada indústria constitui-se num caso distinto, com despejos diferentes, e conseqüentemente, lodos com características distintas (Estrella, 1996). As frações sólidas dos lodos variam com a natureza do efluente tratado, com as quantidades e tipos de aditivos utilizados e com as reações que ocorrem durante o tratamento (Fair, 1976).

Todos os lodos são substâncias pseudo-homogêneas. Segundo Fair (1976), os lodos provenientes da sedimentação livre (lodos primários) apresentam composição muito diversa; os lodos ativados o são em menor grau. Desta forma, muitos lodos são fluidos não newtonianos. Fair (1976) afirma que os lodos apresentam propriedades plásticas em vez de viscosas; que sua resistência ao fluxo é uma função de sua concentração; e que suas propriedades plásticas variam durante a agitação. A maior parte dos lodos são também tixotrópicos. Fluidos tixotrópicos são aqueles cuja viscosidade diminui com o tempo quando submetidos a uma taxa de cisalhamento constante, e cujo fenômeno seja reversível (Manrich, 1987). Segundo Manrich (1987), todo fluido tixotrópico é um fluido pseudoplástico.

A umidade dos lodos pode ser reduzida por centrifugação, filtração em filtros-prensa de placas, filtros-prensa de cinto, filtração a vácuo e leitos de secagem (CETESB, 1985).

### 2.3 DESTINO FINAL DO LODO

O lodo proveniente de estações de tratamento de efluentes apresenta diferentes possibilidades de destino, conforme mostrado na Figura 2.2.



**Figura 2.2-** Possibilidades para destino do lodo de estações de tratamento de efluentes.

O lodo pode ser empregado na agricultura, pode ser depositado em aterros industriais, incinerado, ou estabilizado. O lodo após estabilização pode ser utilizado como matéria prima na construção civil ou pode ser enviado para aterros industriais. Outra possibilidade de destino, menos comum, é a utilização do lodo como matéria prima em algum outro processo industrial.

Além dessas formas de deposição, há forte incidência da disposição marginal em *lixões*. Esta forma de disposição de subprodutos, apesar de acarretar sérios problemas ambientais e muitas vezes representar um risco à saúde pública, é muito comum não apenas no Brasil.

### 2.3.1 Uso na agricultura

Para a deposição do lodo como adubo é necessário levar em consideração a presença de nutrientes e de contaminantes.

Deve-se respeitar os limites admissíveis de metais pesados. Despejos contendo quantidades significativas de metais pesados não são aceitáveis para aplicação no solo. Esses metais podem se acumular no solo, sendo posteriormente absorvidos pelas plantas, entrando no ciclo alimentar Braile (1979).

Segundo Azevedo Netto (1966), o lodo produzido em estações municipais de depuração é um fertilizante pobre, com baixo teor de N-P-K (nitrogênio, fósforo e potássio); mas contém matéria orgânica, microbactérias e microelementos - o que permite seu uso em conjunto com outras substâncias fertilizantes ou corretivas. Ainda assim, a procura pelo lodo digerido ou a aceitação por agricultores tem sido cada vez menor devido a: a) o lodo é um fertilizante volumoso e relativamente pobre; b) as distâncias para o transporte estão aumentando; e, c) as indústrias de fertilizante, principalmente sintéticos, apresentam crescentemente materiais substitutivos mais interessantes.

Na Europa, este tipo de deposição também tem decaído consideravelmente devido a dúvidas quanto a quantidade de metais pesados (Obrist, 1987).

Outro fator depreciativo para o uso de lodo como fertilizante se refere aos riscos higiênicos. Fair (1976) e Argent (1981) relatam que bactérias, vírus e protozoários

patogênicos podem sobreviver ao tratamento de águas e estar inclusos entre os sólidos residuais. Não são totalmente destruídos durante a digestão e secagem ao ar; somente o são com a secagem pelo calor. Argent (1981) verificou que a digestão apenas minimiza a salmonela presente num lodo, porém o seu tratamento do lodo de cálcio e sulfato ferroso pode eliminá-la.

Lake, Kirk e Lester (1984) apresentam uma revisão sobre as técnicas para caracterização de metais pesados em lodos e em misturas solo-lodo.

### **2.3.2 Deposição em aterro industrial**

A deposição em aterro industrial exige controle de inflamabilidade e toxicidade. São mais adequados para este fim resíduos com baixo teor de umidade e uma certa capacidade de suporte. Materiais com alto teor de umidade criam problemas pela formação de percolados, devido a liberação da fase líquida (Oliveira, 1993). Lodos industriais geralmente apresentam alto teor de umidade, sendo necessário secá-los antes de enviá-los ao aterro.

Segundo Haddad (in Estrella, 1996), os aterros industriais apresentam duas grandes restrições: constituem em um processo extensivo que exige grande área para implantação; e não resolvem o problema de toxidez dos resíduos, que continuam potencialmente perigosos.

O custo de deposição em aterros depende da periculosidade do resíduo, mas, em média situa-se entre US\$30 e US\$60 por tonelada em países do primeiro mundo (John, 1996).

Rhew e Barlaz (1995) apresentam um estudo indicando a viabilidade de se utilizar lodo digerido anaerobicamente e estabilizado com cal como cobertura diária de aterros. Observaram que o uso desta técnica não aumenta a concentração de fosfatos, Cd, Cr, Fe, Ni, Pb, entre outros componentes, no lixiviado. Desta forma, obtém-se um material de cobertura barato e propõe-se um uso para o lodo tratado.

### 2.3.3 Estabilização

A estabilização pode ser qualquer processo que impeça que compostos tóxicos retornem ao meio ambiente. Segundo Oliveira (1993), estabilização, solidificação ou fixação consistem em transformar resíduos perigosos em materiais menos poluentes. As principais técnicas são baseadas: a) na adição de cimento; b) na adição de cal ou outros materiais pozolânicos; c) na inserção em materiais plásticos ou termofixos; e, d) na vitrificação com sílica (CETESB, 1985). Além destas, há outras técnicas de estabilização. O material inerte obtido pode ser utilizado na construção civil ou depositado em aterro industrial.

Pelas técnicas de estabilização, pode-se reduzir o potencial poluidor de diversos resíduos, como solventes orgânicos, óleos, graxas, resinas, resíduos radiativos, lodos de esgoto das instalações de tratamento primário, lodos de estação de tratamento de efluentes industriais, lamas galvânicas, lodos provenientes de lavador de gás SO<sub>2</sub> (Prim, 1998).

Prim (1998) estudou a possibilidade de estabilizar lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes de uma indústria têxtil, utilizando a técnica de adição ao cimento. Obteve argamassas a partir de diferentes formulações de lodo-cimento e de lodo-cimento-cinza pesada de carvão. Realizou ensaios de resistência mecânica das argamassas obtidas, visando avaliar seu potencial para uso na construção civil.

### 2.3.4 Incineração

A incineração é um método de tratamento utilizado na destruição de resíduos industriais perigosos. É provavelmente a melhor solução para o tratamento de subprodutos altamente persistentes (organoclorados, organofosforados), tóxicos, inflamáveis (Oliveira, 1993) e ainda para o lixo hospitalar. A incineração permite aproveitar a energia térmica produzida. Porém, não soluciona integralmente o problema, havendo necessidade de se providenciar um destino final adequado para as cinzas e o lodo resultante do tratamento de gases. Com isso, torna-se um processo caro, tanto em termos de equipamento, quanto de manutenção.

Obrist (1987) apresenta um estudo sobre a viabilidade da queima de lodo em fornos de cimento. A alta temperatura do forno de cimento (próximo a 2000°C) permite que todos os compostos orgânicos sejam destruídos, inclusive germes e poluentes. A cinza fica ligada ao clíncker. Traços de metais pesados do lodo são imobilizados com esta técnica.

A caracterização e o aproveitamento de cinzas provenientes tanto de incineradores de lodo quanto de resíduos sólidos urbanos são comumente reportados na literatura.

Em muitos países da Europa, mais de 50% da cinza pesada proveniente de incineradores de resíduos sólidos urbanos é utilizada, enquanto que nos Estados Unidos a utilização destas não é comum. Entretanto, inúmeros projetos de pesquisa têm sido desenvolvidos neste país visando avaliar as alternativas de utilização (Wiles, 1995). Cinzas leves da incineração de resíduos sólidos urbanos podem ser utilizadas como substituto parcial de cimento em concreto (Tay e Cheong, 1991). Cinzas pesadas são utilizadas como agregados em concreto, base de estradas, calçadas e ciclovias, cobertura diária de aterros, entre outras aplicações (Wooley, 1994; Wiles, 1995).

As cinzas provenientes da incineração do lodo costumam apresentar as mesmas aplicações que as cinzas de incineradores de resíduos sólidos. Gray (1972) caracterizou química e fisicamente as cinzas de lodo provenientes de oito plantas de tratamento de efluentes. O autor procura relacionar as propriedades de engenharia, como a resistência a compressão, com as características das cinzas, como composição química. Morales e Dantas (1995) verificaram que as cinzas de lodo adquirem reatividade pozolânica a temperatura de 750°C. Tay (1987 e 1991), Khanbilvardi (1996) e Monzó (1996) reportam a utilização de cinza de lodo em concretos e argamassas.

A fabricação de agregado leve a partir de cinza de lodo é abordada separadamente, uma vez que é o tema principal deste estudo.

### 2.3.5 Reutilização

O crescimento do grau de exigência das medidas de proteção ambiental levaram ao aumento dos custos dos aterros de resíduos sólidos e da incineração. Duas alternativas, não excludentes, podem ser consideradas quando busca-se a redução dos custos de deposição e tratamento de resíduos: (a) a redução do volume de resíduos produzidos; (b) reaproveitamento dos resíduos (John, 1996).

Para redução do volume do lodo há limitações técnicas, nem sempre fáceis de superar. Em relação ao reaproveitamento do lodo, ou seja, seu uso como matéria-prima, existem duas grandes vertentes: seu emprego na fabricação de tijolos (Aleman, 1984; Costa, 1986; Tay, 1987; Tay e Show, 1992; Oliveira, 1997) e de agregados leves (Sardinha, s.d.; Brosch, 1978; Simondi, 1981; George, 1985; Morales, 1989; Bhatti, 1989; Tay, 1991; Mendes, 1998). Nestes tipos de aplicação, os elementos potencialmente poluentes são fixados pela matriz cerâmica ou fase vítrea formada durante o tratamento térmico. Cabe destacar que as propriedades dos materiais produzidos a partir do lodo são, na maioria das vezes, semelhantes a dos materiais convencionais.

## 2.4 AGREGADOS LEVES

Agregados são um conjunto de grânulos naturais, processados ou manufaturados, que apresentam a mesma seqüência de diferentes tamanhos, os quais, interligados por um material aglomerante, formam argamassas e concretos (Souza Santos, 1992). São materiais geralmente inertes, que apresentam forte influência na resistência, estabilidade dimensional e durabilidade de argamassas e concretos.

Segundo a massa específica, os agregados são classificados em leves, normais e pesados. Pela classificação brasileira, consideram-se agregados leves aqueles com massa específica de até  $2000 \text{ kg/m}^3$  (Mehta, 1984).

O uso de agregado leve no concreto confere ao mesmo diversas vantagens sobre o concreto denso convencional. Entre elas, cita-se a leveza, menor custo na estrutura, isolamento térmico e acústico; sem detrimento das propriedades mecânicas.

#### 2.4.1 Concretos leves

Concreto leve é um concreto de características próprias que por um meio ou outro, tornou-se mais leve que o concreto convencional. Apresenta massa específica aparente variando de  $250 \text{ kg/m}^3$  a  $1800 \text{ kg/m}^3$  (Tezuka, 1973), enquanto que para os concretos estruturais normais estes valores oscilam entre 2100 e  $2500 \text{ kg/m}^3$ .

Os concretos leves são materiais que possuem duas características muito importantes em construção: menor peso e bom isolamento térmico.

Em edifícios altos, pontes de grandes vãos, e estruturas flutuantes, o emprego de concretos leves implica em: (a) economia de material no dimensionamento da estrutura; (b) em vãos maiores; e (c) em fundações mais simples e de menor custo. A velocidade de execução e a própria economia da construção variam na razão inversa do peso do concreto.

A capacidade de isolamento térmico de materiais de construção é inversamente proporcional à sua massa específica. Com o uso de concretos leves, consegue-se maior conforto térmico nos ambientes, bem como economia no condicionamento de ar (Albrecht, 1966).

Concretos leves podem ser obtidos por formação de gases dentro do concreto, pela omissão de finos, ou pela substituição do agregado comum por agregado leve. São denominados, respectivamente, concreto celular, concreto sem finos, e concreto com agregado leve.

Nos Estados Unidos, Europa e Japão, os concretos leves com agregado leve são usados em edifícios altos, pontes de grandes vãos e estruturas especiais. Há vantagem econômica ao se utilizar este tipo de concreto leve em pontes com vãos superiores a 20 metros. Conforme Tezuka (1973) sua durabilidade pode ser superior à do concreto convencional.

### 2.4.2 Classificação dos concretos com agregados leves

Os concretos com agregados leves podem ser classificados em relação às propriedades físicas ou em relação aos requisitos funcionais (Tezuka, 1973).

De acordo com as propriedades físicas e mecânicas, os concretos com agregados leves são classificados em:

- a) De baixa resistência mecânica e propriedades excepcionalmente boas de isolamento térmico: apresentando massa específica aparente entre 250 e 800 kg/m<sup>3</sup>;
- b) De média resistência e isolamento térmico adequado: com massa específica aparente de 800 a 1400kg/m<sup>3</sup>;
- c) De elevada resistência mecânica e limitada propriedade de isolamento térmico: apresentando massa específica aparente de 1400 a 2100 kg/m<sup>3</sup>.

De acordo com requisitos funcionais podem ser agrupados em :

- a) De isolamento térmico: resistência superior a 3 kgf/cm<sup>2</sup> e coeficiente de condutibilidade térmica inferior a 0,25 kcal/m.h.°C;
- b) Estrutural e de isolamento térmico: resistência superior a 35 kgf/cm<sup>2</sup> e coeficiente de condutibilidade térmica inferior a 0,65 kcal/m.h.°C;
- c) Estrutural: com resistência à compressão superior a 150 kgf/cm<sup>2</sup>.

### 2.4.3 Classificação e terminologia dos agregados leves

Segundo Tezuka (1973), os agregados leves podem ser divididos em cinco tipos: materiais naturais não processados, materiais naturais manufaturados, subprodutos industriais não processados, subprodutos industriais manufaturados e materiais orgânicos.

Os *produtos naturais* utilizados como agregados leves são: corais, tufos calcários, pedra-pomes, piroclastos, pedras tuffíticas, lavas, escórias e tufos vulcânicos

(Tezuka, 1973). A estrutura celular pode consistir de poros intercomunicantes, como na pedra-pomes, ou de poros esféricos e fechados, como na lava.

Os agregados leves manufacturados, sejam eles provenientes de matérias-primas naturais ou subprodutos industriais, podem ser obtidos pelos processos de expansão, exfoliação, sinterização e aglomeração (Tezuka, 1973).

São raros os depósitos de materiais naturais para aplicação como agregados leves. Em função da crescente demanda, já a partir do início do século, tem-se desenvolvido agregados leves artificiais. As matérias-primas naturais para obtenção de agregados leves são argilas, ardósia, folhelhos argilosos, xisto argiloso, vermiculita, perlita, entre outros, sendo que as argilas e os folhelhos expandidos são os mais utilizados. No Brasil, tem-se conhecimento da existência de apenas uma indústria de argila expandida (Cinasita, Jundiaí/SP).

*Os subprodutos industriais não processados* são aqueles que foram submetidos apenas a operações mecânicas como lavagem, britagem ou peneiramento. Consistem em escórias de forno e de alto forno ou concreto aerado britado.

*Os subprodutos processados* são aqueles tratados especialmente em usina para uso em concreto leve, por operação envolvendo tratamento térmico. Entre estes leves, tem-se: escórias expandidas; resíduo sinterizado da extração da hulha; cinza volante sinterizada; sedimentos finos aglomerados; escória aglomerada; refugo de vidro expandido; cinzas industriais, cinzas de lodo ou de resíduos sólidos urbanos sinterizadas; lodo sinterizado.

*Os materiais orgânicos* utilizados como agregados leves são: partículas de materiais poliméricos, como de espuma rígida; recortes de plásticos e borrachas provenientes da indústria calçadista; detritos de cereais, como cascas de arroz e milho; partículas e fibras de madeira, entre outros.

#### 2.4.4 Propriedades dos agregados leves

As propriedades desejáveis para agregados leves são as seguintes (Souza, 1986; Souza Santos, 1992):

- **Baixa massa específica:** o agregado deve pesar entre  $1/3$  e  $2/3$  do peso do agregado convencional que se deseja substituir. Agregados muito leves podem apresentar problemas de segregação, flutuando na argamassa.
- **Resistência mecânica elevada,** pois, tem-se que o agregado mais resistente resulta em um concreto mais resistente. Entretanto, a resistência do concreto depende também de outras características do agregado tais como sua forma e aspectos da camada superficial. A forma do agregado influencia na trabalhabilidade do concreto. O valor máximo de resistência depende da aderência do agregado à matriz da argamassa, que está relacionado com as características da superfície do agregado.
- **Forma e textura dos agregados:** ausência de pontas e arestas agudas, para melhorar a trabalhabilidade do concreto. Entretanto, partículas muito lisas, sem rugosidade superficial, podem não apresentar aderência à argamassa.
- **Distribuição granulométrica:** deve apresentar uma faixa adequada de tamanhos, inclusive com quantidade conveniente de finos, para assegurar a trabalhabilidade adequada.
- **Inércia química,** para que não ocorram reações entre este e o cimento, prejudicando as propriedades do concreto.
- **Pequena absorção de água é desejável,** uma vez que um agregado cheio de poros abertos tende a desidratar o concreto, impedindo a pega do cimento. A saturação prévia com água pode compensar esse defeito. Um agregado com estrutura vesicular, com poros abertos, pode absorver a matriz de argamassa, reduzindo o volume de concreto produzido e exigindo um maior consumo de cimento por metro cúbico de concreto do que do que aquele tomado como padrão.
- **Preço do agregado leve é o fator básico que determina a aceitação para o emprego em construção.** O preço superior do agregado leve em relação ao

agregado usual (areia, pedra britada, cascalho), deve ser compensado, quer pela economia em peso do aço e do concreto, quer pela obtenção de melhores propriedades em isolamento térmico ou acústico.

No Brasil, o emprego de agregados leves é especificado nas normas técnicas EB-228, EB-229 e EB-230 da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (Tezuka, 1973; Souza Santos, 1992).

## **2.5 FENÔMENO DE EXPANSÃO PIROPLÁSTICA**

Um dos principais processos para produção de agregados leves é a expansão piroplástica, que se deve essencialmente à formação de gases, durante o estado de fusão incipiente, que não podem escapar devido à formação de uma delgada camada superficial impermeável. Deste modo, os grânulos adquirem estrutura interna porosa, geralmente envolvida por uma camada externa vítrea (Damasceno, 1973).

Fisicamente, a expansão consiste na somatória de numerosas ampliações volumétricas de poros individuais estanques. Essa ampliação depende da viscosidade do sistema, da pressão dos gases, do tempo de aquecimento e da temperatura.

Damasceno (1973) afirma que as características mais importantes na escolha de matérias-primas expansíveis são a constituição mineralógica, química e granulométrica.

O mecanismo de expansão, bem como a influência da composição química, mineralógica e granulométrica, é reportado por diversos autores, entre eles, Austin (1942), Riley (1951), Tezuka (1973), Damasceno (1973) e Souza Santos (1992).

Segundo Souza Santos (1992), as condições necessárias para que a expansão piroplástica produza uma estrutura celular, ou seja, interna porosa e externa fechada, são as seguintes:

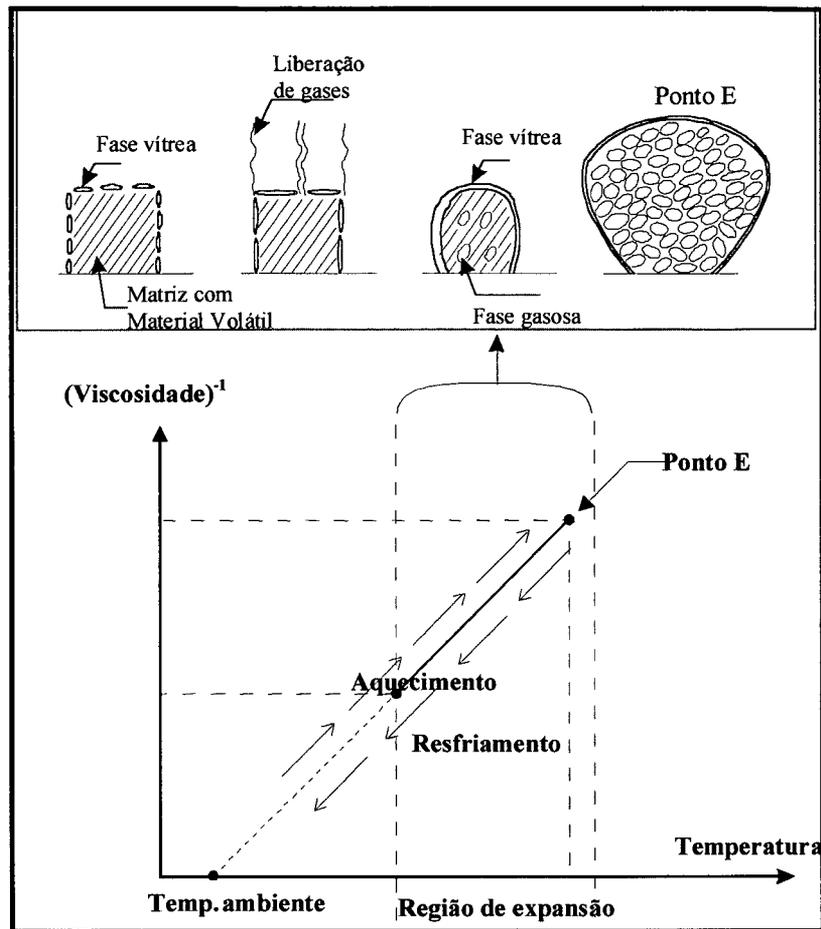
- a) O material deve possuir, na condição piroplástica, teor suficiente de vidro para obstruir os poros e reter os gases formados.

- b) A matéria-prima deve conter quantidade adequada de substâncias produtoras de gases para produzir o grau de inchamento adequado.
- c) Os gases devem ser liberados em quantidade e velocidade adequadas e numa faixa de temperatura condizente com as condições pirolásticas.
- d) O vidro formado deve possuir viscosidade adequada que permita a formação de grande número de bolhas (para assegurar baixa massa específica aparente à partícula de agregado leve) e dar uma espessura de parede das vesículas que leve à máxima resistência ao esmagamento.
- e) O material deve expandir em uma estrutura celular na temperatura mais baixa possível, por razões econômicas.
- f) A faixa de temperatura em que ocorra o início do inchamento e a fusão total deve ser superior a 20°C, para evitar que fragmentos do agregado grudem entre si e provoquem entupimento do forno.

Se não existir um teor de fundentes adequados para formar uma fase vítrea, ou se uma fase vítrea de baixa viscosidade é formada, os gases escapam e não há inchamento. Esses problemas podem ser corrigidos pela adição de fundentes adequados, pelo deslocamento do período de liberação de gás para temperaturas mais elevadas (aquecimento mais rápido com menor introdução de ar), ou pela adição de substâncias que elevem a viscosidade da fase vítrea (Tezuka, 1973; Souza Santos, 1992).

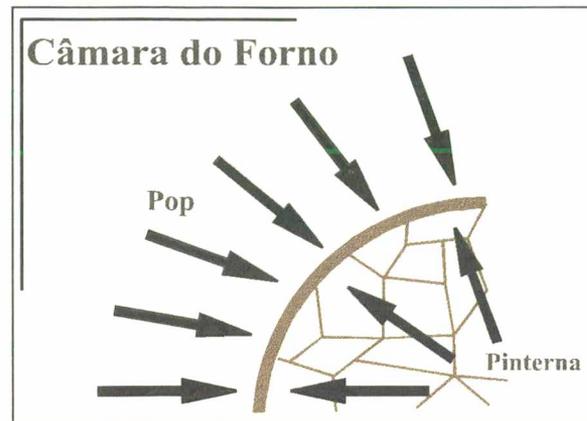
Na Figura 2.3 apresenta-se uma representação do fenômeno de expansão. À baixa temperatura, a quantidade e viscosidade da fase vítrea formada não é suficiente para selar a superfície dos corpos de prova, havendo liberação de parte do material volátil. Em temperatura mais elevada forma-se uma fase vítrea que isola os poros, iniciando-se a expansão.

A fase vítrea deve possuir viscosidade adequada que permita a formação de um grande número de vesículas para dar baixa massa específica aparente à partícula do agregado leve (Ponto E) e dar uma espessura de parede das vesículas que leve à máxima resistência mecânica (Mendes, 1998).



**Figura 2.3 - Formação de uma fase vítrea contínua que favorece o fenômeno de expansão (Mendes, 1998).**

Na parte inferior, representa-se o tratamento térmico do agregado. O aumento da temperatura acarreta em diminuição de viscosidade. Existe uma faixa de viscosidade ideal da massa vítrea superficial que corresponde à região de expansão. Nessa região há um equilíbrio entre a pressão exercida pelos gases internos e a pressão exercida pela camada externa (Figura 2.4). Abaixo dessa região, a viscosidade é muito alta, de forma que não há selamento dos poros superficiais. Acima, a viscosidade é muito baixa, não havendo retenção dos gases formados, acarretando em coalescimento dos poros e elevação da massa específica aparente da partícula de agregado.



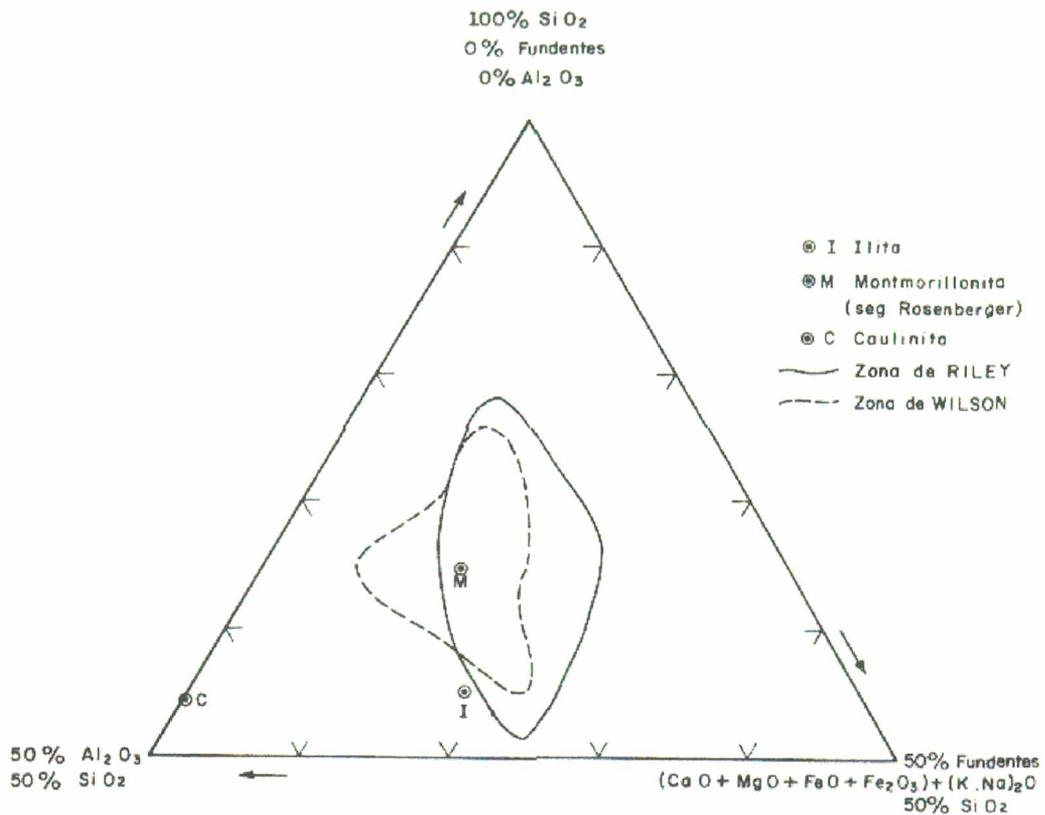
**Figura 2.4** - Pressão interna exercida pelos gases contra a pressão opositora ( $P_{op}$ ) da camada superficial (Mendes, 1998).

Uma camada superficial visco-elástica pode ser expandida idealmente até um limite crítico, dependente da relação pressão interna e pressão externa (Figura 2.4) e a interação fase gasosa e fase vítrea (Mendes, 1998). Segundo Damasceno (1973), no estado de fusão incipiente, pode haver pressões internas de alguns kilogramas por metro quadrado.

### 2.5.1 Influência da composição química

A necessidade de formar uma fase vítrea de viscosidade adequada para reter gases e dar resistência mecânica, impõe certas restrições à escolha de uma formulação para agregados leves. Os teores de sílica, alumina e fundentes (cal, magnésia, óxidos de ferro, álcalis) não devem ultrapassar certos limites.

Riley (1951), a partir da queima de diferentes argilas em forno elétrico, correlacionou sua composição química com a ocorrência ou não de expansão. Estes resultados foram plotados sobre um diagrama ternário  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ -fundentes. Posteriormente, Wilson (in Damasceno, 1973) realizou pequenas adaptações, dando origem ao diagrama de Riley/Wilson (Figura 2.5). Este basicamente apresenta a região de formação de fase termoplástica com viscosidade adequada para gerar gases.



**Figura 2.5** – Diagrama de Riley/Wilson. Mostra a região de composição que permite formar uma massa viscosa o suficiente para a expansão, segundo Riley (1951) e Wilson (1954).

Cabe ressaltar que pequenas variações de composição química levam a diferenças de viscosidade apreciáveis. A introdução de óxidos alcalinos (Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O) e alcalino terrosos (MgO e CaO) contribui para a diminuição da viscosidade, sendo que o efeito destes é diferenciado em função da faixa de temperatura. Em temperaturas inferiores, ou seja, antes do início da fase líquida viscosa, os óxidos alcalinos têm influência predominante na viscosidade, formando massas mais fluidas que os alcalino-terrosos (Fernández Navarro, 1991).

Damasceno (1973) aponta para o fato de que a composição química de uma formulação ou de uma argila dentro dos limites indicados no diagrama de Riley/Wilson, não é a única condição para que haja expansão pirolástica entre 1100°C e 1350°C. Para tal, o material deve conter um mineral que libere gás nessas temperaturas.

### 2.5.2 Influência da composição mineralógica

Alguns estudos buscando correlacionar as propriedades de inchamento piropástico com a composição química de argilas, concluíram que a composição mineralógica é o fator predominante nas propriedades de inchamento (Tezuka, 1973; Souza Santos, 1992).

Segundo Damasceno (1973) existem diversas opiniões entre aqueles que se dedicaram ao estudo da composição mineralógica de rochas argilosas expansíveis. Diversos autores verificaram que a illita e a montmorilonita estão relacionada com o fenômeno de expansão. Quanto à caulinita, a importância desta é controversa. A illita e a montmorilonita apresentam composição química teórica bastante próxima da região de expansibilidade de Riley, Figura 2.5, enquanto que a caulinita fica bastante afastada.

Mica, clorita, vermiculita e sepiolita são minerais argilosos que também costumam estar presentes em rochas expansíveis. Muitos deles estão próximos dos limites estabelecidos por Riley e contêm teores elevados de ferro no reticulado cristalino como óxidos ou hidróxidos, que liberam oxigênio nas temperaturas e condições adequadas (Tezuka, 1973; Damasceno, 1973).

Riley preparou misturas artificiais, que não incham, contendo caulinita, sílica e microclina, e adicionou vários minerais à mistura. Desse trabalho e de outros, concluiu-se que pirita, calcita, dolomita e hematita podem produzir um gás a uma temperatura suficientemente elevada levando ao inchamento (Souza Santos, 1992).

Austin (1942) verificou que a expansão ocorre inclusive em atmosfera de nitrogênio (inerte). Portanto, o fenômeno tem origem nos próprios constituintes da formulação ou da argila, não sendo consequência de uma reação entre estes e o oxigênio.

Os constituintes mineralógicos que conduzem a um desprendimento gasoso são o carbono livre, a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), a biotita ( $\text{K}_2(\text{Mg, Fe})_6(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})_2(\text{OH})_4$ ), os sulfatos de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), de ferro ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ), o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e o cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) (Austin, 1942; Riley, 1951; Damasceno, 1973). Os sulfatos e os sulfetos, como a pirita, liberam gás

sulfídrico ( $\text{SO}_2$ ) durante o aquecimento. A calcita, a dolomita e o carbonato de sódio decompõem-se com o aquecimento e o carbono livre oxida-se, em ambos os casos há liberação de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). A biotita sofre desidroxilação. Os gases liberados são essenciais à expansão do agregado.

### 2.5.3 Influência da composição granulométrica

A real influência da granulometria é mal definida, face às divergências entre diferentes autores. Alguns tentam relacionar a quantidade de determinadas frações de finos, necessárias à expansão, não chegando contudo a uma conclusão comum (Damasceno, 1973). Entretanto, é consenso a necessidade de grânulos finos para que ocorram as reações de expansão. Quanto menor a granulometria, maior a energia superficial, e conseqüentemente maior é a reatividade do grânulo (Thümmler, 1993).

No aquecimento, apenas as frações mais finas ( $< 5\mu\text{m}$ ) se fundem totalmente, sendo as principais responsáveis pela expansão. As partículas de 5 a 10  $\mu\text{m}$  fundem-se em pequena proporção e as maiores de 10  $\mu\text{m}$ , praticamente não tomam parte no processo, permanecendo aglomeradas (Damasceno, 1973).

### 2.5.4 Verificação da expansão

Damasceno (1973) afirma que a verificação preliminar das características térmicas de rochas argilosas expansíveis é feita por meio de técnicas de aquecimento. O uso de critérios de previsão, como a composição química e mineralógica não fornecem, pelo menos na fase preliminar, todas as informações desejadas. As técnicas de aquecimento de laboratório são, também, mais fáceis e econômicas de serem efetuadas, em comparação com outras técnicas.

A utilização de fornos de laboratório tem sido o procedimento preferido pela maioria dos pesquisadores que trabalham com avaliação do comportamento termoplástico das matérias-primas para agregados leves (Damasceno, 1973; Souza Santos, 1992).

## 2.6 LODO NA FABRICAÇÃO DE AGREGADOS LEVES

O aproveitamento de lodo na produção de agregado leve traz uma nova opção tanto para o problema de disposição final do lodo, como para a obtenção de um produto de importante aplicação na construção civil.

Na literatura são reportados basicamente três processos para obtenção de agregados leves a partir de lodo:

- a) sinterização de lodo;
- b) sinterização de cinza de lodo; e
- c) sinterização de mistura lodo-argila.

### 2.6.1 Sinterização de lodo

A partir de um convênio entre a SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) e o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas/SP), nas décadas de 70 e 80, desenvolveu-se um processo para sinterização de lodo e fabricação de agregados leves. Esse processo foi adotado industrialmente em estações de tratamento de esgoto da SABESP na região metropolitana de São Paulo. Por razões econômicas, a fabricação de agregados leves nestas usinas foi desativada. Atualmente nestas usinas produz-se fertilizante a partir do lodo. Esse fertilizante é utilizado basicamente na lavoura de cana-de-açúcar, não sendo assim usado diretamente em produtos para consumo humano.

A descrição do processo desenvolvido pela SABESP e pelo IPT para obtenção de agregados leves a partir do lodo e os resultados relativos ao seu uso em concreto foram reportados na literatura em Sardinha (s.d), Brosch (1978), Simondi (1981), Sabesp (s.d.) e IPT (1982).

Posteriormente, Morales (1989), utilizando basicamente o mesmo processo da SABESP/IPT, produziu agregados leves a partir de lodo digerido da estação de tratamento de esgotos da cidade de Londrina, Paraná. O autor obteve agregados semelhantes aos produzidos nas usinas da SABESP.

O processo de obtenção de agregado leve a partir de lodo consiste basicamente em sua secagem, pelotização, secagem das pelotas em leito fluidizado ou secador rotativo, sinterização, quebra, estabilização em tambor rotativo para reduzir a rugosidade superficial, e por fim, classificação dimensional. A sinterização é iniciada por meio de queimador a gás ou óleo e continuada com insuflação de ar e auto-combustão das pelotas.

Os agregados leves produzidos por sinterização de lodos digeridos apresentaram características que cobrem as especificações EB-228, 229 e 230, da ABNT, podendo ser utilizados em concretos para isolamento térmico, para elementos de alvenaria e concretos estruturais (Brosch, 1978; Sardinha, s.d.; SABESP, s.d.; Morales, 1989). Os agregados produzidos nas diferentes usinas da SABESP e por Morales (1989) apresentaram absorção de água variando entre 10% e 30%, massa específica do grânulo entre 1180 e 1830 kg/m<sup>3</sup>, formato cúbico, textura superficial rugosa, poros grandes e abertos, entre outras características.

Em relação aos concretos com agregados leves de lodo, estes apresentaram propriedades adequadas, como boa trabalhabilidade e resistência à compressão superior ao mínimo exigido para concretos com fim estrutural.

### 2.6.2 Sinterização de cinza de lodo

Inúmeras plantas de tratamento de efluentes são dotadas de incineradores para a queima do lodo, tanto na Europa (Monzó, 1996), como nos Estados Unidos (Gray, 1972; Bhatti, 1989; Khanbilvardi, 1994; Wiles, 1996), Japão e Cingapura (Tay, 1992). A quantidade de cinzas geradas é grande. Estas, muitas vezes, são utilizadas na construção civil.

Yip e Tay (1990) investigaram o efeito do tratamento térmico no lodo, variando a temperatura de queima deste. Produziram agregados a partir da cinza de lodo. Os agregados formados apresentam alta porosidade, em média 66%, formato angular e textura superficial rugosa. O concreto obtido com esses agregados leves apresentou resistência a 28 dias comparável ao obtido com agregado leve comercial. Apresentou

ainda baixo coeficiente de condutividade térmica, o que indica sua adequação para uso em isolamento térmico.

Bhatty e Reidt (1989) registram a produção de agregados sinterizados e expandidos a partir de cinza de lodo pelletizada. A cinza, proveniente de uma estação de Minnesota, é umidificada com 20% de água, pelletizada, seca, e queimada em forno mufla em temperatura entre 1060°C e 1100°C. Obtiveram dois tipos de pellets: um mais poroso, com densidade inferior a 1 g/cm<sup>3</sup> e outro menos poroso, com densidade superior. Os agregados menos densos são bastante porosos, com poros arredondados e fechados. Os autores afirmam que devido ao formato regular dos agregados, obtiveram concreto de bom desempenho.

### 2.6.3 Sinterização de mistura lodo-argila

A produção de agregados leves a partir de formulações lodo-argila consiste basicamente em: misturar lodo e argila em proporções adequadas; umidificar, se necessário; conformar, por extrusão ou pelletização; secar os corpos de prova; e sinterizar, geralmente em temperaturas entre 1000°C e 1200°C. Podem ocorrer variações nas diferentes etapas.

Tay (1991) investigou várias proporções de argila (10 a 40%) adicionadas ao lodo para produzir agregado leve. A queima do agregado se deu entre 1050°C e 1080°C. Obteve agregados de formato angular e superfície com poros abertos. A porosidade apresenta o valor de 48,2% para corpo de prova contendo 10% de argila e diminui para 7,6% em corpo de prova com 40% de argila; a absorção de água diminuiu de 6,58% para 6,01%. Verificou que a resistência à compressão dos concretos com estes agregados aumenta com o aumento do teor de argila.

Celik e Bayasi (1995) apresentam a caracterização de agregados produzidos por queima entre 1077°C e 1088°C de mistura de lodo e argila. Investigam ainda as propriedades do concreto em função da adição deste agregado. Registram que a peso específico da pedra britada corresponde a 2,66, do agregado leve de lodo 1,59 e da argila expandida 1,60. O agregado leve produzido melhora a trabalhabilidade do

concreto, comparando-se com o agregado de pedra britada, não influencia na retração por secagem e reduz a resistência à compressão.

Elkins (1985) e George (1986) relatam a instalação de uma planta de demonstração de tratamento de efluentes (máximo de 380 m<sup>3</sup>/dia) utilizando o processo denominado CCBA (Coordinate Chemical Bonding Adsorption) na usina de San Diego, Califórnia. O efluente líquido é misturado com argila não expansível, alumínio e ácido poliacrílico. A mistura, realizada dentro da estação de tratamento de efluentes, é floculada. O lodo resultante passa por uma cinta desagüadora. Adiciona-se então mais argila. A massa sólida resultante é extrudada, pelletizada, e depois queimada em forno rotativo em temperatura variando entre 1070 e 1095°C. Obtém-se agregados leves que atendem às exigências das normas da ASTM (American Society for Testing Materials).

Cavalcante Rocha (1997) e Mendes (1997) reportam a obtenção de agregados leves a partir de cinza de lodo em mistura com uma argila proveniente do beneficiamento da bauxita. A densidade aparente do agregado diminuiu com o aumento do teor de cinza de lodo.

## 2.7 CARACTERÍSTICAS DO LODO UTILIZADO NESTE TRABALHO

A empresa fornecedora do lodo é uma empresa de grande porte, que emprega mais de 5000 trabalhadores, e produz cerca de 47 milhões de peças de confecções em malha por ano. A empresa é formada diversas unidades fabris na região do Vale do Itajaí (SC).

O lodo utilizado neste trabalho foi coletado em uma unidade, localizada em Blumenau (SC), onde desenvolvem-se as atividades de beneficiamento, estamparia, talharia e confecção. Possui caldeira e estação de tratamento de efluentes. Emprega 1060 trabalhadores e produz em média 930 toneladas por mês de malha beneficiada (dados de 1998).

Na Tabela 2.1 apresenta-se uma lista de produtos químicos, que atuam como auxiliares no processamento têxtil em função de seu consumo, para referida unidade

(dados de 1996). Observa-se que são diversos os tipos de produtos ali utilizados. Pode-se verificar também que a quantidade consumida é significativa.

**Tabela 2.1** - Produtos químicos auxiliares têxteis utilizados na unidade fornecedora de lodo.

<b>Produtos</b>	<b>Quantidade (kg/dia)</b>
Corantes reativos	200
Corantes sulfurosos	500
Branqueadores óticos	110
Sais	250
Ácidos	7000
Amaciantes	1200
Umectantes	70
Seqüestrantes	360
Anti-espumantes	90
Fixadores	30
Detergentes	46
Deslizantes	8
Redutores	425
Oxidantes	950
Bases	800

Fonte: Memorial de Licença Ambiental (Emissão 1996).

Basicamente, a empresa utiliza corantes sulfurosos e reativos.

Esta unidade possui uma estação de tratamento, do tipo Lodo Ativado, que recebe os efluentes do beneficiamento, da estamparia e dos sanitários. Os efluentes líquidos do processo produtivo são mostrados Tabela 2.2. O lodo constitui-se em um subproduto semi-sólido resultante do tratamento destes efluentes.

Na estação de tratamento de efluentes, utilizam-se peróxido de hidrogênio para redução de odores, polieletrólito catiônico (poliacrilamida) como descolorante, e sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) como floculante. Uréia é a fonte de nitrogênio para os microorganismos da estação. O esgoto sanitário fornece parte da uréia necessária, e o restante é adicionado ao sistema.

**Tabela 2.2** – Identificação dos efluentes líquidos e resíduos sólidos da unidade fabril (adaptado de Coelho, 1996).

Etapa do processo produtivo	Efluentes líquidos	Resíduos sólidos
Beneficiamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ do tingimento e alvejamento</li> <li>➤ da lavagem (de tela e dos cilindros)</li> <li>➤ da lavagem dos recipientes</li> <li>➤ da lavagem do tapete da máquina</li> </ul>	
Estamparia	<ul style="list-style-type: none"> <li>(cola e restos de pasta)</li> <li>➤ da cozinha de cores (preparação das pasta e limpeza dos recipientes e tubulação)</li> </ul>	
Estação de tratamento de efluentes		Lodo

O lodo é separado do efluente líquido num tanque de sedimentação. Para aumentar a concentração de sólidos, passa por um filtro prensa de cinto. É condicionado em contêiners (Figura 2.6) e enviado para o aterro sanitário municipal de Blumenau.



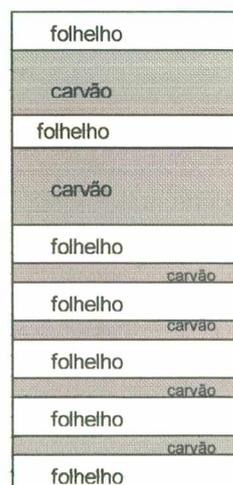
**Figura 2.6** – Coleta do lodo em contêiner na saída do filtro prensa de cinto.

Até o início de 1998, o sistema empregado era o de lodo ativado com aeração superficial. Produzia-se cerca de 370 toneladas de lodo por mês. Em janeiro de 1998

o sistema passou por uma reforma, passando a ter oxigenação em todo o tanque através de dispersores de ar no interior do mesmo. Com isso, melhorou-se a oxigenação do tanque, diminuindo o volume de lodo gerado. Atualmente produz-se cerca de 240 toneladas por mês. O objetivo da empresa é diminuir a produção de lodo para 150 toneladas por mês. Para tal, a empresa pretende otimizar ainda mais o tratamento de efluentes.

## 2.8 SUBPRODUTOS DO BENEFICIAMENTO DO CARVÃO

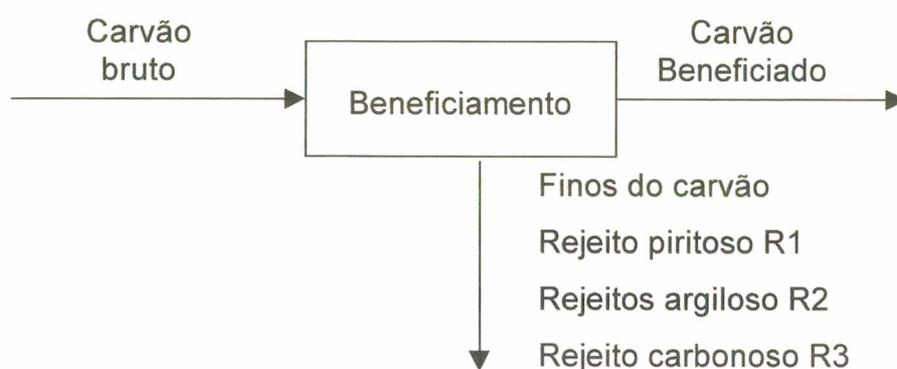
O carvão minerado em Santa Catarina se encontra na Formação Rio Bonito, a qual é constituída na maior parte de arenitos e folhelhos (Projeto Siderópolis, 1991). Um veio de carvão geralmente é composto pela intercalação de camadas de carvão com folhelhos, como apresentado na Figura 2.7.



**Figura 2.7** – Representação de uma camada de carvão  
(adaptado de Projeto Siderópolis, 1991)

Na mineração extrai-se tanto o carvão como o folhelho, que são então separados no beneficiamento.

O beneficiamento é realizado em jigues, onde separa-se 3 subprodutos: (a) primário, com predominância de frações pesadas, denominado rejeito piritoso; (b) secundário, com frações intermediárias, denominado rejeito argiloso; e (c) terciário, com predominância de frações mais leves, denominado rejeito carbonoso (Metropolitana, 1998). Correntemente, estes são denominados, respectivamente, *R1*, *R2* e *R3* (Della, 1993). A Figura 2.8 apresenta um esquema do beneficiamento do carvão.



**Figura 2.8** – Esquema do beneficiamento do carvão, mostrando a geração de subprodutos.

Os folhelhos adjacentes às camadas de carvão, também denominados de xistos, costumam ser formados a partir de materiais argilosos de constituição geológica local. Apresentam em sua constituição quartzo, pirita e matéria orgânica, entre outros (Della, 1993).

De forma geral, há poucos trabalhos de pesquisa sobre a caracterização e o reaproveitamento de subprodutos do beneficiamento do carvão.

### **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

O trabalho experimental consistiu em coleta, beneficiamento e caracterização das matérias-primas, elaboração de formulações, conformação dos corpos de prova, tratamento térmico e caracterização dos agregados leves obtidos.

Os primeiros testes de queima foram executados, utilizando apenas o lodo, objetivando avaliar suas reações durante o tratamento térmico.

Realizou-se testes preliminares, em escala reduzida, visando verificar a possibilidade de obter corpos porosos a partir de formulações a base de Lodo-R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Na seqüência, utilizou-se misturas de lodo, do subproduto R3 e de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) para obtenção dos agregados leves.

Ensaio de análise térmica gravimétrica (TG) e diferencial (ATD), que quando realizados em conjunto podem ser denominados simplesmente por análise térmica simultânea (ATS), foram empregadas para a caracterização tanto de matérias-primas, como de formulações com diferentes teores de R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e de Lodo-R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

#### **3.1 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA**

O objetivo inicial deste trabalho foi o de utilizar o lodo na produção de agregados leves.

Como visto no Capítulo 2, existem três metodologias principais para a produção de agregado leve a partir de lodo: sinterização ou auto-combustão de lodo puro; sinterização de cinzas de lodo; e sinterização de uma mistura de lodo e argila.

Outra metodologia amplamente divulgada na literatura consiste na obtenção de agregado leve a partir da expansão pirolástica de argilas e folhelhos argilosos. Agregados leves obtidos por expansão costumam apresentar características mais interessantes do que aqueles obtidos pelos demais processos, como, por exemplo,

formato mais arredondado do que aqueles obtidos nos demais processos, o que melhora a trabalhabilidade do concreto.

Para a realização deste trabalho optou-se pelo processo de expansão uma vez que, além dos benefícios intrínsecos a este método, tem-se que: (a) os equipamentos disponíveis não permitiam utilizar os processo que envolvem sinterização do lodo; e (b) o uso de cinzas de lodo não corresponde a realidade local, visto que não há incineradores de lodo em Santa Catarina.

Considerando que, para o processo de expansão, a matéria-prima deve atender determinados requisitos relativos à composição química e mineralógica, utilizou-se, neste estudo, formulações a base de lodo, do folhelho R3 e de carbonato de sódio como fundente, indispensável no caso presente.

O R3 foi utilizado por apresentar significativo teor de sílica, o que permite a formação da fase vítrea necessária para a expansão. Porém o baixo índice de álcalis verificado tanto no lodo quanto no R3 indicou a necessidade de adição de fundente. O carbonato de sódio foi escolhido por, além de atuar como fundente, produzir gases (liberação do CO<sub>2</sub>) auxiliares para a expansão. Além disso, o íon sódio tem marcante efeito sobre a diminuição da viscosidade de fases vítreas (Parmelee, 1973).

No diagrama esquemático da Figura 3.1 é mostrada a relação entre as matérias-primas empregadas e suas respectivas contribuições na formação de agregados leves.

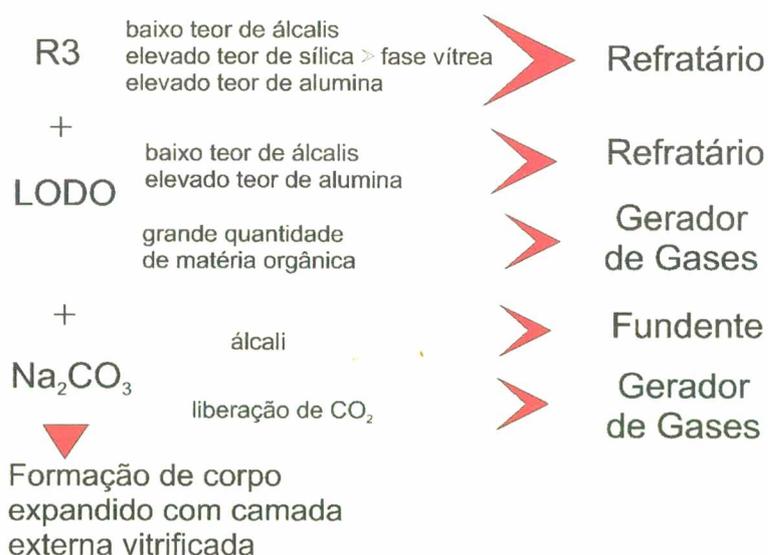


Figura 3.1 – Matérias-primas empregadas e suas características.

### 3.2 COLETA E PROCEDIMENTO ADOTADO PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

O lodo foi coletado na saída do filtro prensa de cinto, apresentando então umidade em torno de 89%. Foi convenientemente armazenado (sacos plásticos escuros em de recipientes vedados) a fim de evitar sua degradação.

O R3 foi coletado no lavador de carvão da Mina Esperança, Siderópolis (SC). Foi coletado úmido, em sacos plásticos, na forma de agregados, com tamanho variando entre 0,5 e 10 cm.

O lodo e o R3 foram avaliados por composição química e de fases cristalinas, análise térmica simultânea (ATD/TG) e morfológica. Na Tabela 3.1 apresenta-se a relação das técnicas de caracterização empregadas, equipamentos utilizados e instituição onde foi realizado cada ensaio.

**Tabela 3.1** – Relação de equipamentos e das análises correspondentes para a caracterização físico-química das matérias-primas.

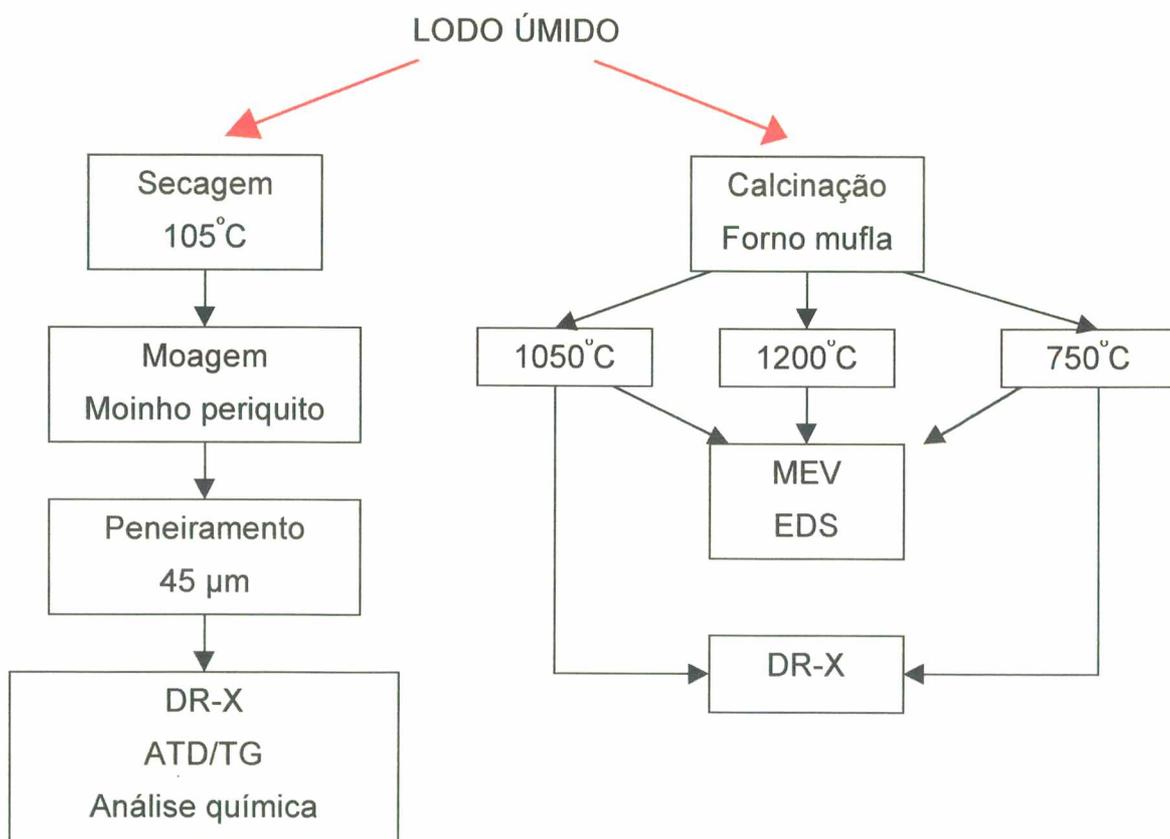
Análise	Técnica	Equipamento e Instituição de realização da análise
Química semi-quantitativa	Fluorescência de raios-X	Philips PW 2400 - CTC
Química semi-quantitativa	Espectrografia de emissão	IPEN
Química qualitativa	Análise química em microsonda por espectrometria de energia dispersiva de raios-X	EDAX acoplada ao MEV Philips XL 30 - LABMAT
Cristalográfica	Difração de raios-X	Philips X'Pert – LABMAT
Térmica	Análise térmica simultânea (ATD/TG)	Netsch STA 409 EP – CTC
Distribuição granulométrica do pó	Medida de tamanho de partículas por laser	Sympatec Helos – LABMAT
Densidade do pó	Picnometria	Picnômetro – CTC
Análise microestrutural	Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	Philips XL 30 – LABMAT

O carbonato de sódio utilizado foi sintético P.A, anidro. Na análise térmica

utilizou-se uma amostra padrão.

O procedimento de caracterização do lodo consistiu preliminarmente na sua secagem em estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , moagem em moinho tipo periquito por aproximadamente 4 minutos e peneiramento, sendo o resíduo moído novamente até que todo o material apresentasse granulação inferior a  $45\ \mu\text{m}$ . O material então foi avaliado por difração de raios-X, fluorescência de raios-X e análise térmica simultânea. Esta metodologia encontra-se esquematizada na Figura 3.2

A partir da curva de análise térmica (que é apresentada no capítulo da caracterização das matérias-primas (Figura 4.1)), escolheu-se as temperaturas de  $750^{\circ}\text{C}$  e  $1050^{\circ}\text{C}$  para calcinação do lodo e sua posterior avaliação por difratometria de raios-X. Esse procedimento teve por objetivo avaliar as transformações que ocorrem durante o tratamento térmico de calcinação.



**Figura 3.2** – Fluxograma de caracterização do lodo.

A velocidade de aquecimento até a temperatura de calcinação ( $750^{\circ}\text{C}$ ,  $1050^{\circ}\text{C}$  e

1200°C), em forno mufla, foi bastante lenta. Após a calcinação, o material foi novamente moído e peneirado até tamanho de partícula inferior a 45 µm.

### **3.3 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE AGREGADOS A PARTIR DA MISTURA LODO-R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>**

No fluxograma da Figura 3.3 apresenta-se a seqüência de etapas adotada para a obtenção de agregados leves.

Confeccionaram-se corpos a partir da mistura lodo-R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. O carbonato de sódio utilizado apresentava tamanho de partícula inferior a 125 µm (após peneiramento).

O teor de carbonato de sódio foi escolhido visando obter formulações com baixo ponto de fusão e viscosidade adequada para a expansão, porém dentro de um custo compatível às utilizações pretendidas, visto que o aumento no teor deste componente eleva os custos da formulação.

Variou-se o teor de lodo nas formulações, visando avaliar a influência deste nas características do agregado leve, tais como absorção de água, massa específica, morfologia, resistência.

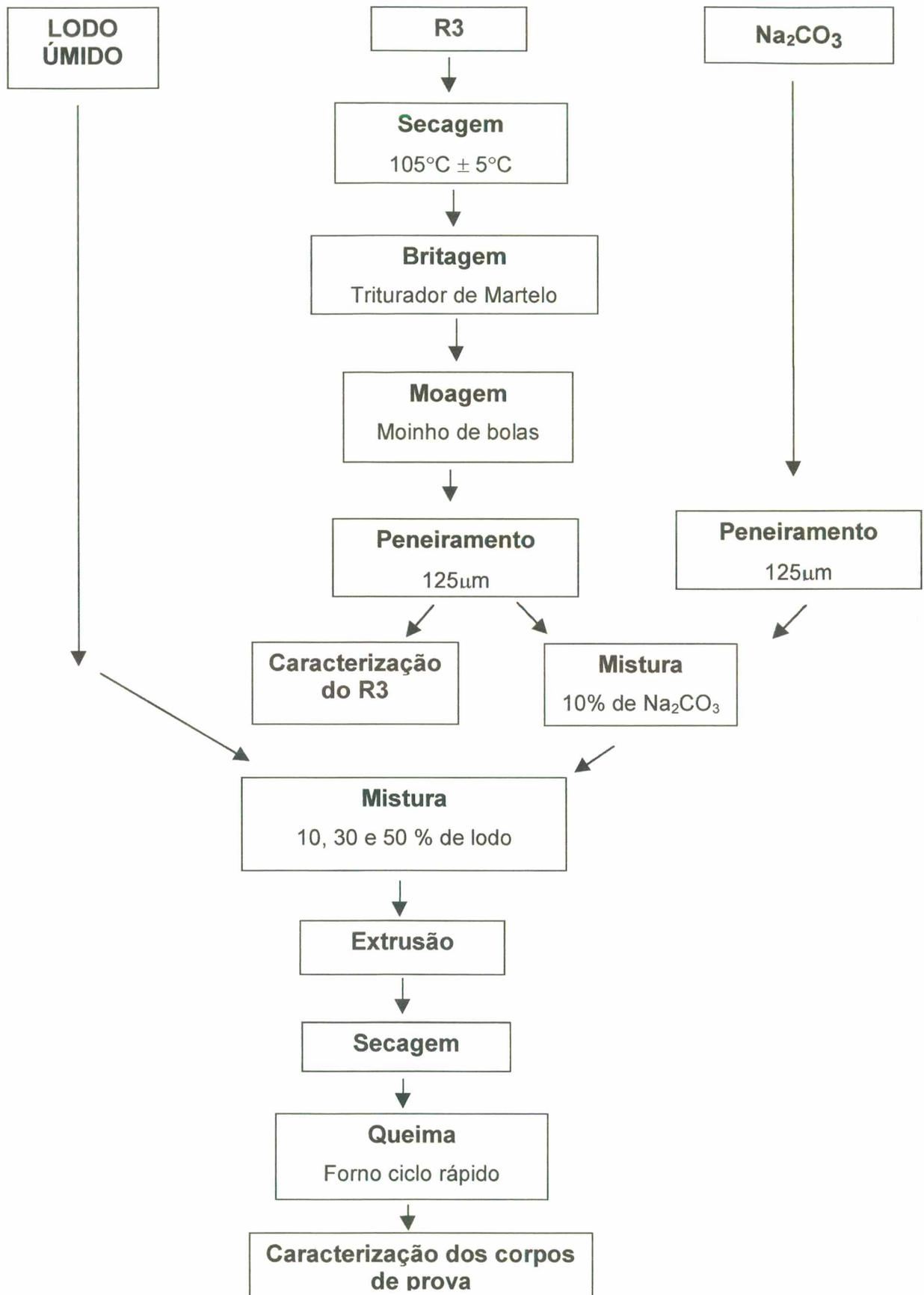


Figura 3.3 – Metodologia adotada neste estudo para obtenção de agregados leves.

### 3.3.1 Procedimento para o beneficiamento do R3

O R3 foi seco em estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , triturado em moinho de martelo e posteriormente moído em moinho de bolas (por 1 hora a rotação de 51,7 rpm, utilizando bolas de alumina como elementos de moagem).

Após moagem o material foi passado em peneira de 125  $\mu\text{m}$ , via peneirador mecânico. O material não passante retornou ao processo de moagem.

### 3.3.2 Formulação e preparo dos corpos de prova

O procedimento de formulação consistiu em misturar inicialmente 90% de R3 e 10% de carbonato de sódio, em massa. A homogeneização foi feita em moinho de bolas, sem carga, durante 10 minutos.

À mistura R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , adicionou-se lodo nas proporções de 10%, 30% e 50%, em massa. Estes teores foram escolhidos de forma a ter-se uma faixa de valores para avaliação da influência do teor de lodo nas propriedades dos agregados produzidos. Introduziu-se, quando necessário, água para obter-se consistência plástica indispensável à extrusão dos corpos de prova. A homogeneização destas misturas foi feita manualmente.

A Tabela 3.2 apresenta as quantidades relativas de cada matéria-prima utilizada para as formulações e as denominações adotadas. Os teores de lodo foram calculados em função da massa total final, sem acréscimo de água.

**Tabela 3.2** – Denominações e quantidades empregadas para cada formulação.

Formulação	Teor de lodo (%)	R3 – $\text{Na}_2\text{CO}_3$ (g)	Lodo (g)	Massa total (g)	Água (g)
C10	10	1980	220	2100	242
C30	30	2100	900	3000	60
C50	50	1500	1500	3000	0

A formulação contendo 50% de lodo não apresentou consistência adequada para extrusão e corte dos corpos de prova, sendo assim, desconsiderada neste estudo.

Os corpos de prova foram obtidos por conformação em extrusora (Marca Netzsch) com boquilha de 15 mm de diâmetro, e então seccionados com um fio de cobre, obtendo-se corpos com comprimento variando entre 12 e 22 mm.

Os corpos de prova foram levados à estufa, a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , por no mínimo 30 minutos, para eliminação do excesso de umidade, permanecendo em temperatura ambiente, por no mínimo 6 horas, antes da queima, para completar a secagem.

A secagem em estufa diminui o processo de exsudação de sais solúveis, que ocorre durante a secagem natural. Esse tema é discutido posteriormente no Capítulo 5.

### 3.3.3 Tratamento térmico

Ensaio de análise térmica simultânea (ATD/TG) foram empregados para a avaliação de reações químicas e transformações de fases de formulações. Realizou-se análise térmica de formulações com diferentes teores de R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e Lodo-R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , visando avaliar a influência do teor de lodo. Variou-se a taxa de aquecimento para uma das formulações de análise térmica visando avaliar a influência desta no tratamento térmico.

O tratamento térmico das formulações denominadas C10 e C30 foi realizado em forno tipo ciclo rápido, marca Nannetti, modelo C/V, que permite simular em laboratório uma curva de queima de um forno industrial contínuo.

Foram testadas 8 curvas de queima com o objetivo de avaliar a influência da temperatura, taxa de aquecimento e tempo de queima. Aquecimento e resfriamento foram executadas à mesma taxa. Na Tabela 3.3 apresentam-se os códigos de denominação de cada ciclo de queima, com dados de temperatura, tempo de patamar e taxa de aquecimento/resfriamento.

Os corpos cilíndricos foram dispostos sobre placas refratárias recobertas com alumina. Foram queimados de 20 a 30 corpos de prova em cada ciclo de queima.

As formulações contendo 30% de lodo (C30) não foram queimadas em todas as

condições de queima descritas na Tabela 3.3, devido a limitações de equipamento.

**Tabela 3.3** - Condições de tratamento térmico e denominações adotadas.

Temperatura (°C)	1200				1250			
Tempo de patamar (min)	15		30		15		30	
Taxa de aquecimento (°C/min)	20	40	20	40	20	40	20	40
Denominação	TT1	TT 2	TT 3	TT 4	TT 5	TT 6	TT 7	TT 8

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA QUEIMADOS

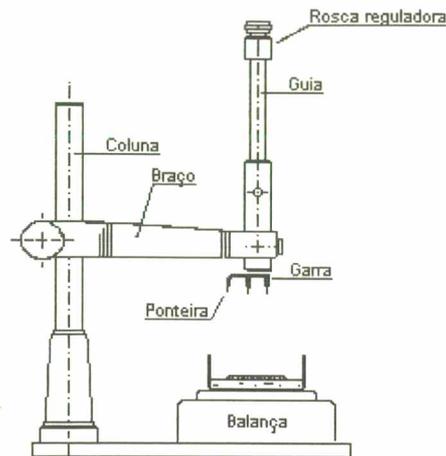
Os corpos de prova foram avaliados em função da morfologia, absorção de água, densidade aparente, resistência a compressão, composição química e de fases.

#### 3.4.1 Absorção de água

Para determinação da absorção de água utilizou-se o método da fervura, conforme recomenda a norma NBR 8947 (ABNT, 1985).

#### 3.4.2 Densidade aparente

Para a determinação da densidade aparente das amostras após a queima, foi utilizado o método de imersão em mercúrio, conforme descrito pelos Controles de Fabricación da Asociación de Investigación de las Industrias Ceramicas (Enrique Navarro, 1989). Utilizou-se o densímetro, esquematicamente mostrado na Figura 3.4.



**Figura 3.4** - Equipamento para a medida da densidade aparente (Enrique Navarro, 1989).

### 3.4.3 Análises química, cristalográfica e microestrutural

Realizou-se análise química, através de fluorescência de raios-X, de amostras de agregados contendo 10% e 30% de lodo.

Para avaliar a morfologia dos corpos expandidos, utilizou-se microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os corpos de prova foram embutidos a frio, em resina epoxi, seccionados em máquina de corte Isomet 2000 Buehler, lavados e secos em estufa a  $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ .

Difratometria de raios-X foi a técnica utilizada para a verificação das fases cristalinas formadas a partir do tratamento térmico. Os corpos de prova escolhidos para o ensaio, foram fraturados manualmente e posteriormente moídos em moinho de ágata<sup>1</sup>. Separou-se ainda pedaços da camada superficial de diversos corpos de prova, contendo 10% de lodo, queimados sob diferentes condições para verificação da(s) fase(s) cristalina(s) formada(s) na superfície dos mesmos.

<sup>1</sup> O “moinho de ágata” foi desenvolvido e patenteado pela equipe técnica do CTC, consiste de jarro e elementos de moagem cilíndricos manufaturados em ágata. Sob condições padronizadas de operação, todo o material moído é reduzido a granulometria inferior a  $20\text{ }\mu\text{m}$ .

### **3.4.4 Resistência à compressão**

O ensaio de resistência à compressão dos agregados foi realizado segundo o procedimento adotado no ensaio de pelotas de minério de ferro (Meyers, 1981) e de agregados obtidos pela aglomeração de cinzas volantes de carvão (Souza, 1986).

Este ensaio é normatizado pela International Standards Organization (ISO / TO 102 / SC 3 283E). Consiste em colocar uma pelota entre duas placas paralelas e comprimi-la a uma velocidade especificada até que ocorra a ruptura (Meyers, 1981).

Embora a ISO recomende uma velocidade de aplicação de carga da ordem de 10 mm/min (Meyers, 1981), o ensaio foi executado a 0,5 mm/min. Este procedimento foi adotado, visando um melhor controle dos parâmetros do ensaio.

A carga de fratura foi determinada utilizando-se uma máquina universal de ensaios, marca Wykeham Farrance, com célula de carga de 20 kgf, apresentando precisão de 0,2 kgf. A leitura da carga foi feita através de indicador digital.

Para efeito de comparação de resultados, ensaiaram-se também agregados leves comercializados no mercado brasileiro. Como a resistência da pelota varia com seu tamanho, empregaram-se corpos de prova de mesma ordem de tamanho que os agregados de lodo-R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Para cada formulação ensaiaram-se no mínimo 5 pelotas.

## 4. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Neste capítulo são determinadas e discutidas as propriedades físico-químicas das matérias-primas empregadas para a produção dos agregados leves.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO

#### 4.1.1 Composição química

O lodo é uma mistura complexa, incluindo metais, não-metais, e elevado teor de compostos orgânicos. Os compostos orgânicos, amoniacais e sulfurosos são os responsáveis pela cor e odor característicos do lodo, bem como pelo valor da perda ao fogo.

A análise química semi-quantitativa foi realizada utilizando-se as técnicas de Fluorescência de Raios-X, Espectroscopia de Emissão e Microsonda eletrônica. Na Tabela 4.1, apresentam-se os teores dos principais constituintes do lodo, expressos em óxidos, segundo a análise de Fluorescência de Raios-X.

**Tabela 4.1** - Análise semi-quantitativa do lodo por FR-X, percentual em massa.

Óxido	Teor (%)	Óxido	Teor (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,6	Cl	0,9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5,2	TiO <sub>2</sub>	0,8
SO <sub>3</sub>	5,3	Na <sub>2</sub> O	0,7
CaO	2,1	K <sub>2</sub> O	0,6
SiO <sub>2</sub>	2,0	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4
Perda ao fogo (1000°C)	74,9	MgO	0,2

O teor de alumínio pode ser justificado pelo uso de sulfato de alumínio como floculante no sistema de tratamento de efluentes. O enxofre é devido tanto ao emprego de sulfato de alumínio como floculante, quanto de corantes sulfurosos no tingimento. O fosfato é decorrente do uso de detergentes polifosfatados. A uréia (nutriente para os microorganismos), proveniente em parte do processamento têxtil e do esgoto sanitário e em parte adicionada ao sistema, é um dos responsáveis pela presença de compostos amoniacais. O titânio é devido ao uso de branqueadores ópticos, e o cloro, aos alvejantes.

Tanto as análises por fluorescência de raios-X e microsonda não identificam a presença de compostos nitrogenados, por isso não apresenta-se o teor de nitrogênio.

Para a determinação dos componentes minoritários do lodo, utilizou-se a técnica de espectroscopia de emissão, uma vez que é mais adequada nestes casos. A Tabela 4.2 apresenta estes resultados.

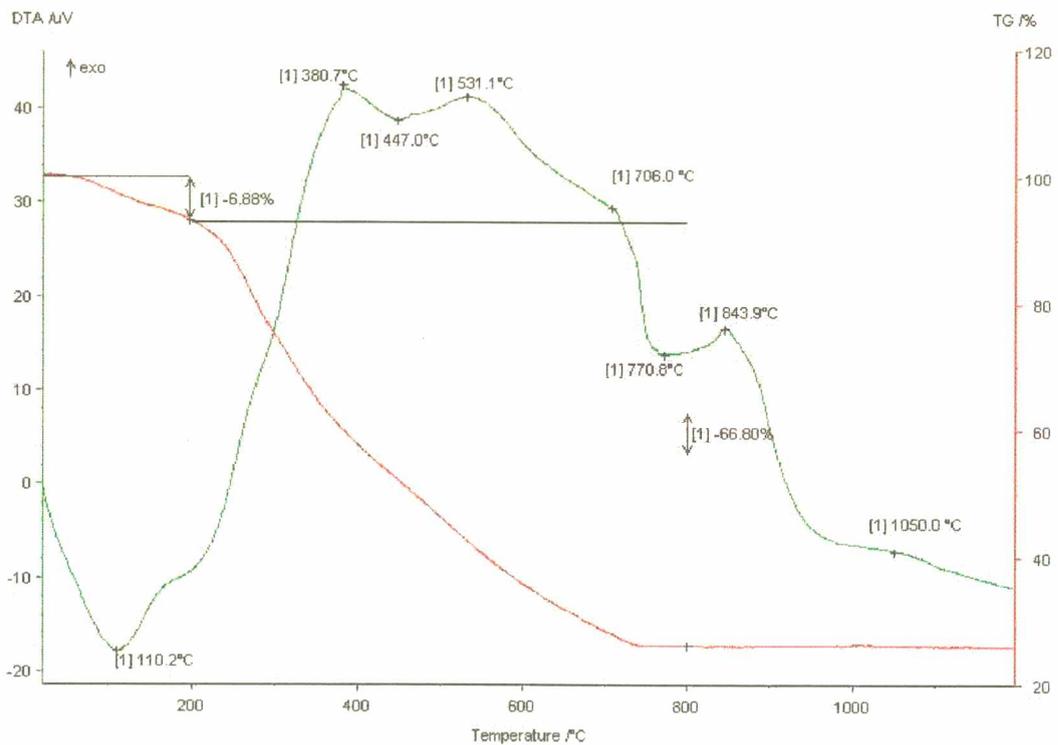
**Tabela 4.2** – Análise semi-quantitativa do lodo por espectroscopia de emissão, percentual em massa.

Elemento	Teor (%)	Elemento	Teor (%)
Cu	0,02	Cd	0,09
Zn	< 0,06	B	< 0,01
Mn	0,01	Pb	< 0,01
Ni	< 0,01	Bi	< 0,01
Sr	0,01	Ba	0,01
Cr	< 0,01	V	< 0,01

Observa-se pela Tabela 4.2 que o lodo possui elementos potencialmente tóxicos em sua constituição, devido aos componentes fixadores de pigmentos utilizados no processo fabril.

#### 4.1.2 Análises térmica e de fases

Na Figura 4.1 apresentam-se as curvas de análise térmica simultânea (ATD/TG) do lodo. A partir de 55°C inicia-se a perda de massa em decorrência do início da evaporação de compostos orgânicos. O pico endotérmico a 110°C corresponde à evaporação de água residual.



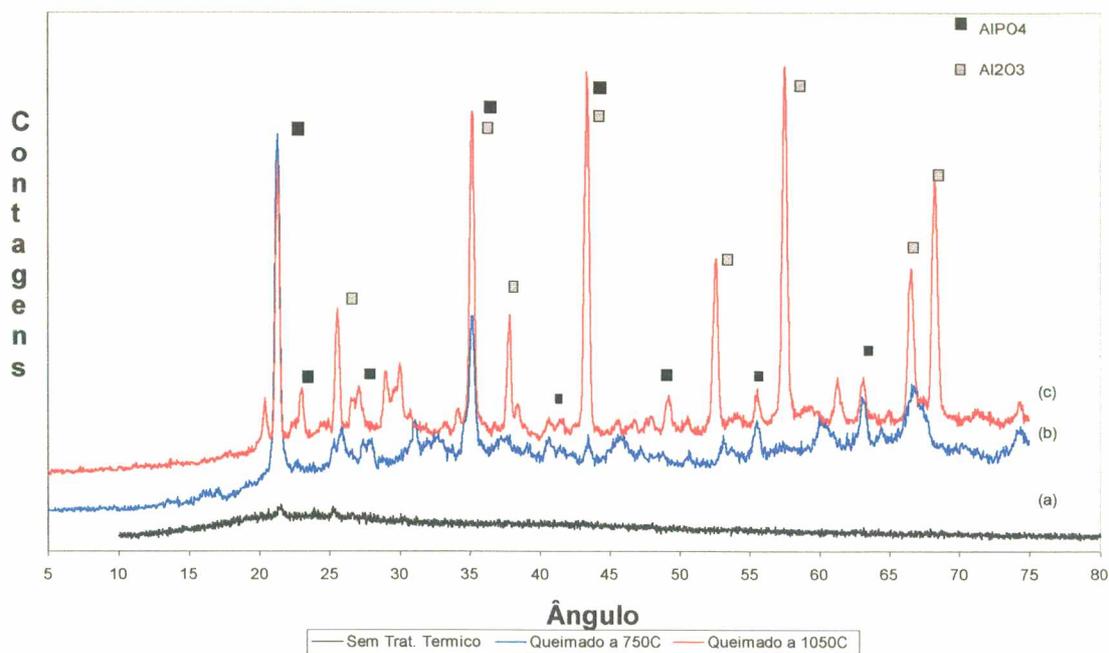
**Figura 4.1** - Curvas de análise térmica (ATD/TG) simultânea do lodo.

A partir de aproximadamente 250-300°C, aumenta a inclinação da curva de análise térmica diferencial (ATD), este comportamento indica uma intensificação na eliminação de matéria orgânica. O pico exotérmico a 380°C representa, provavelmente, a combustão de compostos sulfurosos. O pico exotérmico a 530°C é devido à combustão da matéria orgânica. Observa-se perda de massa de 66,80% entre 200°C e 740°C. A partir desta temperatura, a curva correspondente à perda em massa (TG) permanece estabilizada. Contudo, alterações na curva de ATD são ainda verificadas, indicando a ocorrência de transformações de fases. Em torno de 840°C,

ocorre transformação com pico exotérmico, que corresponde à estruturação de uma fase cristalina.

A partir desta análise, escolheu-se as temperaturas de 750°C e 1050°C para a calcinação do lodo e posterior difratometria. A análise de fases cristalinas, possibilitou inferir sobre as possíveis reações que ocorreram durante o tratamento térmico.

Na Figura 4.2 mostra os difratogramas do lodo: (a) sem tratamento térmico; (b) calcinado a 750°C; e (c) calcinado a 1050°C.



**Figura 4.2** - Difratometria de raios-X do lodo sem tratamento térmico (a), calcinado a 750°C (b) e calcinado a 1050°C (c).

Em decorrência dos diversos componentes do lodo, sem tratamento térmico, em especial da elevada quantidade de matéria orgânica, o difratograma (Figura 4.2(a)) apresenta aspecto similar ao obtido para material amorfo, não permitindo assim identificar a presença de fases cristalinas.

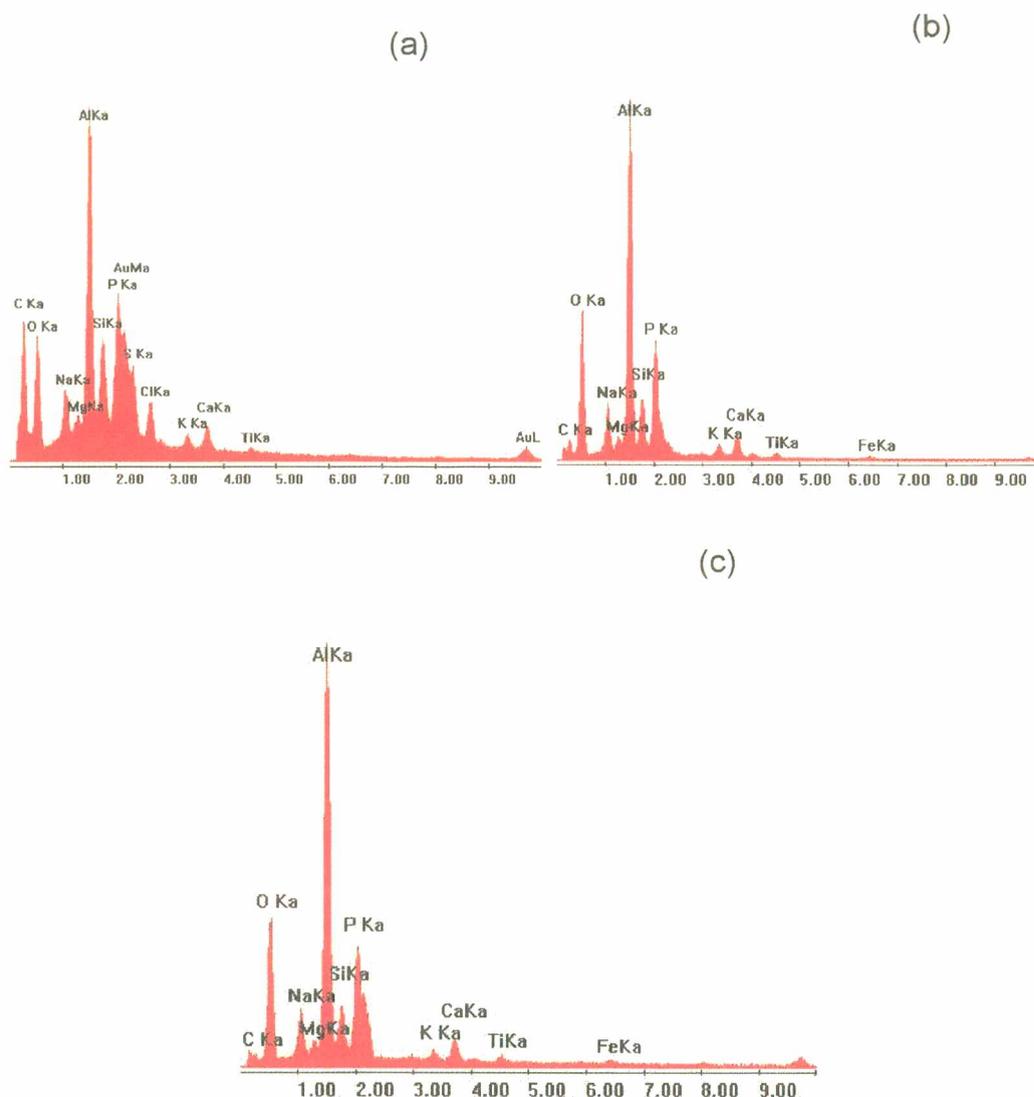
Com a calcinação a 750°C, eliminou-se a matéria orgânica e os compostos sulfurosos, resultando em um material ainda com certo grau de desordenamento, porém com maior quantidade de fases cristalinas, (Figura 4.2(b)). Os picos atestam presença de fosfato de alumínio ( $\text{AlPO}_4$ ). O fosfato de alumínio provavelmente é formado no sistema de lodo ativado, por reação denominada precipitação de fosfatos (Fair, 1976).

À 1050°C, obteve-se material melhor cristalizado, mas ainda com fases amorfas. Na Figura 4.2(c), observam-se picos maiores e melhor definidos, o que confirma que há cristalização de fases acima de 750°C. Este difratograma, indica a presença de fosfato de alumínio ( $\text{AlPO}_4$ ) e óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Comparando-se estes resultados com aqueles obtidos na análise térmica (Figura 4.1), pode-se supor que a 840°C deva ter ocorrido a cristalização do óxido de alumínio.

#### **4.1.3 Análise por microscopia eletrônica de varredura e microsonda**

Amostras de lodo seco, calcinado a 750°C, a 1050°C e a 1200°C, foram analisadas por microsonda de energia dispersiva (EDS), acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 4.3 apresenta os perfis de concentração obtidos.



**Figura 4.3** – Perfis de concentração do lodo, seco (a), calcinado a 750°C (b), e calcinado a 1050°C (c), obtidos por microsonda.

Como pode ser constatado na Figura 4.3, os perfis de concentração para o lodo calcinado a 750°C, a 1050°C não apresentam diferenças significativas entre si. Isso provavelmente é devido ao fato de que a partir de 740°C não verifica-se mais perda de massa, e assim, a composição não sofre mais variação com a temperatura de calcinação.

Avaliando os perfis de concentração do lodo seco e do lodo calcinado (Figura 4.3), observa-se que a queima até 750°C leva a perda principalmente de compostos contendo carbono, enxofre e cloro.

#### 4.1.4 Análise visual

Da análise visual, pode-se dizer que a queima do lodo a 750°C deu origem a um material bege e poroso. Nas queimas a 1050°C e 1200°C, obtiveram-se corpos levemente esverdeados, de aspecto esponjoso e formato bastante irregular.

## 4.2 Caracterização do R3

### 4.2.1 Composição química

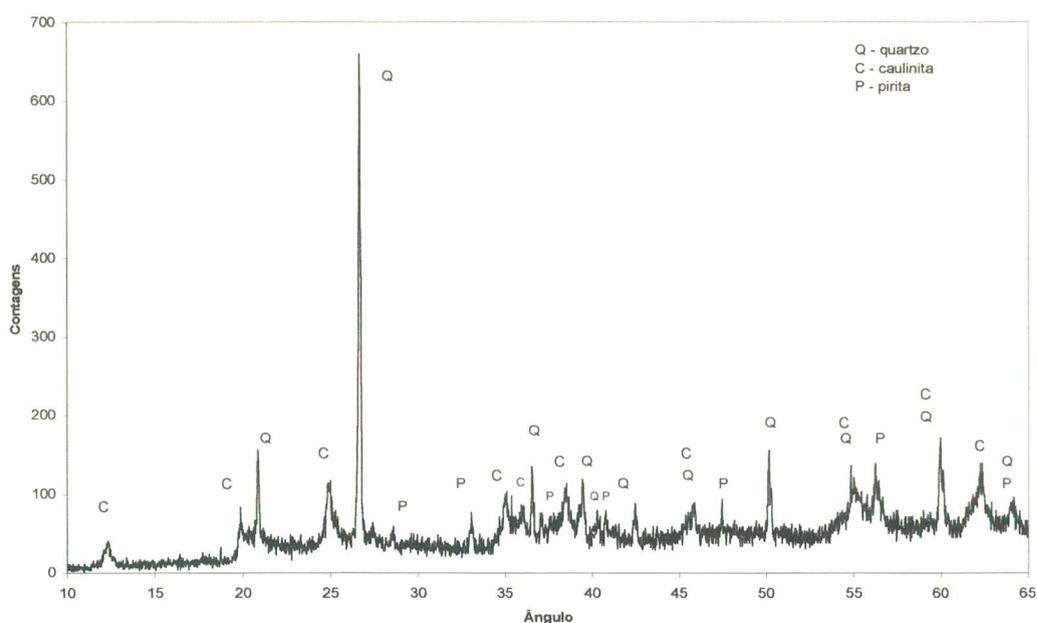
O R3 é rico em sílica e alumina, como pode ser visto na Tabela 4.3. O teor de álcalis é baixo. Possui ainda ferro e enxofre, entre outros componentes.

**Tabela 4.3** – Análise semi-quantitativa do R3 por fluorescência de raios-X, teor em óxidos, percentual em massa.

Óxidos	Teor (%)	Óxidos	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	43,9	MgO	1,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,9	CaO	1,0
SO <sub>2</sub>	2,4	TiO <sub>2</sub>	0,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9	Na <sub>2</sub> O	0,3
K <sub>2</sub> O	1,2	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,1
Perda ao fogo (1000°C)	17,6	MnO	<0,1

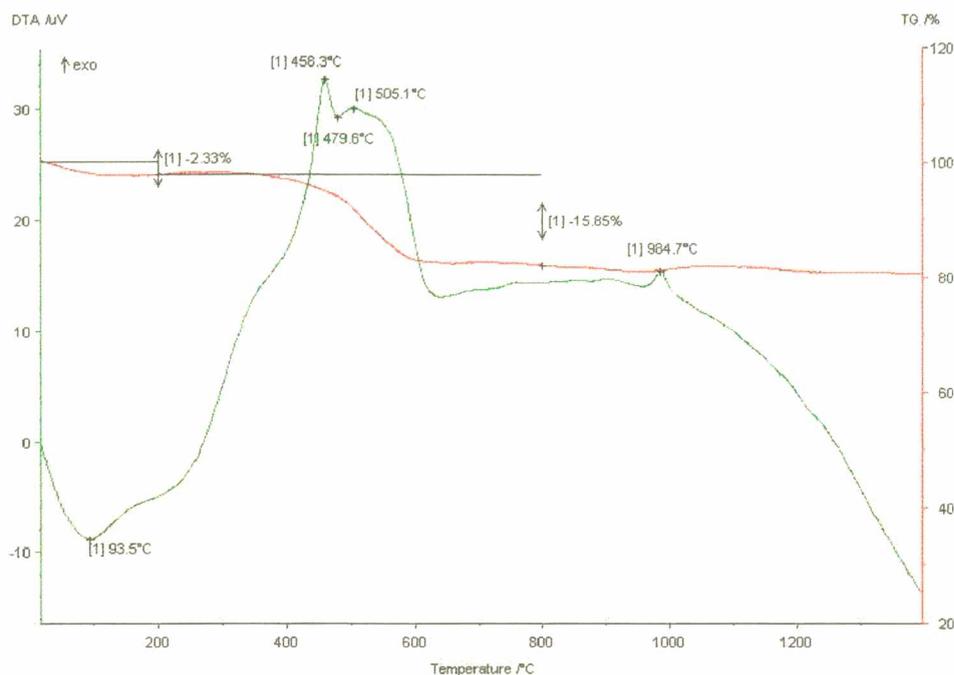
### 4.2.3 Análises térmica e mineralógica

No difratograma da Figura 4.6 pode-se observar que as fases predominantes são, a caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) e o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Verifica-se presença ainda de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), que, segundo Earnest (1984), é o principal componente inorgânico sulfuroso em carvões.



**Figura 4.4 - Difratograma de Raios-X do R3.**

As curvas de análise térmica simultânea do R3 são mostradas na Figura 4.5. Observa-se pico endotérmico a  $93,5^\circ\text{C}$  equivalente a evaporação de água residual. No intervalo de  $380^\circ$  a  $600^\circ\text{C}$  ocorre perda de massa (15,85%), bem como transformações na curva de ATD, que são provavelmente devidas a oxidação da pirita e da matéria orgânica (picos exotérmicos a  $458^\circ\text{C}$  e  $505^\circ\text{C}$ , respectivamente) e desidroxilação da caulinita (pico endotérmico a  $480^\circ\text{C}$ ).



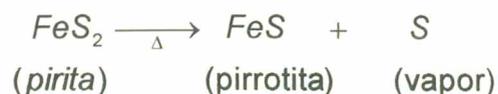
**Figura 4.5** - Curva de análise térmica simultânea (ATD/TG) do R3.

A oxidação da pirita resulta em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SO}_2$  (Equação 4.1). Seu mecanismo apresenta natureza multi-estágio, visto que a reação se dá em diferentes etapas (Equações 4.2 e 4.3), o que acarreta numa curva de ATD com sucessão de picos endo e exotérmicos numa ampla faixa de temperatura (Smykatz-Kloss, 1974 e Earnest, 1984). A posição e intensidade dos picos depende da quantidade de pirita na amostra, da taxa de aquecimento e do fluxo de gás durante o ensaio de ATD, entre outros fatores.

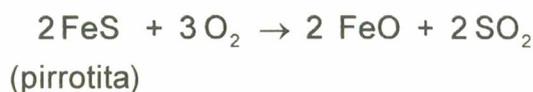


**Equação 4.1**

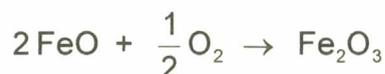
Acima, apresenta-se a equação geral da oxidação da pirita. O mecanismo completo abrange formação da pirrotita e do dióxido de enxofre (Equações 4.2). A pirrotita, oxida-se a  $\text{FeO}$ , e este, que é instável na presença de  $\text{SiO}_2$ , a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Equações 4.3).



Equações 4.2



Equações 4.3



Tanto o gás sulfídrico (SO<sub>2</sub>), quanto o óxido de ferro formados na decomposição da pirita são componentes importantes no processo de piroexpansão.

O pico endotérmico a 480°C é provavelmente devido a desidroxilação da caulinita, marcado por um colapso da estrutura octaédrica, conforme a Equação 4.4. A forma e a posição deste pico são altamente influenciadas pelo desordenamento da estrutura e presença de Fe<sup>+2</sup> e Ti (Senai/CTC, s.d.).



Equação 4.4

O pico exotérmico a 985°C indica a cristalização da mulita. A posição deste pico não é influenciada pelo ordenamento, mas sua intensidade é proporcional a quantidade de fase caulinita no sistema (Senai/CTC, s.d.).

A difração de raios-X identificou a presença de quartzo. Porém na curva de ATD não observou-se os picos endotérmicos de transformação do quartzo, de α para β a 570°C, e de quartzo β para tridimita a 870°C. Isso pode ser indicativo de que a quantidade de quartzo no R3 é pequena. Earnest (1984) afirma que amostras contendo menos de 10% de quartzo não costumam apresentar os picos de transformação na curva ATD.

#### 4.2.4 Caracterização física

Determinou-se a densidade real de sólidos, conforme Manual de Controle de Fabricação da AICE - Asociación de Investigación de la Industrias Ceramicas, Espanha, obtendo-se o valor médio de  $2,4 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ .

Na Figura 4.6, apresenta-se a distribuição volumétrica do tamanho de partículas do R3 beneficiado, ou seja, moído e peneirado. Observa-se o pequeno tamanho das partículas auxilia no processo de expansão (Damasceno, 1973).

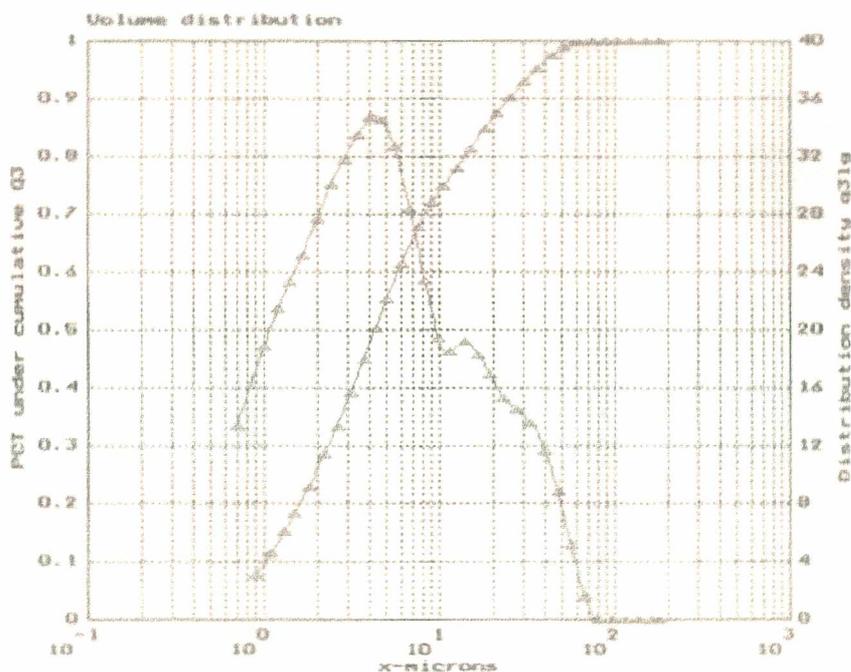


Figura 4.6 - Distribuição granulométrica das partículas do R3 beneficiado.

#### 4.3 Caracterização do carbonato de sódio

O carbonato de sódio apresenta ponto de fusão relativamente baixo,  $851^\circ\text{C}$  (Perry, 1980), liberando  $\text{CO}_2$ , conforme a Equação 4.5. Desta forma, este composto sódio atua como fundente, e produz gases que auxiliam a expansão do agregado.



Equação 4.5

Na Figura 4.7 apresenta-se a curva de análise térmica simultânea do carbonato de sódio. Observa-se pico endotérmico a 86,2°C correspondente a perda de água residual. A 859,0°C, observa-se um pico endotérmico correspondente a sua fusão.

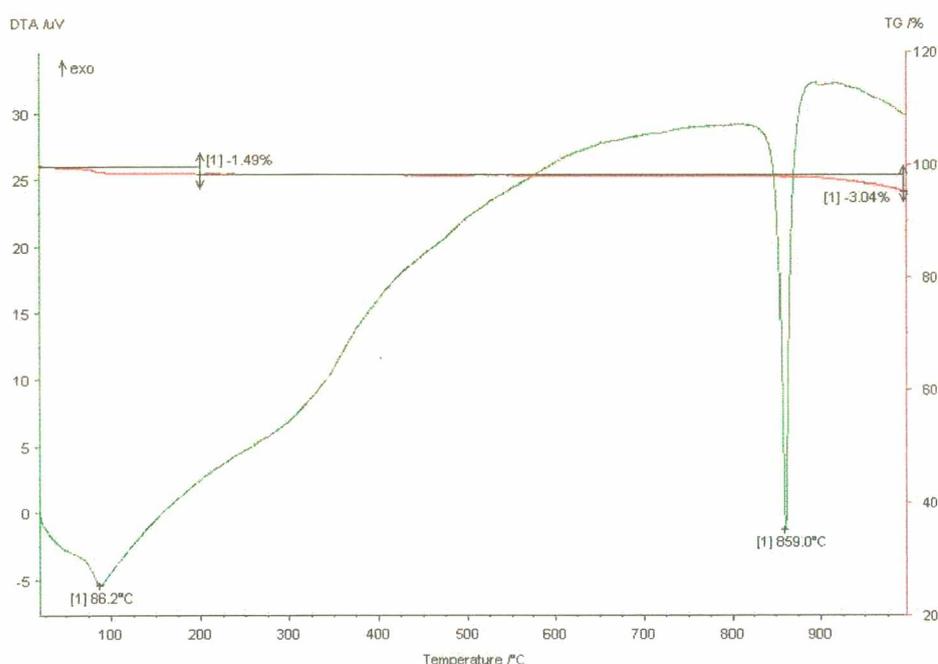


Figura 4.7 – Curva de análise térmica do carbonato de sódio.

Pelas curvas de ATD/TG mostradas na Figura 4.7, em 849,5°C inicia-se a fusão do carbonato de sódio, e a perda de massa, correspondente à eliminação do CO<sub>2</sub>. Ou seja, a decomposição, e conseqüente liberação de CO<sub>2</sub>, inicia-se a partir da fusão. Este é um fator positivo no processamento de agregados leves, visto que a formação de gases em alta temperatura auxilia na expansão.

O óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) formado a partir da evaporação do CO<sub>2</sub>, sofre processo de sublimação (Perry, 1980).

## **5. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO LEVE**

Neste capítulo são determinadas e discutidas as propriedades físico-químicas de formulações a base de Lodo-R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , assim como de agregados leves obtidos pela queima destas.

As formulações foram caracterizadas por análise térmica simultânea (ATD/TG).

Os agregados foram caracterizados por morfologia, composição química e de fases cristalinas, absorção de água, densidade aparente e resistência à compressão. Por fim, plota-se os dados dos agregados obtidos no diagrama de Riley-Wilson.

### **5.1 RESULTADOS PRELIMINARES**

Durante a execução dos testes preliminares com Lodo-R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , observou-se que na secagem natural dos corpos de prova ocorria um processo de exsudação de sais solúveis. Os sais migravam para a superfície dos corpos, formando cristalitos geralmente em forma de agulhas.

Para verificar se os cristalitos eram carbonato de sódio, ou outro sal proveniente de uma reação entre este e algum componente do lodo ou do R3, realizou-se difração de raios-X. Por esta análise, verificou-se que estes consistiam de carbonato de sódio anidro ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

Observou-se ainda que quanto maior o teor de lodo na formulação, mais lenta se dava a exsudação dos sais. Visto que o lodo constitui-se de um sistema com grande quantidade de partículas microscópicas, sua secagem é mais lenta que outros sistemas particulados, com tamanho de partícula maior. Sendo assim, o aumento do teor de lodo, dificulta a secagem, e conseqüentemente a migração de sais solúveis.

Para diminuir a exsudação, neste trabalho a secagem dos corpos de prova em estufa após a extrusão, conforme visto no Capítulo 3. Nos corpos de prova curados na

estufa, formou-se fina camada de sais com coloração variando de branco a azul claro, como pode ser observado na fotografia da Figura 5.1



**Figura 5.1** – Corpos de prova antes da queima.

Como o lodo apresenta comportamento tixotrópico (Fair, 1976), a extrusão dos corpos de prova foi dificultada, visto que a viscosidade diminui com o tempo para uma tensão cisalhante constante. Obteve-se, então, corpos de prova cilíndricos, porém com formato irregular, como pode ser visto na Figura 5.1. Esse problema pode ser evitado, com o uso de extrusora com pequeno espaço entre a alimentação e a saída da massa.

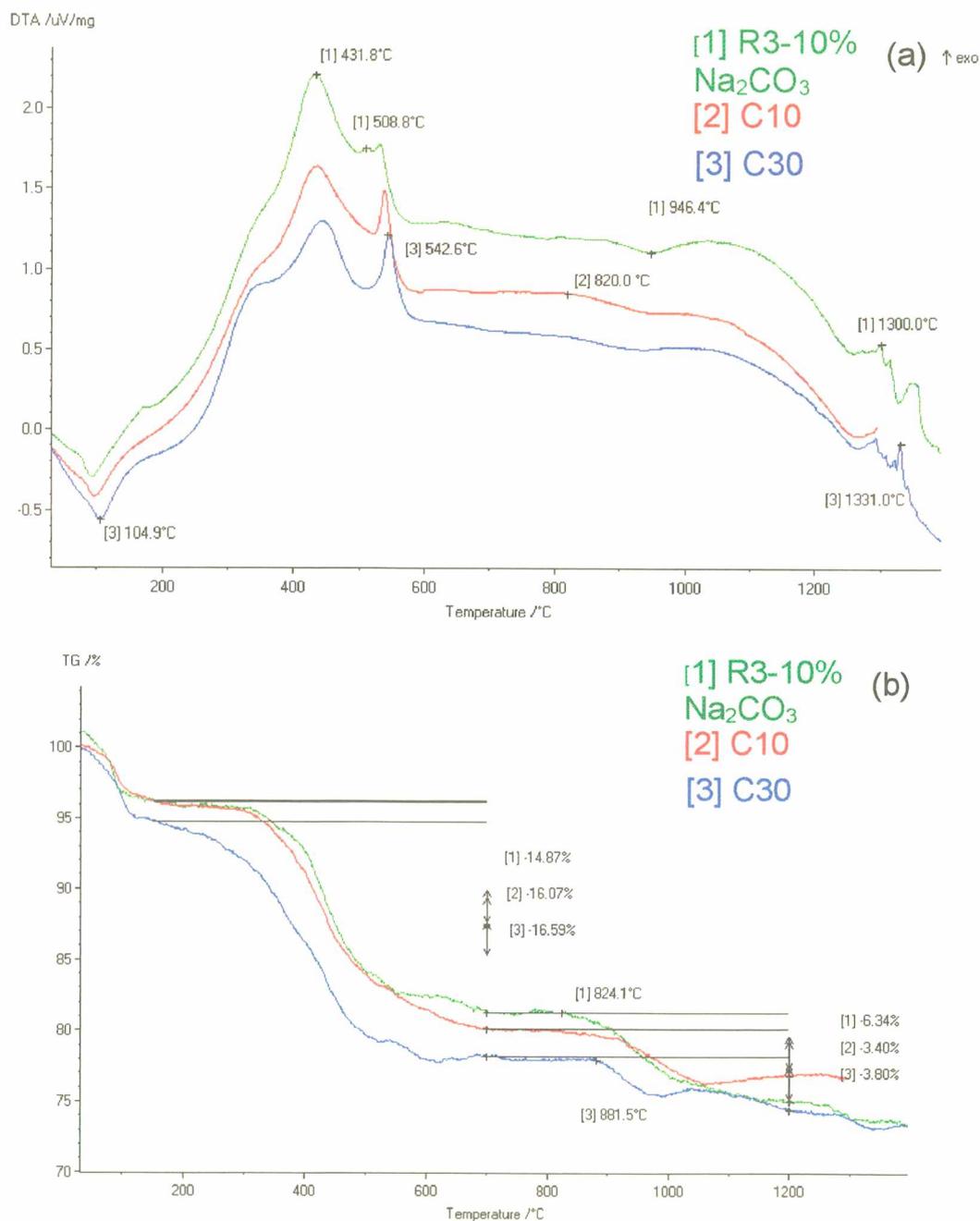
## 5.2 ANÁLISE TÉRMICA

Apresentam-se as curvas de análise térmica simultânea de formulações com diferentes teores de  $R3-Na_2CO_3$  e Lodo- $R3-Na_2CO_3$ . A partir destas, procurou-se identificar as reações químicas e transformações de fases que ocorrem durante o aquecimento, bem como avaliar a influência do teor de lodo nestas reações e transformações.

Para uma das formulações, C10, apresentam-se as curvas de análise térmica obtidas variando-se a taxa de aquecimento. Em função desses resultados, procura-se avaliar a influência da taxa de aquecimento nas transformações ocorridas durante o tratamento térmico.

### 5.2.1 Influência do teor de lodo

A Figura 5.2 apresenta as curvas de ATD e TG para três formulações: C10, C30, onde o teor de lodo é variado, e R3-10%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (equivalente a 0% de lodo).



**Figura 5.2** – Curvas de (a) ATD e (b) TG das formulações C10, C30 e R3-10%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

As amostras apresentam pico endotérmico a aproximadamente 100°C relativo a eliminação da água residual (Figura 5.2(a)). Na seqüência, pico exotérmico em cerca de 430°C devido a oxidação da pirita, presente no R3, seguido de outro pico exotérmico em torno de 540°C relativo à combustão da matéria orgânica. Observa-se que a formulação sem lodo (R3-10% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) não apresenta este pico de forma tão pronunciada, visto que possui menor quantidade de matéria orgânica.

Os picos de desidroxilação da caulinita e formação da mulita, observados na curva de ATD do R3 (Figura 4.4), ficam sobrepostos por outras reações, não sendo assim identificáveis para estas misturas.

Próximo a 1300°C, as curvas de ATD apresentam uma seqüência de picos exotérmicos. Sabe-se que o óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) proveniente da decomposição do Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, sublima em alta temperatura (Perry, 1980). Entretanto, isto equivaleria a um pico endotérmico, e não a picos exotérmicos como os verificados.

Observa-se que as formulações Lodo-R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (C10 e C30) apresentam resultados de ATD bastante semelhantes entre si. A diferença observável diz respeito a intensidade das reações, mas a natureza das reações (temperatura onde ocorrem inflexões da curva de ATD) permanece a mesma. Isto é uma indicação que a variação do teor de lodo tende a influir mais na intensidade do que no tipo de reação que ocorre ao longo do aquecimento. A formulação R3-10% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> mostrou-se ser mais exotérmica. O aumento do teor de lodo acarretou em curva menos exotérmica.

Em relação às curvas de análise termogravimétrica (TG), Figura 5.2b, observa-se acentuada perda de massa entre 200° e 600°C, que se deve a oxidação da pirita e da matéria orgânica e desidroxilação da caulinita. Nesta faixa de temperatura, verificou-se perda de massa entre 14,87% e 16,96%, para as formulações entre 0% e 30% de lodo. Ou seja, quanto maior for o teor de lodo, maior é a perda de massa, que equivale a um aumento na quantidade gerada de gases.

As curvas de TG mantêm-se estáveis de 600°C até aproximadamente 800°C. A partir desta temperatura inicia-se nova perda de massa, relativa a liberação de CO<sub>2</sub>, proveniente da decomposição do Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Nesta etapa, a amostra sem lodo (R3-10%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), e que, portanto, apresenta maior quantidade de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, é aquela que apresenta a maior liberação de gases (6,34% contra 3,40% e 3,80%).

Observa-se que as amostras sem lodo (R3-10%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) e com 10% de lodo (C10) têm a perda de massa iniciada em torno de 800°C, enquanto que a amostra com 30% de lodo (C30), somente apresenta início da perda de massa em torno de 900°C. Isso talvez seja em decorrência da menor quantidade, relativamente, de R3 e Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

O acréscimo de lodo na formulação proporciona uma maior geração de gases no sistema. Nas curvas de TG observa-se que a maior parte dos gases são eliminados antes do início de formação de fase líquida (fusão incipiente). Se a amostra eliminar todos os gases antes de fechar a camada vítrea superficial, não ocorre expansão, mas, provavelmente, retração. Então, é necessário deslocar a faixa de liberação de gases para temperaturas mais elevadas. Um aumento considerável na taxa de aquecimento provavelmente poderia realizar esse deslocamento.

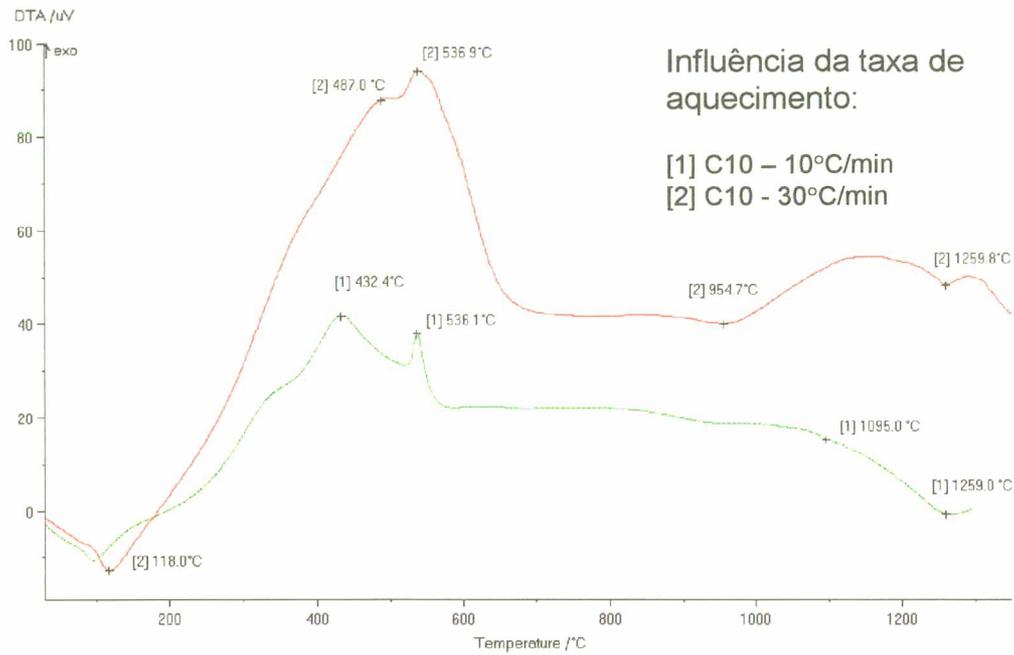
### 5.2.2 Influência da taxa de aquecimento

A influência da taxa de aquecimento é estudada para uma mesma formulação, C10. Objetiva-se, com este procedimento, verificar o efeito desta variável primordialmente sobre a temperatura para a ocorrência de perda de gases.

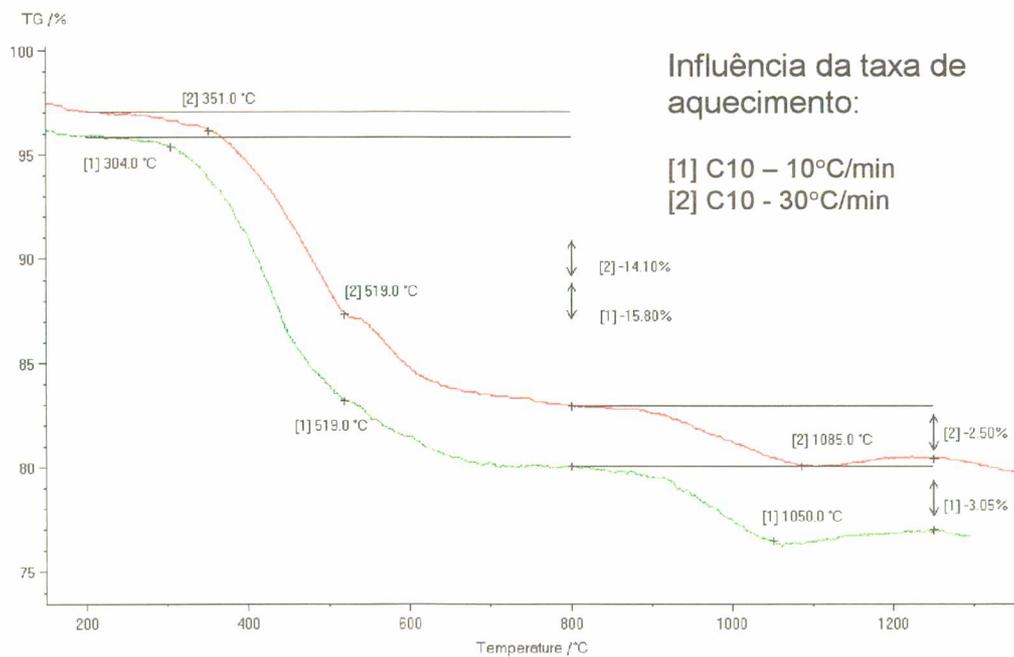
Verifica-se, através da Figura 5.3, que a taxa de aquecimento influencia fortemente as curvas de análise térmica.

Na curva de ATD, Figura 5.3 (a), observa-se que o aumento da taxa geralmente desloca as reações para temperaturas mais elevadas. Contudo, em alguns casos, este aumento impede ou dificulta algumas reações. Em velocidades de 10°C/min, observa-se que os picos de oxidação da pirita (432°C) e da matéria orgânica (536°C) são bem característicos. O mesmo não ocorre para a velocidade de 30°C/min, na qual o pico da oxidação da pirita é insignificante.

Na curva de TG (Figura 5.3 (b)), verifica-se que um aumento na velocidade de aquecimento diminui a quantidade de gases eliminados (15,8% para 14,1% e 3,05% para 2,50%). Também a temperatura em que ocorre a liberação de voláteis aumenta, visto que as reações são deslocadas para temperaturas mais elevadas.



(a)



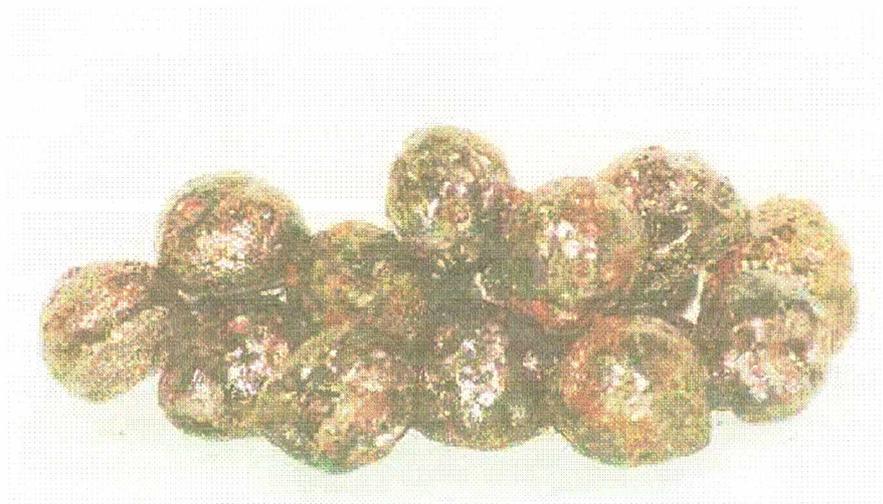
(b)

**Figura 5.3** – Curvas de análise térmica (a) diferencial (ATD) e (b) gravimétrica (TG) da formulação C10, variando-se a taxa de aquecimento (10°C/min e 30°C/min).

## 5.3 MORFOLOGIA

### 5.3.1 Amostras contendo 10% de lodo

O aspecto externo dos corpos de prova formulados com 10% de lodo pode ser observado na Figura 5.4. Os corpos são totalmente recobertos por uma camada vitrificada, com coloração escura, variando em tons de verde, marrom e preto.



**Figura 5.4** – Agregados leves de R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-lodo, contendo 10% de lodo.

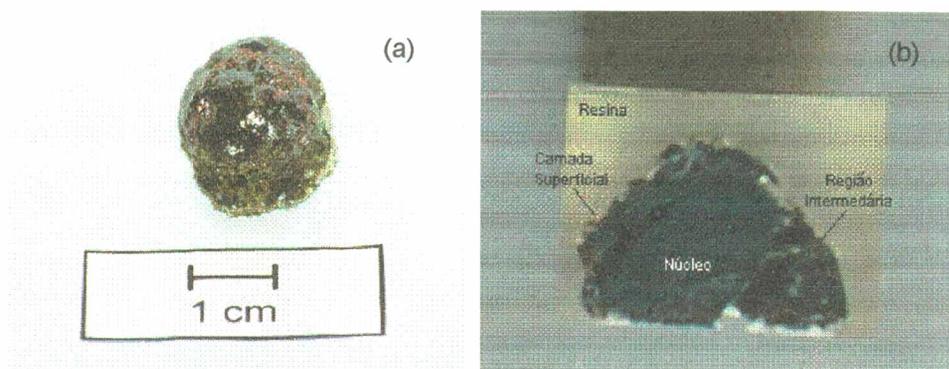
Em relação a forma dos agregados de R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-10%lodo, verificou-se que a maior parte dos corpos de prova adquiriram forma arredondada durante o tratamento térmico. Entretanto, alguns corpos mantiveram formato cilíndrico. Ambos os formatos de agregados acarretam em boa trabalhabilidade do concreto (segundo a literatura).

Quanto a textura superficial, os agregados contendo 10% de lodo apresentaram superfície lisa devido a camada vitrificada.

Uma característica marcante observada nestes corpos é que estes apresentam um perfil de corte com características bem definidas, conforme observado na Figura 5.5(b) e esquematizado:

- região interna ou núcleo, com poros pequenos e coloração preta;

- região intermediária, com poros maiores;
- fina camada superficial vitrificada.



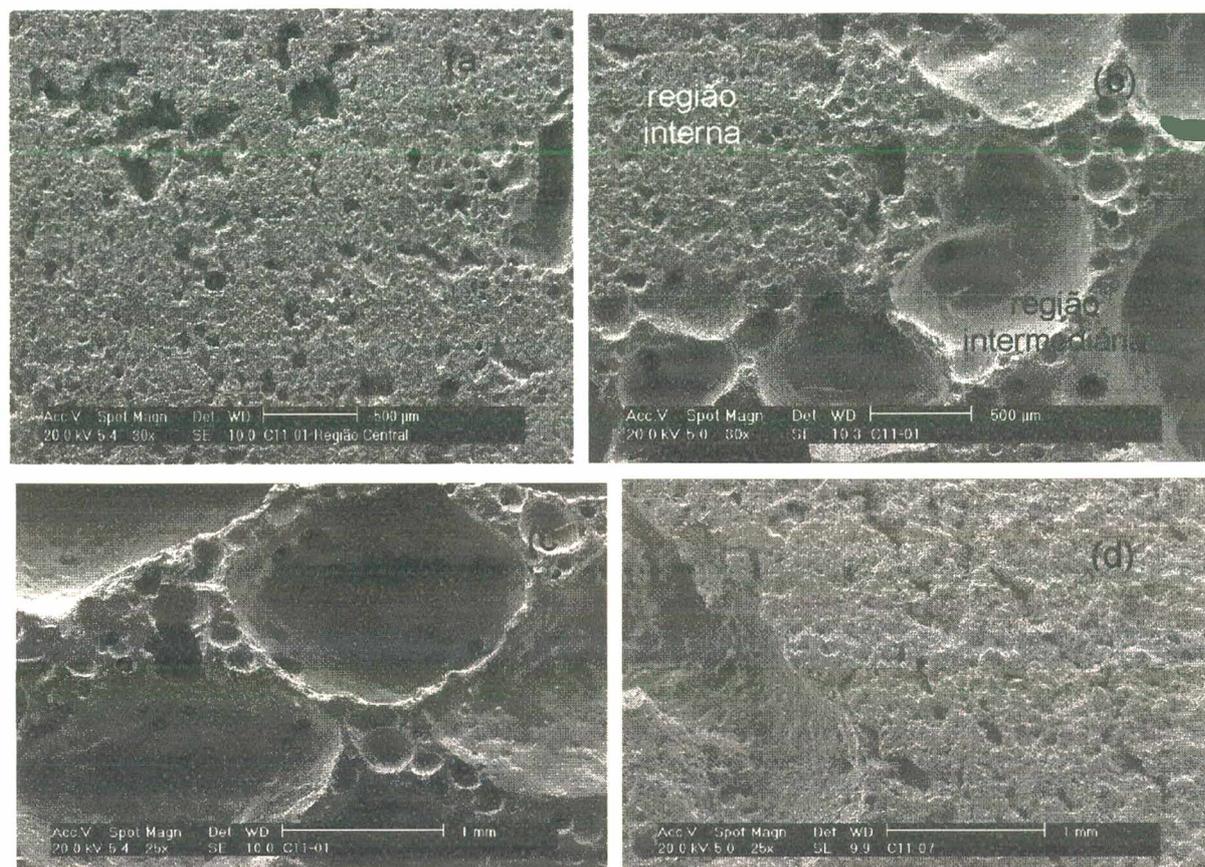
**Figura 5.5** – Agregados leves de R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -10% de lodo (queima à 20°C/min, 1250°C, 30 minutos): (a) corpo de prova inteiro, e (b) seccionado após embutimento, mostrando as diferentes regiões ao longo de sua seção transversal.

Na fotografia Figura 5.5(b), apresenta-se um corpo de prova embutido em resina e seccionado, o que permite a visualização das diferentes regiões que se sucedem desde a periferia até o centro da pelota. Observa-se o núcleo interno com coloração escura e poros pequenos, enquanto que a região intermediária apresenta poros maiores. A coloração interna escura indica que a oxidação da matéria orgânica e da pirita foram incompletas durante a queima.

Na Figura 5.6 apresentam-se as micrografias, obtidas por MEV, de corpo de prova contendo 10% de lodo: (a), (b) e (c) queimado por 15 minutos à 1200°C, sob taxa de aquecimento de 20°C/min; (d) queimado por 30 minutos à 1250°C, sob taxa de aquecimento de 20°C/min.

A região interna dos corpos de prova é constituída principalmente por poros pequenos e de formato irregular, Figura 5.6, micrografias (a) e (d).

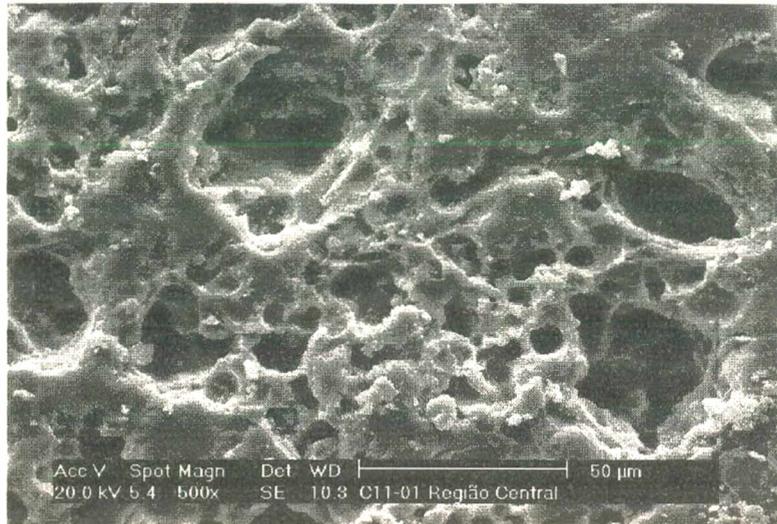
Na micrografia da Figura 5.6 (b) observam-se tanto a região interna, que possui poros menores e irregulares, quanto a região intermediária (mais próxima à superfície do corpo), que apresenta poros maiores e mais arredondados.



**Figura 5.6** – Micrografias, obtidas por MEV, de agregados contendo 10% de lodo: (a) núcleo interno, (b) região interna e intermediária, (c) superfície de um corpo (queima à taxa de 20°C/min, 1200°C, 15 min); (d) região interna do corpo de prova (queima à 20°C/min, 1250°C, 30 min).

Na região mais próxima à superfície há poros de dimensões grandes, como pode ser verificado nas micrografias da Figura 5.6 (b) e (d), e como na fotografia da Figura 5.5(b).

Na Figura 5.7 apresenta-se uma micrografia do mesmo corpo de prova da Figura 5.6 (a), mostrando a região interna, porém com maior aumento.



**Figura 5.7** – Região interna de um corpo de prova contendo 10% de lodo.

Na micrografia da Figura 5.7 observa-se que o agregado é todo poroso. Não verifica-se homogeneidade em termos de tamanho e forma dos poros.

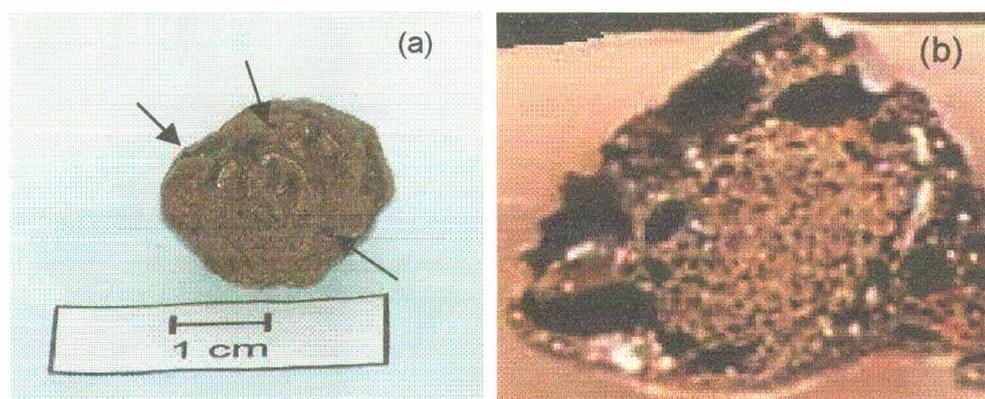
### 5.3.2 Amostras contendo 30% de lodo

A Figura 5.8 apresenta uma fotografia de agregados leves contendo 30% de lodo. Estes corpos apresentam coloração marrom e camada superficial parcialmente vitrificada. Constata-se também que há irregularidades (crateras) na superfície.



**Figura 5.8** – Agregados leves de R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-lodo, contendo 30% de lodo.

Os corpos contendo 30% de lodo apresentam poros na superfície, alguns deles bastante grandes, que denominamos de “*crateras*”, conforme indicado na Figura 5.9(a). Estas crateras se formaram em decorrência da camada vítrea não ter recoberto toda a superfície do corpo de prova, indicando que a quantidade de fase vítrea formada foi insuficiente, e/ou que a viscosidade desta não foi suficiente para cobrir toda a superfície.

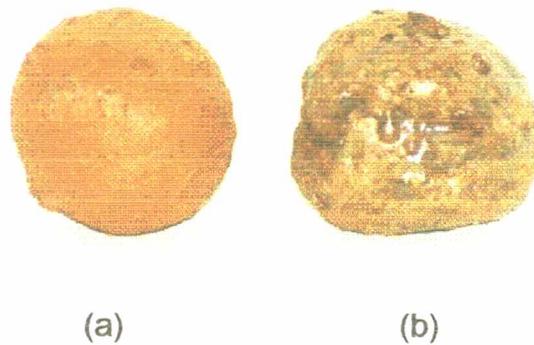


**Figura 5.9** – Agregados contendo 30% de lodo: (a) indicação de *crateras* na superfície, e (b) corpo de prova embutido em resina e seccionado.

Na Figura 5.9 (b), observa-se que estes agregados apresentam coloração marrom também na região interna, indicando combustão praticamente completa da matéria orgânica e compostos sulfurosos. A oxidação completa provavelmente se deve a existência de grandes poros na superfície. Esses poros superficiais podem ter possibilitado tanto a entrada de oxigênio para a combustão, como a saída de gases, e, conseqüente eliminação da matéria orgânica e dos compostos sulfurosos.

Os corpos de prova contendo 30% de lodo são mais porosos que os corpos de prova contendo 10% de lodo, devido ao maior quantidade de voláteis, o que acarreta num volume maior de gases gerado no interior do corpo.

Na Figura 5.10 apresentam-se as fotografias de: (a) agregado leve de argila expandida Cinasita; e (b) agregado leve de R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -30%lodo, produzido por queima à taxa de aquecimento de  $40^\circ\text{C}/\text{min}$ , patamar a  $1250^\circ\text{C}$ , por 30 minutos.

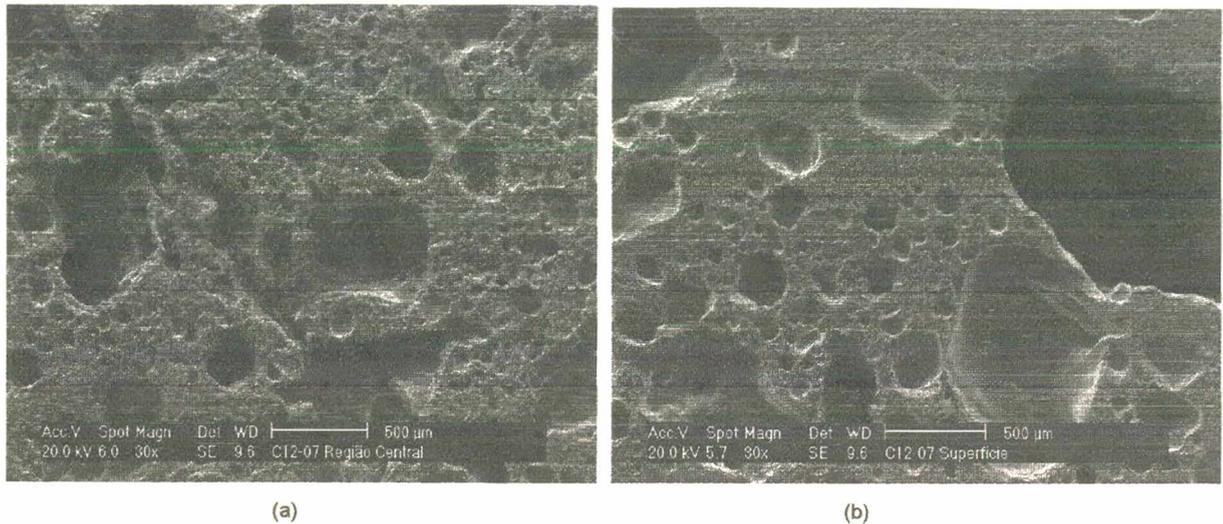


**Figura 5.10** – Agregados leves: (a) argila expandida Cinasita e (b) agregado a base de R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -30% de lodo.

Observa-se que os agregados com 30% de lodo apresentam aspecto semelhante ao produzido a partir de argila expandida. Os corpos de prova da Cinasita são mais arredondados provavelmente por serem produzidos em forno tubular, enquanto que neste trabalho a queima ocorreu sobre placa plana.

Os agregados de R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -30% lodo adquiriram formato arredondado, o que é adequado em termos de trabalhabilidade para o concreto. Em relação a textura superficial, esses agregados apresentam a superfície levemente irregular, com alguns poros abertos.

Na Figura 5.11 apresentam-se as micrografias, obtidas por MEV de corpos contendo 30% de lodo, queimados em taxa de aquecimento de  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ , a temperatura de  $1250^\circ\text{C}$ , por 30 minutos. Observa-se nesta figura que os corpos com 30% de lodo apresentam poros de maior dimensão na região próxima da superfície.



**Figura 5.11** – Micrografias, obtidas por MEV, mostrando a região (a) interna e (b) externa de um corpo de prova contendo 30% de lodo.

Comparando-se as micrografias apresentadas nas Figuras 5.6(a) e 5.11(a), verifica-se que os corpos com 30% de lodo apresentam poros maiores que aqueles com 10%.

Em relação à existência de poros maiores próximo à superfície, tanto para agregados com 10%, como com 30% de lodo, as causas prováveis são a migração de gases e de sais solúveis. Quanto a migração de sais, conforme foi comentado anteriormente, apesar da secagem em estufa, ocorreu pequena exsudação de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para a superfície. Isso resultou em não homogeneidade, devido a diferença de concentração de sal ao longo do corpo de prova. A concentração do sal aumentou no sentido do centro para a superfície do corpo. A soma dos efeitos da migração de gases durante a queima e de exsudação de sais pode ter provocado a diferença de distribuição de porosidade: na região externa dos corpos de prova verifica-se poros maiores, e na interna, poros menores.

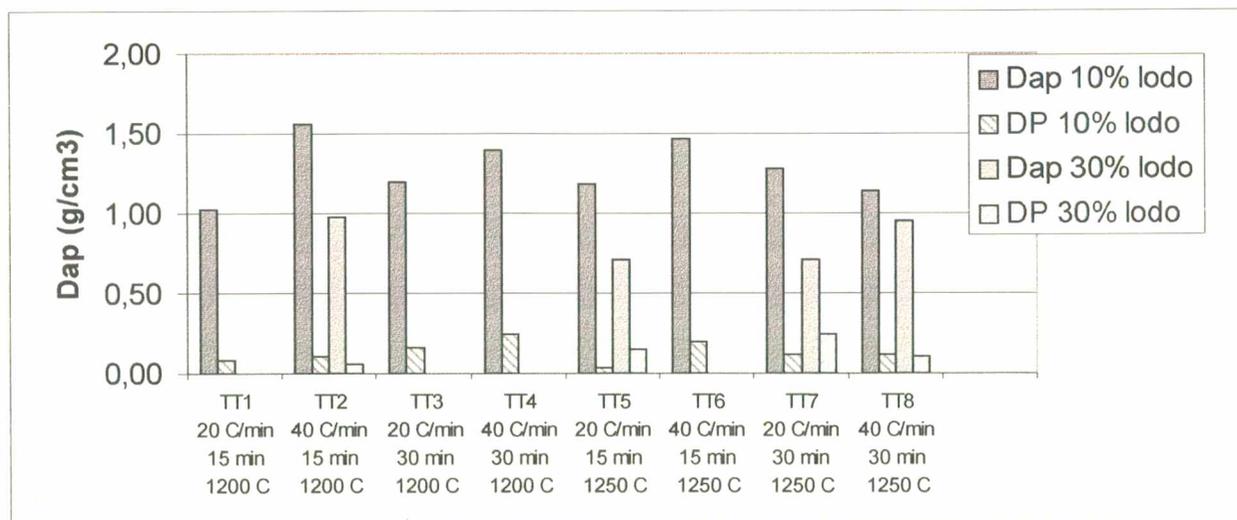
Ainda em relação à distribuição de poros, também há influência do processamento. A queima em forno rotativo ou em leito fluidizado provavelmente daria origem a corpos de prova com poros maiores ao longo de toda superfície, enquanto que a queima sobre placa plana deu origem a poros menores próximos a parte inferior do corpo, como pode ser visto na Figura 5.9(b).

Como comentado nos resultados preliminares (5.1), o aumento no teor de lodo dificulta a exsudação. Desta forma, os corpos contendo 30% de lodo sofreram menor grau de exsudação de sais, mantendo-se mais homogêneos. Então, obtiveram melhor distribuição dos poros e uma menor diferenciação no tamanho destes ao longo do corpo.

## 5.4 DENSIDADE APARENTE

A Figura 5.12 sintetiza os resultados de densidade aparente ( $D_{ap}$ ), obtidos pelo método de imersão em mercúrio, e desvio padrão (DP) para as formulações contendo 10% e 30% de lodo, queimadas em diferentes condições de tratamento térmico.

Observa-se que os agregados contendo 10% de lodo apresentam densidade aparente variando entre 1,0 e 1,6  $g/cm^3$ , enquanto que aqueles com 30%, apresentam densidade aparente entre 0,6 e 1,0  $g/cm^3$ . Esta diferença é decorrente da maior quantidade de poros verificada nas amostras com 30% de lodo.



**Figura 5.12** – Densidade aparente ( $D_{ap}$ ) e desvio padrão (DP) de corpos de prova contendo 10% e 30% de lodo para diferentes condições de queima.

Analisando-se o gráfico de densidade aparente para diferentes condições de queima, não é possível fazer correlações a respeito do efeito dos parâmetros do tratamento térmico. Observa-se tendências de comportamento, porém estas não são observadas em todos os ciclos de queima.

O aumento na taxa de aquecimento de 20°C/min para 40°C/min leva a um aumento na densidade aparente dos agregados. Entretanto, esse comportamento não se repetiu em alguns ciclos térmicos (TT7 e TT8), motivo pelo qual neste trabalho é chamado de tendência.

Segundo Austin (1942) o aumento da taxa de aquecimento diminui a quantidade de gases liberados; o mesmo foi verificado neste trabalho por TG (Figura 5.2b). Ou seja, um aumento na taxa corresponde a menor liberação de gases, o que pode ter diminuído a expansão, obtendo-se maior densidade aparente.

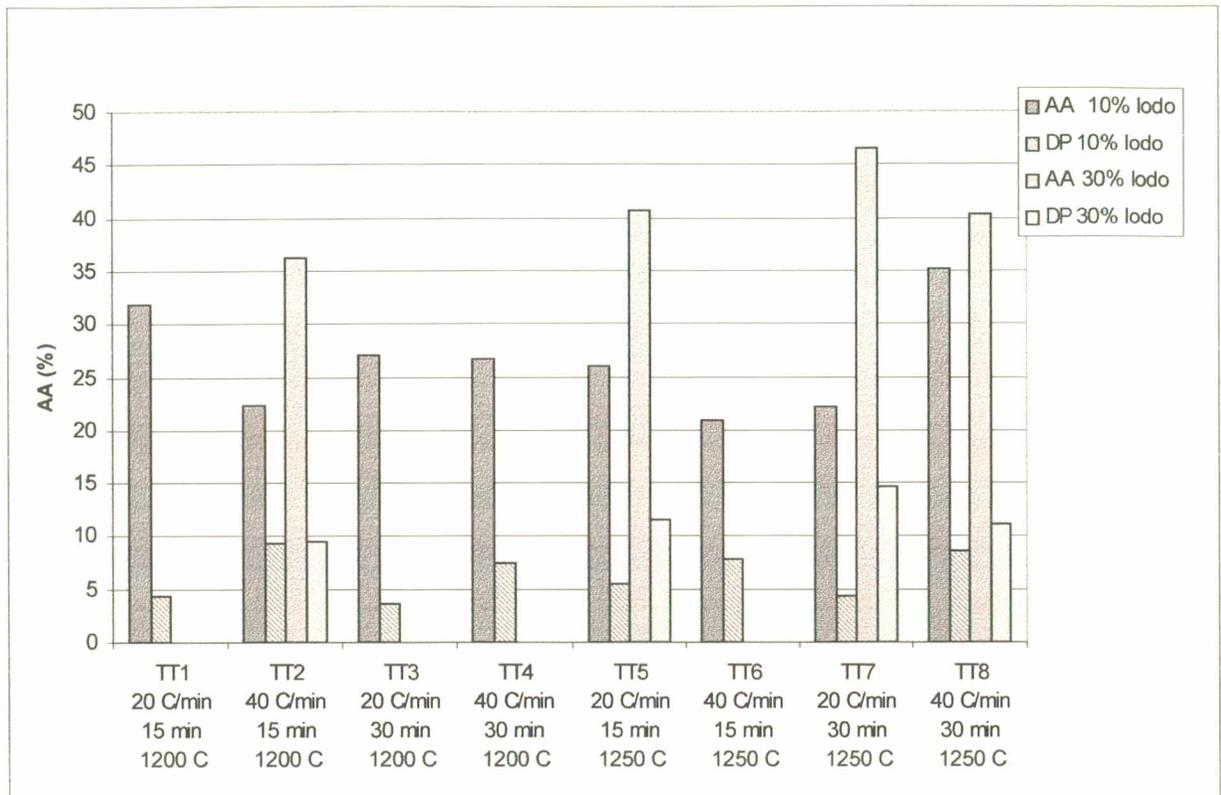
Em relação a influência do tempo e da temperatura não observa-se tendência de valores que permitam algum tipo de correlação entre estes e a densidade aparente. Com relação à temperatura, este resultado pode ser reforçado pela análise das curvas de ATD (Figura 5.2(a) e Figura 5.3(a)), onde observa-se que entre 1200°C e 1250°C não há picos ou inflexão nas curvas que indiquem alguma alteração estrutural que poderia causar considerável diferença entre nas propriedades do agregado.

A taxa de aquecimento mostrou-se ser o parâmetro de tratamento térmico que mais influencia na densidade aparente dos agregados de Lodo-R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

## 5.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Figura 5.13 apresenta os resultados do teste de absorção de água (AA), pelo método da fervura, e desvio padrão associado (DP) para as diferentes formulações e tratamentos térmicos.

Os corpos com 10% de lodo apresentaram absorção de água média entre 20% e 35%. O desvio padrão variou entre 3% e 9%. Aqueles com 30% de lodo, queimados em diferentes ciclos de tratamento térmico, apresentaram absorção de água média superior a 35%.



**Figura 5.13** – Absorção de água (AA), pelo método da fervera, e desvio padrão (DP) de corpos contendo 10% e 30% de lodo para diferentes condições de queima.

Os corpos com 10% de lodo, devido a formação da camada superficial vitrificada praticamente contínua, apresentaram absorção de água inferior à apresentada por corpos formulados com 30% de lodo. A descontinuidade da camada vítrea, somada à presença de crateras na superfície e poros intercomunicantes nos corpos com 30% de lodo, mostrado na Figura 5.9, acarretou em elevada absorção de água.

Em todas as condições de queima avaliadas, obteve-se absorção de água superior a 20%. Agregados de Lodo-R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , por apresentarem alta absorção de água, deverão ser umedecidos até saturação antes do uso em concreto, para não provocarem desidratação do cimento.

Em relação à influência dos parâmetros de tratamento térmico na absorção de água dos agregados, não verificou-se uma continuidade de resultados que possibilitasse desenvolver uma correlação válida para todas as condições.

Analogamente ao que foi constatado para a densidade aparente, verificou-se que o acréscimo na taxa de aquecimento acarretou em diminuição da absorção de água na maioria dos ensaios (TT1 a TT6). Porém, em TT7 e TT8, para agregados contendo 10% de lodo, observou-se o contrário, isto é, a absorção de água diminuiu com o acréscimo da taxa.

Com relação a temperatura, verificou-se que o acréscimo da temperatura, acarretou em menor absorção de água, exceto para os ciclos de queima com taxa de 40°C/min, patamar de 30 minutos (TT4 e TT8).

Quanto ao tempo de patamar, não foi possível correlacionar os resultados.

## 5.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os agregados de R3-lodo- $\text{Na}_2\text{CO}_3$  mostraram resistência adequada ao manuseio.

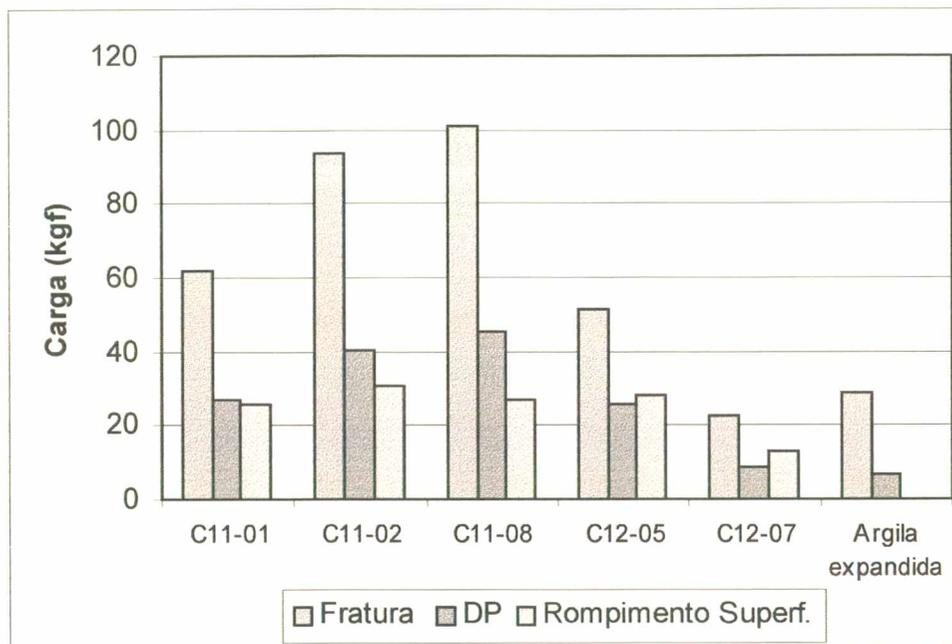
Estes agregados apresentam uma região altamente porosa entre o núcleo e a camada superficial. Isto acarretou num comportamento diferente do observado para outros tipos de pelotas comerciais durante o ensaio de compressão. O rompimento da pelota ocorreu em etapas: primeiro, houve desprendimento da camada superficial; depois, o núcleo rompeu-se em duas ou mais partes. Em função disso, mediu-se a carga para a primeira quebra (fratura da camada superficial), e a carga de fratura do núcleo.

A Figura 5.14 apresenta os valores da carga de rompimento da camada superficial, da carga de fratura do núcleo e do desvio padrão (DP) obtidos no ensaio de compressão entre placas. O desvio padrão foi calculado em relação à carga final de fratura do núcleo.

Os corpos com 10% de lodo, por apresentarem um núcleo menos poroso, mostraram valores de resistência superior aos corpos com 30% de lodo.

Observou-se que os agregados desenvolvidos neste trabalho são bastante resistentes, apresentando carga de fratura superior aquela obtida por agregados

comerciais de argila expandida. Contudo o maior desvio padrão, indica uma dispersão maior de resultados.



**Figura 5.14** - Resistência à compressão para argila expandida e para diferentes amostras de agregado de Lodo-R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

Esta significativa dispersão de resultados, similar à observada em trabalhos anteriores (Souza, 1986; Meyers, 1983), tem como possíveis causas: irregularidade da superfície da pelota, existência de poros, variações intrínsecas na compressão e tamanho da pelota (Meyers, 1981).

A argila expandida apresentou comportamento de fratura semelhante ao descrito na literatura (Meyers, 1981), ou seja, o corpo ao ser comprimido rompe-se em duas ou mais partes, com planos de fratura perpendiculares ao plano de aplicação da carga. Os núcleos dos agregados aqui desenvolvidos também apresentaram o mesmo comportamento, com plano de fratura perpendiculares ao plano de aplicação da carga.

O ensaio de compressão entre placas não reproduz adequadamente o ambiente real encontrado pelas pelotas, como por exemplo, numa pilha. Segundo Meyers (1983), a resistência das pelotas no ambiente real seria cerca de 30% superior ao obtido no ensaio de compressão entre placas. Desta forma, conclui-se que a

resistência dos agregados de Lodo-R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> é adequada e será ainda maior em um ambiente real de uso.

## 5.7 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DE FASES

Através das técnicas de difração de raios-X, fluorescência de raios-X, microscopia eletrônica de varredura e microsonda eletrônica, procurou-se avaliar a influência do teor de lodo na composição química e de fases dos agregados. A análise dos dados obtidos destes ensaios mostrou haver diferenças significativas entre os corpos com diferentes formulações.

### 5.7.1 Composição química

Na Tabela 5.1 apresentam-se os resultados da análise química semi-quantitativa, por fluorescência de raios-X, de agregados contendo 10% e 30% de lodo.

**Tabela 5.1** – Composição química de agregados de Lodo-R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> via FR-X.

Óxido	Teor (%)	
	10 % lodo	30 % lodo
SiO <sub>2</sub>	47,8	51,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,0	25,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,1	7,6
CaO	2,9	3,2
MgO	0,4	traços
Na <sub>2</sub> O	3,1	3,2
K <sub>2</sub> O	3,0	3,2
TiO <sub>2</sub>	1,5	1,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1	0,4
SO <sub>3</sub>	9,2	2,2

Os agregados são formados principalmente por sílica, óxidos de alumínio e de ferro. Verifica-se ainda considerável teor cálcio, sódio e potássio.

Como a maior parte do lodo é constituída por voláteis, os componentes deste não influenciam significativamente na composição final do agregado. Assim, o teor de fosfato nos agregados é baixo.

Observa-se que o teor de enxofre encontrado nas duas formulações é significativamente diferente: 9,2% em agregados com 10% de lodo, e 2,2%, naqueles contendo 30%. Conforme já relatado, os corpos com 10% de lodo apresentavam seu interior escuro, o que indica que não ocorreu oxidação completa da matéria orgânica e da pirita. Já os corpos com 30% de lodo apresentaram coloração marrom, tanto na região interna quanto externa, indicando oxidação completa, fato este que justifica o menor teor de enxofre na amostra. Somando-se a isso, há a diferença nas formulações originais, visto que a formulação contendo menos lodo possui, conseqüentemente mais pirita (proveniente do R3).

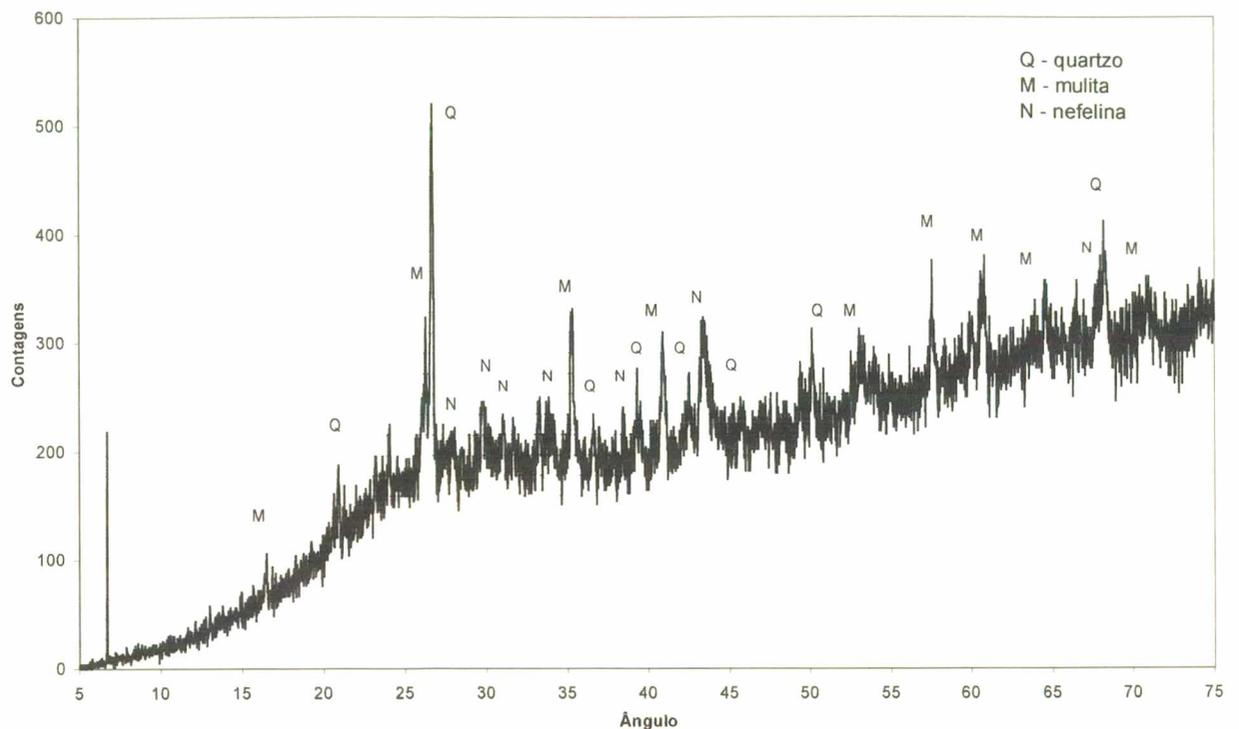
O fato de uma formulação ter dado origem a corpos de prova totalmente oxidados (C30) e a outra a parcialmente oxidados (C10), pode ser devido a formação de camada vítrea contínua nesta última, o que pode ter atuado barreira para o oxigênio.

### 5.7.2 Composição das fases cristalinas

Os agregados obtidos são constituídos por fases cristalinas e amorfas.

Os corpos contendo 10% de lodo apresentaram como fases cristalinas majoritárias a nefelina ( $\text{NaAlSiO}_4$ ), a mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ) e o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), conforme o difratograma mostrado na Figura 5.15.

A partir do difratograma apresentado na Figura 5.16 da camada superficial de agregados contendo 10% de lodo, verificou-se que esta é constituída por fases vítreas e cristalinas. As fases cristalinas majoritárias são nefelina ( $\text{NaAlSiO}_4$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ).



**Figura 5.15** - Difratograma de agregado leve contendo 10% de lodo.

Os agregados contendo 30% de lodo apresentam entre as fases cristalinas principais óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), e ainda hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), conforme o difratograma da Figura 5.17 .

Observa-se que os difratogramas dos agregados apresentam elevado background (afastamento entre a base do difratograma e o eixo de contagem nula) e ruído. Não identificou-se a causas por esse comportamento, mas isso leva a crer que para o preparo de materiais como estes (provenientes de subprodutos e contendo muitos componentes) necessitariam de uma metodologia própria para preparação para a difratometria.

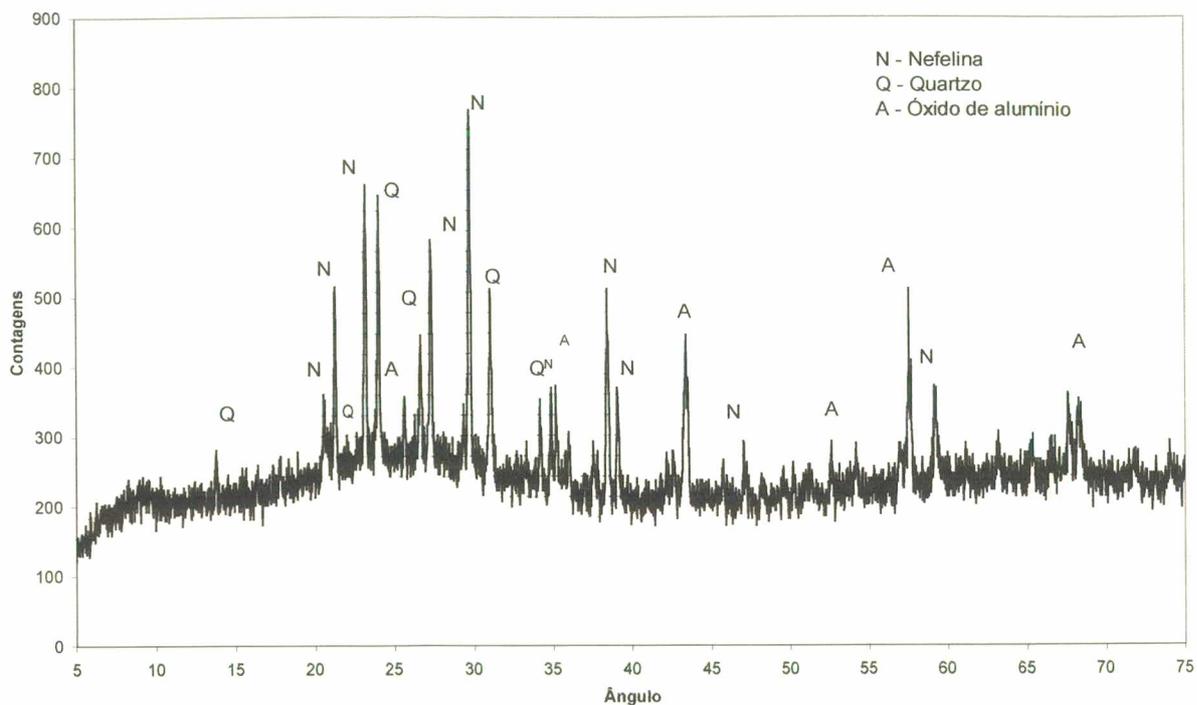


Figura 5.16 - Difratoograma da camada superficial de corpos com 10% de lodo.

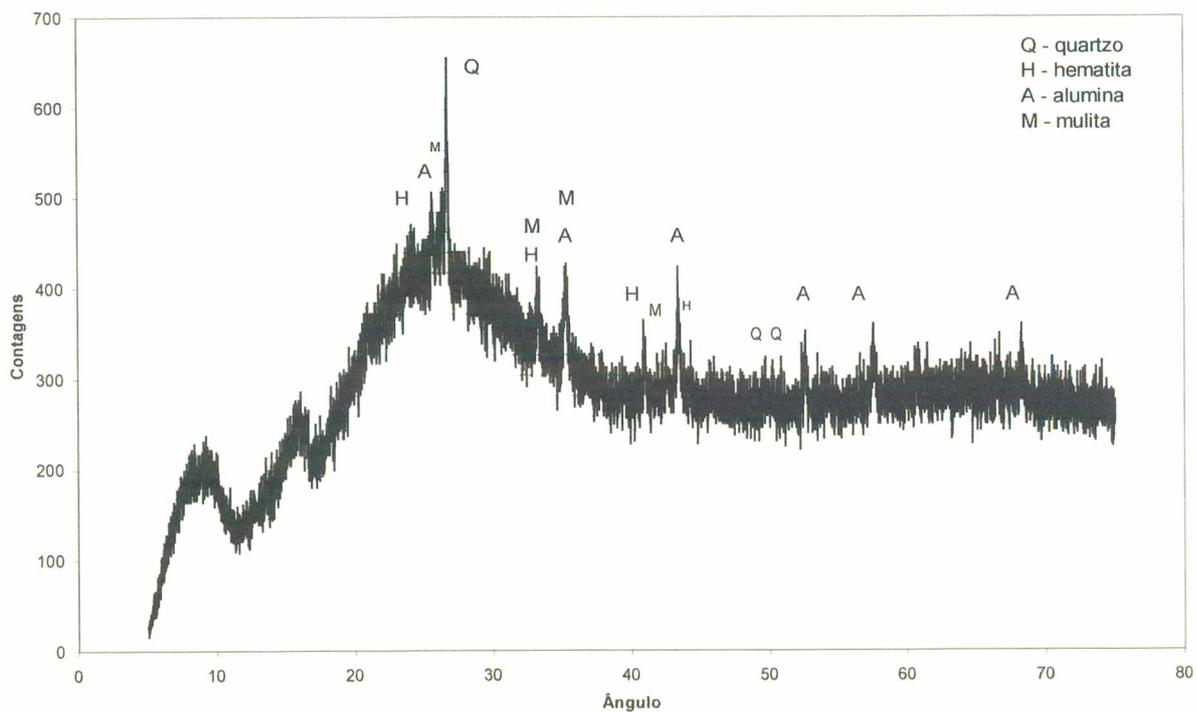
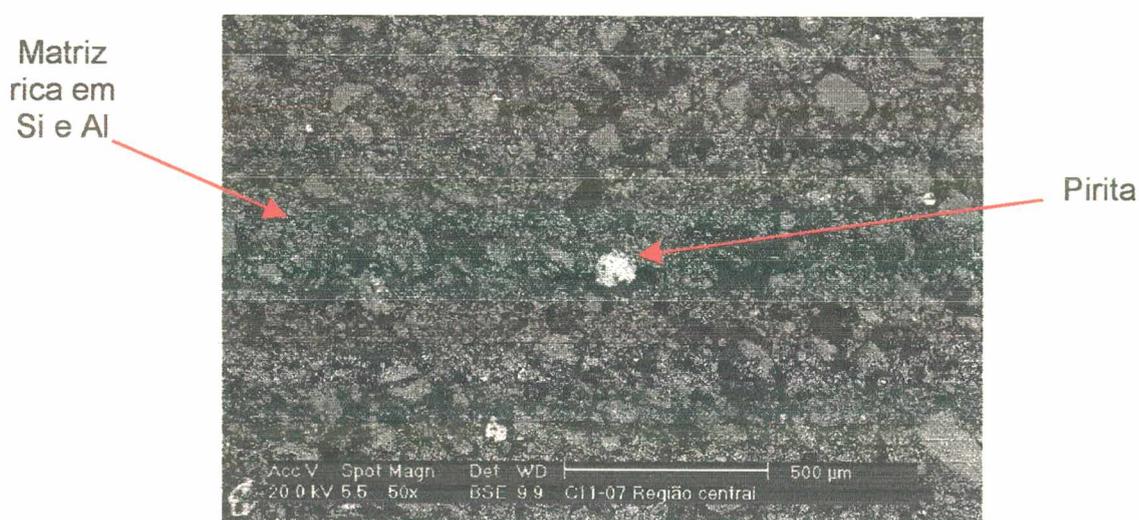


Figura 5.17 - Difratoograma de agregado leve contendo 30% de lodo.

### 5.7.3 Análise por microscopia eletrônica de varredura e microssonda

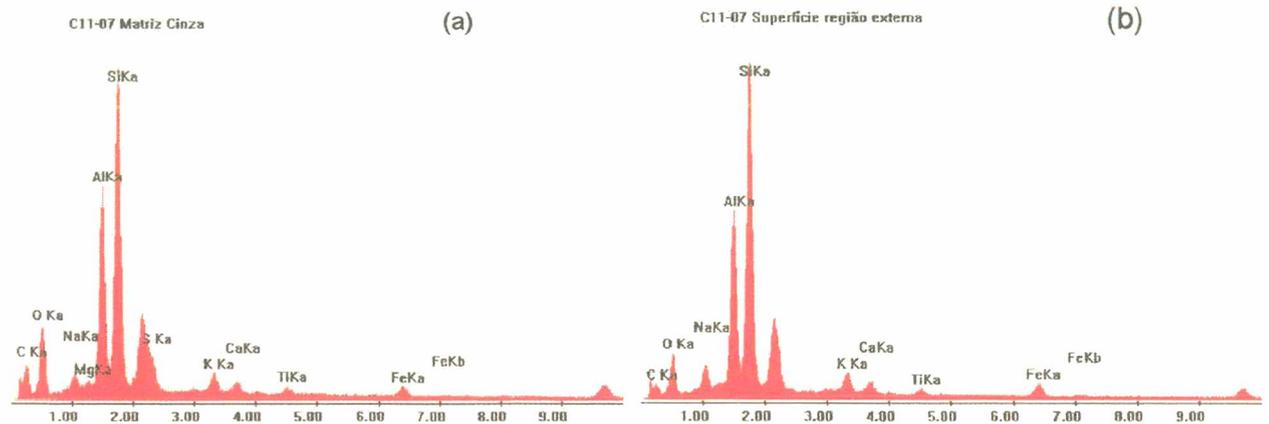
Com auxílio de microscopia eletrônica de varredura e da microssonda eletrônica acoplada ao microscópio eletrônico, foi possível verificar as características da microestrutura, em relação à composição química e de fases.

Na Figura 5.18 apresenta-se uma micrografia obtida por elétrons retro-espalhados, o que permite observar a diferença de composição química com uma diferença de coloração na imagem. Observa-se a região interna de um agregado contendo 10% de lodo (20°C/min, 1250°C, 30min), onde verifica-se que há uma matriz acinzentada, que constatou-se, é rica em silício e alumínio (Figura 5.19(a)), e que provavelmente é mulita. Por microssonda eletrônica, verificou-se que as partículas brancas, envoltas pela matriz, são constituídas por pirita (FeS<sub>2</sub>).



**Figura 5.18** – Micrografia, obtida em MEV por elétrons retro-espalhados, mostrando a região central de um agregado contendo 10% de lodo.

Há ocorrência de carbono e enxofre, o que é esperado, visto que no interior dos corpos contendo 10% de lodo não houve oxidação completa (Figura 5.19(a)), conforme discutido. O perfil de concentração da Figura 5.19(b) confirma a oxidação completa na superfície visto que a quantidade de carbono é menor e não se verifica a presença de enxofre.



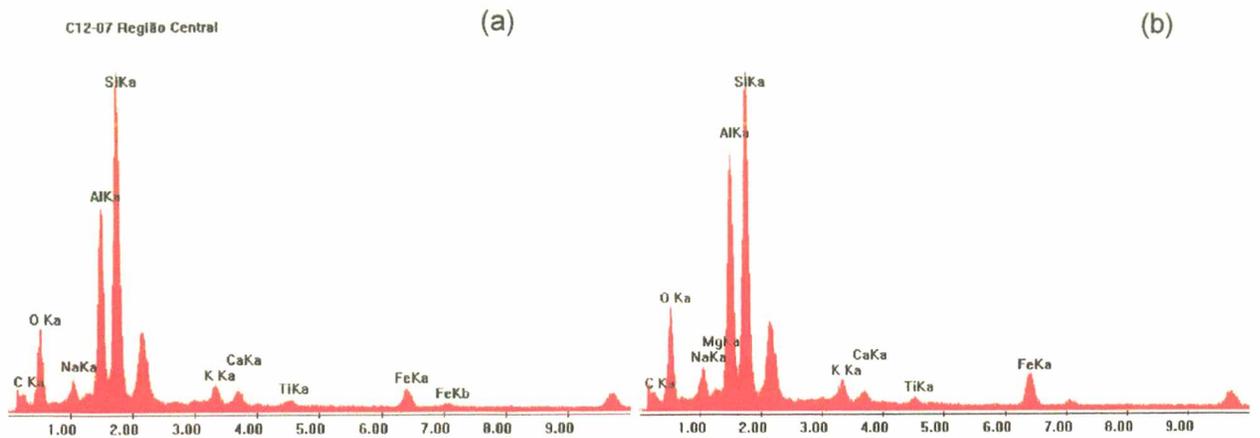
**Figura 5.19** – Perfis de concentração de um corpo de prova contendo 10% de lodo: (a) região central, e (b) região próxima à superfície.

As fases formadas contendo enxofre apresentam-se na região interna dos corpos de prova, envolvidas por uma matriz (Figura 5.18). Desta maneira, não há contato entre as mesmas e o ambiente externo. Na região próxima da superfície, não verificou-se presença de enxofre. Estas características indicam que, provavelmente, o enxofre contido nos agregados não será lançado ao meio ambiente, nem atacará o concreto, desde que não ocorra fragmentação dos corpos de prova.

Não verificou-se presença de enxofre nos corpos contendo 30% de lodo. A quantidade de carbono presente é menor como pode ser verificado na Figura 5.20. Observa-se, ainda, que a composição química entre a região central e superficial difere basicamente na quantidade de alumínio e sódio presentes.

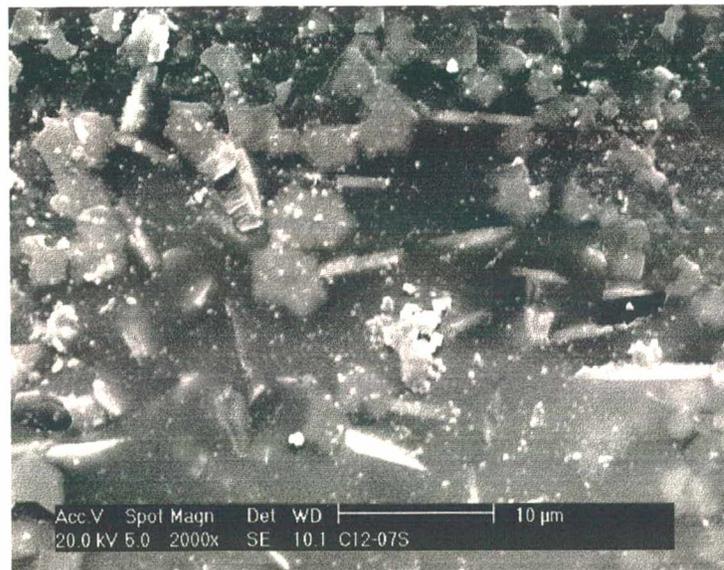
A diferença de composição química entre a região próxima à superfície e a região interna (verificada em ambas as formulações) é devida provavelmente a:

- maior oxidação ocorrida na região mais próxima da superfície;
- diferença de concentração no corpo devido à migração de sais solúveis.



**Figura 5.20** – Perfis de concentração de um corpo contendo 30% de lodo: (a) região central e (b) superfície.

Observou-se a presença de partículas hexagonais, dispersos numa matriz vítrea, na camada superficial de um corpo contendo 30% de lodo, conforme pode ser visto Figura 5.21.



**Figura 5.21** – Micrografia da camada superficial, de um agregado contendo 30% de lodo, apresentando cristais hexagonais dispersos desordenadamente numa matriz.

Esta forma hexagonal é característica da nefelina, que poderia ter se formado na camada superficial. Tanto a difratometria como a análise por microsonda não confirmaram esta fase.

Avaliando-se o conjunto de resultados obtidos por análise química, de fases cristalinas e microestrutural, pode-se fazer algumas previsões sobre o comportamento do agregado. A análise de fases indica a presença de fases estáveis, como a mulita, óxido de alumínio, hematita, quartzo e nefelina, assim como de fases vítreas, que podem reter substâncias potencialmente tóxicas provenientes do lodo. Pela mesma análise não foram encontradas fases que hidratam, o que indicaria expansão por umidade quando do seu uso. Os elementos potencialmente prejudiciais ao concreto, como compostos sulfurosos e sais, encontram-se ou dispersos numa matriz estável (é o caso da pirita) ou formando fases estáveis, como aconteceu com o sódio, que ligado ao alumínio e ao silício, formou nefelina.

A partir destas considerações, pode-se dizer que o agregado desenvolvido provavelmente atenderá aos critérios de estabilidade para uso em concreto. Somando-se a isso, não representam riscos ao meio ambiente, visto que a matriz vítrea isola as substâncias eventualmente tóxicas.

#### 5.7.4 Diagrama de Riley-Wilson

Conforme visto na fundamentação teórica, a partir da composição química, pode-se inferir sobre a capacidade de formação de fase com viscosidade adequada para expansão. Riley (1942) e Conley, Wilson e colaboradores (in Damasceno, 1973) determinaram regiões com essa propriedade num diagrama ternário, dando origem ao Diagrama de Riley-Wilson.

Os valores de composição química das formulações cruas e dos agregados foram adaptados para chegar-se a uma composição em  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e fundentes ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que pudesse ser plotado no diagrama.

Chegou-se aos valores mostrados na Tabela 5.2, que foram plotados num diagrama ternário (Figura 5.22). Observa-se que normalizando-se os valores para  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -fundentes, ou seja, eliminando-se nos cálculos os demais elementos

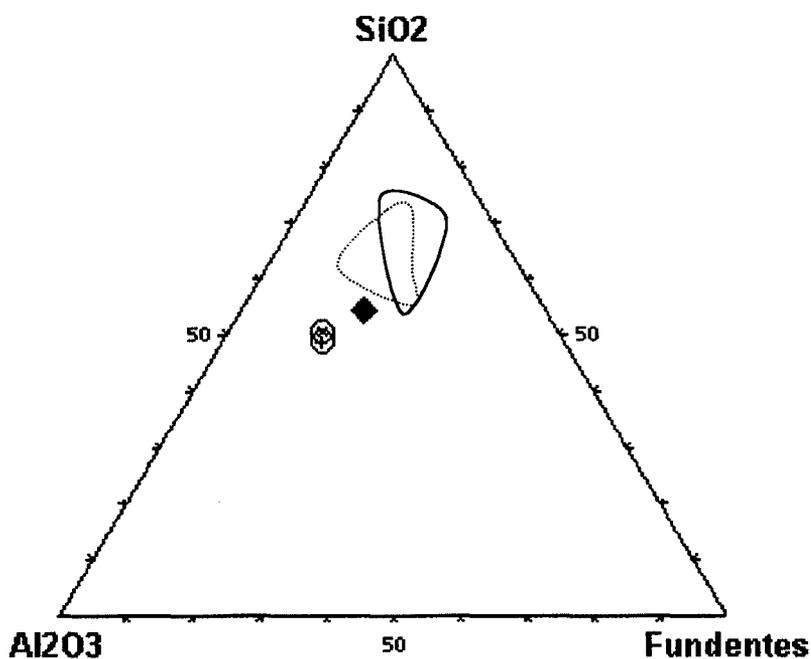
presentes, como os voláteis, as duas formulações originais não apresentam a mesma composição química, provavelmente devido a erros intrínsecos à técnica de fluorescência de raios-X. Em anexo, apresentam-se os cálculos de normalização da composição química.

**Tabela 5.2** – Composição química adaptada de formulações e agregados.

	<b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fundentes (%)</b>
<b>Formulação C10</b>	50	35	15
<b>Formulação C30</b>	49	36	15
<b>Agregados</b>	54	27	18

A Figura 5.22 apresenta um diagrama ternário onde observa-se a região de composição que permite formar uma massa viscosa o suficiente para a expansão, segundo Riley (linha contínua) e Wilson (linha tracejada) e mostra também a localização da composição dos agregados e das formulações originais C10 e C30. Observa-se que composição dos agregados produzidos neste trabalho encontra-se próxima a “região de expansão” de Riley-Wilson. Cabe ressaltar que esta região equivale à formação de uma massa com viscosidade adequada, mas, é imprescindível a formação de gases para a expansão. Assim, verifica-se que os agregados produzidos neste estudo apresentam formulação adequada ao objetivo que se propôs. Expansão ainda maior que a verificada neste estudo provavelmente ocorreria com uma formulação dentro da área de Riley-Wilson.

Apesar da possibilidade de plotar a composição química no diagrama ternário antes da queima, Damasceno (1973) afirma que as técnicas de aquecimento em laboratório são mais adequadas nas fases preliminares de estudo. Assim, o uso de critérios de previsão de expansibilidade, como a composição química e mineralógica, devem ser utilizados em conjunto com ensaios de tratamento térmico.



Legenda:

- ◆ agregado C10/C30
- ⊗ composição original C10
- ⊕ composição original C30

**Figura 5.22** – Diagrama ternário, apresentando as regiões de expansão segundo Riley (linha contínua) e Wilson (linha pontilhada) e o plote das formulações C10 e C30 e dos agregados desenvolvidos neste estudo.

## **6. CONCLUSÕES**

Experimentos com formulações a partir da mistura de Lodo-R3- $\text{Na}_2\text{CO}_3$  foram executados visando desenvolver, por expansão pirolástica, agregados leves para a construção civil. Dentro deste contexto, variou-se a composição da massa e os parâmetros de tratamento térmico (taxa de aquecimento, temperatura e patamar) investigando-se a influência destes na morfologia, densidade aparente, absorção de água, resistência à compressão, composição química e de fases cristalinas. As seguintes conclusões podem ser extraídas dos resultados obtidos neste trabalho.

A mistura de lodo, R3 e carbonato de sódio, em determinadas proporções, dá origem a formulações com propriedades termo-expansíveis, formando agregados porosos e com formação de fase vítrea.

Por análise termogravimétrica verificou-se que o aumento da proporção de lodo aumenta a perda de massa, ou seja, é desprendido um maior volume de gases.

Para uma mesma composição, o aumento da taxa de aquecimento desloca as reações para temperaturas mais elevadas, alterando a natureza de algumas reações e diminuindo o volume de gases desprendidos.

A uma maior taxa de aquecimento, obteve-se, na maioria dos ensaios, corpos de prova com maior densidade aparente, o que pode ser justificado pela menor geração de gases (como verificado por TG). Em relação à absorção de água, esta tende a diminuir com o aumento da taxa de aquecimento. O aumento no tempo de patamar permite desenvolvimento de estruturas mais densas, conforme verificado na maior parte das medidas de densidade aparente.

De um modo geral, os corpos de prova obtidos apresentaram uma região interna menos porosa e mais resistente, seguida de uma região intermediária com poros maiores e mais arredondados, recoberta por camada vítrea.

Quanto ao efeito da formulação, a variação no teor de lodo (e, conseqüentemente, da quantidade relativa dos demais componentes) resultou em diferenças representativas nos agregados, conforme descrito na seqüência.

A formulação contendo 10% de lodo deu origem a agregados cilíndricos ou arredondados, recobertos por camada vítrea contínua, o que não impediu uma elevada absorção de água (20-35%). Apresentaram densidade aparente entre 1 e 1,6 g/cm<sup>3</sup>. A região interna apresentou oxidação incompleta da matéria orgânica e sulfurosa, assim como pequenos poros de formato irregular; enquanto que próximo à superfície, não observou-se presença de matéria orgânica ou compostos sulfurosos, e verificou-se poros maiores e mais arredondados.

Os corpos formulados com 30% de lodo apresentaram maior expansão que os primeiros, resultando em maior porosidade e arredondamento. Verificou-se maior hegemonia em relação a tamanho e distribuição de poros. Obteve-se valores de densidade aparente, por imersão em mercúrio, entre 0,6 a 1 g/cm<sup>3</sup>. Porém, a camada vítrea desenvolvida não recobriu toda a superfície do corpo, formando-se depressões na superfície, que acarretaram em alta absorção de água (superior a 35%). A causa pode ser que ou a quantidade de massa vítrea formada ou a viscosidade desta tenham sido insuficiente para retenção de gases.

Resumidamente, o aumento do teor de lodo, corresponde a uma maior geração de gases, que resultam em maior expansão e conseqüentemente, maior porosidade, menor densidade aparente, maior absorção de água e menor resistência mecânica. A região interna e externa dos corpos apresentou diferença de composição química, que é devida à oxidação da matéria orgânica ser mais intensa na região mais externa e também ao processo de migração de sais solúveis.

A escolha de uma ou outra formulação (com 10 ou 30% de lodo) vai depender da aplicação a que o agregado se destina. Quando se necessita maior resistência, e a leveza não é requisito fundamental, a formulação contendo 10% de lodo é a mais adequada. Contudo, a formulação contendo 30% será mais interessante para aplicações que não tenham a resistência mecânica como requisito. Esta também será

indicada quando propriedades de isolamento térmico e/ou acústico são desejadas. Entretanto, a formulação C30 (30% de lodo) deu origem a agregados que sofreram oxidação completa de compostos orgânicos e sulfurosos, o que é mais interessante do ponto de vista de durabilidade do concreto. Isso porque se houver fragmentação dos agregados, a pirita no interior do corpo de prova contendo 10% de lodo poderá entrar em contato com o cimento.

Avaliando-se as características do agregado obtido, infere-se que a aplicação destes em concreto será adequada, visto que:

- (a) a resistência à compressão verificada apresenta a mesma ordem de grandeza que agregados leves comerciais;
- (b) as formas obtidas (redonda ou cilíndrica) conduzem a boa trabalhabilidade do concreto;
- (c) as fases majoritárias formadas são bastante estáveis, indicando que provavelmente não haverá reações entre estas e os constituintes do cimento.

Apesar de ser potencialmente nociva ao concreto, o aparecimento da pirita provavelmente não causará danos ao concreto, visto que a mesma encontra-se, no interior do corpo, dispersa numa matriz. Isso, desde que não ocorra fragmentação destes corpos.

Verificou-se que o sódio formou, juntamente com a sílica e a alumina, fases estáveis, como a nefelina. O que indica que este não entrará em contato direto com o cimento.

A metodologia adotada no estudo mostrou-se adequada para obtenção de agregados leves a partir de matérias-primas residuais.

A produção de agregados leves a partir do lodo de estação de tratamento de efluentes de indústria têxtil é uma opção interessante, em termos tecnológicos e

ambientais, para destino do lodo. Entretanto, deve ser levado em consideração a necessidade de tratamento para os gases gerados na queima.

## **SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

O desenvolvimento deste trabalho revelou pontos interessantes acerca da produção e das propriedades de agregados leves a partir de subprodutos como o lodo e o R3, evidenciando também alguns aspectos que necessitam ser investigados mais especificamente. Entre eles, citamos:

- o estudo mais aprofundado sobre o efeito dos parâmetros de tratamento térmico, como a taxa de aquecimento e de resfriamento, a temperatura e o patamar na composição química e de fases, resistência mecânica, absorção de água e densidade aparente dos agregados;
- o estudo sobre a lixiviação de componentes;
- a adaptação da formulação, empregando fundentes comerciais, ou preferencialmente, subprodutos de outros processos;
- a adaptação do processo para escala piloto.

## **BIBLIOGRAFIA**

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 10007: Amostragem de Resíduos**. 1987.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8947: Telha Cerâmica – Determinação da Massa e da Absorção de Água**. 1985.

ALBRECHT, H. **Concretos Leves**. Porto Alegre: UFRGS, boletim n. 43, 1968.

ARAÚJO, Mário de, MELO E CASTRO, E. M. de. **Manual de Engenharia Têxtil**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, v. 2, 1984. Cap. 6: Tecnologia da Ultimação. p. 695-830.

ARGENT, V. A.; BELL, J. C.; EDGAR, D. Animal disease hazards of sewage-sludge disposal to land: effects of sludge treatment on salmonellae. **Water Pollut. Control**, p. 537-540, 1981.

AZEVEDO NETTO, José M. de. A necessidade de investigação para métodos novos ou aperfeiçoados de secagem de lodos e recuperação de sólidos. **Revista DAE - SABESP**, São Paulo, n. 63, p. 14-16, dez. 1966.

BHATTY, J.I.; REIDT, K.J. Moderate strength concrete from lightweight sludge ash aggregates. **J. Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 11, n.3, p. 179-187, 1989.

BRAILE, P.M.; CAVALCANTI, J.E.W.A. **Manual de tratamento de águas residuárias**. São Paulo : CETESB, 1979.

- BROSCH, Carlos D.; SOUZA, Hiran R.; ALVARINHO, Silvio B. Produção de agregado leve a partir de lodo de esgoto. In: V Conferência Interamericana de Tecnologia de Materiais (1978 : São Paulo). **Anais...** São Paulo, 6-10 novembro, 1978. p. 233-237.
- CAVALCANTE ROCHA, J.C.; MENDES, M.R.; RIELLA, H.G. Use of Industrial Waste in the Production of Lightweight Aggregates for the Construction Industry. In: First International Conference on Construction Industry Development (1997 :Cingapura). **Proceedings...**Cingapura, 9-11 Dezembro, 1997.
- CELIK, Tahir; BAYASI, Ziad. Performance of Clay-Blended Sludge Aggregate. **Concrete International**, p. 63-65, Jan. 1995.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Resíduos sólidos industriais**. Série ATAS, São Paulo, 1985.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Nota Técnica sobre Tecnologia de Controle - Indústria Têxtil**. NT-22. São Paulo, 1991.
- CHERIAF, Malik; ROCHA, Janaíde Cavalcante. Caracterização de resíduos industriais do Estado de Santa Catarina e as possibilidades de valorização na construção civil. In: I Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (1997 : Canela). **Anais...** Canela : 1997. p. 81-86.
- COHEN, Morris. Prefácio. In: **Princípio de ciência e tecnologia dos materiais**. 4ª. edição, 1979.
- CONLEY, J.E.; WILSON, H.; KLINEFELTER, T.A; et al. Production of lightweight concrete aggregates from clays, shales, slates, and other materials. **U.S Bureau of Mines**, R.I. 4401, p. 1-119, 1948.
- DAMASCENO, E. C. **Pesquisa de algumas matérias-primas para agregados leves**. São Paulo: EPUSP, 1973. Tese (Livres Docência) – Departamento de

Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1973.  
p. 5-89.

DELLA, José P.; NEVES, Etney. **Matéria-prima cerâmica a partir de rejeito R2 de carvão.** In: 37° Congresso Brasileiro de Cerâmica (1993 : Curitiba). **Anais...** Curitiba, 1993. p. 284-291.

EARNEST, C. M. **Thermal analysis of clays, minerals and coal.** Perkin-Elmer Corporation, 1984.

ELKINS, B.V.; WILSON, G.E.; GERSBERG, R.M. Complete reclamation of wastewater and sludge. **Wat. Sci. Tech**, v. 17, p. 1453-1454, 1985.

ENRIQUE NAVARRO, J.E., NEGRE MEDALL, F., BLASCO FUENTES, A. et al. Control de la compacidad de piezas conformadas. **Controles de fabricacion - Pavimentos y revestimientos ceramicos.** AICE, p. 94-96, 1989.

ESTRELLA, Silvana Penedo. **Diagnóstico de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina - Perspectivas de uso na construção civil.** Florianópolis: UFSC, 1996. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

FAIR, G. M.; GEYER, J. C.; OKUN, D. A. **Ingeniería sanitaria y de aguas residuales.** México : Limusa, 1976. v. 2: Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales.

FERNÁNDEZ NAVARRO, José M. **El vidrio.** Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 2° ed. Madrid, 1991. 667 p.

GEORGE, M. S. Concrete aggregate from wastewater sludge. **Concrete International**, p. 27-30, nov. 1986.

GRAY, D.H.; PENESSIS, C. Engineering properties of sludge ash. **Journal WPCF**, v. 44, n. 5, p. 847-858, 1972.

GUTZOW, I.; SCHMELZER, J. **The vitreous state**. Thermodynamics, Structure, Rheology and Crystallization, 1995.

IPT. Metodologia para a realização de ensaios em agregado leve de lodo de esgoto. **Informações internas**. São Paulo, n. 84, out. 1982. 2 p.

JOHN, Vanderlei M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: Workshop Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil (1996 : São Paulo). **Anais...** São Paulo, 25 e 26 de novembro de 1996. p. 21-23.

KHANBILVARDI, R.; AFSHARI, S. Sludge ash as fine aggregate for concrete mix. **Journal of Environmental Engineering**, v. 121, n. 9, p. 633-638, 1995.

KUNZ, A.; MANSILLA, H.; FREER, J.; BAEZA, J.; DURAN, N. Chemical treatment (ozone) of dyes present in textile effluents: toxicity of intermediate formed in the process. In: Fifth Brazilian Symposium on the Chemistry of Lignins and Other Wood Components (1997 : Curitiba). **Proceedings...** Curitiba, 31 de agosto a 05 de setembro 1997. p. 92 – 98.

LAKE, D.L., KIRK, P.W.W., LESTER, J.N. Fractionation, characterization, and speciation fo heavy metais in sewage sludge and sludge-amended soils: a review. **J. Environmental Quality**, v. 13, n. 2, p.175-183, 1984.

MANRICH, SILVIO; PESSAN, LUIZ A. **Reologia: conceitos básicos**, São Carlos: UFSCar, 1987. 161 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J.M.; **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo: PINI, 1994. p. 239-270.

MENDES, Mara R.; ROCHA, Janaíde C.; RIELLA, Humberto G. et al. Utilização de lodo de indústria têxtil para obtenção de agregados leves. In: I Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (1997 : Canela). **Livro de resumos**, Canela : 1997.

MENDES, M.R.; NEVES, E.; ROCHA, J. C.; RIELLA, H. G. Uso de Resíduos para Obtenção de Agregados Leves para a Construção Civil. In: VII ENTAC (1998 : Florianópolis) **Anais...** Florianópolis : ANTAC, v. 1, 1998. p. 909-916.

MEYERS, Marc André; MEYERS, Pedro Paulo. Ensaio mecânicos de pelotas. Análise matemática do ensaio convencional. **Metalurgia – ABM**, v. 37, n. 286, abril 1981. p. 501-506.

MEYERS, Marc André; MEYERS, Pedro Paulo. Ensaio mecânicos de pelotas. Verificação da resistência à compressão. **Metalurgia – ABM**, v. 39, n. 305, abril 1983. p. 199-201.

MINERADORA METROPOLITANA. **Entrevista concedida.** 1998.

MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V.; CÓRCOLES, A. Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 9, p. 1389-1398, 1996.

MORALES, Gilson. **Caracterização do agregado leve obtido a partir do lodo de esgoto da cidade de Londrina.** São Paulo: EPUSP, 1989. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1989.

MORALES, Gilson; DANTAS, Francisco de A. S. **Verificação e avaliação da reatividade pozolânica da cinza de lodo de esgoto da cidade de Londrina.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1995. 36p.

MORALES, Gilson; AGOPYAN, Vahan. **Caracterização do agregado leve obtido a partir do lodo de esgoto da cidade de Londrina.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1992. 20p.

OBRIST. Burning sewage sludge in cement kilns. **World Cement**, p. 57-63, Mar, 1987.

OLIVEIRA, Therezinha Maria Novais de. **Decisão de implantação do aterro**

**para resíduos industriais em Joinville.** Florianópolis: UFSC, 1993. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993. p. 18-27.

PARMELEE, Cullen W. **Ceramic glazes.** Boston: Cahners, 3<sup>rd</sup>. ed., 1973.

PRIM, Elivete C. C. **Reaproveitamento de lodo têxtil e da cinza pesada na construção civil: aspectos tecnológicos e ambientais.** Florianópolis: UFSC, 1998. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

PROJETO SIDERÓPOLIS. Siderópolis: FUCRI, 1991.

RHEW, Rodney D.; BARLAZ, Morton A. Effect of lime-stabilized sludge as landfill cover on refuse decomposition. **Journal of Environmental Engineering**, v. 121, n. 7, p. 499-505, 1995.

RILEY, C.M., Relation of Chemical properties to the bloating of clays. **Journal of the American Ceramic Society**, vol. 34, n. 4, p. 121-128, 1951.

ROCHA, J.C.; MENDES, M.R.; RIELLA, H.G. Use of industrial waste in the production of lightweight aggregates for the construction industry. In: First International Conference on Construction Industry Development. Cingapura : 1997

SABESP. **Unidade piloto para disposição final de lodo – agregado leve de lodo para concreto.** Folhetim, não paginado, s. d.

SARDINHA, Vera L. <sup>a</sup>; MORINIGO Jr, Estevão. **Agregado leve de lodo: características e técnicas de utilização.** São Paulo : SABESP, s.d.

SENAI/CTC. **Caracterização de matérias-primas cerâmicas.** Criciúma, s.d. Não paginado.

SILVA, Neli I. Warpechowski da; BELO, Pedro. Avaliação de misturas de

resíduos com argila plástica para aplicação em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 42, n. 276, jul/ago, 1996. p. 335-338.

SIMONDI, Sergio; YAMADA, Yoshiki; SARDINHA, Vera L. <sup>a</sup> Propriedades e aplicações do agregado leve de lodo de esgoto. **Revista DAE**, v. 41, n. 126, p. 291-298, set. 1981.

SMYKATZ-KLOSS, Werner. **Differential thermal analysis – application and results in mineralogy**. Springer-Verlag, 1974.

SOUZA SANTOS, Pêrsio. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, v.2, 2 ed., 1992. Cap. 20: Argilas para a fabricação de agregados leves. p. 438-467.

SOUZA, Maria Luiza Vaz Dias de. **Estudo de aglomeração de cinzas volantes**. Porto Alegre: UFRGS, 1986. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-graduação em Engenharia de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1986. 117p.

TAY, Joo-Hwa. Sludge ash as filler for portland cement concrete. **Journal of Environmental Engineering**, v. 113, n. 2, p. 345-351, 1987.

TAY, Joo-Hwa; YIP, Woon-Kwong. Sludge ash as lightweight concrete material. **Journal of Environmental Engineering**, v. 115, n. 1, p. 56-64, 1989.

TAY, Joo-Hwa; CHEONG, Hee Kiat. Use of ash derived from residue incineration as a partial replacement of cement. **Cement & Concrete Composites**, n. 13, p. 171-175, 1991.

TAY, Joo-Hwa; SHOW, Kuan-Yeow. Properties of cement made from sludge. **Journal of Environmental Engineering**, v. 117, n. 2, p. 236-246, 1991.

TAY, Joo-Hwa; YIP, Woon-Kwong; SHOW, Kuan-Yeow. Clay-blended sludge as lightweight aggregate concrete material. **Journal of Environmental**

**Engineering**, v. 117, n. 6, p. 834-844,. 1991.

TAY, Joo-Hwa; SHOW, Kuan-Yeow. Utilization of municipal wastewater sludge as building and construction materials. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 6, p. 191-204, 1992.

TEZUKA, Yasuko. **Concreto leve à base de argila expandida**. São Paulo: EPUSP, 1973. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1973. 167 p.

THÜMLER, F.; OBERACKER, R. **Introduction to powder metallurgy**. London: The Institute of Materials, 1993. 332 p.

WILES, Carlton C. Municipal solid waste combustion ash: state-of-the knowledge. **Journal of Hazardous Materials**, n. 47, p. 325-344, 1995.

WOOLLEY, G. R. State of the art report: use of waste materiais in construction – technological development. In: Goumants, J.J.J.M.; Slood, H.A. der; Aalberts, T. G. **Environmental aspects of construction with waste materiais**. The Netherlands : Elsevier Science, 1994. p. 963-977.

## ANEXOS

### CÁLCULOS DE NORMALIZAÇÃO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Apresentam-se os cálculos de normalização da composição química, que deram origem aos pontos plotados no diagrama ternário  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-fundentes}$  da Figura 5.22.

#### Formulações

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados da análise química semi-quantitativa, por fluorescência de raios-X, do R3 e do lodo. Apresentam-se também as composições estimadas do carbonato de sódio e das formulação R3-10%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , C10 e C30.

**Tabela 1 – Composição química do R3, carbonato de sódio, lodo e formulações.**

	R3	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	90%R3-10% $\text{Na}_2\text{CO}_3$	Lodo	C10	C30
$\text{SiO}_2$	43,9		39,5	2,0	35,74	28,24
$\text{Al}_2\text{O}_3$	30,0		27,0	6,6	24,95	20,87
$\text{SO}_2$	2,4		2,2	5,3	2,48	3,10
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,9		1,7	0,4	1,53	1,27
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,0		0,0	5,2	0,55	1,59
$\text{TiO}_2$	0,5		0,5	0,8	0,51	0,57
$\text{MgO}$	1,0		0,9	0,2	0,81	0,67
$\text{K}_2\text{O}$	1,2		1,1	0,6	1,07	0,97
$\text{CaO}$	1,0		0,9	2,1	1,04	1,28
$\text{Na}_2\text{O}$	0,3	58,5	6,2	0,7	5,61	4,52
$\text{MnO}$	0,0		0,0	0,1	0,02	0,03
PF	17,6	41,5	20,0	74,9	25,48	36,45
(1000°C)						

Esses valores podem ser normalizados, considerando-se a soma dos valores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e fundentes como 100%, como apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 – Composição normalizada das formulações C10 e C30.**

Óxido	C10	C30	C10	C30
			normalizada	normalizada
SiO <sub>2</sub>	35,7	28,2	50,5	48,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,0	20,9	35,3	36,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	1,3	2,2	2,2
MgO	0,8	0,7	1,1	1,2
K <sub>2</sub> O	1,1	1,0	1,5	1,7
CaO	1,0	1,3	1,5	2,2
Na <sub>2</sub> O	5,6	4,5	7,9	7,8
	70,7	57,9	100	100

Considerando-se a soma dos fundentes, tem-se os valores da Tabela 3.

**Tabela 3 – Composição normalizada das formulações originais.**

	C10	C30
SiO <sub>2</sub>	50,5	48,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,3	36,1
Fundentes	14,2	15,1

## Agregados

Na Tabela 4 apresentam-se os resultados da análise química semi-quantitativa, por fluorescência de raios-X, de agregados contendo 10% e 30% de lodo.

**Tabela 4 – Composição química de agregados de Lodo-R3-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> via FR-X.**

Óxido	Teor (%)	Teor (%)
	10 % lodo	30 % lodo
SiO <sub>2</sub>	47,8	51,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,0	25,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,1	7,6
CaO	2,9	3,2
MgO	0,4	traços
Na <sub>2</sub> O	3,1	3,2
K <sub>2</sub> O	3,0	3,2
TiO <sub>2</sub>	1,5	1,6

Óxido	Teor (%)	Teor (%)
	10 % lodo	30 % lodo
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1	0,4
SO <sub>3</sub>	9,2	2,2

Esses valores podem ser normalizados, considerando-se a soma dos valores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e fundentes como 100%, como apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5 – Composição normalizada para SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-fundentes.**

Óxido	C10	C30	C10	C30
			normalizada	normalizada
SiO <sub>2</sub>	47,8	51,3	54,1	54,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24	25,8	27,2	27,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,1	7,6	8,0	8,1
MgO	0,4	0	0,5	0
K <sub>2</sub> O	3	3,2	3,4	3,4
CaO	2,9	3,2	3,3	3,4
Na <sub>2</sub> O	3,1	3,2	3,5	3,4
	88,3	94,3	100	100

Considerando-se a soma dos fundentes, tem-se os valores da Tabela 6. Observa-se que as composições C10 e C30 são bastante próximas entre si, sendo consideradas como um só ponto, conforme apresentado no Capítulo 5, item 5.7.4.

**Tabela 6 – Composição normalizada dos agregados.**

	C10	C30
SiO <sub>2</sub>	54,1	54,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,2	27,4
Fundentes	18,69	18,25