



## **176 - ISOLANTE TÉRMICO A PARTIR DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS.**

### **Reginaldo Carvalho da Silva**

Master's Degree Materials Engineering, Electrochemical Processes Laboratory - Metallurgical and Materials Engineering Department Polytechnic School of the University of São Paulo (USP).

Av. Prof. Mello Moraes, n. 2463 - CEP 05508-030 - São Paulo-SP Brazil - Cell phone: +55-11-97115-0499  
e-mail: reginaldocarvalhosilva@usp.br

### **RESUMO**

O Lodo de Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) após a queima apresenta uma composição química e mineralógica típica aos materiais cerâmicos e encontrar aplicações para sua destinação, ao contrário do envio para aterros, é condizente com as práticas ambientalmente sustentáveis adotadas por empresas responsáveis. Neste contexto, foi estudada a possibilidade de utilização do Lodo (biossólido), oriundo da ETE Suzano na conformação de blocos cerâmicos isolantes térmicos. A amostra de biossólido foi inicialmente seca a 110°C por 24 horas, homogeneizada e triturada, sendo acrescida 20% de areia em sua massa. A mistura foi homogeneizada e caracterizada a sua distribuição granulométrica. Através da fluidez em mesa vibratória foi determinada a porcentagem ideal de água para a conformação dos corpos de provas que, após a confecção, foram secos a 110°C por 24 horas e queimados até a sinterização (1150°C por 3 horas a 5°C/min.). A caracterização dos corpos foi realizada através de análise cristalográfica por difração de raios X (DRX), resistência à compressão (RC), retração linear (RL), massa específica aparente (MEA) e porosidade aparente (PA). Para determinação das propriedades térmicas e capacidade de isolamento térmico foi determinada pela técnica do Fio Quente Paralelo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lodo de ETE, Isolante Térmico, Sustentabilidade.

### **1- INTRODUÇÃO**

A destinação ambientalmente correta do lodo de esgotos (LE) é um problema discutido exaustivamente em uma infinidade de trabalhos científicos e que, até o momento, não apresentaram uma solução efetiva para este terrível passivo ambiental. Atualmente por falta de alternativas viáveis, a disposição majoritária deste resíduo, ao menos no Brasil, esta direcionada aos diversos aterros existentes em áreas metropolitanas. Entretanto, com o crescente rigor ambiental aplicado pelos órgãos controladores deste segmento, encontrar alternativas para disposição do LE tornar-se-á, futuramente, uma obrigação inevitável.

Os precursores em pesquisas para o aproveitamento destes resíduos têm sido geralmente os países mais industrializados, destacando-se o Japão, EUA e Singapura (1). No Brasil, dentre as principais alternativas economicamente viáveis para a disposição do LE podemos citar o aproveitamento para a agricultura e incorporação a massas cerâmicas tradicionais.

Estudos recentes demonstraram diversas limitações para o uso na agricultura decorrentes da presença no LE de bactérias, metais pesados e outros contaminantes. Cada vez mais a disposição final deste resíduo tem sido colocada em questão visto que mantêm presentes riscos de contaminação direta do solo, de águas subterrâneas, da vegetação e mesmo a contaminação do homem por contato direto ou através dos alimentos (2).

## 2- OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo a determinação das condições ideais de produção de um produto com propriedade de isolamento térmica a partir de lodo de estação de tratamento de esgotos em condições ambientalmente sustentáveis.

## 3- METODOLOGIA

As amostras de lodo utilizadas no trabalho foram provenientes da Estação de Tratamento de Esgotos da cidade de Suzano. Foi ao agregado ao lodo areia de construção civil em porcentagens de 5, 10 e 20% em massa, para melhorar a consistência estrutural e avaliada analiticamente a melhor opção para a confecção dos corpos de prova.

### 3.1 - Matéria Prima

Após o seu processamento o lodo apresenta uma consistência rígida, que quando seca dificulta o seu processamento e por este motivo o mesmo foi fragmentado previamente, para facilitar a etapa de moagem, posterior a secagem em estufa a 110°C pelo período de 24 horas (FIG.1).



**Figura 1 - Sequência de preparação da matéria prima a) fragmentação do lodo, b) secagem e c) moagem do lodo.**

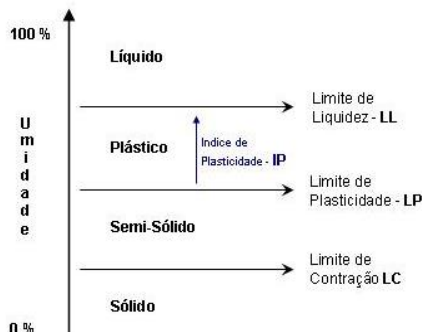
### 3.2 - Granulometria

Técnica de classificação dimensional de partículas que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a porcentagem em peso que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise.

Neste trabalho foi realizado o peneiramento prévio do resíduo do lodo retido na malha 325 mesh (0,045mm) de forma a evitar possíveis interferentes estruturais. Antes da confecção dos corpos de prova foi realizada a caracterização granulométrica do lodo após a secagem e moagem e também após o acréscimo de areia em concordância com a norma técnica NBR 6502 (3).

### 3.3 - Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg ou limites de consistência são métodos de avaliação da natureza de solos criados por Albert Atterberg. Através duma série ensaios é possível definir o limite de liquidez, o limite de plasticidade e o limite de contração de um determinado solo.



**Figura 2 - Limites de Atterberg (4).**

O índice de plasticidade (IP) é um fator determinado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Neste trabalho os limites de Atterberg do lodo foram determinados em concordância às normas NBR 6459/84 (4) e NBR 7180/84 (5) expressa pela equação 1:

$$IP = LL - LP$$

Equação 1

onde:

$IP$  = Índice de Plasticidade;

$LL$  = Limite de Liquidez;

$LP$  = Limite de Plasticidade.

### 3.4 - Conformação e queima dos corpos de prova

Os corpos de prova foram conformados sobre mesa vibratória e secos em estufa a 110°C pelo período de 24 horas, sendo confeccionadas duas placas de 250x50x15mm para determinação da condutividade térmica pelo método do fio quente paralelo e 5 corpos de provas cilíndricos de 50x50mm para determinação das demais propriedades da mistura lodo + areia. A queima foi realizada em forno resistivo da marca INTI a temperatura de 1150°C pelo período de 3 horas com rampa de aquecimento de 5°C por minuto.



**Figura 3 - Forno resistivo utilizado nas diversas queimas realizadas.**



### 3.5 - Retração Linear (RL)

Para avaliação de melhor desempenho dos corpos de prova obtidos, antes e após a queima, os mesmos foram dimensionados para posterior determinação da Retração Linear (RL) dada pela equação 2:

$$RL = \frac{(L_o - L_f)}{L_o} \cdot 100$$

Equação 2

onde:

$RL$  = Retração Linear de queima (%);

$L_o$  = Comprimento do corpo de prova pré-queima (mm);

$L_f$  = Comprimento do corpo de prova pós-queima (mm).

### 3.6 - Massa Especifica Aparente (MEA)

A massa específica aparente, em gramas por centímetro cúbico, é representada pelo quociente da massa de cada corpo de prova pelo volume aparente dada pela equação 3, conforme o especificado pela norma NBR 6220/89 (6).

$$MEA = \frac{M_s}{V_a}$$

Equação 3

onde:

$MEA$  = massa específica aparente (g/m<sup>3</sup>);

$M_s$  = massa seca (g);

$V_a$  = Volume aparente (cm).

### 3.7 - Resistência à Compressão (RC)

A resistência à compressão representa os valores de resistência de um determinado material quando este é solicitado a uma força aplicada perpendicularmente a sua seção transversal até a sua fratura. O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaio universal EMIC, modelo DL, com uma taxa de carregamento de 0,2 mm/min. A resistência a compressão pode ser calculada a partir da equação 4 (7):

$$RC = \frac{F}{S}$$

Equação 4

onde:

$RC$  = resistência à compressão (MPa)

$F$  = Força de compressão (N)

$S$  = Área da seção do corpo (mm<sup>2</sup>)



Figura 4 - Máquina de ensaio universal da Emic.

### 3.8 - Condutividade Térmica

Neste trabalho foi utilizada a técnica do fio quente paralelo para a determinação da condutividade térmica do lodo conformado e sinterizado. A técnica normalizada em 1978 pela norma DIN 51046 permite a determinação da condutividade térmica pela utilização de apenas dois pontos do transiente térmico, conforme o esquema da figura 26.

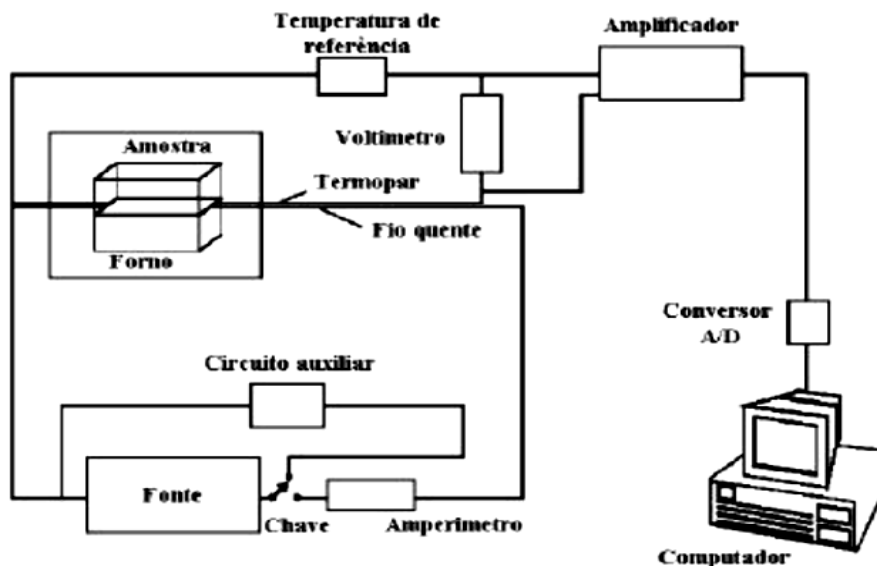


Figura 5 - Arranjo experimental para metodologia do fio quente paralelo (8).

Quando se pretende considerar um trecho do transiente térmico experimental, a condutividade térmica é calculada de dois em dois pontos e, em seguida, é feita uma simples média aritmética entre os valores calculados pela equação 5 (8):

$$k = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{T_2 - T_1}$$

Equação 5

onde:

q = densidade linear de potência (W/m)

T1 = temperatura da fonte no instante  $t_1$  (K)

T2 = temperatura da fonte no instante  $t_2$  (K)

#### 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

##### 4.1 - Conformação

O lodo in natura apresentou uma porcentagem de água livre em média de 62%, valor curiosamente muito próximo do índice de umidade necessário para moldagem, determinado pelo ensaio de fluidez em mesa vibratória com valor médio de 55% de água.

Apesar do lodo+areia apresentar um bom limite de liquidez (LL) pelo ensaio de Casagrande não foi possível a determinação do limite de plasticidade (LP), pois o mesmo apresenta uma consistência arenosa não plástica, não sendo assim possível a determinação do índice de plasticidade (IP).

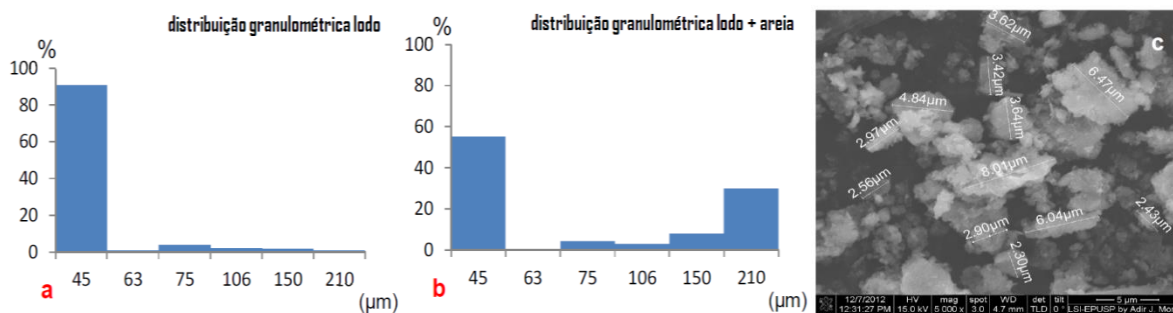
##### 4.2 - Granulometria

A granulometria do lodo foi realizada a partir da fração de resíduo retido na malha 325 por via úmida, seco a 110°C por 24 horas. A porcentagem de resíduo foi inferior a 10% da composição total (TABELA 1), caracterizando um material constituído por uma distribuição granulométrica muito fina e limitada.

**Tabela 1 - Resíduo na malha 325 do lodo in natura.**

Malha 325 (45µm)	Retido (%)	Passante (%)
Lodo 100%	9,6	90,4
Lodo + 20% Areia	45,1	54,97

Tal fato possivelmente acarretaria em um empacotamento disforme dos grãos, visto que os corpos não foram prensados, resultando em uma heterogeneidade na distribuição dos poros e conseqüentemente defeitos estruturais como trincas e deformidades. Com a adição de 20% de areia obtivemos uma melhoria significativa na distribuição das frações granulométricas.



**Figura 6 - (a) A distribuição granulométrica do lodo in natura apresenta uma porcentagem grande de partículas fina (b) com a adição de 20% de areia ao lodo percebemos uma melhora significativa na distribuição percentual (c) o MEV do lodo+areia demonstra a diversidade do tamanho de partículas da mistura.**

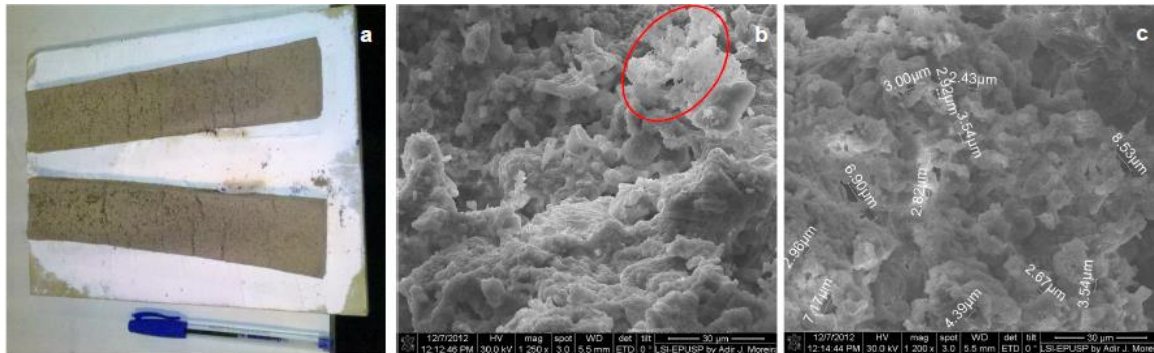
##### 4.3 - Estrutura

Após a queima o lodo tende a liberar uma grande quantidade de produtos voláteis resultando em um produto final extremamente poroso (FIGURA 7c) e que, conseqüentemente, apresentou uma baixa resistência

mecânica, característica dos materiais cerâmicos isolantes. Porém os corpos de prova conformados para o ensaio do fio quente apresentaram também uma excessiva retração linear mesmo com a adição de 20% em massa de areia para reforço estrutural.

Um aspecto importante a ser considerado refere-se às imperfeições existentes na base do forno como buracos e impurezas metálicas fundidas e incorporadas ao refratário que possivelmente provocaram um diferencial de temperatura nos corpos resultando em contrações disformes.

A consequência direta destas contrações se apresenta na forma de pequenas trincas ao decorrer do corpo cerâmico (FIGURA 7a).



**Figura 7 - (a) Os corpos de prova para o ensaio do fio quente paralelo apresentaram diversas trincas e fragilidade estrutural devido a diferenciais de temperatura na base do forno (b) O MEV do lodo pós-queima demonstra um exemplo de fase não coesa, de baixa cristalinidade, devido à baixa sinterização resultando possivelmente na fragilidade da estrutura. (c) A porosidade do corpo, dimensionada pelo MEV, apresentou razoável homogeneidade de tamanho e dispersão.**

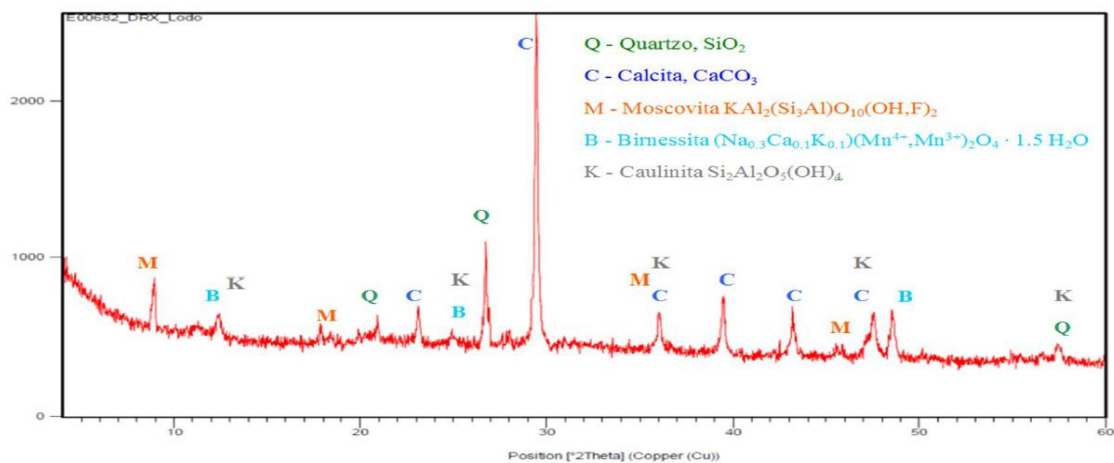
Tal efeito negativo já estava previsto pela pesquisa bibliográfica e por este motivo a queima foi realizada a uma taxa consideravelmente pequena (5°C/mim) de forma a liberar os voláteis lentamente minimizando os danos estruturais, mas aparentemente não foi suficientemente pequena para evitar totalmente o problema. Entretanto, sobre certos aspectos, lodo+areia apresentou propriedades características aos materiais cerâmicos isolantes, como baixa massa específica aparente, e considerável resistência mecânica para classe (TABELA 2).

**Tabela 2 - Resultados diversos obtidos para a composição lodo com 20% de areia comercial.**

<b>Amostras</b>	<b>Perda ao Fogo (%)</b>	<b>Porosidade Aparente (%)</b>	<b>Retração Linear (%)</b>	<b>MEA (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>RC (MPa)</b>
1	39,17	47,31	5,74	743,73	0,23
2	41,54	59,38	6,17	737,94	0,25
3	36,02	65,56	7,84	769,34	0,23
4	38,33	58,01	5,53	831,21	0,26
5	40,62	49,57	6,02	839,15	0,24
<b>Média</b>	<b>39,14</b>	<b>55,67</b>	<b>6,26</b>	<b>782,27</b>	<b>0,25</b>

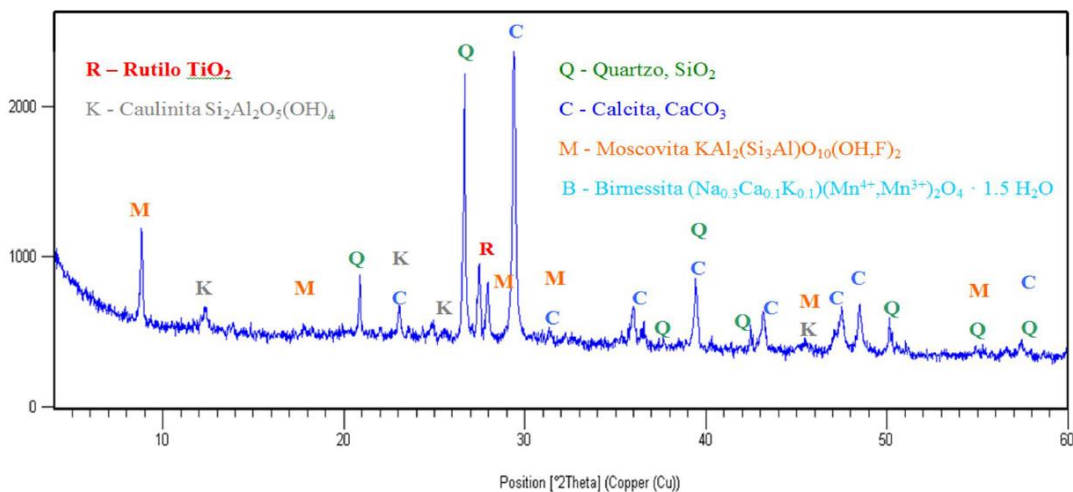
#### 4.4 - Difração de raios-X

A figura 8 representa as composições mineralógicas do lodo *in natura*, determinadas por difração de raios-X.



**Figura 8 - Difratoograma do lodo *in natura*.**

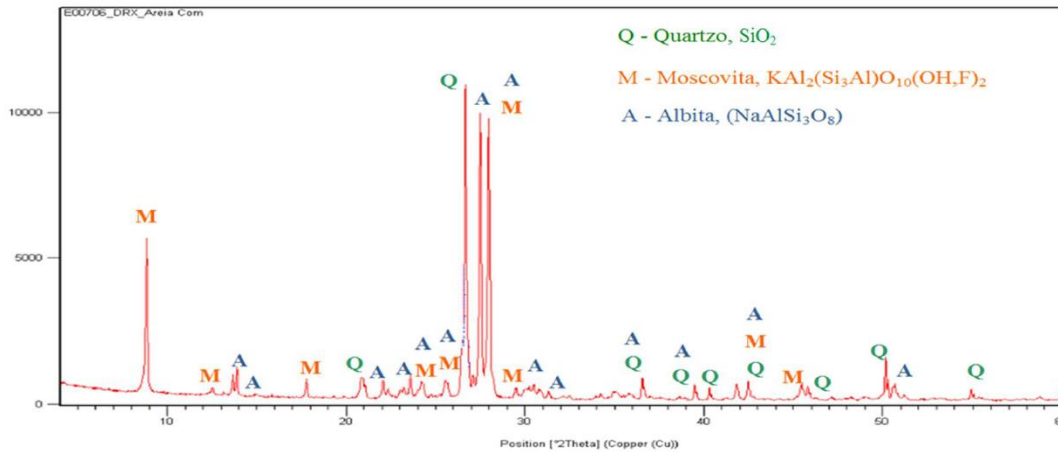
A baixa cristalinidade do lodo, caracterizada pela fraca intensidade dos picos e alto ruído de fundo, é justificável pela alta porcentagem em massa de compostos amorfos na sua constituição. Dentre as fases cristalinas identificadas a que apresentou maior percentual foi a calcita, consequência direta da carbonatação da cal utilizada para coagulação do lodo. O quartzo, mineral de maior abundância na crosta terrestre, é característico a maioria dos efluentes. A moscovita é um mineral do grupo dos filossilicatos comum nos granitos, muito utilizado na engenharia civil, que dada à falta de tratamento de efluentes neste seguimento industrial, acaba sendo recebida diretamente no corpo coletor. A caulinita, argilo-mineral de alumínio hidratado, é muito utilizada em diversos seguimentos industriais, sobretudo na indústria de papel. O mineral menos usual, porém comum às águas subterrâneas, lagos e oceanos, é a birnessita, óxido de manganês com o cálcio, potássio e sódio (9). A adição de areia ao lodo tinha por objetivo a incorporação de elementos estruturais, a exemplo do quartzo, que possibilitasse o aumento da resistência mecânica do corpo conformado, visto que o lodo após a queima não apresentava rigidez significativa. Podemos perceber o êxito através da FIGURA 9, com o aumento da quantidade e intensidade dos picos representativos ao quartzo.



**Figura 9 - Difratoograma do lodo+areia antes da queima.**

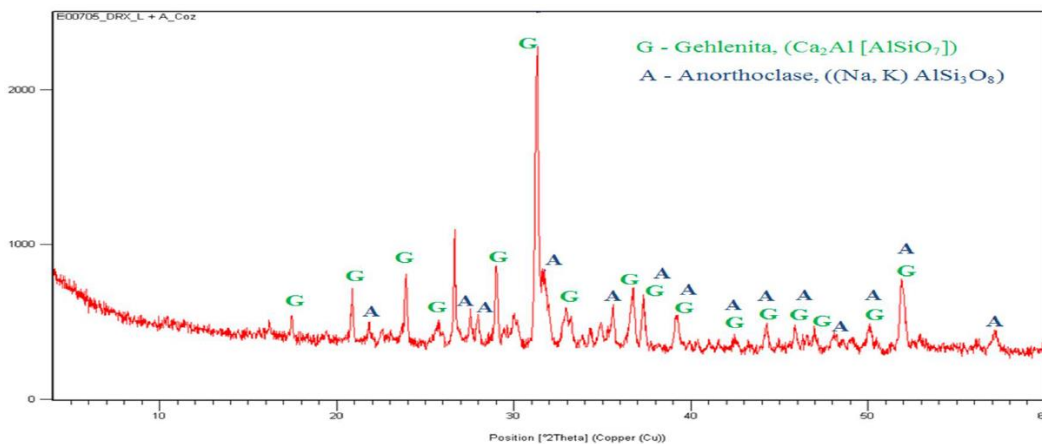


Importante destacar que o difratograma da areia (FIGURA 10) apresentou uma grande variedade de minerais que eventualmente poderiam melhorar a cristalinidade do composto, como a Moscovita ( $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$ ) e Quartzo ( $SiO_2$ ) ou também diminuir a temperatura de sinterização pelo caráter alcalino tal como Albita ( $NaAlSi_3O_8$ ).



**Figura 10 - Difratograma da areia comercial.**

Como resultado da queima da mistura do lodo + 20% de areia obtivemos um composto com significativa cristalinidade, caracterizada pelas diversas fases formadas durante a queima (FIGURA 11) a exemplo da Gehlenita, ( $Ca_2Al [AlSiO_7]$ ), mineral de relativa dureza (5-6 Mohs) o que pode ter propiciado alguma resistência mecânica ao composto, entretanto é perceptível também a presença de Anorthoclase, uma solução mineral Feldspática alcalina ((Na, K) AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) que para o mistura pode assumir um caráter dúbio; se por um lado pode reduzir a temperatura de sinterização propiciando um ganho energético por outro pode prejudicar propriedades como resistência mecânica ou térmica pelo caráter alcalino. Encontrar um balanceamento ideal destas propriedades é uma proposta interessante para pesquisas futuras.

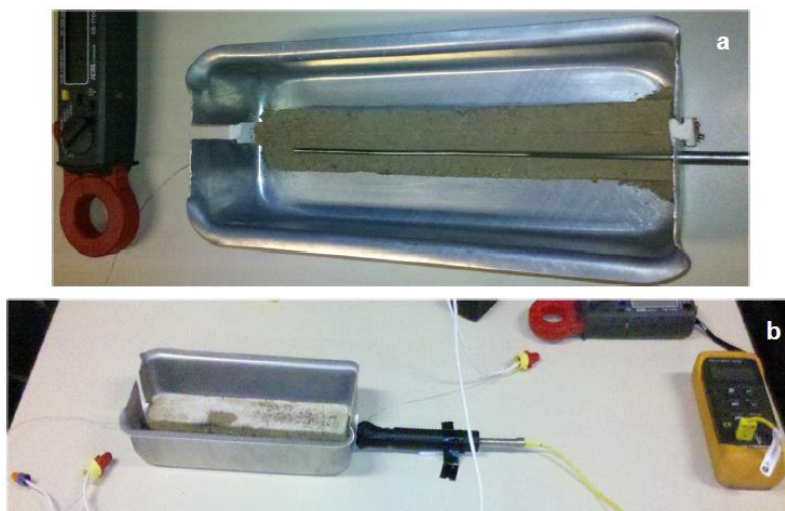


**Figura 11 - Difratograma do lodo+areia após a queima a 1150°C por 3 horas.**

#### 4.5 - Condutividade Térmica

Para a determinação da condutividade térmica do lodo+ 20% de areia, pelo método do fio quente paralelo, foram confeccionadas duas placas com dimensões de 220mm de comprimento por 50mm de largura e 15mm de espessura que foram fixadas em um suporte de alumínio para maior estabilidade. Para determinação da

corrente e tensão foi utilizado um alicate amperímetro da marca ICEL. Entre as placas foi adicionada uma resistência de 0,7 ohms e um termopar do tipo K, separados a uma distância de 16 mm, conforme segue na FIGURA 12.

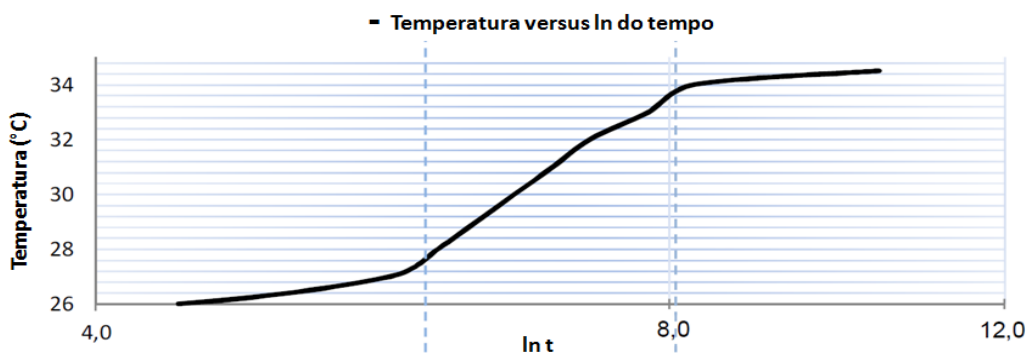


**Figura 12 - (a) A resistência está fixada e isolada térmica e eletricamente, em um suporte de alumínio para melhor manuseio, juntamente com o termopar e separados a uma distancia fixa de 16 mm, a condutividade térmica para o material foi determinada para temperatura ambiente, sendo considerada a importância de máximo contato entre as peças (b).**

Os resultados obtidos, embora apenas a temperatura ambiente, estão muito próximos aos valores requisitados para concretos isolantes utilizados em diversas atividades industriais, como podemos pela perceber pela tabela 7. Eventualmente tornar-se-á necessária a realização em temperaturas mais elevadas para a confirmação da eficácia do produto. Na figura 35 temos a evolução da temperatura em função do ln do tempo.

**Tabela 3 - Resultados da condutividade térmica obtido pelo método do fio quente paralelo com as amostras de lodo + 20% areia.**

Corrente (A)	Tensão (V)	Comprimento (m)	Tempo inicial t1 (s)	Tempo final t2 (s)	Temp. inicial T1 (°C)	Temp. final T2 (°C)	Condutividade Térmica (W/mK)
1,4	0,91	0,22	78	3321	24,7	31,8	0,24
1,5	0,96	0,22	83	3834	25,0	34,0	0,22



**Figura 13 - Evolução da temperatura em função do tempo e intervalo considerado.**

## 5- CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram a possibilidade de reaproveitamento do lodo de ETE para um produto comercialmente viável. Entretanto os diversos problemas encontrados no desenvolvimento do produto apontam para a necessidade de um estudo mais aprofundado de toda metodologia do processo.

O produto apresentou uma considerável resistência à compressão, dada a sua origem e possível aplicação; entretanto este valor poderia ser certamente muito superior se determinado o exato ponto de sinterização.

Neste contexto uma observação pertinente a ser considerada, refere-se à distribuição granulométrica da mistura que, apesar de ter havido uma melhora da distribuição com a adição de areia, existe a necessidade de aumento das porcentagens mais finas (63 $\mu$ m, 75 $\mu$ m, 106 $\mu$ m) em detrimento das mais grosseiras (150 $\mu$ m, 210 $\mu$ m) de forma a ocorrer um crescimento contínuo das frações, tal fato, justifica, seria mais favorável à cinética de sinterização. Este objetivo pode ser efetivamente alcançado através do controle granulométrico no processo de moagem.

Os resultados referentes à densidade e condutividade térmica classifica o produto como um bom isolante térmico quando comparado ao que existe no mercado, sendo, entretanto conveniente à realização de mais ensaios, inclusive a temperaturas maiores, para confirmação do desempenho.



## 6- BIBLIOGRAFIA

1. **AGENCY, JAPAN SEWAGE WORKS.** *Areawide Sewage Sludge Treatment.* Tóquio : s.n., 1999.
2. **SATO, K.; SONE, Y.; ISHIKAWA, O.; OGAWA, S.; IRYAMA, M.; ASADA, S.; KOJIMA, H.** *Recycling and reuse of sludge.* s.l. : Tóquio, 1996.
3. **6502, NBR.** *Determinação Granulométrica.* Rio de Janeiro : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995.
4. **7180, NBR.** *Determinação do limite de plasticidade.* Rio de Janeiro : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984.
5. **6459, NBR.** *Determinação do limite de liquidez.* Rio de Janeiro : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984.
6. **6220, NBR.** *Determinações da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida.* Rio de Janeiro : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1989.
7. **6113, NBR.** *Determinação da resistência à compressão à temperatura ambiente.* Rio de Janeiro : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1990.
8. *Contribuição ao Estudo da Condutividade Térmica do Material Cerâmico Concreto Refratário Utilizando a Técnica do Fio Quente com Ajuste por Ajuste por Regressão.* **SANTOS, W.N.** São Paulo : IPEN USP, 1988.
9. **ERNST, W.G.** *Minerais e Rochas.* Rio de Janeiro : Edgar Blucher Ltda, 1971.