



## Caracterização de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Cinzas de Carvão Visando sua Utilização na Manufatura de Tijolo

M. V. da Silva <sup>a</sup>, D. A. Fungaro <sup>b</sup>

*a. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN – CNEN/SP), São Paulo, e-mail: maurovalerio@usp.br*

*b. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN – CNEN/SP), São Paulo, e-mail: dfungaro@ipen.br*

---

### Resumo

Os lodos provenientes de estação de tratamento de água brasileira são, freqüentemente, dispostos e lançados diretamente nos corpos d'água, causando um impacto negativo no meio ambiente. Também, cinzas leve são produzidas pela queima de carvão em usinas termelétricas e é o resíduo sólido industrial mais gerado no sul do Brasil: cerca de 4 milhões ton/ano. A disposição eficiente das cinzas leve de carvão é um problema devido ao seu volume maciço e aos riscos nocivos para o ambiente.

O presente trabalho está sendo desenvolvido com o objetivo de avaliar a viabilidade do uso do lodo de estação de tratamento de água, juntamente com as cinzas de carvão na fabricação de tijolos. As amostras de cinzas leve do filtro ciclone da usina termelétrica localizada no Município de Figueira, Estado do Paraná, Brasil e o lodo de estação de tratamento de água localizada no município de Terra Preta, Estado de São Paulo, Brasil, foram utilizados no estudo. Os materiais foram caracterizados por análise química, difração de raios X, análise térmica, análise morfológica e análise granulométrica. Tijolos de cinzas leve-lodo e cinzas leve-lodo-solo-cimento foram moldados e testados de acordo com padrões brasileiros. Nenhum dos tijolos produzidos nas condições estudadas atendeu aos requisitos da norma brasileira de qualidade de resistência à compressão.

*Palavras-chave:* Cinzas de carvão, Lodo de estação de tratamento de água, Tijolo.

---

### 1 Introdução

Todo processo industrial gera resíduos, muitas vezes tóxicos e perigosos, não sendo possível simplesmente descartar esses materiais na natureza sem causar danos à saúde e ao meio ambiente. Uma das formas para a solução desse problema consiste na reciclagem ou na reutilização dos resíduos. A reciclagem e a reutilização de resíduos pela indústria vêm se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor ou reduzindo os custos.

Um dos resíduos sólidos mais significativos em termos de volume no Brasil são as cinzas de carvão geradas em usinas termelétricas. A forma de acumulação destas cinzas se dá numa decisão puramente econômica, sem considerar as relações com o meio ambiente, sendo dispostas de forma inadequada no entorno das usinas. A disposição das cinzas em aterros oferece perigos potenciais aos mananciais hídricos, pois contaminam as águas superficiais e subterrâneas, e ao solo pela lixiviação dos seus elementos tóxicos. As principais aplicações das cinzas de carvão são na fabricação e incorporação ao cimento, mas isto ainda ocorre em pequena escala (~ 30%). Uma das maneiras de reduzir os impactos ambientais decorrentes da disposição destes resíduos no meio ambiente consiste na ampliação das potencialidades de sua utilização (Fungaro et. al. 2005).

Outro resíduo produzido em grande quantidade no Brasil é o lodo gerado em Estação de Tratamento de Água (ETA). Estima-se que somente no Estado de S. Paulo são gerados aproximadamente 30.000 toneladas/ano (Cosin et al, 2004). Os lodos das ETAs são dispostos frequentemente em corpos d'água mais próximos, sem nenhum tratamento, causando problemas ambientais, tais como risco à vida aquática residente, aumento da quantidade de sólidos, assoreamento, mudanças de cor e turbidez, aumento das concentrações de alumínio e ferro, além de, gradativamente, poder causar riscos à saúde pública, uma vez que os lodos concentram as impurezas presentes na água bruta.

O objetivo do trabalho é avaliar o aproveitamento dos resíduos sólidos de usina termelétrica a carvão e de estação de tratamento de água na confecção de tijolos ecológicos. Pretende-se, com isso, contribuir com uma alternativa para a reciclagem destes resíduos e reduzir o impacto ambiental proveniente das duas atividades industriais promovendo o desenvolvimento sustentável.

## 2 Metodologia

### 2.1 Materiais

A amostra de cinzas leves de carvão retidas no filtro ciclone (1,650 Kg) foi coletada na Usina Termelétrica de Figueira (UTF), situada no estado do Paraná, no município de Figueira, administrada pela Companhia Carbonífera do Cambuí Ltda. O filtro ciclone retém as partículas com dimensão superior a 0,10 mm. As cinzas não necessitaram de tratamento prévio, sendo utilizadas como recebida da fonte produtora.

As amostras do lodo de ETA (~ 100 Kg) foram coletadas na Estação de Tratamento Terra Preta situada na Estrada Lara Mara, 77 município de Terra Preta no estado de São Paulo, administrada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). As amostras foram coletadas no Leito de Secagem com vasilhas plásticas e colocadas em formas para secagem. A amostra foi coleta em outubro de 2008 sendo que no período de coleta, o coagulante utilizado no tratamento foi o sulfato de alumínio.

*A água potável proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de São Paulo – SP fornecida pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de S. Paulo (SABESP) foi utilizada no estudo.*

### 2.2 Produção dos tijolos

A produção dos tijolos de cinza-lodo foi realizada no Grupo Aguilar na fábrica de Máquinas SAHARA. Os parâmetros utilizados para a produção dos tijolos a partir de cinzas de carvão e lodo foram semelhantes ao utilizados na produção de tijolos de solo-cimento. Em razão da quantidade de argila no lodo ser superior à quantidade adequada para produção dos tijolos (~ 35,16%) e a quantidade de areia ser inferior

58,2% foram confeccionados dois lotes (1 e 2) de três tijolos de cinza-lodo cada, onde no primeiro lote foi utilizado apenas cinza e lodo, enquanto no segundo foram adicionados além da cinza e lodo, solo e cimento. No total foram confeccionados seis tijolos. O lote 1 foi confeccionado com cinza e lodo na proporção em massa de 10% para a cinza. No lote 2 foi incorporado 5% de cimento, 5% de cinza e a mesma proporção em massa de lodo e solo. O procedimento para a preparação das amostras seguiu a NBR10832/92 e NBR 10834/94.

### *2.3 Caracterizações dos materiais*

#### *2.3.1. Fluorescência de Raios-X (FR-X)*

A composição química foi determinada em espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo RIX 3000, da marca Rigaku Company com sistema de dispersão de comprimento de onda (WDXRF). O método utilizado para determinação quantitativa foi de parâmetros fundamentais (FP). O procedimento de preparação de amostra foi o de pastilha prensada de dupla camada utilizando-se como aglutinante 8 gotas de uma solução de álcool polivinílico (PVA) 5 % m/v.

#### *2.3.2. Difração de Raios-X (DR-X)*

A composição mineralógica foi obtida por Difração de Raios-X no equipamento Rigaku, modelo Multiflex, gerada a 40 kV e 20 mA usando radiação de Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$ ). A velocidade angular foi de 10/min e o intervalo de varredura foi de  $2\theta = 50$  a 800. Os valores de distância interplanar (d) das amostras foram comparados com padrões disponíveis no sistema International Centre for Diffraction Data / Joint Committee on Power Diffraction Standards (ICDD/JCPDS).

#### *2.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)*

O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura, modelo XL30, marca Philips, com aumentos de 50, 53, 54, 430 e 1000x a 30 kV.

#### *2.3.4 Distribuição Granulométrica utilizando um conjunto de peneiras*

O procedimento seguiu a Norma ABNT/NBR 7181 de Dezembro/84. O lodo de ETA foi adicionado na peneira superior número 10 (abertura 2 mm). Após o período de funcionamento do conjunto de peneiras, realizaram-se pesagens conforme as seguintes etapas: a) o conteúdo de cada peneira e do fundo foi transferido individualmente para placas de petri com massas conhecidas e foram determinadas as massas em balança semi-analítica. A massa de lodo retida em cada peneira foi obtida pela diferença. b) a massa do material que passou pela peneira de abertura 0,063 mm foi subtraída da massa total peneirada.

#### *2.3.5 Análise Termogravimétrica*

A análise termogravimétrica (ATG) e a termogravimetria derivada (DTG) foram feitas no intervalo de temperatura entre 25 °C a 1400 °C, no equipamento Mettler Star SW 9.30 em cadinho aberto de platina, sob atmosfera de N<sub>2</sub> com fluxo de 50 mL min<sup>-1</sup> e taxa de aquecimento do forno de 10 °C/min.

#### *2.3.6 Determinação da resistência à compressão do tijolo*

A determinação da resistência à compressão foi também realizada aos 28 dias de cura utilizando-se de um tijolo de cada lote (1 e 2), segundo a norma NBR 10836/94, em uma prensa semi-automática digital, marca Skratos Equipamentos do Laboratório do Instituto Falcão Bauer em São Paulo. Na determinação da resistência à compressão foram adotados os seguintes passos: os tijolos foram

serrados ao meio; as duas faces foram unidas com as pontas serradas invertidas; as duas faces foram regularizadas (capeamento) com massa de cimento. As peças foram deixadas em imersão em água por 24 h. Decorrido este tempo, as amostras, foram levadas para a prensa para determinar a resistência à compressão (em MPa).

### 3 Resultado e Discussão

#### 3.1 Cinzas de carvão

##### 3.1.2. Caracterização Química

A composição química das cinzas leves de carvão foi obtida por FR-X. Os principais constituintes do material foram:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (34%),  $\text{SiO}_2$  (32%),  $\text{CaO}$  (10%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (9,5). Os outros compostos encontravam-se em quantidades menores que 6 %.

Um maior teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em detrimento aos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , segundo CHERIAF e ROCHA (1997), está relacionado principalmente à presença de sulfito (pirita e marcassita) nos carvões minerais.

De acordo com a classificação da American Society for Testing Materials (ASTM C618-05), as cinzas utilizadas neste estudo estão incluídas dentro do grupo F. Este grupo possui propriedades pozolânicas e são caracterizados por  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$  e  $\text{CaO}$  entre 1-12%. As cinzas de carvão da classe F são comumente produzidas pela queima de carvão betuminoso, sub-betuminoso ou antracito. Levandowski e Kalkreuth, 2009 analisaram o carvão e as respectivas cinzas geradas na Usina Termelétrica de Figueira. Os resultados indicaram que o carvão é do tipo betuminoso alto volátil B/C.

##### 3.1.3. Caracterização Mineralógica

As fases cristalinas identificadas no difratograma das cinzas de carvão foram: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Fig. 1). As cinzas de carvão, em geral, apresentam o quartzo como forma cristalina principal. A formação de mulita está relacionada com a combustão do carvão mineral na UTF que é realizada à  $1400^\circ\text{C}$ . A presença de hematita se deve à reação da pirita presente no carvão com o oxigênio durante a queima.

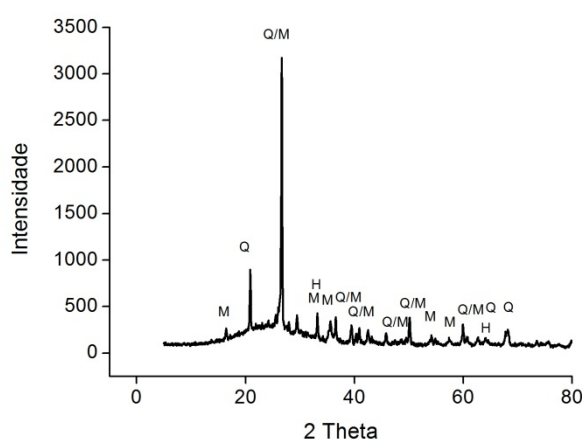


Fig. 1. Difratograma das cinzas de carvão: Q = quartzo; M = mulita; H= hematita.

##### 3.1.4. Caracterização Morfológica

As microfotografias das cinzas de carvão que apresenta partículas heterogêneas

com diferentes diâmetros e formas (Fig. 2). As esferas de superfície lisa são normalmente de composição silicoaluminosa. Os formatos irregulares são características de carvão incombusto e de partículas amorfas que sofreram difusão em intercontato com outras partículas ou rápido resfriamento. É possível visualizar esferas ocas contendo outras pequenas esferas no seu interior (plenosferas) e esferas ocas e vazias (cenoferas) (Fig. 3).

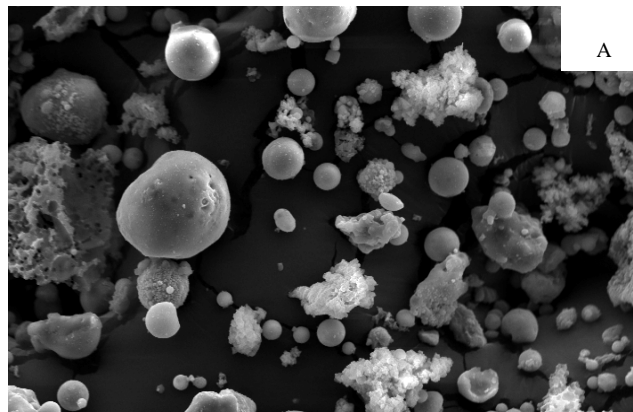


Fig. 2. MEV das cinzas de carvão: partículas esféricas

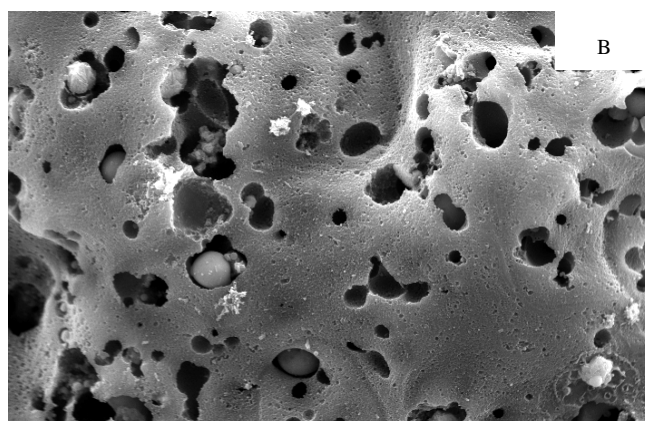


Fig.3. MEV das cinzas de carvão: plenosferas e cenoferas

### 3.2 Lodo da ETA

#### 3.2.1. Caracterização Química

Os resultados da análise da amostra do resíduo de ETA mostraram que, do ponto de vista químico, o resíduo é constituído basicamente por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que correspondem à cerca de 95,1%. Este é um resultado similar ao que foi constatado na literatura (Cordeiro, 2001; Santos 1997). Os teores de óxido alcalino ( $\text{K}_2\text{O}$ ), alcalinos terrosos ( $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ ),  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  estão entre 0,2 -1,4 %. A presença destes elementos é justificada pelo uso do coagulante de sulfato de alumínio no

tratamento de água e pela própria composição da água, a qual contém materiais em suspensão, como por exemplo, a areia e materiais argilosos.

### 3.2.2 Caracterização Mineralógica

O difratograma, Fig. 4, apresenta picos característicos de fase cristalina, podendo-se dizer que há predominância de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), argilominerais do grupo das Caolinitas ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) e muscovita ( $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ).

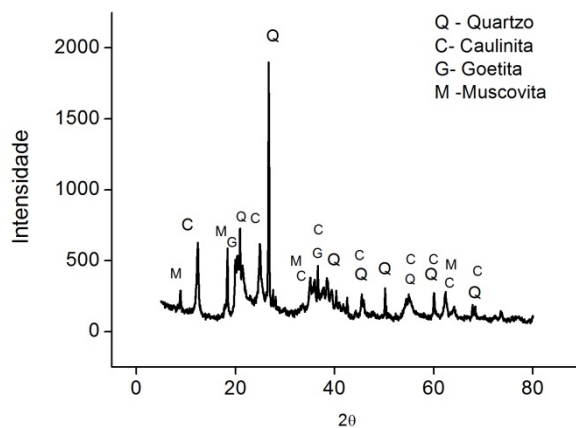


Fig. 4. Difratoograma do lodo de ETA

### 3.2.3 Caracterização Morfológica

As imagens do MEV, Fig. 5, mostram grãos com formatos irregulares e tamanhos variados, havendo a presença de elementos de composição química diferenciada.

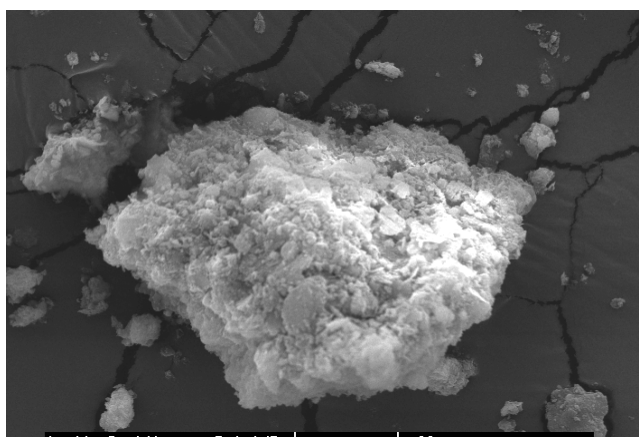


Fig. 5. Distribuição granulométrica da amostra do lodo de ETA

### 3.2.4 Análise Termogravimétrica

Os gráficos da análise termogravimétrica (ATG) e da termogravimétrica derivada (DTG) do lodo de ETA são apresentados na Fig. 6. Os resultados apresentados na análise de ATG mostraram uma perda de massa total no aquecimento de 1440 °C de aproximadamente 32 % devido à eliminação de água adsorvida, hidroxilas, decomposição de alguns materiais constituintes e matéria orgânica (Santos, 1997).

A análise da derivada da curva de perda de massa, entre 25 °C a 1400 °C apresentou três incidências no aumento da taxa de perda de massa: 12% até 203 °C; 8,4% até 397 °C e 9,9% até 906 °C.

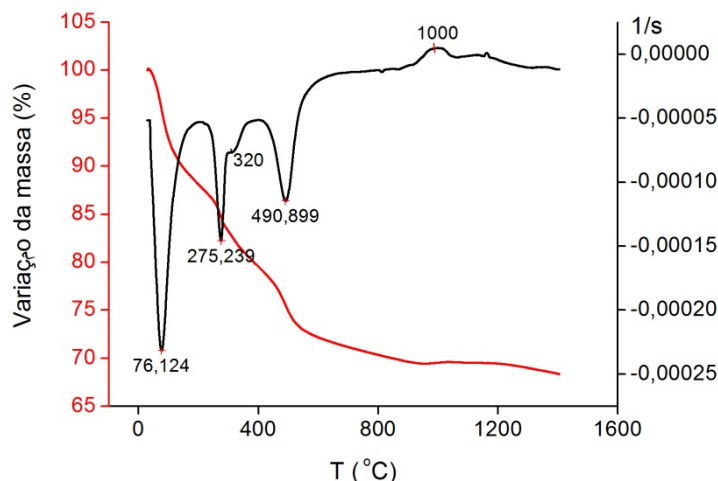


Fig. 6. Análise termogravimétrica (ATG e DTG) do lodo de ETA

A curva obtida no DTG apresentou 4 picos endotérmicos. O primeiro evento em 76 °C corresponde à remoção de água fisicamente adsorvida tipicamente observada em materiais argilosos. O segundo evento térmico em 275 °C está provavelmente relacionado à desidratação de hidróxidos existentes, tais como gibsita e goetita. O pico em 320 °C, o qual não está associado a qualquer perda de massa, indicou a presença de gibsita e/ou decomposição de matéria orgânica.

Segundo Reed (1995) o sulfato de alumínio, utilizado como floculante no processo de tratamento de água onde o lodo do presente estudo foi gerado, perde água quimicamente ligada por volta de 300 °C, porém este pico não foi identificado e este fato pode estar relacionado com a existência dos dois fenômenos muito próximos, no caso em 275 °C e 320 °C.

De acordo com Santos (1989), o vale endotérmico na temperatura de 491 °C está associado principalmente à desidroxilação da caulinita, levando à formação de metacaulinita. Um pequeno pico exotérmico não associado à perda de massa foi observado em torno de 1000 °C e deve-se fundamentalmente à quebra da estrutura da metacaulinita para a formação de novas fases cristalinas tais como  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  e/ou mulita primária.

### 3.2.5 Distribuição granulométrica

Um ensaio de granulométrica por peneiramento e sedimentação, segundo a NBR 7181/84, foi realizado para a caracterização física do lodo. Os resultados estão apresentados na Tabela 7 e Fig.7.

TABELA 7. Distribuição granulométrica do lodo de ETA

Tara das peneiras		Peneiras vazias sem fundo	Nome do material	Granulometria mm	Peneiras com amostra + fundo	Massa corrigida (g)	Porcentagem (%)
10	860,81	388,02	Grânulos	> 2,0	911,63	40,60	40,60
18	899,85	427,06	Areia muito grossa	2,0 a 1,0	921,20	19,60	19,60
35	894,66	421,87	Areia grossa	1,0 a 0,5	909,72	13,91	13,91
60	817,82	345,03	Areia média	0,5 a 0,25	828,50	9,29	9,29
120	811,73	338,94	Areia fina	0,25 a 0,1250	820,98	7,76	7,76
230	807,07	334,28	Areia muito fina	0,125 a 0,063	814,77	6,18	6,18
fundo	472,79	472,79	Silte grosso	< 0,063	475,03	2,68	2,68
Totais						100,00	100,00

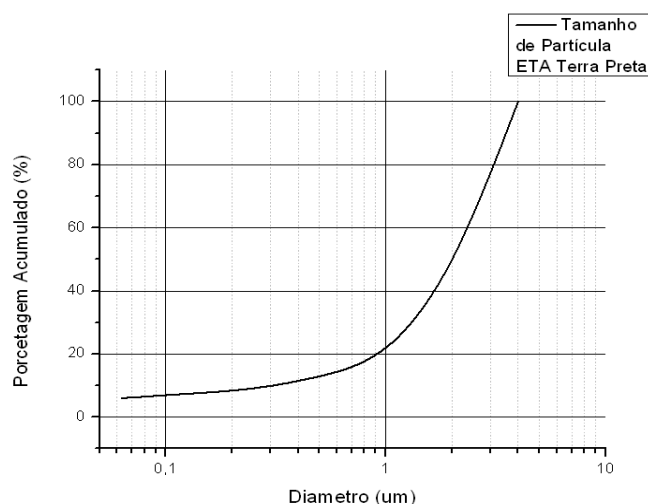


Fig. 7. Distribuição granulométrica da amostra do lodo de ETA

Os valores encontrados na Tabela 7 em conjunto com os dados da TAB. 6 e da FIG.



3 permitem concluir que a areia (58,23%) é formada por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm, o silte (6,83%) é formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm e a argila (35,16%) possui graduação fina constituída por partículas com dimensões menores que 0,002 mm (NBR 6502/95).

### 3.3 Caracterização de Tijolos

A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos tijolos dos lotes 1 e 2. Segundo a NBR 10836/94, as condições específicas para tijolos de solo-cimento são: (1) resistência à compressão: as amostras ensaiadas devem ter média dos valores  $> 2,0$  MPa ( $20 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ); (2) valores individuais  $> 1,7$  MPa ( $17 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ) aos 28 dias de idade; (3) absorção de água: as amostras ensaiadas devem ter média dos valores  $< 20\%$  e os valores individuais  $< 22\%$ , aos 28 dias de idade; Idade dos corpos de prova: idade mínima deve ser de sete dias.

TABELA 10. Resultados do ensaio de resistência à compressão do tijolo de cinza e lodo (Lote 1) e do tijolo de cinza e lodo com incorporação de 50% de solo (Lote 2)

Tijolo	Dimensões do tijolo (mm)			Área (mm <sup>2</sup> )	Carga lida (tf)	Resistência (MPa)
	Altura	Comprimento	Largura			
Lote 1	48	200	101	20200	-	-
Lote 2	48	200	101	20200	1,44	0,7

Como pode ser observado, nenhum tijolo produzido nas condições estudadas no presente trabalho atendeu simultaneamente aos requisitos das normas brasileiras de qualidade em relação à resistência à compressão. Haviam sido preparados 3 tijolos em cada lote para que os resultados que os apresentados fossem um valor médio. No entanto, devido ao resultado negativo obtido, apenas um tijolo de cada lote foi testado. Pelo mesmo motivo, o ensaio absorção de água não foi realizado nos tijolos.

Provavelmente, o tijolo de lodo/cinza (Lote 1) produzido não atendeu o requisito da resistência à compressão porque o lodo utilizado apresentava partículas graúdas em relação às partículas de solo que são normalmente utilizadas na confecção dos tijolos de solo/cimento. No caso do tijolo lodo/cinza/cimento/solo (Lote 2), também houve o problema da granulometria do lodo ser inadequada e, além disso, supõe-se que deveria haver na mistura maior quantidade de cimento.

Todos os ensaios realizados nas amostras estudadas permitiram aferir que será necessário adicionar areia para obedecer às recomendações da NBR 10832/92 na mistura de solo-cinza-cimento-lodo, para mudar a granulometria e aumentar a resistência à compressão do tijolo (Silva 2009).

## 6. CONCLUSÃO

A análise conjunta dos dados obtidos até o momento permitiu concluir que:

- Os principais constituintes das cinzas de carvão foram  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresentando propriedades pozolanicas. As fases cristalinas identificadas foram quartzo, mulita e hematita.

- O lodo da ETA apresentou quartzo e caulinita nas fases cristalinas, em sua maior proporção. Os teores de sílica e alumínio mais elevados são características dos argilominerais e, em se tratando do alumínio, pode ter participação da quantidade de coagulante, à base de sulfato de alumínio, utilizado no tratamento da água;
- Os tijolos confeccionados apenas com lodo e cinza não possibilitaram o ensaio em prensa para verificar o limite estabelecido na NBR10836/94.
- Verificou-se que a baixa resistência dos tijolos foi resultado, provavelmente, da granulometria inadequada do lodo de ETA para o tijolo cinza-lodo e também do baixo teor de cimento para o tijolo cinza-lodo-solo-cimento.

## 7. Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: solo- Análise Granulométrica – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10832: fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com utilização de prensa manual. Rio de Janeiro, 1992.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10836: – Bloco vazado de solo- cimento. Determinação da resistência à compressão e a absorção de água. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro. 1995.

Cosin, S. ; Kozievitch, V. F. J.; Santos, P. S. ; Diaz, F. R. V. Anais 48o Congresso Brasileiro Cerâmica, 2004, Curitiba. CD-Anais...., Paraná.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C.; ALMEIDA, R. S.; Remoção de compostos tóxicos de solução aquosa por adsorção com zeólita sintetizada a partir de cinzas de carvão. *Ecl.Quim.*, v. 30, p. 31- 35, 2005.

LEVANDOWSKI, J., KALKREUTH, W. Chemical and petrographical characterization of feed coal, fly ash and bottom ash from the Figueira Power Plant, Paraná, Brazil. *Int. J. Coal Geol.*, v. 77, p. 269-281, 2009.

REED, J. S., **Principles of Ceramic Processing**, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York (1995).

SANTOS, P. S.; *Ciência e Tecnologia de Argilas*, 2a Ed., vol. 1, Ed. Edgard Blucher, S. Paulo (1989).

Santos, P. S.; *Ciência e Tecnologias de Argilas*, 2a ed., PINI Ltda.: São Paulo, 1997, vol. 1.

SILVA, M. R. *Incorporação de lodo de Estações de Tratamento de Água (ETAs) em tijolos de solo-cimento como forma de minimização de impactos ambientais*. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Aracruz - FAAZ. Aracruz - ES. 2009.