

# Caracterização de resíduo gerado por processo de lavagem de gases e avaliação de possíveis aplicações em construção civil

## *Scrubber waste characterization and evaluation of possible waste applications in building materials*

- **Data de entrada:**  
14/08/2016
- **Data de aprovação:**  
17/03/2017

Lucimara Bragagnolo\*/ Eduardo Pavan Korf/ Felipe Paiva Muscope/ Roberta Santoro de Constantino/  
Gean Delise Leal Pasquali Vargas/ Rosilene R. Kaizer/ Andréia Fátima Tormen

DOI: 10.4322/dae.2017.016

### Resumo

A destinação final de resíduos gerados por processos industriais constitui um problema mundial crescente. Por conta disso, tem-se buscado alternativas para sua incorporação a outros processos produtivos. O presente estudo teve por objetivo realizar caracterização química, mineralógica e granulométrica de resíduo gerado por meio do processo de lavagem de gases de uma indústria de incineração, bem como avaliar e discutir alternativas de aplicabilidade do resíduo em materiais de construção. Verificou-se que o resíduo é composto predominantemente por minerais que possuem ferro em sua estrutura, como a Goethita e a Hematita. A análise química revelou a presença majoritária de  $Fe_2O_3$ ,  $SO_3$ ,  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ . O material foi classificado segundo sua granulometria como arenoso, com partículas de 0,06 a 2mm de diâmetro e massa específica de  $2,17g/cm^3$ . Por meio das características apresentadas, pode-se concluir que o resíduo possui potencial de aplicabilidade em materiais para produção de cerâmicas vermelhas e para servir como aditivo ao cimento na produção de argamassas e concretos.

**Palavras-chave:** Composição química e mineralógica. Aditivo. Tijolos cerâmicos. Cimento.

### Abstract

*The disposal of the waste generated by industrial processes is a growing global problem. Thus, alternatives have been evaluated to incorporate the waste in others productive processes. This study aimed to conduct chemical, mineralogical and granulometric analysis of a waste resultant of a scrubber from an incineration industry, as well as to evaluate and discuss alternatives to application of the waste in construction materials. It was found*

**Lucimara Bragagnolo** – Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, campus Erechim.  
**Eduardo Pavan Korf** – Doutor em Engenharia (Geotecnia e Meio Ambiente) pela UFRGS e Professor/pesquisador dos cursos de Engenharia Ambiental e Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul, campus Erechim.  
**Felipe Paiva Muscope** – Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, campus Erechim.  
**Roberta Santoro de Constantino** – Administradora pela PUC-RS e especialista em Marketing e MBA em Gestão de Empresas pela FGV. Diretora da Seresa - Serviços de Resíduos da Saúde Eireli.  
**Gean Delise Leal Pasquali Vargas** – Doutora em Engenharia Química pela UFSC e Professora/pesquisadora dos cursos de Engenharia Ambiental e Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul, campus Erechim.  
**Rosilene R. Kaizer** – Doutora e Pós-Doutora em Ciências Biológicas pela UFSM e Professora/pesquisadora do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul, campus Erechim.  
**Andréia Fátima Tormen** – Engenheira Civil pela URI e Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo.  
 \***Endereço para correspondência:** Universidade Federal da Fronteira Sul, Rodovia ERS, km 135, nº 200 - Erechim - RS, CEP: 99700-970. E-mail: lucimarabragagnolo@hotmail.com.

that the waste consists predominantly of iron minerals compounds, such as goethite and hematite. The chemical analysis revealed the significant presence of  $Fe_2O_3$ ,  $SO_3$ ,  $Al_2O_3$  and  $SiO_2$ . According to their granulometry, the material was classified as sandy, with diameters from 0,06 to 2 mm. The waste has a specific weight of 21,7kN/ $m^3$ . As a result of material characteristics, we could conclude that the waste has potential of applicability in materials for production of ceramic brick and it can serve as a cement additive to produce mortars and concretes.

**Keywords:** Chemical and mineralogical composition, Additive. Ceramic bricks. Cement.

## 1 INTRODUÇÃO

Processos industriais são responsáveis pela geração de quantidades consideráveis de resíduos que muitas vezes não são reaproveitados ou não possuem um destino ecologicamente correto (CASAGRANDE et al., 2008). Além disso, a disposição desses é um problema crescente, uma vez que necessita de espaços consideráveis e medidas extensivas de segurança, demandando custos. Em certos casos, tais resíduos podem ainda ser reaproveitados ou aplicados como matérias-primas em outros processos industriais (ISO, 2006).

Indústrias incineradoras, em questão, geram quantidades significativas de resíduos, sejam eles as cinzas resultantes da incineração ou resíduos de processos de tratamentos subsequentes. Gouveia e Prado (2010) colocam que o procedimento apresenta a vantagem de diminuir o peso e a quantidade de resíduo, diminuindo, por consequência, os custos de logística e gerenciamento dos resíduos, bem como prevenindo o crescimento de bactérias e proliferação de vetores de doenças. Contudo, o processo de incineração também resulta em diversas quantidades de substâncias tóxicas, sejam elas orgânicas ou inorgânicas. Além disso, as características do que é gerado após o processo são influenciadas por fatores como o tipo e a capacidade do forno, a temperatura de entrada e o tipo de resíduo, dentre outros (CHANG; WEY, 2006).

Os gases gerados pela incineração, por conterem substâncias tóxicas, necessitam de tratamento específico. O tratamento geralmente é feito com

a utilização de lavadores de gases (CROSS; ROSS, 1968; USEPA, 2002). O funcionamento desses baseia-se no processo de absorção que remove o contaminante gasoso de uma corrente de gás por meio de sua dissolução em líquido. Esse processo acaba resultando em geração de lodo, que posteriormente deve ser tratado e depositado de forma correta (WOODARD, 1998). Contudo, em decorrência dos problemas apresentados anteriormente, como a restrição de espaços para disposição, tem-se buscado alternativas para aplicação do resíduo.

Para Reinoso et al. (2010), o setor da construção civil é o mais adequado para reutilização de resíduos, uma vez que grandes quantidades de matérias-primas são necessárias. Areias e cascalhos triturados são cada vez mais utilizados como agregados finos e grosseiros para produção de concreto em função do esgotamento de fontes naturais de agregados. Por conta disso, resíduos de processos industriais também têm sido utilizados para tal fim (PARK et al., 2016). O aproveitamento de resíduos nessa área também é considerado como solução para a disposição final destes, resultando em tecnologia de aplicação para o desenvolvimento de concretos leves, homogêneos e com facilidade de emprego em obras (SIMONDI; YAMADA; SARDINHA, 2008). Além disso, outro setor que possibilita a utilização ampla de resíduos é o cerâmico. Menezes, Neves e Ferreira (2002) colocam que são diversos os resíduos industriais que a indústria cerâmica pode absorver. Ainda, segundo o trabalho, tais resíduos, independentemente de sua origem, possuem utiliza-

ção crescente como matérias-primas alternativas no setor. No entanto, segundo Cusidó e Cremades (2012), ainda existe a preocupação pública acerca da segurança sanitária de edificações construídas com tais materiais, uma vez que os resíduos são conhecidos por sua periculosidade e toxicidade. Por conta disso, é necessário realizar uma avaliação ambiental profunda dos produtos finais. É de extrema importância, também, que a incorporação desses resíduos não gere aumento de emissões do processo produtivo, bem como não altere a qualidade do produto (COLPAS et al., 2011).

Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo realizar a caracterização química, mineralógica e granulométrica de resíduo gerado a partir do processo de lavagem de gases de uma indústria de incineração, bem como avaliar e discutir alternativas de aplicabilidade do resíduo em materiais de construção.

## 2 METODOLOGIA

O material utilizado neste estudo é proveniente do processo de lavagem de gases de uma indústria incineradora de resíduos de saúde localizada no município de Caxias do Sul (RS). Os resíduos incinerados compõem o grupo A e E, conforme a Resolução RDC/Anvisa nº 306 (BRASIL, 2004).

Inicialmente, o material, por apresentar-se de forma pastosa, foi seco na estufa a 100°C por aproximadamente 24 horas. Posteriormente, para que as análises subsequentes fossem realizadas, o material foi preparado conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016). Para tanto, o material passou pelo processo de destorroamento e, em seguida, visando à análise granulométrica, este foi submetido à peneira de 76 mm, como previsto pela NBR 6457 (ABNT, 2016). Para o ensaio de massa específica e demais análises, passou-se o resíduo pela peneira de 4,8 mm.

Cerca de 100g da amostra preparada foi coletada para a determinação da composição química,

mineralógica e de perda ao fogo. A composição mineralógica do resíduo foi avaliada por meio de Difratomia de Raios X (DRX) pelo método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X da marca PANalytical, modelo X'Pert PRO com detector sensível a posição X'Ceclerator. A identificação das fases cristalinas foi obtida por meio da comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD (*International Centre for Diffraction Data*) e ICSD (*PANalytical Inorganic Crystal Structure Database*). As condições de análise para a obtenção do difratograma foram: tubo de Cu, energia 45mA 40kV, faixa angular 5-90° (2theta), passo angular de 0,02° e com passo de tempo de 100s. Já a composição química do material foi analisada por meio de Fluorescência de Raios X (FRX). A determinação dos teores por FRX deu-se por meio de pastilhas prensadas com espectrômetro Axios de marca PANalytical na calibração STD-1 (Standardless) relativa à análise sem padrões dos elementos químicos compreendidos entre flúor e urânio. A perda ao fogo do material foi executada a 1020°C por 2h.

Por fim, a distribuição de tamanho de partículas do material foi obtida por meio de análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, conforme a NBR 6508 (ABNT, 1984a) e NBR 7181 (ABNT, 1984b).

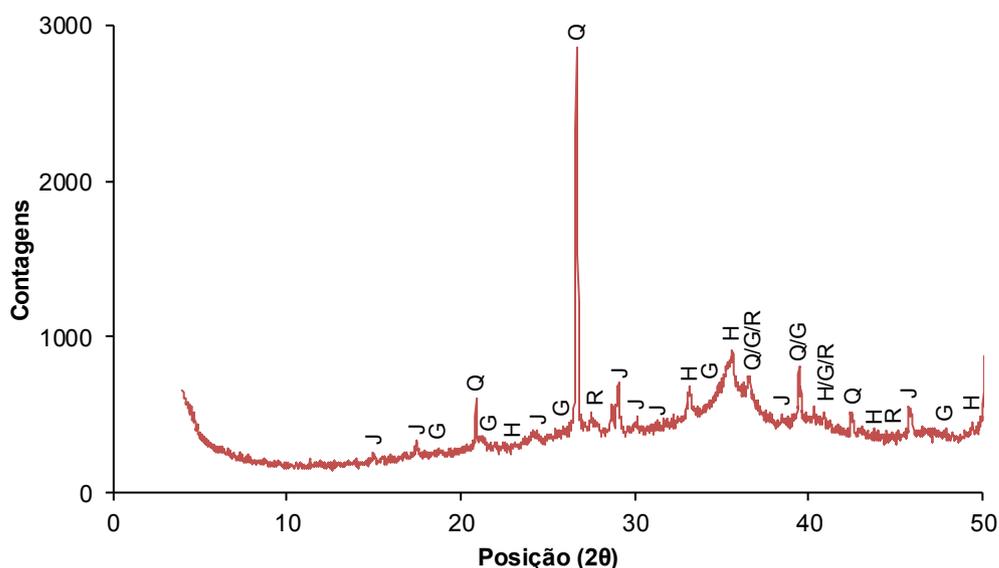
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o resultado obtido pela análise DRX. Os minerais predominantes no material são os óxidos de ferro, como a Goethita e Hematita. A predominância destes relaciona-se ao processo e tipo de material que é incinerado, uma vez que a incineração gera gases característicos que posteriormente serão lavados. Nesse processo, resíduo é gerado e sua composição química e mineralógica terá características do resíduo incinerado. Ainda, a ocorrência da Hematita pode estar associada à inicial presença de Goethita, uma vez que esta é mais

estável em temperaturas ambientes e, em temperaturas superiores a 200°C, sofre desidroxilação, originando, então, a Hematita após o processo de incineração (PEREIRA et al., 2011). Outro mineral identificado foi a Jarosita, um sulfato hidratado de ferro e potássio originado da oxidação de sulfetos de ferro. Sua presença relaciona-se a condições ácidas (SWAYZE et al., 2008). Além disso, materiais de construção que contenham Jarosita em sua

composição, como o concreto, podem sofrer problemas de deterioração por conta da presença dos sulfatos. De Ceukelaire (1991), por exemplo, observou manchas de ferrugem e deterioração superficial do concreto que possuía Jarosita em sua composição, este empregado na construção de uma ponte na Bélgica. Também foi verificada a presença de Quartzo, que pode ser atribuída ao tipo de material que é incinerado.

Figura 1 - Análise DRX



Legenda: J – Jarosita; G – Goethita; Q – Quartzo; H – Hematita; R – Rutilo

A Tabela 1 apresenta a composição química do material estudado por meio de análise FRX. Pode-se verificar que os compostos majoritários presentes no material estudado são Óxido de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Trióxido de Enxofre ( $\text{SO}_3$ ), Óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e Dióxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ). A presença de tais compostos está relacionada aos processos que ocorrem na incineração dos resíduos, que, em altas temperaturas, geram gases que após passarem pelo processo de lavagem dos gases, constituem o resíduo. O óxido de ferro presente está intimamente ligado à presença dos minerais Hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) e Goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), o primeiro

formado a partir da desidroxilação do segundo. A Hematita é uma das formas mais estáveis dos óxidos de ferro e, geralmente, é a última fase de uma sequência de transformações destes (CORNELL; SCHWERTMANN, 2003).

De acordo com a resolução RDC/ANVISA nº 306 (BRASIL, 2004), o grupo E é composto por materiais perfurocortantes ou escarificantes, como lâminas, agulhas, brocas e outros materiais de grande maioria metálicos, cujo elemento majoritário é o ferro, o que justifica a formação de compostos constituídos por tal elemento.

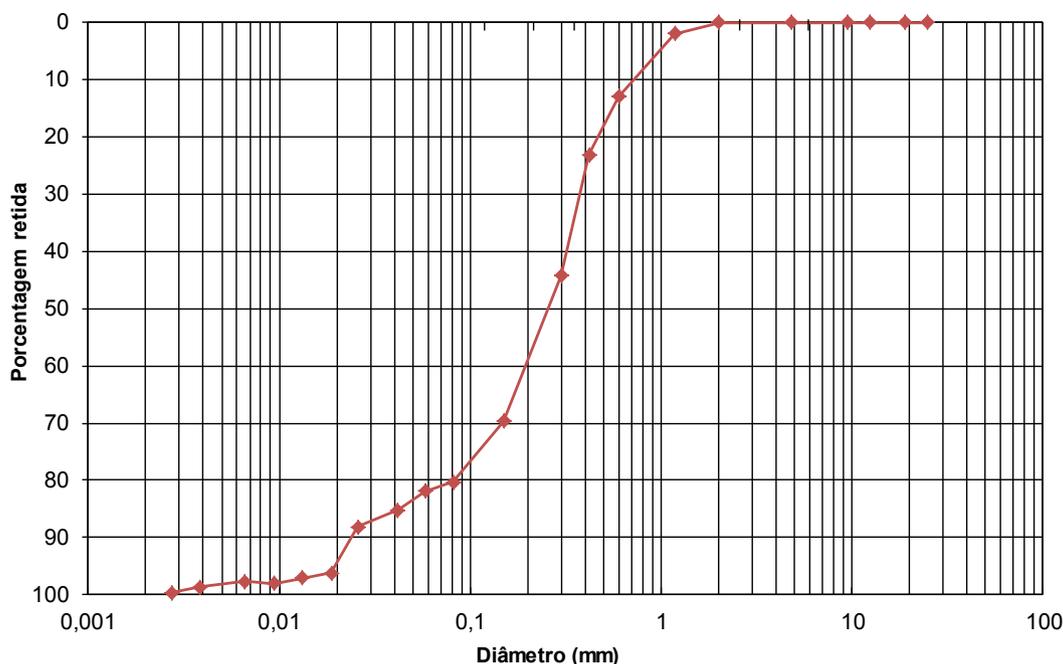
Já o considerável teor de  $\text{SO}_3$  está relacionado às condições ácidas resultantes do processo de incineração, que libera gás contendo enxofre devido à queima dos materiais. A presença de  $\text{SiO}_2$  é resultante da ocorrência de quartzo, verificada pela análise DRX. O material ainda apresenta uma elevada perda ao fogo (32,7%), que possivelmente está relacionada à perda de água dos hidróxidos que constituem os minerais Jarosita e Goethita e é um indicativo de presença de matéria orgânica.

**Tabela 1** - Resultados análise FRX

| Composto                | Resíduo (%) | Composto                | Resíduo (%) |
|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0,756       | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 38,1        |
| $\text{MgO}$            | 0,084       | $\text{NiO}$            | 0,018       |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 7,77        | $\text{CuO}$            | 0,072       |
| $\text{SiO}_2$          | 7,55        | $\text{ZnO}$            | 1,14        |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | 0,136       | Br                      | 0,016       |
| $\text{SO}_3$           | 8,52        | $\text{ZrO}_2$          | 0,004       |
| Cl                      | 1,83        | I                       | 0,064       |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 0,332       | BaO                     | 0,057       |
| CaO                     | 0,212       | Hg                      | 0,015       |
| $\text{TiO}_2$          | 0,118       | PbO                     | 0,403       |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 0,067       | $\text{Bi}_2\text{O}_3$ | 0,014       |
| MnO                     | 0,050       | PF                      | 32,7        |

A Figura 2 apresenta a curva de distribuição granulométrica das partículas do resíduo. Pode-se verificar que o material apresenta tamanhos de grãos característicos de areias, com partículas que abrangem um diâmetro de 0,06 a 2mm, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995) Existe, ainda, uma pequena fração de partículas classificada como silte (0,002 a 0,06mm) (Tabela 2). A massa específica média do resíduo é de  $21,7\text{kN/m}^3$ , o que não difere muito da massa específica de tijolos produzidos com argila, que varia entre  $18\text{-}20\text{kN/m}^3$ , por exemplo (WENG; LIN; CHIANG, 2003).

**Figura 2** - Distribuição granulométrica das partículas do resíduo de lavador de gases



**Tabela 2** – Tamanho das partículas do resíduo de lavador de gases

| Diâmetro (mm) | < 0,002 Argila | 0,002 – 0,06 Silte | 0,06 – 0,2 Areia fina | 0,2 – 0,6 Areia média | 0,6 – 2 Areia Grossa | > 2 Pedregulho |
|---------------|----------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------|
| %             | 0              | 18,06              | 37,74                 | 31,33                 | 12,87                | 0              |

Os resultados apresentados assemelham-se muito aos estudos que caracterizam resíduos que são produzidos pela indústria siderúrgica, especialmente com relação à análise química (CARDOSO DE OLIVEIRA; MARTINS, 2003; DIAS, 2011; LIMA; REIS; BORGES, 2013; VIEIRA et al., 2007). Esses materiais, da mesma forma que o resíduo em estudo, apresentam como composto predominante  $Fe_2O_3$ , e, como teores consideráveis,  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ . Além disso, a perda ao fogo é elevada. O composto que se encontra em maior quantidade no material estudado, em relação aos demais estudos, é o  $SO_3$ . De acordo com Ingunza, Del Pilar e Dantas (2015), a presença de  $SO_3$  pode acarretar alguns riscos ambientais, com a liberação de gases tóxicos, durante processos de queima para a produção de certos materiais, como a cerâmica. Portanto, é necessária a avaliação desse aspecto caso o resíduo seja utilizado para a produção de materiais que incluam a etapa de queima em seu processo produtivo.

Por meio dos resultados obtidos e pesquisa bibliográfica, verificou-se que o resíduo possui grande potencial de aplicabilidade para produção de cerâmicas vermelhas e misturas com cimento, como será discutido a seguir.

### 3.1 Adição em massas cerâmicas vermelhas para fabricação de tijolos

A cerâmica vermelha é caracterizada por produtos provenientes da argila ou misturas, por meio da moldagem, secagem e queima, e esta última origina a cor avermelhada. Alguns exemplos desses materiais são os tijolos, blocos e telhas (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2002). A produção destas com a

utilização de resíduos pode ser realizada por meio da substituição de uma ou mais matérias-primas da constituição original pelo resíduo, em conformidade com o processo produtivo convencional, com o propósito de reproduzir as propriedades do produto padrão (SCARINCI et al., 2000).

Diversos autores estudaram a aplicação de lodo de diversas origens em massas cerâmicas ((BRUXEL et al., 2012; LIMA; REIS; BORGES, 2013; MOTHÉ, 2008; OLIVEIRA; MACHADO; HOLANDA, 2004; VIEIRA et al., 2007). Os materiais tradicionais utilizados para a fabricação de tijolos, por exemplo, baseiam-se em argila, areia e restos de tijolos triturados. Aditivos ainda podem ser inseridos para aprimorar as propriedades do produto final (CRUZ et al., 2016).

Para auxiliar na produção de massas cerâmicas, costuma-se utilizar diagramas ternários a partir de dados de composição química e distribuição do tamanho das partículas. Fiori et al. (1989) utilizam o diagrama composto pelos três vértices: (1)  $SiO_2$  (2)  $Al_2O_3$  e (3)  $Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O$ .  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$  estão presentes no diagrama uma vez que são componentes predominantes na estrutura dos argilominerais, bem como constituintes principais das fases formadas durante a queima da massa cerâmica. O outro vértice ( $Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O$ ), constituído por óxidos fundentes, justifica-se por sua importância de possibilitar que o produto final apresente uma microestrutura compatível com as propriedades desejadas (VIEIRA; MONTEIRO; FILHO, 2001). Ao analisar a composição química do resíduo em estudo, nota-se a presença de grande parte dos compostos que constituem as massas cerâmicas,

conforme o diagrama ternário, fator favorável para sua aplicabilidade nesse fim.

O alto teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  encontrado pode conferir ao material final coloração escura (SILVA et al., 2005). Além disso, de acordo com Lima, Reis e Borges (2013), a presença significativa de  $\text{Fe}_2\text{SO}_3$  em compostos para adição em cerâmica resulta no aumento da temperatura de queima, diminuindo o tempo necessário para que o material permaneça no forno.

Já a presença de metais, observada nos resultados da análise FRX, não é considerada um fator limitante para a produção de materiais cerâmicos, uma vez que as fases sílicas, características dos minerais da argila, são capazes de incorporar quantidades consideráveis de metais em suas estruturas (PÉREZ-VILLAREJO et al., 2015).

Para aplicação em massas cerâmicas, deve-se levar em conta, também, a coesão do material, que influencia principalmente o processo de queima. Aconselha-se que 65% da massa argilosa seja composta por frações de argila e silte. A fração argila é responsável por conferir à massa plasticidade quando misturada com água, possibilitando conformar as peças argilosas por extrusão (MOTHÉ, 2008). Partículas maiores podem causar problemas durante a queima, provocando trincas em decorrência da transformação alotrópica do quartzo (FERNANDES, 2008). Da mesma forma, concentrações muito elevadas de argila podem causar problemas na secagem e queima das peças cerâmicas (TEIXEIRA et al., 2011). Diante disso, para a utilização do resíduo em estudo na produção de cerâmicas, é preciso determinar a parcela ótima de adição a fim de não alterar significativamente a composição granulométrica majoritária da massa total, que deve apresentar características argilosas. Além disso, para a determinação da concentração ótima de resíduo a ser adicionada, é preciso considerar as propriedades do material usado para a mistura (TEIXEIRA et al., 2011).

Ainda, é importante levar em consideração o teor de matéria orgânica presente, realizando ensaios específicos. Isso porque, durante o processo de queima do material cerâmico, a matéria orgânica será volatilizada, resultando no aumento da porosidade e perda de resistência (CRUZ et al., 2016). A presença da matéria orgânica ainda pode causar o efeito conhecido como “coração negro” se essa não for completamente eliminada durante o processo de queima (UKWATTA et al., 2016).

Zhang et al. (2016) estudaram a fabricação de tijolos com a incorporação de três diferentes materiais: sedimento de uma lagoa, lama e lodo de esgoto, este último com a maior parcela de perda ao fogo (47,50%), amplamente relacionada à presença de grande quantidade de material orgânico. A partir da adição do lodo de esgoto à mistura com os demais componentes, os autores verificaram uma perda significativa da resistência à compressão, bem como uma aparência com um maior grau de deterioração do material final.

Nesse sentido, por meio das considerações e bibliografias levantadas, pode-se prever que o resíduo possui potencial de aplicabilidade na produção de massas cerâmicas vermelhas. Sua similaridade com a composição química dos materiais cerâmicos é um importante fator para inserção do resíduo nesses materiais. Contudo, a elevada presença de matéria orgânica, verificada pela alta perda ao fogo, pode ser um fator limitante, em que possivelmente baixos teores poderão ser adicionados às misturas sem acarretar em perdas significativas das características padronizadas.

### 3.2 Adição ao cimento

Materiais com características muito semelhantes ao resíduo aqui apresentado também foram estudados em misturas para a produção de argamassas e cimento. Alguns dos principais compostos do resíduo, como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , também

pertencem aos principais componentes de alguns materiais utilizados na produção do cimento (CHEN; MA; DAI, 2010).

Ulubeyli e Artir (2015) obtiveram resultados positivos no que se refere à aplicação de resíduos em cimento, resultando em materiais com alta resistência e desempenho. Aristimunho e Bertocini (2012) avaliaram o comportamento mecânico da mistura de lama de minério de ferro em pó em diferentes porções (0, 4, 6, 8 e 20%) com argamassa de cimento Portland. Avaliaram a substituição da areia pelo pó de minério em diferentes parcelas (0, 10, 20 e 30%). Os autores obtiveram como melhor resultado a adição de 8% de pó à argamassa, sem prejudicar a consistência e a mudança intensa de coloração do material. Para as substituições de areia, o melhor resultado apresentou-se com 20% de substituição de areia pelo pó de minério. Assim como o pó de minério de ferro, o resíduo do lavador de gases analisado contém elevado teor de  $Fe_2O_3$ . Ambos os materiais possuem outros compostos em comum. Diante disso, tem-se como indicativo a possibilidade de produção de um material final de qualidade com a adição do resíduo ao cimento, que também pode servir de substituo à areia na produção de argamassa.

Alqam, Jamrah e Daghlas (2011) concluíram que a adição de lodo provindo de água tratada em cimento para produção de ladrilhos de uso externo cumpre os requisitos de resistência à ruptura de 2.8MPa para uma porcentagem de adição menor que 50%.

Chen, Ma e Dai (2010) estudaram a adição de resíduo gerado pelo processo de purificação da água em cimento. Os autores concluíram que os efeitos verificados, como redução do ponto de queima de fusão, aumento do teor da fase líquida, redução da fase viscosa e aceleração da velocidade de difusão de partículas, ocorrem em função das pequenas concentrações de elementos presentes no resíduo como Cu, Zn, Cr, Ni, K e Na. É possível verificar, pela

análise química, que o resíduo do presente estudo também apresenta pequenas concentrações desses elementos, o que pode favorecer sua aplicabilidade em misturas com cimentos.

Com relação ao alto teor de  $Fe_2O_3$  observado pela análise química (Tabela 1), Sugrañez et al. (2012) colocam que esse composto pode ser considerado um interessante mineral fotocatalítico, podendo até substituir o  $TiO_2$  que já é utilizado em certos materiais de construção. A presença de tais compostos nos materiais, sob irradiação solar, induz à fotooxidação/degradação de poluentes orgânicos/inorgânicos na superfície do material. Diante disso, o alto teor de óxido de ferro presente no resíduo pode ser um ponto positivo para sua utilização em alguns materiais de construção. Além disso, a presença de compostos e alumino-silicatos possibilitam e favorecem a mistura dos materiais com cimento (FILIPPONI et al., 2003).

Quanto à presença de matéria orgânica no resíduo, seu alto teor é considerado o obstáculo principal para uma boa solidificação e estabilização do cimento, com alterações nas propriedades mecânicas e reológicas. Autores ainda sugerem que, por conta disso, taxas superiores a 10% do resíduo por massa de cimento não sejam adicionadas (VALLS; VÀZQUEZ, 2000). Para contornar o problema, Zhen et al. (2012) estudaram a adição de aluminato  $12CaO.7AlO_3$  à mistura. Os autores concluíram que a adição do composto facilitou a formação das fases cristalinas, como etringite, calcite e quartzo, que foram capazes de preencher os poros das massas solidificadas, bem como tornou a microestrutura mais densa.

Um problema que deve ser considerado em decorrência da presença do mineral Jarosita e de compostos corrosivos, como o  $SO_3$ , é a deterioração do material por meio de reações químicas, geralmente conhecidas como sulfatação. Contudo, a defesa contra tais reações pode ser dada pela diminuição de Aluminato Tricálcico (C3A)

presente no cimento e adição de óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), resultando na formação de Ferro-Aluminato Tetracálcico (C4AF), muito mais resistente a esses ataques químicos (FUSCO, 2008). Existem cimentos específicos com tal composição que resistem aos ataques por sulfato e que são descritos pela NBR 5737 (ABNT, 1992). Contudo, dependendo da parcela do resíduo a ser adicionada, é possível que a elevada presença do óxido férrico possa realizar tal função.

Assim como a aplicação do resíduo no setor da cerâmica vermelha, sua adição ao cimento para a fabricação de materiais de construção pode ser considerada outra alternativa com grande potencial, visto a grande aceitabilidade de incorporação dos mais diversos resíduos no setor. O alto teor de óxido de ferro favorece a propriedade fotocatalítica do material final. Já as baixas concentrações de outros compostos também podem fornecer características importantes para a qualidade do produto final. A presença de compostos corrosivos pode resultar em deterioração, caso o cimento ou parcelas de adição não forem adequados, como a utilização de cimentos pouco resistentes a sulfatos ou incorporação de quantidades muito elevadas do resíduo. Novamente, o elevado teor de matéria orgânica presente no resíduo pode ser um fator limitante na aplicação de altas concentrações do material em misturas com cimento.

Após ou durante a escolha da aplicação mais viável do resíduo gerado pelo lavador de gases, é imprescindível, ainda, a realização de ensaios correspondentes à tensão de ruptura, bem como ensaios de retração linear, absorção de água e solubilização para verificar a qualidade final do produto e a conformidade às normas reguladoras para materiais utilizados na construção civil, se for o caso. Para Berge (2009), as propriedades que devem ser consideradas em primeiro plano para o desenvolvimento e uso de materiais estruturais são o peso, resistência à compressão e resistência à tração.

#### 4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a caracterização química, mineralógica e granulométrica do resíduo gerado pelo processo de lavagem de gases de uma indústria de incineração, bem como buscou avaliar os resultados a fim de encontrar alternativas para aplicação em materiais de construção.

Verificou-se a presença de elevado teor de óxidos de ferro e matéria-orgânica, e concentrações menores de SO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>, composições muito semelhantes a resíduos gerados por processos de alto forno desenvolvido pela indústria siderúrgica. Em relação à mineralogia, a análise DRX revelou a presença de quartzo, hematita, jarosita e goethita. Quanto à análise granulométrica, o resíduo foi caracterizado como arenoso, contendo partículas menores que 2mm de diâmetro.

Baseado nos resultados obtidos, verificou-se que o resíduo tem a possibilidade de ser reaproveitado, para a produção de materiais cerâmicos ou em misturas com cimento. Contudo, é necessário estudar a viabilidade de execução de cada alternativa, bem como realizar testes de resistência e toxicidade a fim de determinar a proporção ótima de mistura de cada composto e a qualidade final do produto.

#### REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984a.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6457**: Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
- ALQAM, M.; JAMRAH, A.; DAGHLAS, H. Utilization of Cement Incorporated with Water Treatment Sludge. *Jordan Journal of Civil Engineering*, v. 5, n. 2, p. 268-277, 2011.
- ARISTIMUNHO, P. B.; BERTOCINI, S. R. Application of iron ore mud in powder form in posartland cement presence. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 5, n. 2, p. 153-165, 2012.

- BERGE, B. **The Ecology of Building Materials**. 2. ed. Burlington, USA: Press, Architectural, 2009. v. 53
- BRASIL. Resolução RDC Nº 306, de 7 de Dezembro de 2004. **Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária**, 2004.
- BRUXEL, F. R. et al. Estudo da adição de resíduo (lodo) de gemas na massa cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 58, p. 211-215, 2012.
- CARDOSO DE OLIVEIRA, M. R.; MARTINS, J. Caracterização e classificação do resíduo sólido “pó do balão”, gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal: Estudo de um caso na região de Sete Lagoas/MG. **Química Nova**, v. 26, n. 1, p. 5-9, 2003.
- CASAGRANDE, M. C. et al. Reaproveitamento de Resíduos Sólidos Industriais: Processamento e Aplicações no Setor Cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 13, p. 34-42, 2008.
- CHANG, F. Y.; WEY, M. Y. Comparison of the characteristics of bottom and fly ashes generated from various incineration processes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 138, n. 3, p. 594-603, 2006.
- CHEN, H.; MA, X.; DAI, H. Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 6, p. 436-439, 2010.
- COLPAS, F. T. et al. Incorporação de lodo e areia de ETE em blocos para construção civil: avaliação do crescimento de fungos. **DAE**, n. 186, p. 23-28, 2011.
- CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. Chapter 1: Introduction to the iron oxides. In: \_\_\_\_\_. **The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses**. Freising: WILEY-VCH, 2000. 2 ed. p. 1-7.
- CROSS, F. L.; ROSS, R. W. **Effluent Water from Incinerator Flue Gas Scrubbers**. Incinerator Conference, ASME. **Proceedings...** New York, 1968.
- CRUZ, D. C. et al. Quality improvement of ceramic bricks by incorporation of sludge from water treatment units. **Journal of Chemical Engineering and Chemistry**, v. 2, n. 2, p. 42-56, 2016.
- CUSIDÓ, J. A.; CREMADES, L. V. Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies. **Waste Management**, v. 32, n. 6, p. 1202-1208, 2012.
- DE CEUKELAIRE, L. Concrete surface deterioration due to the expansion by the formation of jarosite. **Cement and Concrete Research**, v. 21, n. 4, p. 563-574, 1991.
- DIAS, C. A. C. M. **Reciclagem de lama de alto-forno em cerâmica vermelha**. 2011. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2011.
- FILIPPONI, P. et al. Physical and mechanical properties of cement-based products containing incineration bottom ash. **Waste Management**, v. 23, n. 2, p. 145-156, 2003.
- FIORI, C. et al. Mineralogical composition of the clay bodies used in the Italian tile industry. **Applied Clay Science**, v. 4, n. 5-6, p. 461-473, 1989.
- FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. 1. ed. São Paulo: Editora PINI Ltda., 2008.
- GOUVEIA, N.; PRADO, R. R. DO. Análise espacial dos riscos à saúde associados à incineração de resíduos sólidos: avaliação preliminar. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 13, n. 1, p. 3-10, 2010.
- INGUNZA, D.; DEL PILAR, M.; DANTAS, L. A. **Use of Sewage Sludge as Raw Material in the Manufacture of Soft-Mud Bricks**. International Conference on Civil, Materials and Environmental Sciences. **Proceedings...** 2015
- ISO. THE INTERNATIONAL STANDARDS ORGANISATION. **ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework**. 2006.
- LIMA, L. H. M.; REIS, S. C.; BORGES, L. R. Aproveitamento de Resíduo Siderúrgico em Blocos Cerâmicos Argilosos. **e-xacta**, v. 6, n. 2, p. 69-78, 2013.
- MENEZES, R. R.; NEVES, G. DE A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 303-313, 2002.
- MOTHÉ, A. V. **Utilização da lama de alto-forno em cerâmica vermelha**. 2008. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2008.
- OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Ceramics**, v. 50, p. 324-330, 2004.
- PARK, H. et al. Production of price-competitive bricks using a high volume of stone powder sludge waste and blast furnace slag through cementless CaO activation. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 343-353, 2016.
- PEREIRA, M. C. et al. Composites prepared from natural iron oxides and sucrose: A highly reactive system for the oxidation of organic contaminants in water. **Chemical Engineering Journal**, v. 166, n. 3, p. 962-969, 2011.
- PÉREZ-VILLAREJO, L. et al. Valorization and inertization of galvanic sludge waste in clay bricks. **Applied Clay Science**, v. 105-106, p. 89-99, 2015.
- REINOSA, J. J. et al. High chemical stability of stoneware tiles containing waste metals. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 30, n. 14, p. 2997-3004, 2010.
- RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. DA S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 2ª ed. Belo Horizonte, MG: UFGM, 2002.
- SCARINCI, G. et al. Vittrification of industrial and natural wastes with production of glass fibres. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 20, n. 14-15, p. 2485-2490, 2000.
- SILVA, J. B. et al. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, v. 51, n. 320, p. 325-330, 2005.
- SIMONDI, S.; YAMADA, Y.; SARDINHA, V. L. A. Propriedades e aplicações do agregado leve de lodo de esgoto. **DAE**, n. 126, p. 292-298, 2008.
- SUGRAÑEZ, R. et al. Use of industrial waste for the manufacturing of sustainable building materials. **ChemSusChem**, v. 5, n. 4, p. 694-699, 2012.
- SWAYZE, G et al. Chapter B: Understanding jarosite—from mine waste to Mars. In: VERPLANCK, P. L. **Understanding contaminants associated with mineral deposits**. Suíça: U.S. Geological Survey Circular 1328, p. 8-13, 2008.
- TEIXEIRA, S. R. et al. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, v. 53, n. 4, p. 561-565, 2011.
- UKWATTA, A. et al. Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 76-85, 2016.

ULUBEYLI, G. C.; ARTIR, R. Sustainability for Blast Furnace Slag: Use of Some Construction Wastes. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 195, p. 2191-2198, 2015.

USEPA. Air Pollution Control Technology Fact Sheet. **Pollution Engineering**, p. 1-4, 2002.

VALLS, S.; VÁZQUEZ, E. Stabilisation and solidification of sewage sludges with Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, p. 1671-1678, 2000.

VIEIRA, C. M. F. et al. Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha (Incorporation of blast furnace sludge into red ceramic). **Cerâmica**, v. 53, p. 381-387, 2007.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; FILHO, J. D. Formulação de Massa de Revestimento Cerâmico com Argilas Plásticas de Campos dos Goytacazes (RJ) e Taguá (SP) Materiais e Métodos. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 6, p. 43-49, 2001.

WENG, C. H.; LIN, D. F.; CHIANG, P. C. Utilization of sludge as brick materials. **Advances in Environmental Research**, v. 7, n. 3, p. 679-685, 2003.

WOODARD, K. Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter. n. 68, p. 286, 1998.

ZHANG, Y. M. et al. Fabrication, microstructure and properties of bricks fired from lake sediment, cinder and sewage sludge. **Construction and Building Materials**, n. 121, p. 154-160, 2016.

ZHEN, G. et al. Hydration process of the aluminite 12CaO7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3-assisted Portland cement-based solidification/stabilization of sewage sludge. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 675-681, 2012.