

Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção

(Physical characterization of the residue of a water treatment plant for using in building materials)

F. C. Araújo¹, P. S. Scalize², A. Albuquerque³, R. R. Angelim²

¹Pontifícia Universidade Católica de Goiás, ²Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás,

³Dep. de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Portugal
fcaraujo40@gmail.com, pscalize.ufg@gmail.com, ajca@ubi.pt, tecnoeng@gmail.com

Resumo

A produção de água tratada, nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) gera lodo, também chamado de resíduo de ETA (RETA). A maior parte das ETAs descarrega estes resíduos em meios hídricos, apesar da política nacional de resíduos sólidos salientar que é de responsabilidade da fonte geradora adotar destinação sustentável aos resíduos, visto que o seu lançamento *in natura* nos corpos hídricos é prejudicial, tornando esse meio de disposição um sério passivo ambiental das companhias de saneamento. O objetivo do presente trabalho foi realizar a caracterização física do resíduo gerado em uma ETA buscando obter parâmetros com bases normativas e considerar alternativas sustentáveis de reincorporação do lodo na cadeia produtiva para confecção de materiais de construção, de maneira a reduzir o impacto causado com o lançamento do RETA nos cursos de água. Para isso, foram realizados ensaios de índices de consistência do resíduo, granulometria, microscopia de varredura eletrônica e espectroscopia por dispersão de energia. Os resultados encontrados nas análises do resíduo demonstram a potencialidade de sua aplicação em substituição parcial do solo e/ou da areia, sendo suas propriedades similares a matéria-prima, na fabricação de materiais de construção.

Palavras-chave: estação de tratamento de água, resíduo de ETA, lodo de ETA, materiais de construção.

Abstract

In the Water Treatment Plants (WTPs), the production of treated water generates residues, which are usually called water treatment residues (WTR). Most of these WTPs discharge waste into watercourses, despite the national solid waste policy assigning responsibility for adopting sustainable ways to disposal the wastes to the generating source, because its launch "in natura" in water bodies is harmful. The aim of this work was to determine the physical characteristics of the waste generated in a Water Treatment Plant according to normative parameters in order to consider sustainable alternatives for its reuse in the production of building materials and, therefore, reducing the potential environmental impacts on water streams. Thus, the following tests were performed on the residue: consistency index, granulometry, scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy. The results show the potential application of the residue for partially replacing soil and/or sand in the production of construction and building materials.

Keywords: water treatment plants, water treatment residues, construction and building materials.

INTRODUÇÃO

O progressivo aumento das comunidades humanas e a consequente busca por qualidade de vida contribuem para a evolução da infraestrutura das cidades. No que se refere ao setor de saneamento, esse desenvolvimento, que tem por objetivo atender a demanda por água tratada, traz consigo a produção de grandes quantidades de resíduos; os quais na maioria das Estações de Tratamento de Água (ETAs), não possuem destinação sustentável, sendo lançados diretamente nos cursos de água [1, 2]. Essa forma de disposição dos resíduos, provenientes principalmente dos decantadores e dos filtros das ETAs, causa poluição e caracteriza crime ambiental, conforme Art. 54 da Lei 9.605 [3]. Há um consenso pelo uso de mecanismos que evitem a degradação

do meio ambiente e corrobore a reutilização dos resíduos, pois a poluição e deterioração dos cursos de água, bem como as restrições legais impostas pela legislação brasileira, pressionam a indústria a solucionar esse passivo ambiental, caminhando em direção ao concluído no Relatório de Conclusões do Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos de Lodos de Estações de Tratamento de Água [4, 5].

A caracterização dos resíduos evidencia que existe uma diversidade de propriedades analisadas, as quais interferem diretamente nas possibilidades de seu uso, como concluíram [6], que após análise dos resultados conjunta dos dados e da caracterização do lodo da ETA Passaúna em Curitiba, PR, relataram sua aplicação na fabricação de artefatos, como blocos e peças de concreto em percentual de 5% de resíduo

[7]. Averiguaram a durabilidade do concreto com adição de resíduo e notaram que seu desempenho com 5% de resíduo foi similar às amostras sem o resíduo [8]. Observaram o comportamento do resíduo incorporando-o como matéria-prima para produção de cimento Portland em percentuais que variaram de 10% a 30% e perceberam que o resíduo diminuiu a resistência mecânica das argamassas produzidas com esse cimento em comparação com as amostras de controle, produzidas com o cimento Portland tradicional [9]. Realizaram caracterização desse tipo de resíduo e concluíram que possuíam composição química e mineralógica formados por minerais argilosos, hidróxidos de ferro e de alumínio, além de mica e quartzo, sendo aplicável em materiais compostos por cerâmica argilosa [10]. Aplicaram os RETA e casca de arroz incinerados à 1100 °C, em percentuais de 15% para produção de tijolos de baixa densidade e atingiram resistência compatíveis com os padrões de Taiwan [11], utilizando até 10% de RETA proveniente do uso com sulfato de alumínio, e até 20% de resíduo com cloreto férrico, obtiveram resultados dentro da norma quando incorporados em materiais cerâmicos estruturais [12]. Investigaram as características físicoquímicas do RETA da região de Campos dos Goytacazes, RJ, e comprovaram que podem ser usados como constituinte e de massa argilosa para fabricação de cerâmica vermelha. Na ETA Tamanduá em Foz do

Iguaçu, PR [13], verificaram que devido as características não plásticas, o resíduo gerado não pode ser usado como componente majoritário em massas cerâmicas. Em vista disso, percebe-se que as características do resíduo gerado em uma ETA são variadas em função: (1) da geologia da bacia por onde o corpo de água flui a montante da captação, (2) do ciclo hidrológico, (3) do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica de onde é realizada a captação, (4) dos produtos e das tecnologias empregadas no tratamento da água, entre outras, configurando que cada resíduo gerado tem suas próprias características, podendo ser semelhantes ou não. Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi realizar a caracterização física do resíduo, desidratado na lagoa de secagem da ETA Eng. Rodolfo José da Costa e Silva (ETA Meia Ponte), localizada em Goiânia, GO, região central do Brasil, e com base nesses resultados visualizar as possíveis potencialidades para o aproveitamento ou disposição adequada desse resíduo.

METODOLOGIA

O trabalho foi realizado na ETA Meia Ponte, que está inserida na bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte, localiza-se no centro-sul do estado de Goiás e sua área territorial corresponde a 3,6%, onde estão inseridos 38 municípios e



Figura 1: (*) Imagem de satélite da área da ETA Meia Ponte (a); Lagoa de secagem em operação (b); Lagoa de secagem cheia (c); Disposição do resíduo em área ao lado da lagoa (d).

[Figure 1: (*) Satellite image of the Meia Ponte WTP (a); Dry lagoon for WTR (after loading) (b); Dry lagoon for WTR (after dried) (c); Disposal of WTR on soil (d). Source: (*) Adapted from Google Earth (image generated on 10/08/2008).]

Fonte: (*) Adaptado do Google Earth, imagem gerada em 10/08/2008.



Figura 2: Resíduo após sua remoção (a), trituração em máquina tipo pedra moinho (b) e triturado (c).

[Figure 2: Raw residue after drying process (a), mechanical grinding of residues (b) and residue after milling (c).]

se concentra 48% da população goiana [14]. A ETA Meia Ponte, que trata uma vazão média de 2,8 m³/s, responsável pelo tratamento da água que abastece de cerca de 50% da região metropolitana, utiliza sulfato de alumínio como coagulante primário e nenhum outro produto, tais como alcalinizante, carvão ativado ou polímero. A ETA (Fig. 1a) conta com decantadores com raspador automático de lodo e filtros descendentes e lavagem com ar e água no sentido ascensional, sendo o resíduo de suas limpezas encaminhado para a lagoa de secagem (Fig. 1b), que quando seco (Fig. 1c) é removido da lagoa, é disposto em área ao lado (Fig. 1d).

O resíduo (Fig. 2a) foi coletado no mês de outubro de 2013 na lagoa de secagem de lodo da ETA, que se encontrava em processo de secagem (Fig. 1c). Em seguida triturou-se a amostra em máquina compacta do tipo triturador de pedra moinho (Fig. 2b), obtendo-se o resíduo para a caracterização (Fig. 2c).

O RETA (Fig. 2c) foi caracterizado com normalização aplicada para solos. Para determinar o comportamento do material sob o ponto de vista de engenharia foi feita a análise granulométrica [15] e adicionalmente via granulômetro a laser (método não normalizado) com aparelho S3500 Microtrac. O ultrassom é uma ferramenta do aparelho que pode ser utilizada na amostra do material com a finalidade de desagregá-lo, caso haja a suspeita de que tenha agregados provocados por secagem, existência de pontes de argila ou cimentações pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, comum de solos tropicais, e atração elétrica, permitindo assim uma caracterização mais realista. Para a execução do ensaio no granulômetro, a amostra foi primeiramente passada na peneira de abertura 2 mm, limite superior do equipamento. Ensaio foram feitos sem e com ultrassom, sendo que as análises, nas duas situações, podem

fornecer informações sobre o teor de agregação do material. Foram também determinados os índices de consistência, o limite de liquidez [16] e o limite de plasticidade [17]. O teor de umidade da amostra do RETA foi determinado [18].

A mineralogia do resíduo foi determinada por difração de raios X; a amostra foi peneirada até granulometria <600 µm e inserida em difratômetro de raios X Shimadzu LabX XRD-6000, com radiação CuK α , velocidade de varredura 2°/min, intervalo de medida 0,02, sendo a varredura de 10° a 80° 2 θ . A interpretação dos difratogramas e identificação dos minerais foram feitas com o software JADE 6.5.

Para o estudo da microestrutura, foi feito ensaio de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por dispersão de energia com o equipamento Jeol JSM-6610 equipado com EDS, Thermo Scientific NSS Spectral Imaging. Análise foi feita por espectrometria de absorção atômica, segundo os procedimentos da Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW), para determinação dos elementos químicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela I estão apresentados os resultados dos índices de consistência do lodo e o índice de atividade da fração argila presente no resíduo. O teor de umidade (*w*) do material *in situ* foi 24,3%, relativamente alto, mas condizente com materiais de elevados teores de finos, que tem dificuldade de perder água. O índice de plasticidade (*I_p*) foi 16%, que define o material como de plasticidade média, segundo a classificação qualitativa de [19, 20] definida para o intervalo de *I_p* entre 10% e 20%. Cabe salientar que quanto maior for o intervalo plástico, ou seja, o valor do *I_p*, mais plástico será

Tabela I - Índice de consistência do lodo e índice de atividade da fração argila.
[Table I - Consistency index of the residue and activity index for the clay fraction.]

Umidade <i>in situ</i> <i>w</i> (%)	Limite de liquidez <i>w_L</i> (%)	Limite de plasticidade <i>w_p</i> (%)	Índice de plasticidade <i>I_p</i> (%)	Índice de atividade <i>I_a</i>
24,3	56	40	16	0,80

o material. Um material é considerado de atividade normal quando seu índice se situa entre 0,75 a 1,25, inativa quando menor que 0,75 e ativa quando maior que 1,25 [21]. Desta forma, o índice de atividade (I_a) dado pela relação entre o I_p e a porcentagem de material com dimensão inferior a 0,002 mm (fração argila) de 0,80, conforme apresentado na Tabela I, enquadra o material como de atividade normal.

A propriedade plástica é comum de solos de natureza argilosa e fundamental como requisito da matéria prima utilizada na produção de materiais cerâmicos. Com plasticidade média o resíduo poderia ser aplicado moderadamente para confecção de corpos cerâmicos, pois garantiriam uma retração média das peças moldadas [22].

Em Campos de Goytacazes [12] encontraram massa de consistência plástica, com $w_L = 73\%$, $w_p = 53\%$ e $I_p = 20\%$ e foi classificado como silte inorgânico de alta compressibilidade, porém o limite de plasticidade de 53% está acima da faixa recomendada para cerâmica vermelha ($w_p = 18\%-30\%$), gerando dificuldade no processo de secagem, resultando em alta retração e defeitos nos corpos cerâmicos [13] $w_L = 65\%$, $w_p = 72\%$, $I_p = 7\%$, no RETA Tamanduá em Foz do Iguaçu, o que determina, portanto, características não-plásticas, desfavoráveis para produção de cerâmica vermelha. O valor de I_p encontrado nessa pesquisa foi próximo ao determinado [12] e acima do valor encontrado por [13], isso evidencia uma grande variação nas características dos resíduos gerados em ETAs que está em função dos produtos empregados no tratamento e da natureza mineralógica dos sedimentos de solo presentes na água, mostrando a necessidade de uma caracterização ampla para fins de utilização do resíduo como matéria prima para a construção civil.

A plasticidade depende de fatores que incluem composição mineralógica, tamanho e distribuição das partículas, capacidade de troca dos cátions e pH da argila [23]. Para o processamento cerâmico, a plasticidade das argilas pode ser avaliada a partir dos limites de Atterberg, que indicam a adequação da massa cerâmica a ser conformada por extrusão. O limite de plasticidade indica a quantidade de água mínima que a massa cerâmica deve conter para ser conformada. O limite de liquidez corresponde a máxima quantidade de água que a massa cerâmica pode conter para ser moldável. Assim as massas cerâmicas altamente plásticas e medianamente plásticas são favoráveis ao processo de extrusão e moldagem industrial.

Três curvas de distribuição granulométrica do material são apresentadas na Fig. 3, sendo uma determinada via ensaio tradicional, por peneiramento e sedimentação [24] e outras duas obtidas via ensaio com granulômetro a laser sem e com a aplicação de ultrassom. A curva obtida via granulômetro laser com ultrassom mostrou que a quantidade de finos aumentou com o uso do dispositivo e mostrando que o material tinha agregações presentes. Esse comportamento foi notado também no estudo de solos finos tropicais [25]. Pelo método tradicional, considerando apenas as dimensões das partículas do resíduo seria enquadrado como um silte arenoso (com aproximadamente 41% de silte, 32% de areia, 24% de argila e 3% de pedregulho). Já na classificação pelo

sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), que leva em consideração o comportamento plástico, trata-se de um silte inorgânico de alta compressibilidade, a mesma

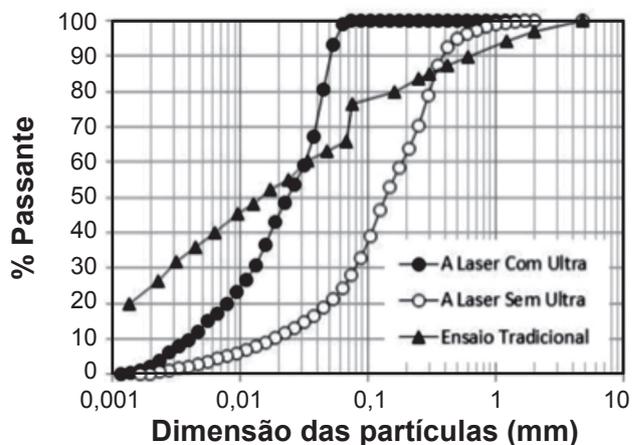


Figura 3: Curvas de distribuição granulométrica do RETA estudado. [Figure 3: Particle size distribution curves for the WTR.]

obtida para o RETA de Campos de Goytacazes [12].

Se o RETA for analisado como agregado miúdo para argamassas e concretos apresenta diâmetro máximo característico (DMC) de 2,0 mm, módulo de finura (MF) de 0,72 e teor de material pulverulento (% que passa na peneira 0,075 mm) superior a 76%. Vale destacar que o teor de material pulverulento foi muito elevado e isto desqualifica seu uso direto como agregado miúdo, entretanto ainda pode participar da composição de argamassas como filer com função plastificante. Cabe salientar que o excesso de finos também pode aumentar o consumo de água de amassamento e de cimento, além de provocar patologias nos revestimentos como retração, fissuração e pulverulência.

[26] encontraram valores semelhantes nos RETA gerenciada pela *Midvaal Water Company*, em Londres no que tange a composição granulométrica com 37,5% de areia, 33,42% de silte e 29,1% de argila utilizando o método

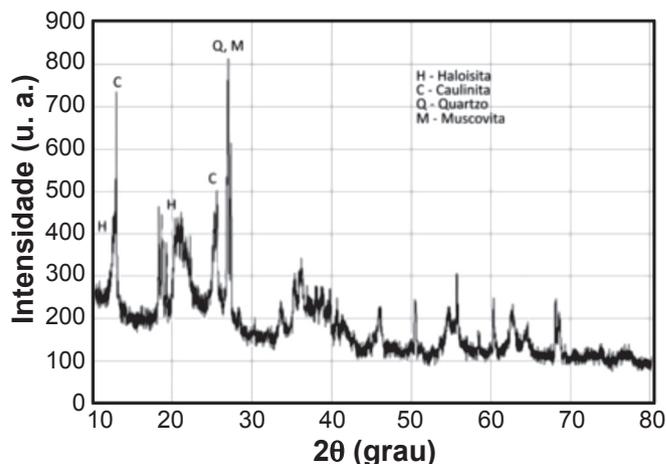


Figura 4: Difratograma de raios X de amostra de resíduo de estação de tratamento de água (RETA).

[Figure 4: X-ray diffraction pattern of water effluent residue.]

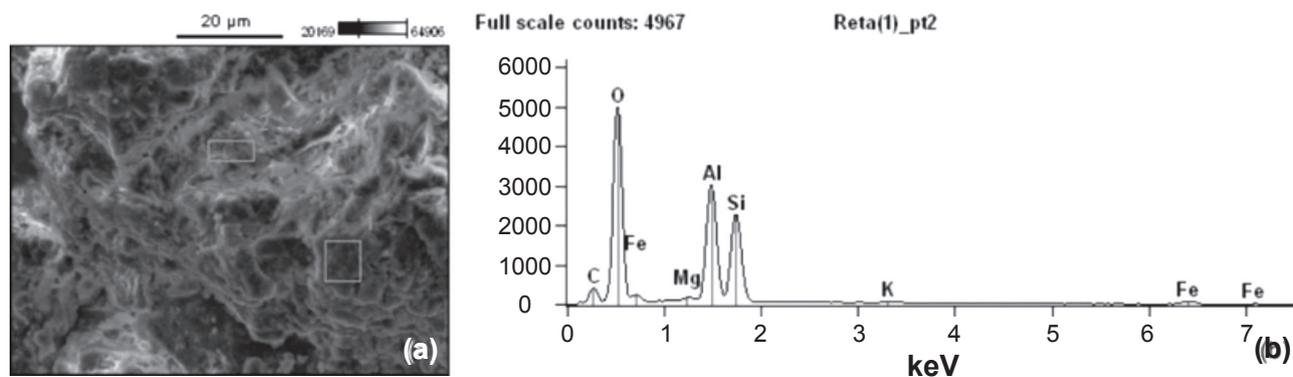


Figura 5: Micrografia do resíduo de estação de tratamento de água obtido por microscopia eletrônica de varredura(a); espectro de composição elemental do RETA obtido com EDS (b).

[Figure 5: SEM micrograph of the residue (a); EDS spectra for the residue (b).]

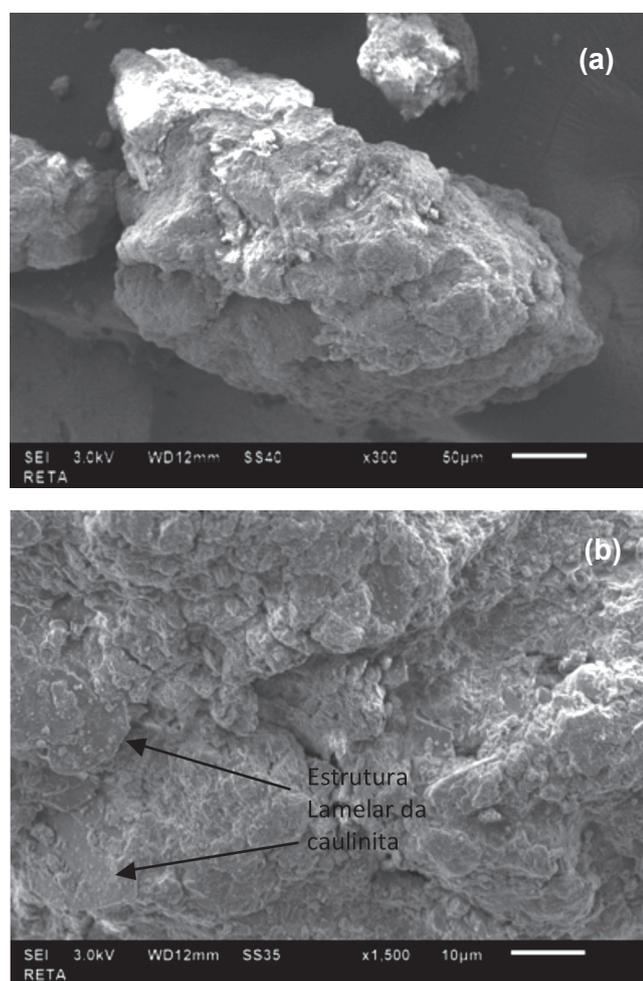


Figura 6: Imagens do resíduo obtidas por microscopia eletrônica de varredura com ampliação de 300 vezes (a) e 1500 vezes (b), possibilitando visualizar a superfície irregular da estrutura e a presença de caulinita (estrutura lamelar).

[Figure 6: SEM micrographs of the residue: 300x (a) and 1500x (b).]

tradicional [12]. Verificaram que o resíduo proveniente da ETA de Campos de Goytacazes, também apresentou alto teor de materiais pulverulentos em torno de 45% [27] ressaltam que o alto teor de fração argila no RETA atrapalha a etapa de homogeneização da mistura e interfere na hidratação do

Tabela II - Resultado da análise da espectrometria de absorção atômica.

[Table II - Atomic absorption spectrometry.]

Parâmetro	Resultado (mg/kg)	LQ (mg/kg)
Alumínio	386,39	0,003
Antimônio	< 0,005	0,005
Arsênio	< 0,005	0,005
Bário	1,291	0,003
Berílio	0,0019	0,0004
Boro	0,497	0,007
Cádmio	< 0,001	0,001
Cálcio	14,93	0,01
Chumbo	< 0,005	0,005
Cobalto	< 0,003	0,003
Cobre	0,465	0,002
Cromo	< 0,003	0,003
Estrôncio	< 0,001	0,001
Ferro	212,47	0,01
Lítio	0,083	0,001
Magnésio	12,85	0,01
Manganês	9,132	0,007
Mercúrio	< 0,0002	0,0002
Molibdênio	< 0,007	0,007
Níquel	0,273	0,007
Potássio	11,449	0,005
Prata	< 0,005	0,005
Selênio	< 0,01	0,01
Sódio	4,19	0,01
Tálio	< 0,001	0,001
Urânio	< 0,01	0,01
Vanádio	< 0,03	0,03
Zinco	0,18	0,02

LQ - Limite de quantificação do método.

cimento, porém o grande percentual de partículas da fração areia fica próxima da recomendada pela [28], que é entre 50 e 70%.

A Fig. 4 ilustra a difratometria de raio X de uma amostra do RETA, com fases cristalinas de haloisita, caulinita, quartzo e muscovita. Esses resultados são parcialmente similares aos encontrados [6]. A micrografia ilustrada na Fig. 5 apresenta a estrutura morfológica do RETA e conforme a análise da microsonda, nota-se a presença concentrada de alumínio; a hipótese é que o sulfato de alumínio, utilizado como coagulante no tratamento da água bruta, além dos hidróxidos de alumínio presentes nas partículas de solo tropical intemperizado, influenciaram na acentuada quantidade de alumínio presente no resíduo. A Fig. 4 mostra ainda o difratograma de raios X do RETA, sendo possível observar alguns minerais na composição do resíduo pelos picos cristalinos, tais como Si, Al, Fe e Mg. Esses elementos também foram encontrados por outros autores [12, 13, 22].

Na Fig. 6 podem ser observadas imagens do RETA com 300 e 1500 vezes de ampliação, onde é possível constatar a superfície irregular dos grãos presentes e sua forma não esférica, bem como a estrutura lamelar de mineral de argila caulinita, muito comum nos solos tropicais.

Embora as exigências para utilização do material como agregado miúdo sejam mais restritas, NM 52 [29], um prévio peneiramento para retirar o material pulverulento pode aproveitar a parcela grossa do mesmo como agregado. Ainda assim, existe possibilidade do aproveitamento da fração fina majoritária como matéria prima na fabricação de cimento Portland, já que é rica em alumínio (principalmente), ferro e magnésio, que servem como fundente no processo de produção. A difração de raios X, realizada durante o ensaio de microscopia eletrônica de varredura detectou a presença de alto teor de alumínio na composição do material, cabe salientar que a sua presença na forma de sulfato de alumínio pode reagir com o C_3A (aluminato tricálcico) do cimento produzindo etringita, que após a hidratação é indesejável por causar expansão, fissuração e patologias nos produtos à base de cimento, a continuação de estudos nessa linha devem levar em consideração aspectos de durabilidade. O alto teor de alumínio na composição pode ser interessante na produção de materiais cerâmicos, pois após a queima colabora no aumento da resistência mecânica do elemento e principalmente na produção de refratários com queima entre temperaturas a 1250 °C e 1450 °C, mas para tanto faz-se necessários mais estudos com o material.

As propriedades encontradas no resíduo da ETA Meia Ponte, que expressam a consistência plástica do material, sugerem uma aplicação moderada, ou seja, em pequenos percentuais na argila para produção dos blocos cerâmicos queimados, pois o silte inorgânico de alta plasticidade provoca deformações e retrações nas peças [12]. Encontraram valores um pouco diferentes, para os limites de Atterberg, no RETA de Campos de Goytacazes, quando comparados com os índices do RETA estudado, porém as classificações de ambos demonstram que pertencem ao mesmo grupo de siltes inorgânicos. E também, recomendam o aproveitamento moderado em cerâmicas vermelhas, para evitar sua retração.

A identificação de elementos utilizando espectrometria de absorção atômica permitiu verificar suas proporções. A

presença em grandes parcelas de alumínio e ferro (386,39 e 212,47 mg/kg) reforçam a presença de seus picos cristalinos no EDS (Tabela II).

A aplicação do RETA do Meia Ponte em artefatos de concreto pode ser indicada, porém em percentuais pequenos e com limite não superior à 5% devido o percentual de finos ser superior à 76%. Conforme [6], que observaram o comportamento dos corpos de prova e concluíram que o percentual de 5% de resíduo da ETA Passaúna é o limite para obtenção de resistência superior à 25 MPa e que percentuais maiores prejudicam a hidratação das peças, na fase de cura, pois os finos do resíduo condiciona o aumento da absorção de água e afeta a relação água/cimento, reduzindo consideravelmente, por este motivo, a resistência mecânica das peças e causando o aumento da absorção de água.

CONCLUSÕES

O resíduo de estação de tratamento de água (RETA) retirado da lagoa de secagem com percentual de umidade relativamente baixo e posteriormente triturado possui parâmetros geotécnicos, como índices de consistência e distribuição granulométrica, compatíveis com os solos tropicais da bacia hidrográfica, bastante intemperizados e ricos em óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Este estudo preliminar aponta que a presença de metais como o alumínio torna o material resistente após a queima, o que dá potencial ao uso do resíduo como adição e/ou matéria prima na produção de materiais cerâmicos como tijolos, telhas e outros. Também, no caso da mistura ao cimento Portland juntamente com outros agregados na produção de artefatos de concreto, não há nada que prejudique o RETA na obtenção de resultados satisfatórios. Sob o ponto de vista de engenharia, o RETA apresentou viabilidade de aproveitamento. Os ensaios de caracterização física mostraram que o resíduo apresenta características comuns a outros materiais empregados na construção civil, ou como insumo para a produção destes. Os índices de consistência do resíduo enquadram o material na faixa típica de uso, entretanto requer-se que seja avaliada sua participação na composição dos traços com percentuais devidamente testados e controlados, verificando a quantidade ideal de resíduo a ser aplicado em substituição ao solo/areia sem que haja prejuízo às propriedades mecânicas e ao desempenho do material produzido, atendendo às exigências das normas específicas.

REFERÊNCIAS

- [1] D.M. Morita, A.O. Sampaio, M.K. Miki, A.C. David, *Revista Saneas* **14** (2002) 7-12.
- [2] L.A. Soares, P.S. Scalize, A.J.C. Albuquerque, *Rev. Monog. Amb.* **14**, 2 (2014) 3154-3163.
- [3] Brasil, Lei Federal 12.305, de 2/08/2010, institui a Política Nacional de Resíduos sólidos, altera a Lei 9.605 de 12/02/1998; e dá outras providências.
- [4] IE/SP - Instituto de Engenharia de S. Paulo, "Relatório

de Conclusões do Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos de Lodos de Estações de Tratamento de Água”, S. Paulo, SP (2008) 11 p.

- [5] C.L. Achon, M.M. Barroso, J.S. Cordeiro, Eng. Sanit. Amb. **18**, 2 (2013) 115-122.
- [6] C. Hoppen, K.F. Portella, A. Joukoski, O. Baron, R. Franck, A. Sales, C.V. Andreoli, V.A. Paulon, Cerâmica **51**, 318 (2005) 85-95.
- [7] A. Yagüe, S. Valls, E. Vázquez, F. Albareda, Cement Concrete Res. **35**, 6 (2005) 1064-1073.
- [8] N.H. Rodríguez, S.M. Ramírez, M.B. Varela, M. Guillem, J. Puig, E. Larrotcha, J. Flores, Cement Concrete Res. **40**, 5 (2010) 778-786.
- [9] J.P.D. Vitorino, S.N. Monteiro, C.M.F. Vieira, Cerâmica **55**, 336 (2009) 385-392.
- [10] K.Y. Chiang, P. H. Chou, C.R. Hua, K.L. Chien, C. Cheeseman, J. Hazard. Mater. **171**, 1 (2009) 76-82.
- [11] S.R. Teixeira, S. A. Souza, N. R. Aléssio, G. T. A. Santos, Cerâmica **52**, 323 (2006) 215-220.
- [12] E.M.S. Oliveira, S.Q. Machado, J.N.F. Holanda, Cerâmica **50**, 316 (2004) 324-330.
- [13] R. Tartari, N. Díaz-Mora, N. Módenes, S.A. Pianaro, Cerâmica **57**, 343 (2011) 288-293.
- [14] A.M. Veiga, M.R.S. Cardoso, N.C. Lino, Rev. Cam. Geog. **14**, 46 (2013) 126-138.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7181, “Solo - Análise granulométrica”, Rio de Janeiro, RJ (1984).
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7180, “Solo - Determinação do limite de plasticidade”, Rio de Janeiro, RJ (1984).
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6459, “Solo - Determinação do limite de liquidez”, Rio de Janeiro (1984).
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 16097, “Solo - Determinação do teor de umidade - Métodos expeditos de ensaio”, Rio de Janeiro, RJ (2012).
- [19] D.M. Burmister, Annual Highway Research Board Meeting, National Research Council, Washington, D.C., EUA **13**, 8 (1949) 121-136.
- [20] B.M. Das, *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*, 6ª Ed., Thomson Learning, S. Paulo, SP (2007) 562.
- [21] C.S. Pinto, *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*, 2ª Ed., Oficina de Textos, S. Paulo, SP (2012) 355.
- [22] L. M. Dias, G. Batalione, F. U. Morais, J. F. Sobrinho, M. C. Ribeiro, M. S. Lisboa, Anais 27º Cong. Interam. Ing. Sanit. Amb., Porto Alegre, RS (2000).
- [23] M.D.P.D. Ingunza, C.V. Andreoli, R.M. Nascimento, J.D. Tinoco, C. Hoppen, E.S. Pegorini, “Uso de resíduos do saneamento na fabricação da cerâmica vermelha”, in C. V. Andreoli (Coord.), Alternativas de uso de resíduos do saneamento, ABES, Rio de Janeiro, RJ (2006) p. 283-359.
- [24] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR7211, “Agregados para concreto - Especificação”, Rio de Janeiro, RJ (2009).
- [25] I. Ribeiro, R.R. Angelim, R.C. Guimarães, Anais 7º Cong. Bras. Mecânica dos Solos e Eng. Geot., Goiânia, GO (2014) 8p.
- [26] L.W. Titshall, J. C. Hughes, Water SA **31**, 3 (2005) 299-308.
- [27] L.P. Rodrigues, J.N.F. Holanda, Cerâmica **59**, 352 (2013) 551-556.
- [28] Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais*, 3ª Ed., ABCP(BT-111), S. Paulo, SP (2000) 16p.
- [29] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NM 52, “Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente”, Rio de Janeiro, RJ (2009). (Rec. 11/05/2015, Rev. 22/07/2015, Ac. 28/07/2015)