

### III-034 - CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS REMOVIDOS NOS GRADEAMENTOS E DESARENADORES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

**Nayara Batista Borges<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutora em Hidráulica e Saneamento na EESC/USP.

**José Roberto Campos<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade de São Paulo. Professor sênior da Universidade de São Paulo – Escola Engenharia de São Carlos.

**Gilcimar Trento Ferreira<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela UNICASTELO. Chefe do setor de operação da ETE Monjolinho do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) São Carlos- SP.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Trabalhador São-carlense, 400 CP 359 São Carlos - CEP 13566-590 - Brasil - Tel: (16) 3379-9534 - e-mail: [naybatista@yahoo.com.br](mailto:naybatista@yahoo.com.br)

#### RESUMO

Os sólidos grosseiros removidos no sistema de tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto (ETE) e, de forma geral, são dispostos em aterros sanitários e lixões, sem preocupação relacionada ao seu potencial de aproveitamento, redução, recuperação e impactos ambientais. Contudo, esses resíduos constituem um importante componente no gerenciamento de estações no que se refere ao manuseio, tratamento e destinação final. Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo demonstrar a potencialidade do aproveitamento dos resíduos removidos no tratamento preliminar de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), tomando-se como referência a ETE Monjolinho em São Carlos-SP (com capacidade de atendimento de 258.000 habitantes). Para atingir este propósito, foi avaliada a potencialidade do uso dos materiais removidos na unidade do tratamento preliminar, como fontes de energia e de matéria-prima, enfocando tema pouco explorado. Foram estudados os resíduos: i) removidos nos gradeamentos grosseiro e fino, visando seu uso como combustível; ii) o material sedimentável retido nos desarenadores, com intuito de utilizá-lo como agregado para argamassa e concreto não estrutural na construção civil. Em relação a cada tipo de resíduo foi possível verificar: i) a potencialidade da geração de energia a partir dos resíduos removidos nos gradeamentos de estações de tratamento de esgoto, tendo em vista os elevados resultados do poder calorífico inferior (4.837 kcal.kg<sup>-1</sup> para resíduos do gradeamento grosseiro e 5.059 kcal.kg<sup>-1</sup> para resíduos do gradeamento fino) e baixos valores na geração de cinzas (15,91% para resíduos do gradeamento grosseiro e 9,60% para resíduos do gradeamento fino); ii) a viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização da areia residual, removida nos desarenadores de ETES, como agregado miúdo na incorporação de argamassas para revestimento e preparação de concreto não estrutural, desde que seja submetida ao procedimento de limpeza e secagem. Diante dos resultados obtidos de resistência à compressão axial e considerando a ideia de utilizar a maior proporção de material residual que seria descartado na ETE, recomenda-se a utilização de até 70% de areia residual como agregado miúdo em argamassas de cimento e cal e concreto magro (não estrutural).

**PALAVRAS-CHAVE:** Aproveitamento de Resíduos de ETE, Concreto não Estrutural, Poder Calorífico, Tratamento de Esgoto, Resíduos do Tratamento Preliminar.

#### INTRODUÇÃO

A Lei nº12.305 (BRASIL, 2010) classifica os resíduos sólidos em nove tipos, sendo que um deles engloba aqueles provenientes de serviços públicos de saneamento básico que, por sua vez, incluem os resíduos retidos no gradeamento e no desarenador – que fazem parte do tratamento preliminar de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Até o presente, no Brasil, a maioria das ETES descarta esses resíduos em aterros sanitários, e até mesmo em “lixões.

A disposição em aterros brasileiros, além do custo inerente ao transporte e ao manuseio, ocupa volume que poderia ser efetivamente destinado aos resíduos sólidos domésticos. Também deve ser considerada a análise

integrada da viabilidade ambiental, técnica, operacional e econômica do aproveitamento dos resíduos, em que se insere o termo desenvolvimento sustentável em ETEs, visando “ao atendimento das necessidades da atual geração, sem comprometer a capacidade das futuras gerações em prover suas próprias demandas.”.

Na operação de unidades de tratamento preliminar de ETEs, quantidades significativas de sólidos grosseiros e areia residual são removidas. A capacidade potencial de geração de energia a partir desses subprodutos, bem como a possibilidade de utilizá-los como matéria-prima para diferentes fins, são premissas ainda não ponderadas com profundidade.

O objetivo deste artigo é o de descrever os principais resultados de pesquisa desenvolvida no tratamento preliminar da ETE Monjolinho – São Carlos-SP, referente à caracterização, quantificação e avaliação da possibilidade de aproveitamento desses materiais como fonte de energia e como matéria-prima, com consequente mitigação de impactos decorrentes da sua disposição. Para tanto, avaliou-se: i) o poder calorífico do material retido no gradeamento, com uso potencial em fornalhas de secadores de lodo; ii) o possível aproveitamento da areia removida como agregado miúdo na incorporação de argamassas para revestimento e preparação de concreto não estrutural.

Além disso, buscaram-se subsídios complementares para avaliar os benefícios técnico, econômico e ambiental decorrentes do aproveitamento desses resíduos, em comparação com as formas usuais praticadas no Brasil, considerando-se: i) que o custo para disposição adequada do material retido no gradeamento e peneiramento em aterros sanitários é elevado; ii) ao se aproveitar a areia removida, além de se mitigar danos ambientais por sua disposição inadequada, pode-se reduzir impactos decorrentes da extração de areia em rios a ser destinado à construção civil.

Por fim, cabe comentar que a pesquisa visou atender um dos objetivos previstos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que é o incentivo ao desenvolvimento de sistema de gestão ambiental e empresarial voltadas para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético. Além de atender a ordem de prioridade estabelecida no Art. 9º da referida lei: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. De acordo com esta ordenação básica, todos os resíduos deverão ser reaproveitados e/ou tratados e somente os rejeitos desses processos poderão ser dispostos em aterros sanitários.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO ETE MONJOLINHO – SÃO CARLOS-SP**

A pesquisa foi desenvolvida no tratamento preliminar da ETE Monjolinho, em São Carlos – SP (Coordenadas: 7560900 N, 19800 E; altitude: 735 m; temperatura média: 20°C). O sistema de tratamento implantado na ETE tem capacidade para atender à vazão média de 636 L.s<sup>-1</sup> e vazão máxima de 1.050 L.s<sup>-1</sup>, sendo constituído por tratamento preliminar, seguido por reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB), floculação, flotação por ar dissolvido, desinfecção com radiação ultravioleta e pós-aeração. Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma simplificado do tratamento preliminar da ETE, por sua vez na Tabela 1, estão apresentadas as características básicas de projeto dos componentes do tratamento preliminar da ETE Monjolinho – São Carlos – SP.

Foi implantada na referida ETE, anexa ao tratamento preliminar, uma unidade experimental do tipo estufa agrícola (Figura 2), visando à secagem dos resíduos removidos nos gradeamentos e desarenadores, com as seguintes características: 6,0 m de comprimento, 4,0 m de largura e 3,0 m de altura, e lona plástica em todo o seu entorno.

Para a secagem dos resíduos (removidos nas grades e areia) foi prevista uma baía para cada tipo de resíduo, com 1,2 m de comprimento e 0,6 m de largura e sistema coletor de líquido drenado, composto por dreno e recipiente para coleta do líquido. Para a classificação dos componentes dos resíduos também foram previstas quatro baias, duas com 0,6 m de comprimento e 0,6 m de largura, e duas com 0,5 m de comprimento e 0,6 m de largura. Em todas foi previsto o sistema coletor de líquido drenado, que conduz o líquido para o sistema de esgoto da ETE, retornando para o tratamento preliminar.

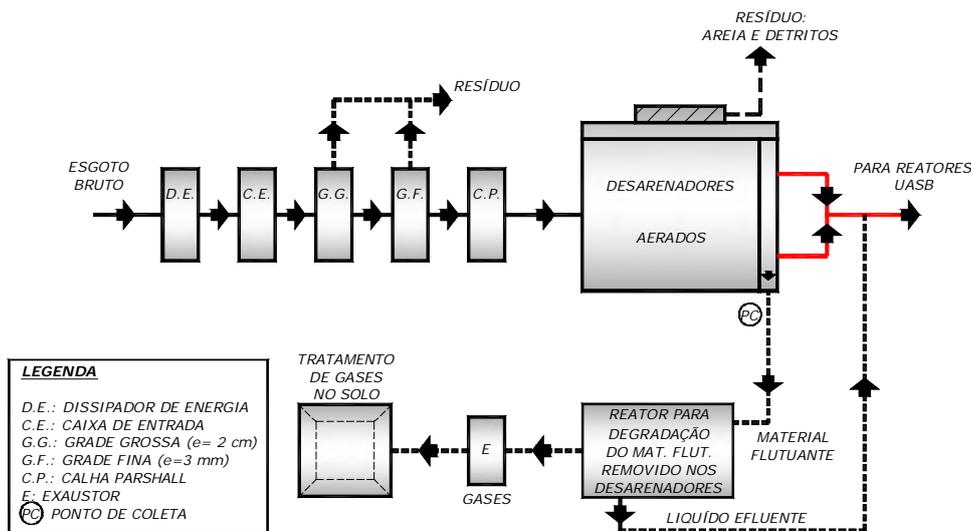


Figura 1 – Fluxograma do tratamento preliminar (TP) da ETE Monjolinho – São Carlos – SP

Tabela 1 – Características básicas de projeto dos principais componentes da ETE Monjolinho – São Carlos – SP.

Discriminação	Características Principais
Grade Grossa	Duas unidades mecanizadas do tipo cremalheira; aberturas: 20 mm
Grade Fina	Duas unidades mecanizadas do tipo escada; aberturas: 3 mm
Calha Parshall	Garganta (W) = 3'. Nessa unidade aplica-se hidróxido de cálcio para ajuste de pH entre 7,0 a 7,4.
Desarenador/Removedor de material flutuante (MF)	Duas unidades aeradas, com raspador superficial em paralelo, cada qual com 72 m <sup>2</sup> de área superficial (630 m <sup>3</sup> m <sup>2</sup> dia <sup>-1</sup> , para Q <sub>MAX</sub> ). Durante a pesquisa, apenas uma unidade estava em operação.
Reator para degradação do material flutuante retido no desarenador/removedor de MF	Volume total de projeto: 156,8 m <sup>3</sup> , com estimativa para TDH média, final de plano, de cerca de 20 dias



Figura 2 – Instalações para secagem e classificação dos resíduos dos gradeamentos grosseiro e fino

## **CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS REMOVIDOS NOS GRADEAMENTOS GROSSEIRO E FINO**

Para quantificação e caracterização dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino, foram coletadas nove amostras, em diferentes épocas do ano (maio de 2012 a agosto de 2013), para cada tipo de gradeamento (grosseiro e fino) ao longo de um dia de operação (24 horas consecutivas). Os resíduos brutos coletados foram quantificados (pesados) e amostras representativas (após mistura e quarteamento) de aproximadamente 1 kg foram retiradas para determinação de sólidos totais e teor de umidade. Posteriormente, parcela do material (aproximadamente 10 kg) coletado foi encaminhada para estufa tipo agrícola, onde era disposta em baias (1,2 m de comprimento e 0,6 m de largura), para secagem durante quinze dias. Durante o processo de secagem foram aferidas temperaturas interna e externa da estufa.

Após o tempo de secagem, antes de iniciar a caracterização dos resíduos, coletavam-se amostras (1 kg) para determinação de sólidos totais e umidade. Em seguida, o material seco era separado e agrupado de acordo com a seguinte tipologia: matéria orgânica (restos de alimentos, animais em decomposição, fios de cabelo, galhos e folhas); plásticos (garrafas pet, tampinhas, embalagens diversas, preservativo); papel (absorventes femininos, fraldas, fragmentos de papel); tecidos (panos, trapos), pedra e outros. Realizou-se a pesagem e medição de volume de cada grupo separadamente.

Também, foi realizada a determinação do poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), segundo a Norma ASTM D 240 (2015), que se baseia na combustão completa do material, com oxigênio puro a volume constante, e na transferência de calor para certa quantidade de água contida em um calorímetro. A amostra do material a ser analisado era inserida no reator do calorímetro (bomba calorimétrica) com pressurização a 30 bar com oxigênio. Devido à especificidade dessa determinação, foi realizado o quarteamento do resíduo seco na unidade experimental, até a obtenção de amostra representativa. Na sequência, a amostra era encaminhada para estufa a 105°C, durante 24 horas e, posteriormente, triturada.

## **CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DA AREIA RESIDUAL REMOVIDA NOS DESARENADORES**

Para quantificação e caracterização da areia retida nos desarenadores da ETE, foram coletadas seis amostras, em diferentes épocas do ano (dezembro de 2012 a agosto de 2014). Cada amostragem abrangeu duas horas de operação dos classificadores de areia, em que cerca de 70 kg de areia foram dispostos sobre lona plástica. A areia foi revolvida e uma amostra de aproximadamente 2 kg, retirada para determinação dos seguintes parâmetros: série de sólidos totais, umidade, coliformes totais e fecais. Para duas dessas amostras, também foi efetuada determinação da distribuição granulométrica. Após, determinou-se a concentração de sólidos totais voláteis e fixos, para verificar as porcentagens de matéria orgânica e do resíduo inerte das frações retidas nesse ensaio.

A amostra coletada, foi encaminhada à unidade experimental para procedimento de limpeza e secagem, com o intuito de reduzir a umidade e a densidade de micro-organismos patogênicos, tornando-a segura do ponto de vista microbiológico para as possíveis aplicações desejadas. Esse procedimento compreendeu as seguintes etapas: i) etapa inicial, em que os resíduos coletados foram dispostos em duas baias, durante cinco dias, para a drenagem/evaporação do líquido (esgoto) que é coletado juntamente com o material. ii) peneiramento (peneira de abertura de 1,18 mm) para remoção de materiais maiores, tais como: bitucas de cigarro, sementes, pedras, palitos de fósforo, entre outros; iii) lavagem com água potável e hipoclorito de sódio (relação areia/água potável de 0,51, relação da solução de hipoclorito de sódio/água potável de 0,03 e tempo de mistura de 10 minutos), visando à inativação de micro-organismos e possível oxidação de parte da matéria orgânica agregada na areia; iv) secagem durante 10 dias.

Para determinar a eficiência dos procedimentos de limpeza e secagem foram realizadas determinações de série de sólidos totais, de umidade e de coliformes totais e fecais, e seus resultados foram comparados com aqueles obtidos para areia bruta, sem lavagem e secagem. Também, foram realizadas as mesmas determinações para areia comercial de referência, com intuito de comparar os resultados.

Após procedimento de limpeza e secagem, foram avaliadas as possibilidades de utilização da areia residual em concreto não estrutural. Para tanto, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e

200 mm de altura) com traço 1:3:2 (cimento:areia:brita), em massa, e após a idade de 28 dias verificaram-se as resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral. Foram realizados ensaios utilizando substituição da areia comercial pela areia residual nas proporções de 100%, 80%, 70%, 50%, 30% e 0%.

Também, foram avaliadas as possibilidades de utilização da areia residual em argamassa para revestimento externo. Para tanto, foram moldados corpos de prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) com traço 1:1:6 (cimento:cal hidratada:areia), em massa, e realizados ensaios de resistência à compressão axial na idade de 28 dias. Foram realizados ensaios utilizando substituição da areia comercial pela areia residual nas proporções de 100%, 50%, 30% e 0%.

Ressalta-se que quando se pretende fazer estudo comparativo entre dois materiais é importante que ambos possuam algumas características em comum, para então poder observar seu comportamento perante suas propriedades. Por esse motivo a areia comercial foi submetida à etapa de peneiramento (abertura de 1,18 mm), antes da realização das análises – assim como a areia retida no desarenador da ETE.

A caracterização da areia residual e da areia comercial envolveu as seguintes análises: distribuição granulométrica, determinada segundo a NBR 248 (ABNT 2003); massa unitária e massa específica aparente, conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006) e a NBR NM 52 (ABNT, 2009), respectivamente.

## RESULTADOS

### CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS REMOVIDOS NOS GRADEAMENTOS GROSSEIRO E FINO

A Tabela 2 apresenta os valores médios da composição, expressa em teor de sólidos, dos resíduos dos gradeamentos grosseiro e fino antes e após do processo de secagem, ao passo que a Figura 3, contém os resultados médios das caracterizações físicas dos resíduos do gradeamento grosseiro e fino.

**Tabela 2 – Composição, expressa em teor de sólidos, dos resíduos dos gradeamentos grosseiro e fino antes e após do processo de secagem (15 dias em estufa agrícola)**

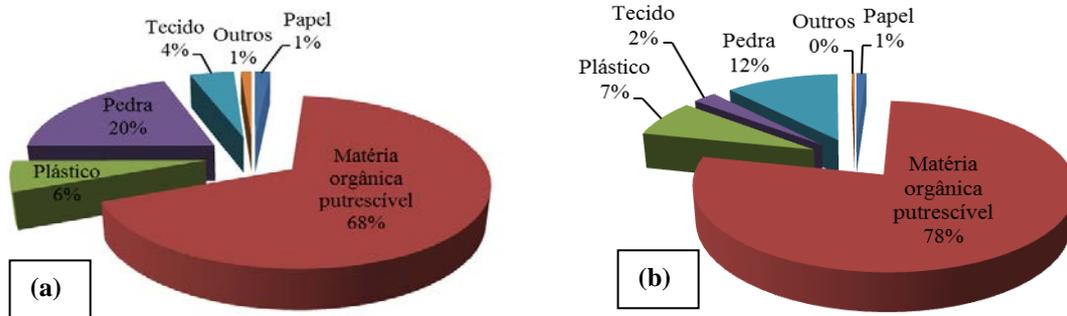
Parâmetro	Unidade	Gradeamento grosseiro		Gradeamento fino	
		Antes	Após	Antes	Após
Umidade	(%)	83,2 ± 2,86	8,9 ± 5,11	83,9 ± 4,49	6,7 ± 2,16
Sólidos Totais	(%)	16,8 ± 2,86	91,1 ± 5,11	16,1 ± 4,49	93,3 ± 2,16
Sólidos Totais Fixos	(%)	13,5 ± 4,10	14,6 ± 4,27	9,9 ± 2,65	10,3 ± 2,68
Sólidos Totais Voláteis	(%)	86,5 ± 4,10	85,4 ± 4,27	90,1 ± 2,65	89,7 ± 2,68

Diante dos resultados apresentados na Tabela 2 constatou-se que:

- A maior parcela do teor de sólidos totais é orgânica: para os resíduos do gradeamento grosseiro, em torno de 86,5 % antes do processo de secagem e 85,4% após processo de secagem; no caso dos resíduos do gradeamento fino, cerca de 90,1% antes do processo de secagem e 89,7% após processo de secagem;
- Os resíduos apresentaram alto teor de umidade 83,2% e 83,9% para os gradeamentos grosseiro e fino, respectivamente; e por esse motivo foi realizada a secagem dos mesmos em estufa agrícola, demonstrando que tal processo foi eficaz, tendo em vista que se obteve eficiência média de remoção de umidade de aproximadamente 89% (gradeamento grosseiro) e 92% (gradeamento fino).
- Após secagem de 15 dias (temperatura média interna da estufa de 25,8° C), os teores de sólidos totais voláteis para resíduos dos gradeamentos grosseiro (85,4%) e fino (89,7%) estão em consonância com os valores obtidos por Le Hyaric *et al.* (2009), que obtiveram, após secagem por uma semana a 80°C, teor de matéria volátil dos resíduos retidos em grades com espaçamento entre barras variando de 3 a 60 mm, de 70,0% a 90,5% de massa seca.

A estimativa da relação entre volumes de resíduos retidos e de esgoto afluyente, a partir dos dados médios disponibilizados pelo setor de operação da ETE Monjolinho, foram 4,2 L(1.000 m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> para o gradeamento grosseiro e 3,7 L(1.000 m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> para o gradeamento fino. Os valores da referida ETE foram muito inferiores aos encontrados na literatura técnica internacional – da ordem de 22 L(1.000 m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> para grades com abertura de 25

cm e 67 L(1.000 m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> para grades com aberturas de 6 cm (METCALF & EDDY, 2015), entretanto, mais aproximado aos dados nacionais, em que há referência da produção de 5,0 L(1.000 m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> para ETE Piçarrão (Campinas-SP) e 6,0 L(1.000 m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> para ETE Goiânia-GO (SILVIA e CARVALHO, 2007). Os menores valores encontrados na ETE Monjolinho podem ser atribuídos ao bom nível educacional da população da cidade; ou deficiências nos conjuntos de gradeamento.



**Figura 3 – Caracterização física (média) dos resíduos sólidos retidos nos gradeamentos: (a) grosseiro e (b) fino.**

Em complemento à caracterização físico-química dos resíduos foram efetuadas determinações do poder calorífico dos resíduos retidos nos gradeamento, visando conhecer sua potencialidade para geração de energia. Os principais dados são apresentados na Tabela 3.

**Na Tabela 3 – Resultados médios do poder calorífico e teores de sólidos e cinzas dos resíduos dos gradeamentos grosseiro e fino, após secagem.**

Parâmetro	Unidade	Gradeamento Grosseiro		Gradeamento fino	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Porcentagem de sólidos	% p p <sup>-1</sup>	98,40	1,21	95,57	6,79
Poder Calorífico Inferior (PCI)	kcal.kg <sup>-1</sup>	4.837	730	5.059	757
Poder Calorífico Superior (PCS)	kcal.kg <sup>-1</sup>	5.219	778	5.464	817
Cinzas (base seca)	% p p <sup>-1</sup>	15,91	7,02	9,60	4,37
Cinzas (base úmida)	% p p <sup>-1</sup>	15,66	6,88	9,24	4,55

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3 verifica-se que:

- Os valores do poder calorífico dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino foram elevados quando comparados aos valores médios relatados na literatura técnica especializada para resíduos sólidos urbanos (valores médios de PCS variando na faixa de 1.687 a 4.551 kcal kg<sup>-1</sup> e valores médios de PCI variando na faixa de 1.027 a 4.142 kcal kg<sup>-1</sup>) e lodo de estação de tratamento de esgoto (valores médios de PCS variando na faixa de 2.102 a 4.801 kcal kg<sup>-1</sup> e valores médios de PCI variando na faixa de 2.054 a 4.442 kcal kg<sup>-1</sup>), conforme dados apresentados por Borges (2014);
- Nesse contexto, destaca-se que o valor médio do poder calorífico inferior dos resíduos removidos no gradeamento fino (5.059 kcal kg<sup>-1</sup>) foi superior ao resultado obtido para os resíduos retidos na peneira rotativa da ETE de Adelanto-CA – USA de 4.299,23 kcal kg<sup>-1</sup> (GIKAS *et al.* 2010);
- O poder calorífico dos resíduos removidos no gradeamento fino foi superior ao do gradeamento grosseiro, tendo em vista que apresenta maior teor de sólidos voláteis e menor teor de cinzas;
- Constatou-se que a geração de energia a partir dos resíduos removidos nos gradeamentos de ETEs é tecnicamente viável, o que pode ser corroborado com a comparação do índice de PCI, indicado pela EPE (2014), que condiciona a viabilidade a valores maiores que 2.000 kcal kg<sup>-1</sup>.

Com os resultados obtidos do poder calorífico e do teor de sólidos totais dos resíduos removidos em cada gradeamento foi possível determinar a quantidade potencial de energia que pode ser gerada com a combustão desses resíduos, lembrando que a queima do material decorre também na geração de cinzas e de gases, que, obrigatoriamente, deverão ser tratados, antes do lançamento na atmosfera. Na Tabela 4 encontram-se os resultados da potencialidade da geração de energia e de cinzas para cada tipo de gradeamento, tomando-se como referência a massa bruta de 1 tonelada, após secagem.

**Tabela 4 – Potencialidade da produção de energia e cinzas no processo de queima dos resíduos removidos nos gradeamentos**

Tipo de gradeamento	Massa bruta (t)	Material seco <sup>1</sup> (kg)	Material seco <sup>2</sup> (kg)	Energia potencial (kcal <sup>t-1</sup> )	Energia gerada <sup>3</sup> (kcal <sup>t-1</sup> )	Energia gerada (kWh <sup>t-1</sup> )	Quantidade de cinzas (kg)
Grossoiro	1,0	160	143	693.048	173.262	202	22,8
Fino	1,0	137	122	617.486	154.372	180	11,7

<sup>1</sup> refere-se à massa de sólidos após a operação de secagem em estufa agrícola durante 15 dias

<sup>2</sup> refere-se à massa de sólidos em estufa de laboratório a 100 °C após 24 horas, procedimento utilizado para determinação do poder calorífico

<sup>3</sup> 1 kcal = ~ 1,16Wh

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4 e da quantidade média dos resíduos removidos na ETE Monjolinho (3,0 toneladas para gradeamento grossoiro e 4,0 toneladas para gradeamento fino), estimou-se a geração mensal de energia com a queima desse tipo de material, obtendo valor total de aproximadamente 1.505 kWh (786 kWh para os resíduos do gradeamento grossoiro e 719 kWh para os resíduos do gradeamento fino).

Cabe enfatizar que no presente caso a geração de energia utilizando apenas os resíduos removidos nos gradeamentos da estação de tratamento de esgoto não seria rentável, tendo em vista sua baixa quantidade e o elevado custo de implantação de instalações e de equipamentos para esse fim. Uma possível solução para viabilizar a queima desses resíduos, seria enviá-los às centrais de geração de energia de resíduos sólidos urbanos ou unidades de grandes ETEs, ou, ainda, para secadores térmicos de lodo na própria ETE.

No Brasil, apesar da pouca utilização, a secagem térmica surgiu como atraente alternativa visando à redução no volume e/ou reaproveitamento do lodo, devido à crescente quantidade de lodo produzido, aliada a pouca disponibilidade de aterros sanitários.

## CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DA AREIA RESIDUAL REMOVIDA NOS DESARENADORES

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados das determinações relacionadas com a areia residual removida nos desarenadores, antes e após procedimento de limpeza e secagem, e da areia de referência (areia comum).

**Tabela 5 – Dados referentes aos resíduos sedimentados nos desarenadores, antes e depois da limpeza e secagem, e da areia comercial de referência**

Parâmetro	Unidade	Areia residual		Areia referência
		Antes (n=6)	Após (n=4)	(n=1)
Coliformes Totais	UFC.(100 mL) <sup>-1</sup>	3,84E+07	1,96E+02	1,6 x 10 <sup>3</sup>
E. Coli	UFC.(100 mL) <sup>-1</sup>	5,22E+06	Ausência	Ausência
Sólidos Totais	(%)	85,2 ± 3,60	99,9 ± 0,39	99,9
Sólidos Totais Fixos	(%)	96,9 ± 1,07	99,0 ± 0,13	99,9
Sólidos Totais Voláteis	(%)	3,1 ± 1,07	1,0 ± 0,13	0,1
Porcentagem de umidade	(%)	14,8 ± 3,69	0,10 ± 0,39	0,1

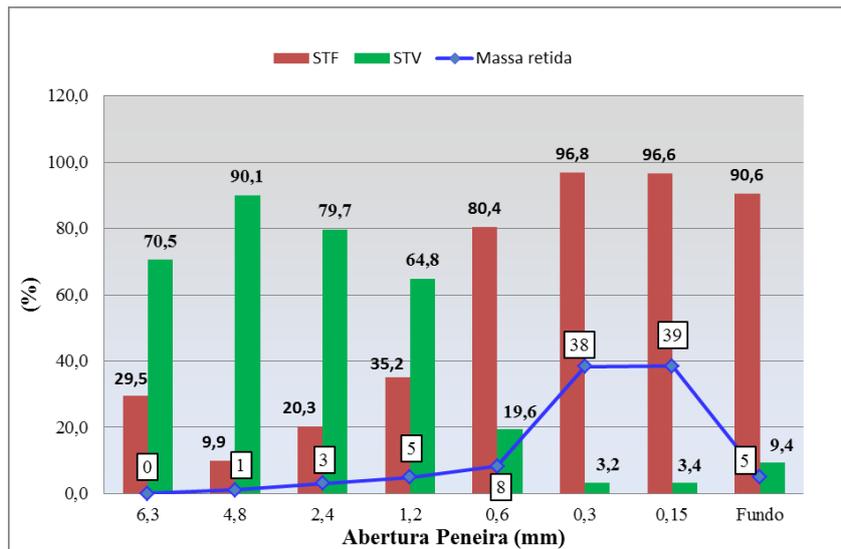
n: número de amostra

De acordo com os dados apresentados na Tabela 5, verificou-se que:

- Os resíduos antes do procedimento de limpeza e secagem apresentaram elevada porcentagem de sólidos totais fixos, alto teor de umidade e densidade expressiva de coliformes totais e fecais, demonstrando a necessidade de tratamento com o objetivo de eliminar ou reduzir significativamente a densidade de micro-organismos patogênicos, a fim de torná-la segura do ponto de vista microbiológico, bem como diminuir a quantidade de água e material orgânico, viabilizando as possíveis aplicações desejadas;

- O procedimento de limpeza e secagem utilizado foi eficaz, obtendo-se as seguintes eficiências de remoção: 98,8% de umidade e 67,1% de sólidos totais voláteis, e, decaimento bacteriano médio de 5 e 6 unidades logarítmicas para coliformes totais e *E.Coli*, respectivamente.
- A areia residual após procedimento de limpeza e secagem apresentou características semelhantes à areia de referência (comercial), mostrando valores pouco superiores para os sólidos totais voláteis, *E.Coli* e umidade.

As porcentagens de sólidos totais voláteis e sólidos totais fixos encontrados em cada fração retida nas peneiras dos ensaios de granulometria estão representadas na Figura 4.



**Figura 4 – Composição das frações orgânicas e minerais retidas nas peneiras no ensaio de granulometria da areia residual antes do procedimento de limpeza e secagem.**

De acordo com os resultados apresentados na Figura 3, constatou-se menor concentração de resíduos orgânicos nas frações retidas nas peneiras de abertura menor, demonstrando que para possível aproveitamento desse resíduo é fundamental reduzir a parcela de matéria orgânica presente.

Na Tabela 6 apresentam-se as características dos agregados miúdos (areia residual após limpeza e secagem e areia de referência) utilizados na confecção dos corpos de prova.

**Tabela 6– Características dos agregados utilizados na confecção dos corpos de prova**

Parâmetro	Unidade	Norma ANBT	Areia residual	Areia de referência	Brita n° 1
Massa unitária	kg.L <sup>-1</sup>	NM 45/06	1,45	1,60	1,57
Massa específica aparente	g.cm <sup>-3</sup>	NM 52/09	2,44	2,62	—
Diâmetro máximo	mm	NBR 248/03	1,18	1,18	6,30
Módulo de finura	-	NBR 249/03	1,57	1,67	4,84

Conforme valores apresentados na Tabela 6 verificou-se que a areia residual e a areia de referência apresentaram características bastante semelhantes. Ambas as areias apresentaram baixo módulo de finura, indicando a presença de alta porcentagem de matéria fina. A massa unitária e a massa específica dos agregados utilizados apresentam valores próximos dos usualmente encontrados na literatura, e, portanto, são resultados coerentes e satisfatórios, demonstrando que o material analisado pode ser utilizado como agregado miúdo na construção civil.

Na Tabela 7 encontram-se os resultados dos ensaios de resistência na compressão axial aos 28 dias, que utilizaram as seguintes porcentagens da areia residual 100%, 80%, 70%, 50%, 30% e 0% como agregado miúdo na preparação do concreto. Por sua vez, na Tabela 8 estão apresentados os resultados das resistências à

compressão axial, aos 28 dias, das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens crescentes de 0%, 30%, 50% e 100%.

**Tabela 7- Resultados dos ensaios de resistência dos corpos de prova confeccionados com substituição total e parcial da areia comercial por areia residual comum aos 28 dias de cura**

Parâmetro	Resistência na compressão axial (MPa)					
	100% AR+ 0% AC	80% AR+ 20% AC	70% AR+ 30% AC	50% AR+ 50% AC	30% AR+ 70% AC	0% AR+ 100% AC
Mínimo	6,8	10,8	12,3	13,6	17,0	19,6
Máximo	12,5	11,0	13,4	15,7	18,1	20,1
Média Aritmética	9,7	10,9	12,8	14,9	17,4	19,8
Mediana	9,1	11,0	12,8	15,2	17,1	19,8
Desvio Padrão	1,4	0,1	0,5	0,7	0,4	0,2
$f_{ck}$	7,3	10,8	12,0	13,7	16,7	19,5

AR: areia residual e AC: areia comercial

Resistências características do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ) =  $f_{cm} - 1,65 \times s$ . Em que:  $f_{cm}$  é a média aritmética dos valores de  $f_c$  para o conjunto de corpos de prova ensaiados e  $s$  é o desvio padrão.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7, verificou-se que houve acréscimo nos valores de  $f_{ck}$  à medida que se aumentou a quantidade de areia comercial. Os aumentos em relação aos ensaios com 100% de areia residual foram: 46,6%, 63,7%, 86,9%, 127,1% e 165,1%, respectivamente, para as seguintes porcentagens de areia comercial adicionada: 20%, 30%, 50%, 70% e 100%.

A ideia do presente estudo é de utilizar o concreto confeccionado com areia produzida na ETE para execução de serviços da própria concessionária que a gerencia, tais como: calçadas, guias, sarjetas, contra piso. Como não existe norma técnica com os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos do saneamento básico para essas utilizações (concreto não estrutural), foram adotados como referência os valores de resistência característica à compressão dispostos na norma NBR 15116 (ABNT, 2004) para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

Dessa forma, constatou-se que os resultados de resistência do concreto preparados com a mistura da areia residual com a areia comercial comum em todas as proporções analisadas foram satisfatórios para utilizações sem função estrutural, tendo em vista que seus valores de  $f_{ck}$  foram superiores a 10 MPa (limite mínimo previsto na norma NBR 15116). Com os resultados referentes à resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ), uma proporção de 80% de areia residual e 20% de areia comercial poderia ser utilizada (maior que 10 MPa); contudo, por segurança, seria mais apropriado considerar-se a proporção de 70% de areia residual e 30% de areia comercial.

**Tabela 8- Resultados dos ensaios de resistência das argamassas preparadas com substituição total e parcial da areia residual por areia comercial comum aos 28 dias de cura**

Parâmetro	Resistência na compressão axial (MPa)			
	100% AC+ 0% AR	70% AC+ 30% AR	50% AC+ 50% AR	0% AC+ 100% AR
Mínimo	6,0	5,7	5,2	5,0
Máximo	8,3	6,0	7,1	5,9
Média Aritmética	7,4	5,8	6,2	5,4
Mediana	7,7	5,8	6,3	5,3
Desvio Padrão	0,9	0,1	0,7	0,3
$f_{ck}$	5,97	5,61	5,02	4,82

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 8, verifica-se que:

- Redução na resistência à compressão axial à medida que se aumentava a areia comercial pela areia residual. As reduções em relação às argamassas sem incorporação de areia residual (100% AC + 0% AR) foram de aproximadamente 6,0%, 15,9% e 19,2% para, respectivamente, as adições de 30%, 50% e 100% da areia residual;

- Todas as argamassas avaliadas foram classificadas com classe 4 de acordo com a NBR 13281 (ABNT,2005) para assentamento e revestimento de paredes e tetos, pois as resistências características à compressão, aos 28 dias, foram superiores a 4,0 MPa e inferiores a 6,5 MPa.

Na Tabela 9 apresenta-se comparação entre as despesas atuais com a areia removida nos desarenadores da ETE Monjolinho (disposição em aterro sanitário) e o possível custo para possível aproveitamento dessa areia. Evidentemente trata-se apenas de uma estimativa de custo preliminar e que depende do porte da ETE e condições locais. Além disso, deve ser ressaltado que se trata de uma avaliação específica para o cenário vigente na ETE Monjolinho São Carlos-SP (custo com transporte e disposição de R\$ 160.t<sup>-1</sup> e produção média de areia removida nos desarenadores de 25 t.mês<sup>-1</sup> – dados referentes ao mês de maio de 2014).

**Tabela 9 – Comparação entre possíveis alternativas para areia removida na ETE Monjolinho: aproveitamento e disposição em aterros em R\$.mês<sup>-1</sup> (maio de 2014).**

Alternativa para areia	Custo (R\$.mês <sup>-1</sup> )	Benefício (R\$.mês <sup>-1</sup> )	Custo total final (R\$.mês <sup>-1</sup> )
Aproveitamento	5.357,43	868,97	4.488,47
Disposição em aterro sanitário	4.000,00	-	4.000,00

O valor de R\$ 868,97 apresentado na Tabela 9 refere-se ao o retorno financeiro que a areia trará para estação, ou seja, a ETE deixaria de comprar areia comercial. Esse benefício foi estimado com base nos dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, em que o preço da areia fina, no Estado de São Paulo, é em torno de 56 R\$/m<sup>3</sup> sem considerar o valor do transporte (maio de 2014).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 9, verificou-se que o aproveitamento da areia resultou em maiores custos que sua disposição em aterro sanitário. Ressalta-se que essa comparação é específica para cada ETE, tendo em vista que envolve o custo do transporte, o qual é diretamente proporcional à distância entre a estação e o aterro credenciado para receber esse tipo de resíduo, e o custo da disposição. Segundo informações da Gerência, a ETE Monjolinho apresentou custo total para dispor a areia em aterros sanitários (160 R\$.t<sup>-1</sup>) inferior aos valores disponibilizados por outras ETES da região (que variou na faixa de 200,00 a 250,00 R\$.t<sup>-1</sup>). Portanto, sob ponto de vista econômico, a vantagem do aproveitamento da areia está condicionada ao porte da ETE e a distância da mesma ao aterro sanitário, sendo mais vantajosa para ETES de grande porte (maior valor do benefício em função da maior produção de areia) e situadas em locais onde os aterros sanitários são mais distantes.

## CONCLUSÕES

As conclusões desta pesquisa referem-se ao cenário vigente na ETE Monjolinho SAAE- São Carlos- SP (com capacidade de atendimento de 258.000 habitantes), que pode ser considerada uma ETE de porte médio. Os resultados obtidos demonstraram a expressiva potencialidade técnica, econômica e ambiental, no que se refere ao aproveitamento energético dos resíduos retidos nos gradeamentos e ao uso da areia removida em desarenador como agregado miúdo na construção civil, em substituição à areia comum comercial.

As análises de poder calorífico e teor de cinzas demonstraram a potencialidade da geração de energia a partir dos resíduos removidos nos gradeamentos de estações de tratamento de esgoto, tendo em vista os elevados resultados do poder calorífico inferior (4.837 kcal.kg<sup>-1</sup>, para resíduos do gradeamento grosseiro; e, 5.059 kcal.kg<sup>-1</sup> para resíduos do gradeamento fino) e baixos teores de cinzas (15,91%, para resíduos do gradeamento grosseiro; e, 9,60% para resíduos do gradeamento fino).

Verificou-se a viabilidade da utilização da areia residual, removida nos desarenadores de ETES, como agregado miúdo na incorporação de argamassas para revestimento e preparação de concreto não estrutural, desde que seja submetida ao procedimento de limpeza e secagem. Esse procedimento tem como objetivo reduzir significativamente a densidade de micro-organismos patogênicos e remover matéria orgânica, uma vez que esse tipo de resíduo apresentou alto teor de umidade (17,3%), quantidade significativa de sólidos totais voláteis (3,9%) e densidades expressivas de coliformes totais [3,84 x 10<sup>7</sup> (100 mL)<sup>-1</sup>] e fecais [5,22 x 10<sup>5</sup> (100 mL)<sup>-1</sup>]. Diante dos resultados obtidos de resistência à compressão axial e considerando a ideia de utilizar a

maior proporção de material residual que seria descartado na ETE, recomenda-se a utilização de até 70% de areia residual como agregado miúdo em argamassas de cimento e cal e concreto magro (não estrutural).

Em relação ao aspecto ambiental, a pesquisa demonstrou que aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento preliminar de ETEs atendeu a ordem de prioridade estabelecida no Art. 9º da Lei 12.305/2010, em que todos os resíduos deverão ser reaproveitados e/ou tratados e somente os rejeitos desses processos poderão ser dispostos em aterros sanitários.

Somado a isso, os resíduos removidos no tratamento preliminar de ETEs, que antes eram rejeitos passaram a ser matéria-prima, apresentando vantagens como a economia de recursos naturais e a preservação do meio ambiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM D 240. American Society for Testing Materials In: Annual Book of ASTM Standards, D-240. Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. West Conshohocken, PA: ASTM, 2014.
2. Associação Brasileira De Normas Técnicas (2005). NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro.
3. \_\_\_\_\_. NBR 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 2003.
4. \_\_\_\_\_. NBR 15116. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2004.
5. \_\_\_\_\_. NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. RJ, 2006.
6. \_\_\_\_\_. NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, RJ, 2009.
7. BRASIL, Lei Federal Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Brasília, v. 1, 2010.
8. BORGES, N. B. Aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto. 2014. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
9. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA -EPE. Balanço Energético Nacional. Rio de Janeiro, 2014 – Ano base: 2013. Disponível: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2014.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf)>. Acesso em: 12 Dez. 2016.
10. GIKAS, P.; NOLL, S.A.; STEDMAN, K. and TCHOBANOGLIOUS, G. The Characterization and testing of wastewater fine screen fresh solids for suitability as a gasification feedstock. In: Proc. 2nd International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management, 2010, Chania. p. 5-8, Chania, 2010.
11. LE HYARIC, R.; CANLER, J. P.; BARILLON, P.; GOURDON, R. Characterization of screenings from three municipal wastewater treatment plants in the region rhône-alpes. Water Science and Technology, v. 60, n. 2, p. 525-531, 2009.
12. METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. McGraw Hill Brasil, 2015
13. SILVA, M. F.; CARVALHO, E. H. Otimização do tratamento preliminar da ETE-Goiânia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABES. 2007.