

USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA CENTRIFUGADO EM MATRIZ DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND PARA REDUZIR O IMPACTO AMBIENTAL

Cintha Hoppen

Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, 81531-980 Curitiba - PR

Kleber F. Portella*, **Alex Joukoski** e **Eduardo M. Trindade**

Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, CP 19067, 81531-980 Curitiba - PR

Cléverson V. Andreóli

Companhia de Saneamento do Paraná, Rua Engenheiro Rebouças, 1376, 80215-900 Curitiba - PR

Recebido em 4/3/05; aceito em 18/5/05; publicado na web em 8/9/05

THE USE OF CENTRIFUGED SLUDGE FROM A WATER TREATMENT PLANT (WTP) IN PORTLAND CEMENT CONCRETE MATRICES FOR REDUCING THE ENVIRONMENTAL IMPACT. An alternative application of the humid sludge from the Passaúna WTP, located in Curitiba's metropolitan area, is proposed for concrete structures, partially replacing aggregates and cement. For the investigation, a reference concrete and four concrete mixtures with sludge were produced, and from these, two mixtures, containing 4% and 8% of sludge (m/m), were analyzed by different techniques: X ray fluorescence, X ray diffraction, thermogravimetric analysis, physicochemical analysis, compressive strength, etc. The properties were evaluated and the results indicate that the mixtures can be applied in different situations as cast structures for construction of concrete walls. Mixtures with more than 4% of sludge are restricted to applications where the workability of the concrete is not required, such as for residential pavements, sidewalks and stepping floors.

Keywords: concrete; disposal; WTP sludge.

INTRODUÇÃO

A demanda por água potável e a má qualidade da água dos rios está exigindo maiores concentrações de produtos químicos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs), gerando maior quantidade de resíduos, denominados lodos de ETA.

Há muito tempo o destino deste material vinha sendo os cursos d'água próximo às estações. No entanto, as atuais legislações estão restringindo e, até mesmo, proibindo esta prática. Segundo a NBR 10.004/87¹ e a Lei Estadual 12.493/99² estes lodos, classificados como resíduos sólidos, devem ser minimizados, reutilizados e/ou reciclados, ficando proibido seu lançamento em corpos d'água.

Para transformar a água bruta em potável, as ETAs utilizam processos como coagulação, floculação, decantação e filtração dos resíduos, os quais são, normalmente, constituídos de partículas coloidais de natureza química, física e/ou biológica^{3,4}. De acordo com Richter⁵, o lodo de ETA é considerado como um resíduo composto de água e sólidos suspensos contidos na própria água, acrescidos dos produtos químicos aplicados durante o processo de seu tratamento. Grandin *et al.*⁶ complementam essa constituição com resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, tais como algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, areias, argila, siltes, cálcio, magnésio, ferro, manganês, etc. Outros metais pesados podem fazer parte dos sedimentos em águas fluviais devido a poluentes arrastados pelo deflúvio superficial urbano ou mesmo por despejos de efluentes industriais nos mananciais que alimentam as estações de tratamento⁷.

A quantidade de lodo é dependente da qualidade físico-química das águas bruta e tratada e dos coagulantes e produtos utilizados no processo de sua potabilização. Desta forma, o volume gerado

passa a ser diretamente proporcional à dosagem de coagulante utilizado no processo, o qual varia entre 0,2 e 5% do volume total de água tratada pela ETA⁵.

A identificação de possíveis impactos ambientais, das formas de tratamento da água e de disposição final do lodo podem ser antecipadas pela determinação qualitativa e quantitativa de sua composição química, da distribuição e tamanho das partículas, da filtrabilidade e de sua resistência específica⁸.

Alguns metais, como cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo, manganês e, em especial, alumínio, presentes no lodo de ETA, possuem ações tóxicas, podendo apresentar efeitos positivos ou negativos nas técnicas de tratamento, na disposição final e, até mesmo, na reutilização destes resíduos⁹.

Como já comentado, a qualidade também é afetada pelo grau de pureza e pelos tipos de coagulante e auxiliares utilizados no tratamento da água bruta, sendo suas concentrações dependentes da sazonalidade^{10,11}. Saron e Leite¹² complementam que pode ocorrer variação destas características, também em função da tecnologia usada no processo de tratamento de água utilizado.

Segundo Sartori e Nunes¹³ o lodo é composto, quase que integralmente, de partículas finas a coloidais, havendo predominância de fração argilosa quando o mesmo é removido no decantador.

O teor de sólidos totais presentes em um lodo de ETA varia entre 1.000 e 40.000 mg/L, sendo 75 a 90% (partes por volume - ppv) de sólidos suspensos e 20 a 35% (ppv) de compostos voláteis apresentando, portanto, pequena porção biodegradável que pode ser prontamente oxidável⁵.

Os coagulantes mais utilizados no tratamento de água são à base de sais de ferro e alumínio¹⁴. Os lodos obtidos com ambos os materiais são muito semelhantes e apresentam coloração marrom e marrom avermelhada, respectivamente, com viscosidade e consistência que lembram chocolate líquido, além de possuírem difícil sedimentação ou flotação em seu estado natural sendo que, quase sempre, necessitam da adição de polímeros^{5,11}.

*e-mail: portella@lactec.org.br

Atualmente, a busca por alternativas econômica e tecnicamente viáveis, além de ambientalmente vantajosas para a destinação final do lodo de ETA, é um grande desafio. Sua utilização benéfica pode ser considerada uma oportunidade para aumentar a receita das empresas de saneamento mas, principalmente, reduzir custos e impactos ambientais associados a este resíduo³.

No estado do Paraná são produzidos, aproximadamente, 4.000 t/mês em matéria seca deste lodo, sendo que, mais de 50% é oriundo da cidade de Curitiba.

Dentre os diversos métodos de reutilização ou destinação final destes resíduos há a possibilidade do seu emprego direto na construção civil¹⁵⁻¹⁷. Tal prática, além de reduzir o impacto ambiental, pode trazer, como vantagem, a diminuição do consumo de agregados naturais e do cimento¹⁶, uma vez que o setor consome entre 14 e 50% de todos os recursos naturais extraídos do planeta e que só no Brasil, em 2000, foi estimado um consumo anual da ordem de 210 milhões de t de agregados¹⁸.

Em função destes fatos, foi idealizado o presente trabalho para avaliação da incorporação do lodo de ETA *in natura* (centrifugado) utilizando, como estudo de caso, os resíduos da ETA Passaúna, localizada na região metropolitana de Curitiba, por representar o maior volume de material gerado no estado do Paraná e por possuir sistema de tratamento similar ao de muitas ETAs do Brasil.

PARTE EXPERIMENTAL

O trabalho foi constituído em 3 etapas. Na primeira etapa, caracterizaram-se os insumos artificiais, de forma a se obter um material composto e representativo do resíduo gerado pela ETA durante um determinado período do ano (cerca de 2 meses de compostagem semanal). Esta caracterização se deu pelas análises de umidade, densidade, perda ao fogo e análise química por fluorescência (FRX) e difração de raios X (DRX). Posteriormente, realizou-se o estudo de dosagem definindo-se quatro teores de lodo em relação ao peso seco da areia e, por último, a escolha de dois dos traços mais representativos e intermediários aos limites estudados, sendo, então, confeccionados seus corpos-de-prova e caracterizados segundo a metodologia correspondente.

Análise do lodo de ETA *in natura*

Perda ao fogo por análise termogravimétrica

A perda ao fogo foi analisada em equipamento de análise termogravimétrica (TG), marca Netzsch, modelo STA 409 C, em cadinho de platina aberto, sob atmosfera de O₂ e N₂, e taxa de aquecimento do forno de 10 °C por min até a temperatura de 1500 °C.

Determinações analíticas por FRX

A análise química foi feita por FRX em equipamento Philips, modelo PW 2400. O material foi previamente seco em estufa e prensado na forma de pastilhas (discos), visando obter-se informações qualitativas e quantitativas da composição.

Determinações analíticas por DRX

Difratogramas de raios X foram obtidos a partir das amostras de lodo, secas em estufa, a 110 °C por 12 h e calcinadas à temperatura de 1000 °C por 3 h.

Identificação do argilomineral

Também foi adotado o procedimento indicado por Santos¹⁹ para identificação dos argilominerais, que consiste na separação da fração argila do material, pela suspensão aquosa e posterior secagem orientada em lâmina de vidro. A identificação foi feita pela medi-

da da distância interplanar basal do argilomineral. Estas amostras foram analisadas em equipamento Philips, modelo X'Pert MPD, utilizando radiação Cu K α , $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$; tensão = 40 kV; corrente = 40 mA; varredura $2\theta = 5$ a 90° ; tamanho do passo = $0,020^\circ$; tempo do passo = 1,00 s e velocidade de varredura = $0,020\%$. Os difratogramas obtidos foram analisados e identificados pela comparação com as fichas de padrões do "International Centre for Diffraction Data (ICDD)".

Corpos-de-prova de concreto com lodo de ETA

O estudo de dosagem foi realizado com a finalidade de se obter os teores de lodo em concreto que apresentassem melhor desempenho. Os principais fatores considerados para este procedimento foram as variações de trabalhabilidade e de resistência mecânica do material obtido, em termos da quantidade de lodo de ETA adicionada a um concreto referência (sem adição de lodo). Foram fabricados, inicialmente, quatro concretos incorporando teores de 3, 5, 7 e 10% (partes por peso – p/p) de lodo de ETA, em substituição ao peso do agregado miúdo. As quantidades totais de água das misturas foram corrigidas em função do peso e do teor de umidade do lodo acrescentado.

Destes concretos foram selecionados dois traços para estudo mais completo, enfocando, inclusive, além das propriedades no estado a fresco e endurecido, aspectos ambientais pela lixiviação do material em meios ácido e alcalino.

A massa unitária e o teor de ar incorporado foram verificados pela norma NBR 9833/87²⁰, para obtenção dos consumos/m³ de concreto.

Após as idades previstas para os ensaios (7, 14, 28 e 91 dias), os corpos-de-prova (CPs) foram levados à ruptura nos testes de resistência mecânica, utilizando-se máquina universal de ensaios Emic, modelo DL30000N, observando-se os procedimentos descritos em normas técnicas¹⁶.

O ensaio de permeabilidade foi realizado pelo método de água sob pressão específica de 2,1 MPa, de acordo com a NBR 10786/89²¹. Ao término do ensaio, a água percolada pelo concreto foi coletada, evaporada, e o material sólido restante analisado por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com microsonda analítica de raios X (EDAX) para determinação dos metais presentes. Para o teste, utilizou-se equipamento Philips, modelo XL 30, com microsonda de raios X.

A absorção de água por imersão, a massa específica e o índice de vazios dos concretos endurecidos foram analisados seguindo-se as recomendações da norma NBR 9778/87²². Destes CPs foram extraídas pequenas amostras, que foram moídas para serem submetidas ao ensaio de DRX, com os mesmos parâmetros de ensaio anteriores.

O processo de lixiviação do material foi realizado em presença de meio aquoso ácido e alcalino. Para o meio ácido, foi utilizada solução aquosa de ácido acético a 4,5%, colocando-se os CPs de cada dosagem imersos nesta solução, durante 1 semana. O mesmo procedimento ocorreu com a solução aquosa alcalina à base de hidróxido de sódio (NaOH) 1M. Posteriormente, as soluções foram analisadas por espectrofotometria de absorção atômica em chama, para determinação dos metais presentes na solução extraída do concreto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Perda ao fogo por TG

As análises por TG do lodo *in natura* indicaram perda de massa média de 87%, entre 25 e 1000 °C, devido à eliminação de água

adsorvida, hidroxilas, decomposição de alguns materiais constituintes e matéria orgânica¹⁹. Uma das curvas de TG do material estudado está apresentada na Figura 1.

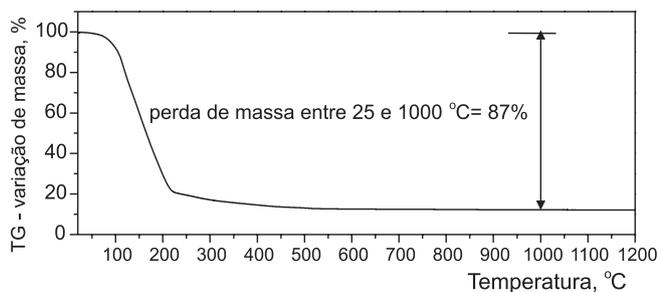


Figura 1. Curva TG do lodo in natura

A massa específica média do lodo foi de $1,06 \pm 0,013 \text{ mg/m}^3$. Este valor está dentro da faixa citada por Richter⁵ para um lodo com 12% de sólidos, sendo de 1,03 a $1,08 \text{ mg/m}^3$.

Determinações analíticas por FRX e DRX

Os 3 principais elementos químicos encontrados no lodo encontram-se listados na Tabela 1, na forma de seus respectivos óxidos. Os teores resultantes podem ser provenientes da própria constituição química do lodo e de impurezas que possam estar presentes no coagulante à base de sulfato de alumínio utilizado.

Tabela 1. Análise química do lodo da ETA Passaúna, por FRX

Compostos químicos identificados no lodo	(%)
SiO_2	16,55
Al_2O_3	13,07
Fe_2O_3	4,15

O difratograma da amostra seca e calcinada a 800°C , por 3 h, obtido pelo ensaio de DRX, está apresentado na Figura 2, com as possíveis fases químicas identificadas por intermédio do ICDD, sendo tais compostos formados à base de alumínio, ferro e sílica.

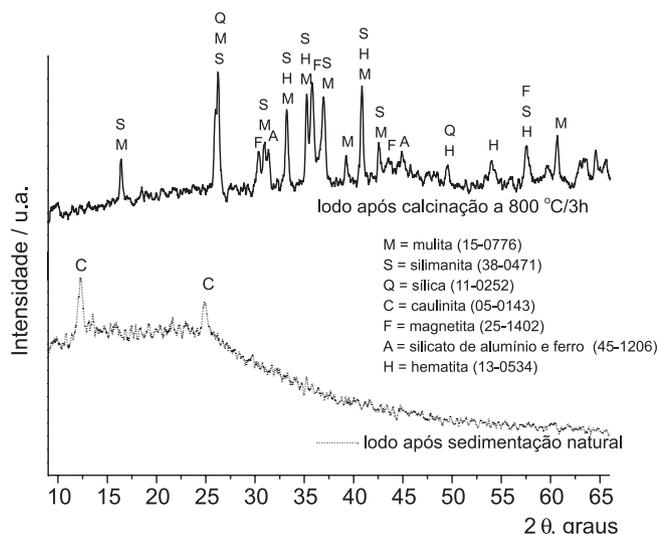


Figura 2. Difratogramas de raios X da amostra de lodo da ETA Passaúna, após sedimentação natural em lâmina de vidro, segundo método descrito por Santos¹⁹ e após calcinação a 800°C , por 3 h

Identificação de argilomineral

Utilizando a metodologia indicada por Santos¹⁹ identificou-se a presença da fase do argilomineral do grupo caulinita com as reflexões basais [001] a, aproximadamente, 7Å . Este argilomineral também foi encontrado por Cordeiro²³, na ETA São Carlos. Na literatura, são encontradas outras técnicas analíticas capazes de determinar a composição química de argilominerais, tal como a espectrometria de emissão óptica em plasma indutivamente acoplado²⁴.

Estudos de dosagem

A consistência do concreto fresco, denotada pela medida do abatimento do tronco de cone, variou acentuadamente com a adição de até 3% (p/p) de lodo, chegando a zero (abatimento nulo) aos 10% (p/p). Isto se deve ao fato do material ser constituído por uma parcela grande de finos, apresentando maior superfície específica que a areia substituída e, conseqüentemente, requerendo mais água para o adensamento.

Outra propriedade verificada foi a resistência mecânica à compressão axial simples dos CPs ao longo do processo de cura. Aos 7 dias de idade, os valores obtidos para os traços 3, 5 e 7% foram maiores de 20 MPa. O traço com 10% (p/p) de lodo apresentou resultados médios em resistência mecânica muito baixos e em torno de 15 MPa, mesmo aos 28 dias, conforme pode ser observado na Figura 3.

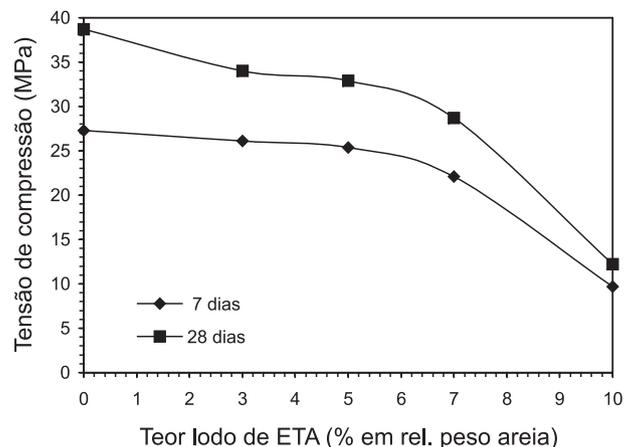


Figura 3. Resistência à compressão do concreto em termos do teor de lodo

Usando-se como premissa valores de resistência moderada de 20 a 25 MPa^{25,26} e abatimento no tronco de cone para adensamento manual, foram estabelecidas duas concentrações de lodo para estudos complementares, sendo de 4 e de 8% em peso, esta última por ter grande potencial de uso na tecnologia de concreto compactado com rolo (CCR) para barragens de usinas hidroelétricas e pavimentos de rodovias.

Propriedades do concreto fresco com 4 e 8% (p/p) de lodo de ETA

Na Tabela 2 estão representadas algumas propriedades do concreto fresco, para as dosagens de 4 e 8% (p/p) de lodo de ETA, comparativamente ao concreto considerado como referência, com 0% de lodo de ETA.

Analisando-se os valores tabelados, para o concreto fresco, observa-se que a mistura se torna mais exotérmica com o aumento

Tabela 2. Propriedades do concreto fresco contendo lodo de ETA

Teor de lodo de ETA (% (p/p) em relação ao peso da areia)			
	0%	4%	8%
Temperatura do concreto (°C)	18,3	25	25,5
Traço			
Cimento	1,00	1,00	1,00
Areia	2,02	1,94	1,86
Brita 1	2,98	2,98	2,98
Lodo de ETA	-	0,08	0,16
Consumo (kg/m ³)			
Cimento	364	348	344
Areia	736	676	640
Brita 1	1.085	1038	1026
Água	183	176	176
Lodo de ETA	-	28	56
Massa Unitária (kg/m ³)			
Teórica	2.373	2331	2291
Real	2.366	2263	2247
Ar Incorporado (%)			
Teórico	0,3	2,9	1,9
Real	-	3,5	3,5

do teor de lodo, porém, o aumento resultante da temperatura não foi suficiente para causar defeitos superficiais (trincas térmicas) visíveis nos CPs.

A massa unitária reduziu em 1,7% com o aumento de 4 para 8% de lodo e de 3,5% se comparada ao concreto-referência. Esta redução é explicada pela menor densidade do lodo de ETA em relação à areia.

O teor de ar incorporado reduziu em cerca de 34% entre os dois traços confeccionados com o lodo. Este valor não interfere nas propriedades finais do concreto, a não ser para regiões onde há a influência de gelo e degelo da estrutura.

Na trabalhabilidade do concreto, obteve-se abatimento do tronco de cone de 36 mm para o traço de 4% e de 18 mm para o traço de 8%, o que pode ser resultante, também, do aumento da parcela de finos (maiores superfícies específicas) e, portanto, da necessidade de maior quantidade de água para uma mesma consistência. Para que ocorra um aumento na trabalhabilidade do concreto com 8% de lodo seria necessário aumentar a relação água/cimento (a/c), o que poderia acarretar diminuição da resistência mecânica final. Uma outra forma seria trabalhar com aditivos plastificantes²⁵.

Segundo Petrucci²⁷, o abatimento de 18 mm é considerado como sendo de consistência seca e pode ser utilizado para obras de estrutura de concreto armado ou protendido e o de 36 mm, como de consistência rija, sendo recomendado apenas em estruturas correntes.

Para o caso estudado, considerou-se como melhor consistência a de 36 mm, obtida para o concreto com 4% de lodo.

Observou-se que a adição de lodo de ETA no concreto reduziu o consumo do restante dos insumos, tais como dos agregados e cimento, chegando com 8% (p/p) de lodo no concreto a uma redução de cimento da ordem de 3% e de 11% (p/p), para os agregados miúdos. Para os agregados graúdos (brita 1) a redução ficou próxima de 2,5% (p/p). Esta redução é interessante, dos pontos de vista técnico e econômico, para fabricação de concreto-massa, em virtude do custo mas, também, do ponto de vista ambiental, pela redução dos materiais extraídos das minas e da poluição causada na produção do cimento.

Nos ensaios de resistência à compressão axial simples dos CPs, em idades de 7, 14, 28 e 91 dias, foram obtidos os resultados listados na Tabela 3.

Tabela 3. Resistência à compressão axial simples dos CPs, em função da idade e concentração de lodo na dosagem

Resistência (MPa)	0% de lodo	4% de lodo	8% de lodo
7 dias	28,40	25,00	21,45
14 dias	28,40	28,40	25,85
28 dias	38,90	28,25	27,05
91 dias	43,80	32,00	29,90

A análise destes dados revela que a resistência à compressão para a dosagem de 8% (p/p) é, em média, 8% inferior à resistência da dosagem de 4% (p/p). No entanto, observa-se que já aos 7 dias, o traço com 4% (p/p) de lodo atingiu resistência superior a 25 MPa, o que aconteceu aos 14 dias para o traço com 8% (p/p) de lodo.

Os valores obtidos para índice de vazios, massa específica e absorção d'água para os concretos com dosagem de 0, 4 e 8% (p/p) de lodo, estão reunidos na Tabela 4.

Tabela 4. Teores de absorção de água, índice de vazios e massa específica dos traços de concreto estudados, em função do teor de lodo

Teor de lodo de ETA (p/p) – (por peso da areia)			
	0%	4%	8%
Absorção (%)			
Após imersão em água	7,14	7,41	7,46
Após imersão em água	7,44	7,41	7,46
Massa específica (Mg/m ³)			
Real	2,70	2,51	2,51
Seca	2,25	2,09	2,08
Após saturação	2,41	2,24	2,24
Após saturação e fervura	2,42	2,26	2,25
Índice de vazios (%)			
Após saturação	16,13	15,64	16,93
Após saturação e fervura	16,72	15,76	17,51

O teor de absorção de água não é considerado parâmetro de qualidade do concreto, até porque dependerá da finalidade da obra. No entanto, os concretos de boa qualidade devem apresentar teores de absorção abaixo de 10%. Para o concreto com adição de lodo, a absorção ficou em torno de 7,4%, podendo ser utilizado em certos tipos de obras onde o contato direto com a água não seja constante (interiores, por ex.). Para estruturas de concreto do tipo postes e cruzetas, é recomendável teores de absorção de água inferiores a 6% na média dos CPs, segundo recomendação de norma técnica²⁶.

O aumento no índice de vazios com a concentração de lodo pode ser um fator desfavorável ao concreto, pois facilita o ingresso de materiais indesejáveis à estrutura, tais como os íons cloreto presentes nas regiões litorâneas, acelerando o processo corrosivo das estruturas em concreto armado.

Em relação à massa específica, observa-se que esta ficou em 2,5 Mg/m³ para as duas dosagens. Segundo Petrucci²⁷, Scandiuzzi e Andriolo²⁸, a massa específica do concreto, normalmente, varia entre 2,30 e 2,50 mg/m³, estando os valores na faixa citada.

No estudo de permeabilidade dos CPs com o teor crescente de lodo, conforme apresentado na Tabela 5, observou-se que houve decréscimo nos valores, ficando o concreto-referência com o menor coeficiente.

Segundo Neville²⁹, o limite arbitrário aceitável para o coeficiente de permeabilidade é de $1,5 \times 10^{-9}$ cm/s (valor adotado em

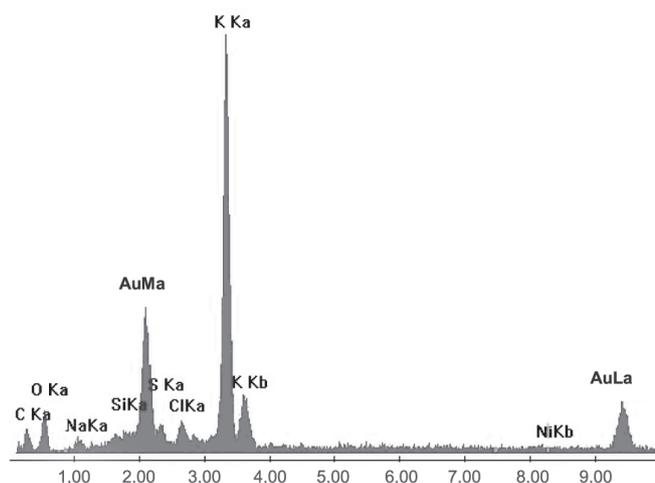
Tabela 5. Coeficientes de permeabilidade dos traços de concreto analisados

	Concreto-referência	4% (p/p)	8% (p/p)
Coeficiente de permeabilidade – (x 10 ⁻¹⁰) k (cm/s)	0,37	2,78	0,87

obras do “Bureau of Reclamation – USA”), ou seja, valores acima deste são considerados permeáveis. Comparativamente a este valor referência, observa-se que todos os coeficientes ficaram na ordem de 10⁻¹⁰ cm/s, abaixo do limite aceitável. Portanto, os concretos com o lodo de ETA podem ser considerados não-permeáveis.

A água percolada resultante do ensaio de permeabilidade foi analisada por MEV com EDS, identificando-se os seguintes elementos químicos: carbono, oxigênio, cobalto, sódio, sílica, enxofre, cloro, potássio, cálcio e níquel.

Na Figura 4, pode ser observado o espectro resultante do resíduo seco extraído pela evaporação da água percolada pelos CPs e os picos referentes a cada elemento químico presente (descarta-se o Au, por ter sido o elemento químico utilizado na metalização da amostra).

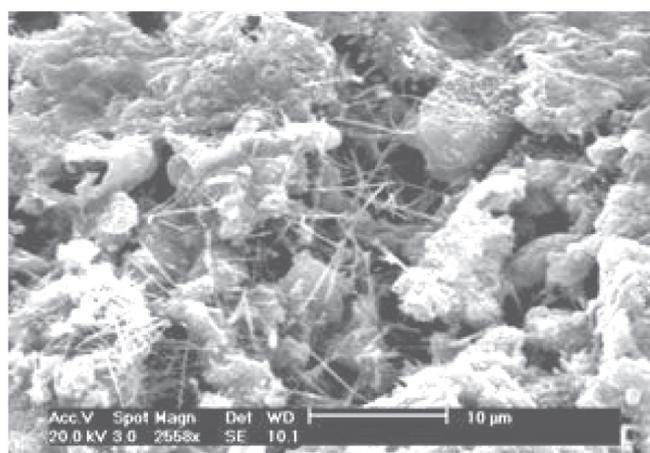
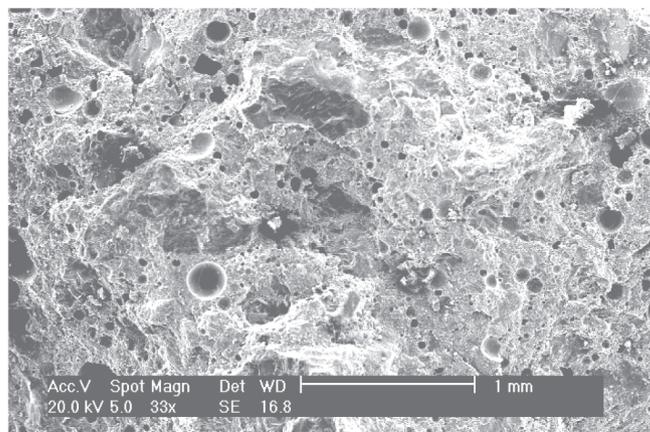
**Figura 4.** Espectro do resíduo da evaporação da água percolada pelos CP's de concreto com adição de lodo, realizado por EDS

A maior permeabilidade do CP com 4% (p/p) de lodo pode ser devida à porosidade observada na Figura 5, nas micrografias obtidas por MEV das superfícies de fratura de um CP analisado. Constatou-se, também, a presença de cristais aciculares de etringita (3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.32H₂O), preenchendo parte da trinca visualizada. Esta substância é formada durante a hidratação do cimento³⁰ e, também, como consequência da temperatura de fabricação da estrutura de concreto e sob efeito da composição química do cimento e seus constituintes³¹.

Pelos estudos de lixiviação dos CPs em meios ácido e alcalino foram encontrados os metais relacionados na Tabela 6.

Observa-se que em meio ácido, os metais foram liberados em maior quantidade, destacando-se ferro e alumínio, somando mais de 95% do total. As quantidades dos demais metais presentes na lixiviação foram inferiores a 3,8 mg/L, que representam 1,6% do total.

Testes comparativos de lixiviação de resíduos sólidos em amostras de cimento com misturas de sais de metais pesados, em diversos meios e normas técnicas adotadas, incluindo o meio em ácido acético, como utilizado neste trabalho, foram desenvolvidos por Cauduro *et al.*³². No trabalho verifica-se que os teores dos metais pesados Cd, Pb, Cr, Ni e Zn, adicionados na sua amostra referência

**Figura 5.** Micrografias das superfícies de fratura de CP de concreto com adição de 4% de lodo, realizadas por MEV**Tabela 6.** Elementos químicos presentes no resíduo extraído por secagem do líquido sobrenadante obtido do ensaio de lixiviação dos CPs de concreto com lodo, frente a soluções aquosas, ácida e alcalina

Elementos (mg/L)	Hidróxido de sódio 1 M		Ácido acético à 4,5% (v/v)	
	4% (p/p)	8% (p/p)	4% (p/p)	8% (p/p)
Alumínio	47,00	42,00	91,00	102,00
Cádmio	0,01	< 0,01	0,01	0,01
Chumbo	0,10	0,85	0,40	0,45
Cobre	0,60	0,40	2,90	2,60
Cromo	0,40	0,20	0,95	0,70
Ferro	0,70	0,60	140,00	130,00
Manganês	0,10	0,10	3,55	3,75
Níquel	0,10	0,10	0,65	0,65
Zinco	0,15	0,15	2,30	2,00

(sem adições), após os testes químicos, permaneceram abaixo de 10 mg/L na solução resultante. Comparativamente, pode-se estimar um baixo risco ambiental, pela co-disposição do lodo de ETA em concreto.

Na solução alcalina, a concentração de metais presentes no lixiviado foi inferior à em meio ácido. Nesta solução observaram-se maiores teores de alumínio que, sozinho, representa cerca de 95% dos metais presentes.

Tanto nas soluções ácida como alcalina, o alumínio pode ser considerado um metal importante na lixiviação e, para o ferro, este

só é considerado frente a ambientes ácidos. A presença dos demais metais é insignificante, uma vez que são encontrados em quantidades inferiores a 2%. Alumínio e ferro podem ser resultantes da incorporação do lodo e também são constituintes do concreto, o que pode justificar a concentração obtida. Os teores dos metais lixiviados nos traços com incorporação de lodo encontram-se dentro do limite recomendado, utilizando-se valores referenciais adotados no estado de São Paulo³³.

Destaca-se que mesmo dobrando a quantidade de lodo no concreto, o teor de metais presentes não aumentou proporcionalmente, ficando, em alguns casos, praticamente inalterado, indicando que a dissolução ou lixiviação não é linear ou função da massa de lodo.

Na NBR 10.004/87¹, norma de classificação de resíduos sólidos quanto ao risco ao meio ambiente e saúde, verifica-se que, dos metais pesados avaliados, apenas cádmio, chumbo e cromo estão referenciados. Os valores obtidos não podem ser comparados em virtude dos testes terem sido realizados em ambientes muito mais agressivos que os indicados e recomendados pela referida norma. Em um processo de lixiviação natural, os resultados obtidos para os CPs, com lodo, submetidos à solução aquosa alcalina, estariam acima dos limites estabelecidos para alumínio, chumbo, níquel e cobre, para os rios de Classe 3 (maioria dos rios do estado do Paraná). No entanto, para os padrões de lançamento de acordo com o Conama nº 20/86, apenas chumbo, em uma das dosagens, estaria acima do permitido.

CONCLUSÕES

A análise conjunta dos dados permitiu concluir que:

- o lodo obtido da ETA Passaúna, utilizado nas dosagens de concreto, apresentou a fase química caulinita, em sua maior proporção. Os teores de sílica e alumínio mais elevados são características dos argilominerais e, em se tratando do alumínio, pode ter participação da quantidade de coagulante, à base de sulfato de alumínio, utilizado no tratamento da água;
- 10% (p/p) de lodo de ETA em concreto é um teor limitante para sua aplicabilidade prática no setor da construção civil, pelo abatimento no tronco de cone nulo e baixa resistência mecânica à compressão, sendo esta inferior a 15 MPa;
- 4 e 8% (p/p) de lodo em relação ao peso seco da areia no concreto resultaram em valores de resistência superiores a 27 MPa, aos 28 dias. Tais valores são promissores para emprego deste novo material em concreto estrutural mas, pelo não conhecimento do seu desempenho em função do tempo, direciona-se sua utilização a concretos não-estruturais. Dentre as aplicações viáveis, é possível citar contrapisos, blocos e placas de vedação, peças decorativas em concreto, placas de estai para redes de distribuição de energia elétrica, tampas de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, pedestais para apoio de equipamentos, calçadas e pavimentos residenciais, concreto compactado com rolo, dentre outras;
- dentro do limite estudado de incorporação do lodo no concreto houve redução no consumo de matérias-primas naturais, tais como areia, brita e cimento. Tais reduções quantitativas destes materiais minimizam o impacto ambiental pela diminuição da extração dos minérios nas jazidas e pela redução dos poluentes atmosféricos advindos da produção do clínquer de cimento Portland, além de reduzir, drasticamente, a quantidade do lodo lançado em rios e córregos, dispondo-os de forma ambientalmente correta;
- de maneira geral, apesar de ocorrerem reduções na qualidade do concreto com a incorporação do lodo de ETA com teores de 4 e 8% (p/p), sua utilização como forma de disposição final pode ser considerada viável técnica e ambientalmente.

AGRADECIMENTOS

Ao LACTEC, à SANEPAR, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da UFPR e à CAPES, pela infra-estrutura e apoio financeiro para execução deste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação*, Rio de Janeiro, 1987.
- Lei Estadual n.º 12.493, de 22 de janeiro de 1999; *Diário Oficial*, Curitiba, PR, 1999, 9.
- Tsutuya, M. T.; Hirata, A. Y.; *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, Brasil, 2001.
- Cordeiro, J. S.; *Anais do Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Cancún, México, 2002.
- Richter, C. A.; *Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água*, Edgard Blücher Ltda.: São Paulo, 2001.
- Grandin, S. R.; Alem Sobrinho, P.; Garcia Jr., A. D.; *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Natal, Brasil, 1993.
- Jesus, H. C.; Costa, E. A.; Mendonça, A. S. F.; Zandonade, E.; *Quim. Nova* **2004**, 27, 371.
- Cordeiro, J. S.; *O Tese de Doutorado*, Universidade de São Paulo, Brasil, 1993.
- Barroso, M. M.; Cordeiro, J. S.; *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, Brasil, 2001.
- AWWA – American Water Works Association; *Landfilling of Water Treatment Plant Coagulant Sludges*, AWWARF: USA, 1992.
- Reali, M. A.; *P. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- Saron, A.; Leite, V. M. B.; *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, Brasil, 2001.
- Sartori, H. J. F.; Nunes, M. S.; *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Foz do Iguaçu, Brasil, 1997.
- Cordeiro, J. S.; *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- Sales, A.; Cordeiro, J. S.; apud Andreoli, C. V.; *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- Hoppen, C.; *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2004.
- Oliveira, E. M. S.; Machado, S. Q.; Holanda, J. N. S.; *Cerâmica* **2004**, 50, 324.
- John, V. M.; *Tese de livre docência*, Universidade de São Paulo, Brasil, 2000.
- Santos, P. S.; *Ciência e Tecnologias de Argilas*, 2ª ed., PINI Ltda.: São Paulo, 1997, vol. 1.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico*, 1987, Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10786: Concreto Endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água*, 1989, Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão*, 1987, Rio de Janeiro, RJ.
- Cordeiro, J. S.; *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, Brasil, 1999, p. 121.
- Silva, C. R.; Nóbrega, J. A.; Blanco, T.; *Quim. Nova* **2005**, 28, 135.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M.; *Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais*, PINI Ltda.: São Paulo, 1994.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 8452, Postes de Concreto Armado para Redes de Distribuição de Energia Elétrica - Padronização*, 1998, Rio de Janeiro, RJ.
- Petrucchi, E. G. R.; *Concreto de Cimento Portland*, 12. ed., Globo: São Paulo, 1993.
- Scandiuzzi, L.; Andriolo, F. R.; *Concreto e seus Materiais: propriedades e ensaios*, PINI Ltda.: São Paulo, 1986.
- Neville, A. M.; *Propriedades do Concreto*. 2ª ed., PINI Ltda.: São Paulo, 1997.
- Baur, I.; Séller, P.; Mavrocordatos, D.; Wehrli, B.; Johnson, A.; *Cem. Concr. Res.* **2004**, 34, 341.
- Sahu, S.; Thaulow, N.; *Cem. Concr. Res.*, **2004**, 34, 1675.
- Cauduro, F.; Roberto, S.; *Anais do Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Cancún, México, 2002.
- CETESB, “Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo”, 2001.