

USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

Use of sludge of water treatment plant in paving roads

Rodrigo Vaz Coelho ¹; Fernando Shigueu Tahira ²; Fernando Fernandes ³; Heliana Barbosa Fontenele⁴; Raquel Souza Teixeira⁵

Recebido em 04 de março de 2015; recebido para revisão em 10 de junho de 2015; aceito em 10 de setembro de 2015; disponível on-line em 21 de setembro de 2015.



PALAVRAS CHAVE:

*Solo-cimento;
Lodo de ETA;
Pavimentação.*

KEYWORDS:

*Soil-cement;
WTP sludge;
Paving.*

RESUMO: Lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA) é o resíduo sólido resultante do processo de coagulação nas estações de tratamento de água. Este trabalho avalia a viabilidade técnica da mistura de solo com lodo da ETA Cafezal (Londrina/PR) para uso como base, sub-base e subleito de pavimento de estradas. Dois solos, de diferentes granulometrias foram usados: o solo argiloso do Campus da Universidade Estadual de Londrina/PR, e o solo arenoso das proximidades da cidade de Mandaguaçu/PR. As misturas foram: a) para o solo argiloso um traço unitário em massa de 1:1 (solo-lodo) e de mesmo traço unitário com a adição de 6 e 10% de cimento; b) para o solo arenoso um traço unitário em massa de 1:0,25 (solo-lodo), sem a adição de cimento. As misturas dos dois solos com lodo foram aprovadas para uso na camada de subleito e as misturas com cimento apenas foi aprovada para emprego de base de pavimento aquela de solo arenoso com 10 % de cimento. Conclui-se que o lodo de ETA pode ser usado em camadas de pavimentos contribuindo principalmente na redução do impacto ambiental gerado pela disposição deste resíduo no meio ambiente. Reforça-se que as misturas com lodo de ETA ainda necessitam de estudos adicionais da sua aplicabilidade na pavimentação rodoviária.

ABSTRACT: The sludge of the Water Treatment Plants (WTP) is the solid residue from the coagulation process in water treatment plants. In Brazil, this residue was generally released in receiving waters near the stations, currently this practice is prohibited by environmental legislation. On the other hand, this residue can be used as building material. This work evaluates the technical viability of soil mixed with the sludge from Water Treatment of Cafezal's Plant (Londrina / PR) for use as base, sub-base and subgrade of a road pavement. Two soils of different particle sizes were used: one was the clayey soil from the Campus of the State University of Londrina / PR, and the other was a sandy soil obtained near the city of Mandaguaçu / PR. The mixtures were made: a) for the clayey soil was used a proportion in mass of 1: 1 (soil-sludge) and others mixtures with the same proportions but with the addition of 6 and 10% of Portland cement; b) for the sandy soil was used the proportion of 1: 0.25 (soil-sludge) without the addition of cement in the mixture. Mixtures of the two soils with sludge have been approved for use in the subgrade layer. Among the mixtures containing cement the sandy soil mixture with 10 % of cement was approved to use in base of road pavements. It is concluded that the WTP sludge can be used in pavement layers for contribute to reduction of the environmental impact caused by the disposal of this waste in the environment. It is important to point out that mixtures with WTP sludge still need further study of its applicability in road paving.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: rodrigovcoelho@hotmail.com (R. V. Coelho)

Eng. Civil pela Universidade Estadual de Londrina (UEL).

² e-mail : fernandotahira@gmail.com (F. S. Tahira)

Graduando do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

³ e-mail: fernando@uel.br (F. Fernandes)

Eng. Civil Dr. Docente da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

⁴ e-mail: heliana@uel.br (H. B. Fontenele)

Eng^a. Civil Dra. Docente da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

⁵ e-mail: raquel@uel.br (R. S. Teixeira)

Eng^a. Civil Dra. Docente da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

1. INTRODUÇÃO

O tratamento das águas provenientes de mananciais subterrâneos ou superficiais e seu abastecimento são de suma importância para a população. No entanto, para que a água bruta possa se tornar adequada para o consumo humano, ela passa por diversos processos físicos, químicos e biológicos nas Estações de Tratamento de Águas – ETAs.

Nas etapas iniciais desse tratamento, ocorre a adição de produtos químicos na água bruta a fim de separar as impurezas existentes. Nesta separação, as partículas ficam dispersas no meio líquido e vão se aglomerando formando flocos, que pela ação da gravidade sedimentam. Esse resíduo acumulado é chamado de lodo de ETA e é obtido a partir da lavagem dos decantadores. O lodo originário desse tratamento possui características líquidas e com grande volume, que por sua vez necessita de tratamento e disposição adequada.

A disposição final desse material era feita a partir do lançamento em corpos d'água mais próximos. Em virtude de não existir um tratamento adequado, tal procedimento prejudicava a qualidade da água, além de ocasionar o assoreamento do rio. Devido a isso, essa prática foi abolida pela resolução do CONAMA Nº 357 (2005), que classifica este material como poluente, exigindo assim uma disposição adequada para este resíduo.

A NBR 10.004 (ABNT 2004) diz que o lodo gerado nos decantadores das ETAs é considerado como resíduo sólido, dessa forma, não pode ser disposto em corpos d'água superficiais.

Andreoli (2001) descreve em seus estudos que o lodo gerado nas ETAs após sua desidratação, possui características para a utilização na fabricação de solo-cimento, materiais cerâmicos, pigmentos para argamassas e revestimentos ou como aditivo para agregados.

Richter (2001) cita em seus estudos que o lodo de ETA, em seu estado desidratado, pode ser uma opção para a aplicação em sub-bases e bases de pavimentos, o que resultaria na melhoria das características e propriedades destas camadas.

A busca pela melhoria da qualidade dos solos não é uma técnica recente, muitos povos da antiguidade misturavam ao solo outros tipos de materiais, visando um melhor desempenho deste. Surgindo neste momento, a técnica de estabilização de solos.

A estabilização dos solos é um método abundantemente utilizado, pois acarreta na alteração das propriedades e melhoria nas características quanto à aplicação na engenharia. A estabilização pode ser: mecânica; granulométrica e com aditivos.

Os solos com alto teor de argila, de acordo com a ABCP (1962), não são indicados para a aplicação direta em pavimentos, porque após a compactação não atingem as características de capacidade de suporte e ou expansão necessárias para uso em base e sub-bases. Entretanto, para que possam ser utilizados na pavimentação, Baptista (1976) diz que estes solos podem ser melhorados por meio de processos de compactação, estabilização granulométrica e estabilização com a adição de materiais com ação cimentícia.

No que tange à estabilização com adição de materiais, segundo a NBR 12253 (ABNT 1992), que define a dosagem de cimento para emprego como camada de pavimento, os solos devem se enquadrar nas classificações de grupo A1, A2, A3 ou A4 da tabela TRB (*Transportation Research Board*).

A estabilização com aditivos foi estudada neste trabalho, utilizando o cimento Portland como material estabilizante. Também o lodo de ETA, após sua desidratação, foi acrescentado na mistura solo-cimento com o objetivo de propor uma nova alternativa de disposição desse material.

Em um estudo conduzido por Fadanelli e Wiecheteck (2010) foi realizada a incorporação do lodo de ETA em misturas de solo-cimento. Foram realizados os ensaios de caracterização física, química e mineralógica, moldagem de corpos de prova, com diferentes dosagens e ensaio de resistência por compressão simples. O lodo era proveniente da ETA Pitanguí, em Ponta Grossa/PR, e foi utilizado em seu estado destorroado, o que gerou um material com granulometria fina e menor

massa específica do que o solo, e por isso pode ser considerado mais frágil e com menor resistência. A partir das análises foi verificado que a adição do lodo destorroado no solo, resultou em uma diminuição considerável na qualidade do mesmo, sendo necessário o uso de uma maior quantidade de cimento, para que a mistura se tornasse estabilizada, gerando assim uma inviabilidade econômica.

Desse modo, percebe-se que quando se adiciona lodo no estado destorroado à mistura de solo cimento, há uma diminuição da qualidade do conjunto, pois aumenta a quantidade de finos na mistura, o que afeta sua durabilidade.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho foi avaliar o uso de material alternativo, o lodo de Estação de Tratamento de Água, em misturas com solos, de granulometrias diferentes, com e sem adição de cimento, para uso em pavimentação como destino final.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A estratégia realizada para atingir o objetivo desse trabalho foi definida a partir da coleta das informações sobre os estudos realizados com os dois solos escolhidos, um argiloso e outro arenoso, e da amostragem desses solos e do lodo da estação de tratamento de água (ETA). Depois foi realizada a fase experimental iniciando com a definição das misturas a serem ensaiadas de solo, lodo e/ou cimento, seguida da compactação. Após a compactação foram medidos o Índice de Suporte Califórnia (ISC), a expansão para as misturas que não usaram cimento e a resistência à compressão simples (RCS), para misturas com cimento. Para a avaliação da mistura de solo argiloso-lodo ETA-cimento para a aplicação na pavimentação rodoviária, foi feita a partir da resistência mínima admissível à compressão de 2,1 MPa e da mistura solo-arenoso-lodo ETA através dos valores mínimos de ISC e expansão exigidos pelo Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de

Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006). A seguir serão descritos os materiais utilizados neste trabalho, os solos arenoso e argiloso, o lodo e o cimento. Em seguida será feito o relato das informações principais obtidas a partir de estudos realizados anteriormente, com os materiais e suas misturas.

3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

O solo argiloso usado neste trabalho foi proveniente do Campo Experimental de Engenharia de Geotécnica (CEEG), localizado no interior da Universidade Estadual de Londrina (UEL) e classificado como argila siltosa vermelha escura (Teixeira et al 2006, 2008). As amostras coletadas desta área foram do tipo deformadas e obtidas de uma cava no CEEG, à 2m de profundidade. Pela classificação TRB ou Sistema Rodoviário este solo é dado como um solo do tipo A7, ou seja, é considerado argiloso e visto como ruim para a aplicação em pavimentação, o que resultaria em um maior consumo de cimento para que a mistura tivesse um bom desempenho, de acordo com as normas técnicas.

Já o solo arenoso usado foi obtido de um talude às margens da Rodovia PR 376-Km 37, na entrada da cidade de Mandaguaçu/PR e as amostras coletadas foram do tipo deformadas. Tahira e Teixeira (2013) realizaram ensaios neste solo e o classificaram como areia fina à média siltosa, cor vermelho claro. Na classificação TRB o solo arenoso pertence ao grupo A-2-6, solos do grupo pedregulho e areias siltosas ou argilosas, considerado como excelente a bom para emprego em pavimento.

O lodo usado foi obtido da estação de tratamento de água - ETA Cafezal, disponibilizado pela SANEPAR da cidade de Londrina/PR. O lodo na sua forma líquida foi transportado e lançado em um leito de drenagem que é constituído por um tanque de alvenaria e meio drenante, com camada suporte de brita recoberto com manta geotêxtil, ao lado do Laboratório de Saneamento da UEL. Depois do desaguamento do lodo através de uma manta geotêxtil, MAcDrain® de densidade superficial de 100g/m², ele passou de uma aparência aquosa para a aparência pastosa e finalmente, após a secagem

ao ar, se obteve o lodo na umidade ambiente em forma de grãos ou torrões muito resistentes ao esforço de destorroamento manual tradicional com mão de gral e almofariz. O lodo foi então devidamente ensacado, quarteado e mantido no laboratório de Geotecnia da UEL, sem destorroamento.

Os solos e o lodo já foram alvos de estudos anteriores em projetos de pesquisa nos laboratórios de Geotecnia das Universidades Estaduais de Londrina e Maringá. Desses estudos Silva et al (2011), Beraldo, Teixeira e Rodriguez (2011), Tahira e Teixeira (2013),

Sousa e Teixeira (2013) e Vaz Coelho et al (2014) fizeram a caracterização geotécnica e a classificação do lodo da ETA Cafezal e dos solos argiloso e arenoso, além das curvas de compactação, usando a energia Normal de Proctor, dos dois solos e das misturas solo argiloso-lodo (1:1) e solo arenoso-lodo (1:0,25). A Tabela 1 mostra o resumo da caracterização física e a classificação textural. Na Tabela 2 são apresentados os valores de umidade ótima e massa específica seca dos solos argiloso do CEEG e arenoso de Mandaguaçu, do Lodo de ETA e das misturas de solo argiloso-lodo ETA (1:1) e solo arenoso-lodo ETA (1:0,25), compactados na energia Norma de Proctor.

TABELA 1: Caracterização física dos materiais.

Características Físicas	Lodo	Solo argiloso	Solo arenoso
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,75	3,03	2,69
Limite de Liquidez (%)	NP	51,80	31,0
Limite de Plasticidade (%)	NP	38,27	15,0
Índice de Plasticidade (%)	NP	13,53	16,0
Argila (%)	0,0	55,5	13,5
Silte (%)	0,0	23,5	15,5
Areia Fina (%)	0,5	20,73	44,0
Areia Média (%)	2,0	0,27	27,0
Areia Grossa (%)	2,5	0,0	0,0
Pedregulho (%)	95,0	0,0	0,0
Classificação textural	pedregulho arenoso	argila siltosa	areia fina siltosa

Fonte: BERALDO, TEIXEIRA e RODRIGUEZ, (2011), SILVA et al (2011); TAHIRA e TEIXEIRA (2013).

TABELA 2: Umidades ótimas e massas específicas secas obtidas da curva de compactação usando Energia Normal.

Descrição do Material	Umidade ótima ($\omega_{ót}$) (%)	Massa específica seca (γ_d) (g/cm ³)
Solo argiloso	32,0	1,44
Mistura Solo argiloso-Lodo (1:1)	31,0	1,46
Mistura Solo argiloso-cimento (10 %)	30,0	1,53
Mistura Solo argiloso-lodo-cimento (1:1 – 10 %)	29,5	1,54
Solo arenoso	14,0	1,86
Mistura Solo arenoso-cimento (10 %)	12,9	1,88
Mistura Solo arenoso-Lodo (1:0,25)	14,5	1,80

Fonte: BERALDO, TEIXEIRA e RODRIGUEZ, (2011); TAHIRA e TEIXEIRA (2013); SOUSA e TEIXEIRA (2013), VAZ COELHO et al (2014).

O cimento Portland para os ensaios foi cedido pelo laboratório de Materiais de Construção da UEL, em quantidade suficiente para os ensaios. O cimento utilizado foi o CII – Z – 32, ou seja, com adição de pozolana.

3.2 MÉTODOS USADOS EM LABORATÓRIO

Os solos, argiloso e arenoso, após a coleta foram para o processo de secagem ao ar, no interior do Laboratório de Geotecnia da UEL (Figura 1). Depois os solos foram destorroados, peneirados e quarteados para a realização dos ensaios.



(a)



(b)

FIGURA 1: Amostras de solo retiradas dos locais de estudo secando ao ar no interior do laboratório de Geotecnia/Uel/PR: a) Solo argiloso e b) Solo arenoso.

Após a retirada do leito de secagem o lodo foi armazenado no laboratório de Geotecnia em seu estado natural, sem destorroamento (Figura 2).



FIGURA 2: Lodo coletado da ETA Cafezal/Londrina/PR após secagem em leito de drenagem e sem destorroar.

3.3 PREPARO DAS MISTURAS SOLO-CIMENTO E SOLO-LODO (ETA)-CIMENTO E A COMPACTAÇÃO

Antes de realizar a adição do lodo, no solo argiloso para obter a sua curva de compactação, foram realizados ensaios de compactação para duas misturas solo-cimento dosados com teores de 6% e 10% de cimento. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de avaliar a resistência à compressão simples da mistura do solo argiloso apenas com cimento.

Como o solo argiloso necessitaria de teor de cimento mais elevado para a sua estabilização, foi fixado o teor de 10% de cimento para os ensaios com a mistura de solo-cimento e solo – lodo ETA -cimento, que é o valor máximo estipulado pela NBR 12253 (ABNT, 1992). Para obter as misturas de solo argiloso-cimento para os ensaios de compactação foi utilizada a massa de solo de 2,5 kg e adicionado 10 % dessa massa em cimento, ou seja, respectivamente 0,250 kg de cimento.

A mistura de solo argiloso–lodo ETA-cimento foi realizada usando 1,25 kg de solo, 1,25 kg de lodo e 10% da soma dessas massas em cimento fazendo assim uma mistura com 0,250 kg de cimento.

A mistura com o solo arenoso-lodo foi feita com o traço unitário em massa de 2,5 kg de solo e 0,250 kg de lodo, fazendo assim uma mistura com 25% de lodo. Também foram preparadas amostras apenas com o solo arenoso para obter a curva de compactação.

A compactação dos materiais foi realizada em cilindro pequeno de Proctor, sem reuso de material e aplicando energia Normal de Proctor. A curva de compactação do solo argiloso já tinha sido realizada por Beraldo et al (2011). As curvas de compactação, para todas as misturas e o solo arenoso, foram obtidas com cinco pontos. Os ensaios de compactação seguiram as especificações existentes na norma técnica NBR 12023 (ABNT, 1992).

3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS MISTURAS COM CIMENTO

Os corpos de prova usados nos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) foram compactados próximos a umidade ótima e massa específica seca máxima, indicados nas curvas de compactação, para cada mistura. Para as misturas de solo arenoso com 10% de cimento e argiloso com 6% e 10% de cimento foram compactados três corpos de prova. Já para a mistura de solo argiloso-lodo ETA com 10% de cimento, foram compactados quatro corpos de prova. Não houve necessidade de realizar ensaios RCS na mistura solo argiloso-lodo ETA com 6 % de cimento, visto que a RCS obtida da mistura do solo com 6% de cimento foi muito baixa.

A NBR 12024 (ABNT, 1992) diz que somente devem ser aceitos corpos de prova que obedeçam às imposições de Grau de Compactação (GC) e desvio de umidade. Pela norma o GC do corpo de prova compactado deve variar entre 98% a 102% e o desvio de umidade deve estar no intervalo de $\pm 0,5\%$ do valor da umidade ótima. Antes da ruptura os corpos de prova foram retirados da câmara e imersos em um recipiente com água durante 4 horas. A ruptura dos corpos de prova foi feita em prensa manual e assim obtidos os valores de resistência à compressão simples em MPa.

Os procedimentos de cura e ruptura por compressão simples dos corpos de prova foram realizados a partir da NBR 12024 (ABNT, 1992) e a NBR 12025 (ABNT, 1990), respectivamente.

3.5 ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA E EXPANSÃO PARA O SOLO ARENOSO E A MISTURA SOLO ARENOSO-LODO

Do estudo realizado por Silva *et al.* (2011) foi obtida a umidade ótima do solo arenoso e com esse valor ajustou-se a umidade para a mistura solo-lodo, considerando que o lodo não absorve a água, para que após a homogeneização a mistura estivesse na umidade desejada.

Realizou-se a compactação para o ensaio de Índice Suporte Califórnia (ISC), do solo arenoso e da mistura solo arenoso-lodo (20%), usando Energia Normal e próximos as umidades ótima e massas específicas secas máxima, indicados nas respectivas curvas de compactação. Foram usados para a mistura solo-lodo 4,8 kg de solo e 1,2 de lodo, ajustados na umidade ótima para a compactação. Após a compactação os corpos de prova permaneceram dentro do cilindro e foram levados para o tanque de imersão e iniciou-se o processo de expansão que durou 4 dias. Ao término deste período de imersão deu início ao ensaio de penetração de um pistão padrão de 5 cm, para determinar o ISC, de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 1987). Os ensaios de Índice de Suporte Califórnia e expansão do solo argiloso foram realizados por Beraldo et al (2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MISTURAS COM SOLO ARGILOSO

A Figura 3 mostra as curvas de compactação do solo argiloso e das misturas solo argiloso-cimento com teor 10% de cimento e solo argiloso-lodo ETA-cimento (10%).

O teor de umidade ótima e a massa específica seca máxima, obtidos da curva de compactação da mistura solo argiloso – lodo ETA-cimento com teor de 10% de cimento, são 29,5% e 1,54 g/cm³, respectivamente.

A Tabela 3 mostra os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima do solo argiloso, das misturas de solo argiloso-cimento 10% de cimento e solo argiloso – lodo ETA-cimento com teor de 10 % de cimento.

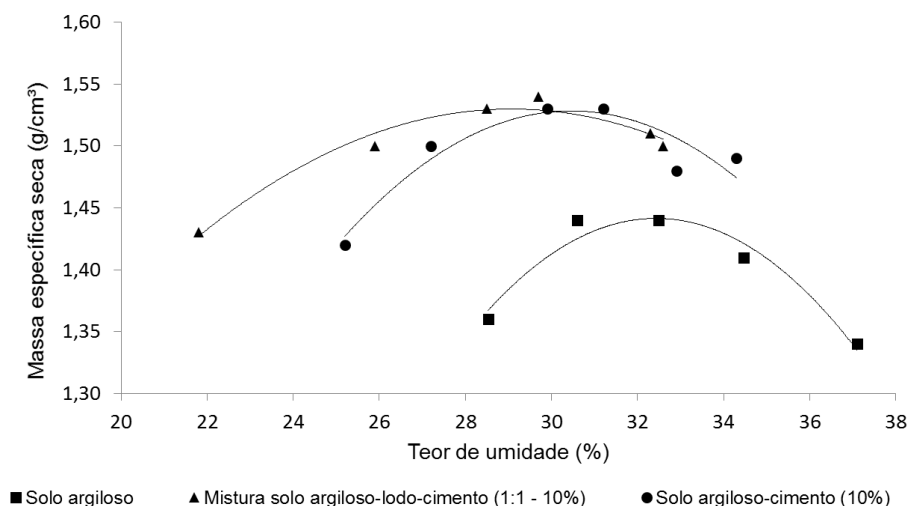


FIGURA 3: Curvas de compactação do solo argiloso e das misturas solo argiloso-lodo-cimento e solo argiloso-cimento.

TABELA 3: Umidade ótima e massa específica seca obtidas da curva de compactação do solo argiloso e misturas.

Descrição do Material	Umidade ótima ($\omega_{ót}$) (%)	Massa específica seca (γ_d) (g/cm ³)
Solo argiloso	32,0	1,44
Mistura Solo argiloso-Lodo (1:1)	31,0	1,46
Mistura Solo argiloso-cimento (10%)	30,0	1,53
Mistura Solo argiloso-lodo-cimento (1:1 - 10%)	29,5	1,54

Fonte: BERALDO, TEIXEIRA e RODRIGUEZ, (2011); VAZ COELHO et al (2014).

A partir dos resultados foi possível observar que com a adição do lodo de ETA, em seu estado seco e granular, na mistura de solo argiloso – cimento, houve um aumento na massa específica seca máxima da mistura, fazendo-se um comparativo ao solo e a mistura solo argiloso – cimento sem a adição do lodo de ETA.

Na Tabela 4 estão os resultados do ensaio do Índice de Suporte Califórnia e expansão do solo argiloso e do lodo de ETA e da mistura solo argiloso-Lodo (1:1).

O maior valor de ISC e de menor expansão foi para o solo argiloso, por outro lado a mistura solo argiloso-lodo apresentou o menor ISC e a maior expansão. Como esperado a expansão da mistura solo-lodo foi maior que a do solo tendo em vista que o índice de vazios da mistura solo-lodo é maior que a do solo.

A Tabela 5 mostra os valores de resistência à compressão simples das misturas de solo-cimento com teor de 10 % de cimento e da mistura de solo argiloso – lodo ETA – cimento com teor de 10 % de cimento.

TABELA 4: Índice Suporte Califórnia e expansão do solo argiloso e da mistura solo argiloso-lodo (1:1).

Descrição do Material	ISC (%)	Expansão (%)	Grau de Compactação (%)	Desvio da umidade ótima (%)
Solo argiloso	18,56	0,15	101	1,0
Mistura Solo argiloso-Lodo (1:1)	10,67	1,27	99	0,2

Fonte: BERALDO, TEIXEIRA e RODRIGUEZ, (2011).

TABELA 5: Resistência à compressão simples aos 7 dias de idade das misturas solo argiloso-cimento e solo argiloso-cimento-lodo.

Descrição do Material	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Mistura Solo argiloso-cimento (10%)	0,46	0,58	0,55	0,53	0,06	0,11
Mistura Solo argiloso-lodo-cimento (1:1 - 10%)	0,23	0,29	0,29	0,27	0,03	0,11

Fonte: VAZ COELHO et al (2014).

Em média os resultados de resistência à compressão simples (RCS) foram de 0,53 MPa para a mistura de solo-cimento com 10% de cimento. Já para a mistura de solo argiloso-lodo ETA-cimento a resistência média a compressão simples foi de 0,25 MPa.

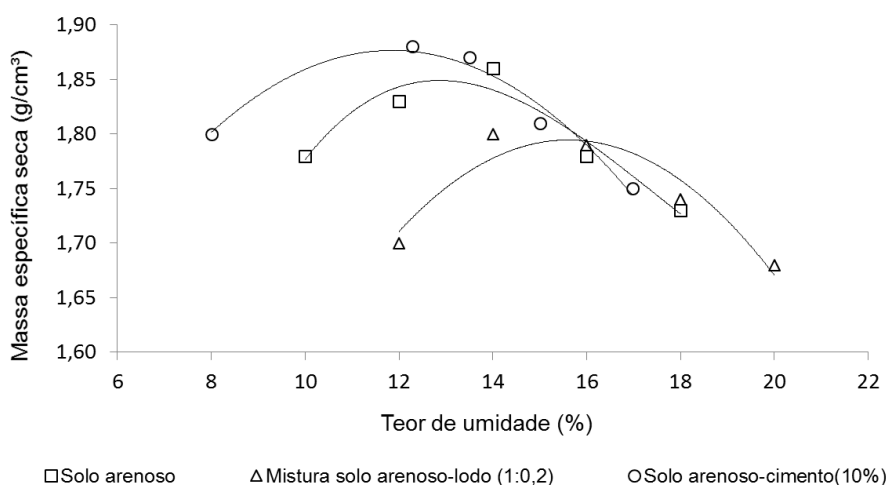
Ocorreu uma redução da resistência do material, ou seja, uma diminuição da qualidade do conjunto. Isto se explica devido à falta de coesão entre as partículas, pois mesmo o lodo sem destorroamento e melhorando a granulometria do solo do CEEG (argiloso), seus grãos são muito lisos, o que dificulta na reação com o cimento.

Observou-se que ocorreu uma melhoria na granulometria do solo do CEEG com a adição do lodo, mas conseqüentemente ocorreu diminuição da resistência do material, ou seja, um decréscimo da qualidade do conjunto. Isto se explica pela falta de entrosamento (contato) entre as partículas (solo argiloso-lodo-cimento). Durante a hidratação do

cimento ocorrem as reações químicas, que são responsáveis pelo processo de estabilização do solo. São nessas reações que surgem os vínculos químicos entre as superfícies dos grãos do cimento e as superfícies rugosas dos grãos de solo, ou seja, a cimentação das partículas. Foi possível observar, nas etapas iniciais dos ensaios de laboratório, que a superfície dos grãos do lodo era pouca rugosa e, também, de baixa porosidade, diminuindo o entrosamento e a aglomeração das partículas de lodo e solo, pelo cimento.

4.2 MISTURAS COM SOLO ARENOSO

A Figura 4 apresenta as curvas de compactação do solo arenoso e mistura solo arenoso-lodo respectivamente. A Tabela 6 mostra os parâmetros de compactação, umidade ótima e massa específica seca máxima, obtidos das curvas do solo arenoso e da mistura solo arenoso-lodo (1:0,25).

**FIGURA 4:** Curvas de compactação do solo arenoso e das misturas solo arenoso-lodo e solo arenoso-cimento.

Da Figura 4 e Tabela 6 percebe-se que a mistura solo arenoso- cimento (10%) tem a maior massa específica seca. O valor de massa específica seca máxima ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) do solo apresenta valor maior que o da mistura solo-lodo e isso se deve ao fato de que o índice de vazios da mistura solo-lodo ($e = 0,5$) foi maior que o do solo ($e = 0,44$) após a compactação.

Tabela 7 mostra os valores de ISC e expansão dos corpos de prova compactados, do solo arenoso e da mistura solo arenoso-lodo.

Analisando a Tabela 7 percebe-se que o solo apresenta maior resistência à penetração padrão que a mistura solo-lodo, resultado da massa

específica seca máxima do solo ser maior que a da mistura solo-lodo. A expansão foi maior na mistura solo-lodo devido ao menor índice de vazios quando comparado com o solo. Isto acarreta maior infiltração da água cujo resultado leva a uma maior expansão.

A Tabela 8 mostra a RCS dos corpos de prova da mistura solo arenoso-cimento (10%) para 7 dias de cura.

Da Tabela 8 observa-se que mistura atingiu a RCS média de 2,7 MPa, acima do valor exigido pelo DNIT e o coeficiente de variação foi baixo, indicando baixa dispersão dos resultados.

TABELA 6: Umidades ótima e massas específicas secas obtidos da curva de compactação do solo arenoso e das misturas.

Descrição do Material	Umidade ótima ($w_{ót}$) (%)	Massa específica seca (γ_d) (g/cm^3)
Solo arenoso	14,0	1,86
Mistura Solo arenoso-cimento (10%)	12,9	1,88
Mistura Solo arenoso-Lodo (1:0,25)	14,5	1,80

Fonte: BERALDO, TEIXEIRA e RODRIGUEZ, (2011); TAHIRA e TEIXEIRA (2013).

TABELA 7: Índice Suporte Califórnia e expansão do solo arenoso e a mistura solo arenoso-lodo (1:0,25).

Descrição do Material	ISC (%)	Expansão (%)	Grau de Compactação (%)	Desvio da umidade ótima (%)
Solo arenoso	10,86	0,48	99,46	-0,9
Mistura Solo arenoso-lodo (1:0,25)	4,62	1,44	95,56	-0,3

Fonte: TAHIRA e TEIXEIRA (2013).

TABELA 8: Resistência à compressão simples aos 7 dias de idade das misturas.

Descrição do Material	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Mistura Solo arenoso-cimento (10%)	2,53	2,70	2,88	2,70	0,17	0,06

Fonte: TAHIRA e TEIXEIRA (2013).

4.3 EMPREGO EM PAVIMENTO

Os requisitos mínimos exigidos para emprego em pavimentos definidos pelo Departamento de Infraestrutura e Transporte (DNIT) estão na Tabela 9.

A Tabela 10 mostra um resumo da avaliação do emprego, dos solos argiloso e arenoso e suas misturas com cimento e/ou lodo, em pavimento usando o critério do DNIT.

A Tabela 10 mostra que o solo argiloso e arenoso e as misturas dos dois solos com lodo

foram aprovados apenas para uso na camada de subleito em obras de pavimentação. Das misturas com cimento somente foi aprovada para emprego de base de pavimento aquela de solo arenoso com 10 % de cimento.

A partir dos resultados obtidos verifica-se a possibilidade de uso do lodo de ETA em misturas com o solo argiloso e arenoso, para material de subleito e nas condições determinadas neste trabalho, pois os valores de ISC e expansão atenderam os requisitos mínimos exigidos pelo DNIT.

TABELA 9: Requisitos exigidos pelo DNIT para camadas de subleito, sub-base e base em obras de pavimentação.

Requisitos DNIT	ISC Mínimo (%)	Expansão Máxima (%)	RCS Mínima (MPa)
Base	80	0,5	2,1
Sub-Base	20	1,0	--
Subleito	2	2,0	--

Fonte: Manual do DNIT.

Tabela 10: Emprego dos materiais em pavimento a partir dos critérios do DNIT.

Material	Base	Sub-Base	Subleito
Solo argiloso	Reprovado	Reprovado	Aprovado
Mistura Solo argiloso-Lodo (1:1)	Reprovado	Reprovado	Aprovado
Solo argiloso-cimento (10%)	Reprovado	-----	-----
Mistura Solo argiloso-lodo-cimento (1:1 - 10%)	Reprovado	-----	-----
Solo arenoso	Reprovado	Reprovado	Aprovado
Mistura Solo arenoso-lodo (1:0,25)	Reprovado	Reprovado	Aprovado
Solo arenoso-cimento (10%)	Aprovado	-----	-----

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram estudadas dosagens de mistura do lodo de ETA em seu estado desidratado ao solo-cimento. Buscava-se encontrar uma alternativa para a disposição adequada para o lodo de ETA para que assim fosse possível seu emprego em pavimentos rodoviários.

Com relação aos resultados obtidos das misturas estudadas, pôde-se perceber que quando se adicionou o lodo de ETA, ocorreu um aumento do valor da massa específica seca máxima encontrada em relação ao ensaio da mistura sem

adição do lodo para o solo argiloso, o que não ocorreu para o solo arenoso. Também foram realizadas misturas dos solos com cimento com e sem o lodo de ETA e nesses casos as massas específicas secas aumentaram.

No geral os ensaios de ISC mostraram que os valores de resistência à penetração das misturas solo-lodo são menores que a dos solos, uma vez que as massas específicas secas máximas das misturas são menores que as dos solos. Como esperado a expansão da mistura solo-lodo foi maior que a do solo tendo em vista que o índice de vazios da mistura solo-lodo é maior que a do solo.

Em relação aos valores de resistência à compressão simples somente a mistura solo arenoso-cimento 10% atingiu a RCS mínima de 2,1 MPa. A mistura de solo argiloso-lodo-cimento (10%) ficou com valores menores do que a mistura de solo argiloso-cimento (10%). Desse modo, percebe-se que quando se adicionou o lodo sem destorroar a mistura solo argiloso-cimento, ocorreu uma diminuição da qualidade do conjunto. Os materiais não tiveram bom entrosamento, pois o lodo seco sem destorroamento é um material pouco rugoso e de baixa porosidade.

As dosagens avaliadas de solo argiloso-cimento (10%) e solo argiloso-lodo ETA-cimento (10%), usando o solo característico da cidade de Londrina, não atende ao critério do DNIT para a aplicação como sub-base ou bases de pavimentos rodoviários.

Com base nos requisitos do DNIT pode ser verificado que as mistura dos solos com o lodo de ETA podem ser utilizados na camada de subleito de um pavimento.

Ressalta-se que o ISC diminui e a expansão aumentou quando o lodo de ETA foi adicionado aos solos. Sendo assim fica clara a necessidade de um estudo mais aprofundado que comprove ser viável a adição do lodo em materiais para subleito, tendo em vista a sua interferência na concepção e desempenho do pavimento. Tais características poderão, por exemplo, aumentar as espessuras das outras camadas e conseqüentemente o volume de material necessário, refletindo nos custos finais do projeto. Além disso, deve ser verificado se o volume produzido de lodo de ETA será suficiente para atender a demanda da obra.

6. AGRADECIMENTO

À SANEPAR pelo apoio técnico e acesso ao material lodo, aos alunos bolsistas (CNPq, Fundação Araucária e UEL) e não bolsista pelo apoio no laboratório e nos textos científicos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Curitiba: Rima 1ª. ed., 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. ABCP - **Dosagem das misturas de solo-cimento**, capítulo IV. São Paulo, SP, 1962.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **ABNT NBR 10.004**: Resíduos sólidos - Classificação, Rio de Janeiro, 2004.

_____. **ABNT NBR 12025**: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **ABNT NBR 12023**: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Solo-cimento – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **ABNT NBR 12253**: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **ABNT NBR 12024**: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **ABNT NBR 9895**: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.

BAPTISTA, C. N. **Pavimentação – Compactação dos solos no campo, Camadas de bases e Estabilização dos solos**. Porto Alegre: Editora Globo 2ª Edição, 1976.

BERALDO, F. M., Teixeira, RS; Rodriguez, T.T. Caracterização Física, Capacidade de Compactação e Permeabilidade de Lodo de ETA. In **Anais: XIX EAIC – Encontro Anual de Iniciação Científica**. Ponta Grossa: UEPG, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **CONAMA nº 357**. Dispõe sobre a Classificação das Águas Doces, Salobras e Salinas do Território Nacional. Brasília, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT - **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro. 3ª Ed., 2006.

_____. **DNIT: ES143**: Pavimentos flexíveis: Base de solo-cimento – Especificação de serviço 143, Rio de Janeiro, 2010.

FADANELLI, L. E. A.; WIECHETECK - Estudo da Utilização do Lodo de Estação de Tratamento de Água em Solo Cimento para Pavimentação Rodoviária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v.02, n. 2, p. 31-37, ago.2010.

MORTARA, F.C. **Utilização de Leitões de Drenagem no Desaguamento de Lodos Anaeróbios**. 2011. 241f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011.

RICHTER, C. A. **Resíduos das estações de tratamento de água. Disposição final dos lodos**. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. São Paulo: Edgar Blucher LTDA, 2001.

SILVA, S. S., YSHIBA, J. K., LIDELFONSO, J. S., REIS, J. H. C. Estudo da viabilidade técnica do uso de misturas de solo, cimento e rcd para fins de pavimentação. In: Anais...CDROM **Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura I**. Maringá, 2011. p. 10.

SOUZA, C. H. U.; TEIXEIRA, R. S.; MARINGODA JUNIOR, A. Estudo da Mistura Solo-Lodo para Aterro Sanitário. In **Anais: XXI EAIC – Encontro Anual de Iniciação Científica**. Foz do Iguaçu: UNIOESTE, 2013.

TAHIRA, F.S.; TEIXEIRA, R.S. Estudo da Mistura Solo-Lodo para Pavimentação. In **Anais: XXI EAIC – Encontro Anual de Iniciação Científica**. Foz do Iguaçu: UNIOESTE, 2013.

TEIXEIRA, R S.; BRANCO, C. J. M C.; SOBRINHO, V. R. M., TEIXEIRA, S. H. C. - Avaliação de parâmetros geotécnicos por meio de correlações de resultados de SPT, CPT e DMT. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E GEOTECNIA. 2008, Búzios. **Anais XIV COBRAMSEG 2008**. Búzios 2008.CD-ROM.

TEIXEIRA, R S.; SOBRINHO, V. R. M, BRANCO, C. J. M C. - Avaliação do Perfil Estratigráfico Obtido por meio de SPTs, CPTs e DMTs Executados em Solo Laterítico da Cidade de Londrina/PR. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E GEOTECNIA. 2006. **Anais XIII COBRAMSEG**, Curitiba 2006. CR-ROM.

VAZ COELHO, R; FONTENELE, H.B.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S. Dosagem de Mistura Solo - Lodo (ETA) - Cimento para Emprego em Pavimentação. In: Simpósio sobre Materiais e Construção Civil/UTFPR. **Anais Simpósio sobre Materiais e Construção Civil/UTFPR**, Toledo, 2013.