

Análise laboratorial de lodos desidratados de estações de tratamento de água da região metropolitana de Belo Horizonte – MG para uso em pavimentação

Laboratory analysis of dehydrated sludge from water treatment stations in the metropolitan region of Belo Horizonte - MG for use in paving

DOI:10.34117/bjdv7n2-633

Recebimento dos originais: 10/01/2021

Aceitação para publicação: 28/02/2021

Hebert da Consolação Alves

Mestre em Geotecnia

Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas/Núcleo de Geotecnia
Campus Universitário SN - Morro do Cruzeiro 35400000 Ouro Preto- MG, Brasil
E-mail: alves@ufop.edu.br

Geraldo Luciano de Oliveira Marques

Doutor em Engenharia Civil

Universidade Federal de Juiz de Fora – Departamento de Transportes e Geotecnia
Faculdades de Engenharia
Endereço: Rua José Lourenço Kelmer SN – São Pedro 36036900, Juiz de Fora – MG,
Brasil
E-mail: geraldo.marques@ufjf.edu.br

RESUMO

Com o avanço e desenvolvimento dos grandes centros urbanos, os serviços de tratamento de água e esgoto tem sido de enorme importância para a qualidade de vida da população. Porém, são geradas grandes quantidades de resíduos nos processos e a disposição final destes tem sido um grande problema para as autarquias e concessionárias. A pesquisa teve como objetivo precípua realizar uma análise laboratorial de resíduos desidratados de estações de tratamento de água (lodo de ETA) da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH, visando sua utilização em camadas de pavimentos. O estudo realizou uma caracterização física, mecânica, química, ambiental e biológica em lodos provenientes das ETAs de Bela Fama, município de Nova Lima – MG e da ETA Rio Manso/Paraopeba localizada no município de Brumadinho – MG. Além da caracterização dos lodos puros, estudou –se o comportamento mecânico dos mesmos e também quanto estabilizados quimicamente com teores específicos de cal hidratada e cimento Portland.

Palavras-chave: Pavimentos, Lodo de ETA, Região Metropolitana de Belo Horizonte.

ABSTRACT

With the advancement and development of large urban centers, water and sewage treatment services have been of enormous importance for the quality of life of the population. However, large amounts of waste are generated in the processes and the final disposal of these has been a major problem for municipalities and utilities. The main

objective of the research was to perform a laboratory analysis of dehydrated residues from water treatment plants (ETA sludge) of the Metropolitan Region of Belo Horizonte (RMBH), aiming at its use in pavement layers. The study carried out a physical, chemical, environmental and biological characterization of sludge from Bela Fama ETAs, Nova Lima - MG and ETA Rio Manso/Paraopeba located in the city of Brumadinho - MG. In addition to the characterization of the pure sludge, the mechanical behavior of the sludge was studied, as well as the chemical stabilization with specific levels of hydrated lime and Portland cement.

Keyword: Pavements, ETA Sludge, Belo Horizonte Metropolitan Region.

1 INTRODUÇÃO

Para a produção de água potável, que é essencial para o desenvolvimento dos grandes centros urbanos, são gerados grandes volumes de resíduos convencionalmente denominados de Lodos de Estação de Tratamento de Água ou simplesmente Lodo de ETA. Este material é originado geralmente nos decantadores, sendo basicamente líquido, representando entre 0,2 e 5,0% do volume total de água tratada e é constituído por materiais inertes, matéria orgânica e precipitados químicos, incluindo compostos de alumínio e ferro em grandes quantidades, dependendo do tipo de coagulante utilizado no tratamento de potabilização da água (HOPPEN et al., 2005). Visando uma melhor disposição final e a uma aplicação como material de construção, alguns resíduos já têm sido utilizados na concepção de pavimentos de rodovias ou na constituição de outros materiais.

O transporte rodoviário no Brasil é a principal alternativa para movimentação de cargas e pessoas, contribuindo significativamente para o desenvolvimento socioeconômico nacional. Com uma participação de mais de 61% na matriz de transporte de cargas e de 95% na de passageiros, a infraestrutura rodoviária é também a principal responsável pela integração de todo o sistema de transporte no país. Dados do Sistema Nacional de Viação-SNV, apontam que a malha rodoviária nacional compreende 213.452 km de rodovias pavimentadas, contrapondo-se a 1.349.938 km de rodovias não pavimentadas (CNT,2020). Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) publicada em 2020 mostra que malha rodoviária brasileira foi avaliada com 59,20 % das rodovia com algum tipo de deficiência no pavimento, 47,60% possuem problemas no pavimento, 48,10% apresentam deficiência na sinalização e 75,70% possuem falhas na geometria. A Tabela 1.1 mostra os resultados obtidos das rodovias pesquisadas:

Tabela 0.1: Estado da Malha Rodoviária Brasileira.

| Variável | Extensão Total (km) | | | | | |
|---------------------|---------------------|--------|---------|--------|---------|----------------|
| | 2019 | | | | | |
| | Ótimo | Bom | Regular | Ruim | Péssimo | Total |
| Estado Geral | 12.951 | 31.714 | 37.628 | 19.039 | 7.531 | 108.863 |
| Pavimento | 42.015 | 9.768 | 38.060 | 14.965 | 4.055 | 108.863 |
| Sinalização | 15.198 | 41.248 | 28.460 | 12.677 | 11.280 | 108.863 |
| Geometria | 6.245 | 19.587 | 29.004 | 22.526 | 31.501 | 108.863 |

(Fonte: adaptado CNT 2020).

A mudança da legislação visando a preservação ambiental, em especial em impactos causados pelas obras de engenharia que além de necessitar de grandes reservas naturais de materiais naturais, bem como grandes áreas para disposição final vem fazendo com que diversas pesquisas busquem soluções que venham reduzir danos naturais no que se diz respeito à exploração e disposição de materiais. A utilização de rejeitos oriundos de processos industriais em camadas de pavimentos pode ser uma notável alternativa técnica e econômica, uma vez que encontrar jazidas de materiais que possuam desempenho e qualidade satisfatórios para a concepção de camadas de pavimentos tem ficado cada vez difícil. Por sua vez, a geração de resíduos devido à expansão industrial e também dos grandes centros urbanos devido principalmente ao desenvolvimento econômico tem aumentado significativamente.

2 METODOLOGIA DE ESTUDO

Visando facilitar a identificação dos lodos convencionou-se que o lodo do Sistema de Captação dos Rio das Velhas seria identificado com a sigla LDE–RV e que o lodo proveniente Sistema de Captação Rio Manso/Paraopeba seria identificado pela sigla LDE–RP. O organograma apresentado na Figura 1 apresenta a organização da pesquisa de acordo com os estudos e as análises realizadas:

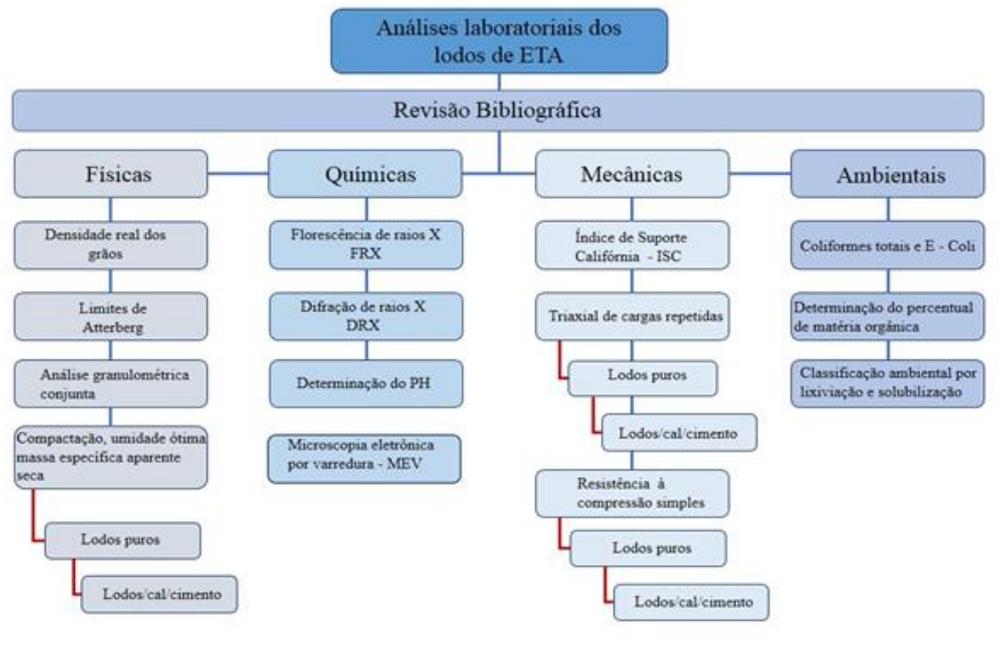


Figura 1 - Organograma da pesquisa.
Fonte: O autor, 2019.

2.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Para determinar as propriedades-índices das amostras de lodos, foram executados os ensaios de caracterização física. Os lodos foram coletados nas ETAs em seus respectivos sistemas de disposição final, onde há a concentração de todo material gerado nos processos de tratamento da água. Os materiais coletados foram preparados conforme os procedimentos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As normas utilizadas na caracterização dos lodos são apresentadas a seguir:

- NBR 6457/2016 –Amostras de Solos–Preparação para Ensaio de Compactação e Caracterização;
- NBR 7181/2016–Solo–Análise Granulométrica;
- NBR 6508/1984–Massa Específica Real dos Grãos;
- NBR 6459/2016–Solo–Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/2016–Solo–Determinação do Limite de Plasticidade;
- NBR 7182/2016–Solo–Ensaio de Compactação;
- NBR 12253/2012–Solo-cimento–Dosagem para emprego em camada de pavimento;

As amostras de lodo foram coletadas em seus sistemas de disposição após tratamento nas estações de tratamento conforme Figura 2 e preparadas para ensaio conforme Figura 3.



Figura 2: Secagem dos lodos: Sendo à esquerda o LDE –RV e o da direita o LDE–RP.
Fonte: Arquivo pessoal,2019.



Figura 3: Secagem dos lodos, sendo: A esquerda o LDE–RV e o da direita o LDE–RP.
Fonte: Arquivo pessoal,2019.

Na pesquisa foram realizados ensaios de compactação utilizando os lodos puros e com adição de cimento Portland e cal hidratada visando definir também a massa específica das misturas e suas respectivas umidades ótimas para os teores de cal e cimento definidos conforme a ABNT NBR 12253/2012. Para uma análise mais criteriosa no que se diz respeito à estabilização química foram definidos teores de cimento Portland e cal hidratada de 5%, 7%, 9%, 11% e 13%. Para os ensaios triaxiais cíclicos foram moldados corpos de prova com teores de cal hidratada e cimento Portland com 5%, 9% e 13%.

2.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Buscando um maior conhecimento sobre a natureza dos lodos por estes se tratarem de um resíduo industrial, foram realizados ensaios de caracterização química citados a seguir:

- Fluorescência de Raios X;
- Difração de raios X;
- Determinação do PH;

- Microscopia Eletrônica Por Varredura–MEV;

2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Os ensaios de caracterização mecânica dos LDEs puros e estabilizados quimicamente realizados foram realizados conforme as normas:

- NBR 9895/2016-Ensaio de Índice de Suporte Califórnia–ISC;
- DNIT 134/2010, Pavimentação–Solos–Determinação do Módulo de Resiliência – Método de ensaio;
- NBR 12025/2012–Solos–Ensaio de compressão simples;
- NBR 12253/2012–Solo Cimento-Dosagem para emprego para emprego como camada de pavimento;
- NBR 12024/2012–Solo Cimento–Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos;

2.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

Por ser classificado como um resíduo sólido urbano se faz necessária uma caracterização ambiental dos lodos de ETA para a verificação da existência de compostos químicos e ou biológicos que possam ser nocivos ao meio ambiente e com isto restringir a utilização do material em camadas de pavimentos rodoviários. Os ensaios realizados foram os seguintes:

- Determinação de Coliformes Totais (CT) e Escherichia coli (E.coli), conforme norma ISO 9308-1/2014;
- Determinação do percentual de matéria orgânica, conforme NBR 13600/1996;
- Ensaio de lixiviação e solubilização observando procedimentos de classificação ambiental de acordo com as normas NBR 10.004/2004, NBR 10.005/2004, NBR 10.006/2004 e NBR 10.007/2004;

3 RESULTADOS

3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

3.1.1 Massa específica dos grãos e Limites de Atterberg

A Tabela 3.1 apresenta os resultados de massa específica para os LDEs analisados e também dos Limites de Atterberg:

Tabela 3.1: Resultados do ensaio de massa especificados grãos e Limites.

| Material | Massa específica (g/cm ³) | Limite de Liquidez (%) | Limite de Plasticidade (%) | Índice de Plasticidade (%) |
|----------|---------------------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|
| LDE-RV | 2,994 | ND | Não plástico | ND |
| LDE-RP | 2,628 | ND | Não plástico | ND |

ND: Não determinado.

3.1.2 Análise granulométrica

Na Figuras 4 estão apresentadas as curvas granulométricas dos lodos de ETA realizados por ensaio de granulometria conjunta conforme a norma ABNT NBR 7181/2016. As curvas granulométricas dos lodos são semelhantes à de areias siltosas com pedregulhos, sem a presença de frações argilosas, com índice de grupo igual a 0, enquadrando-se na classificação SW da classificação SUCS e como um material A-2-5 ou A-2-4 na classificação TRB.

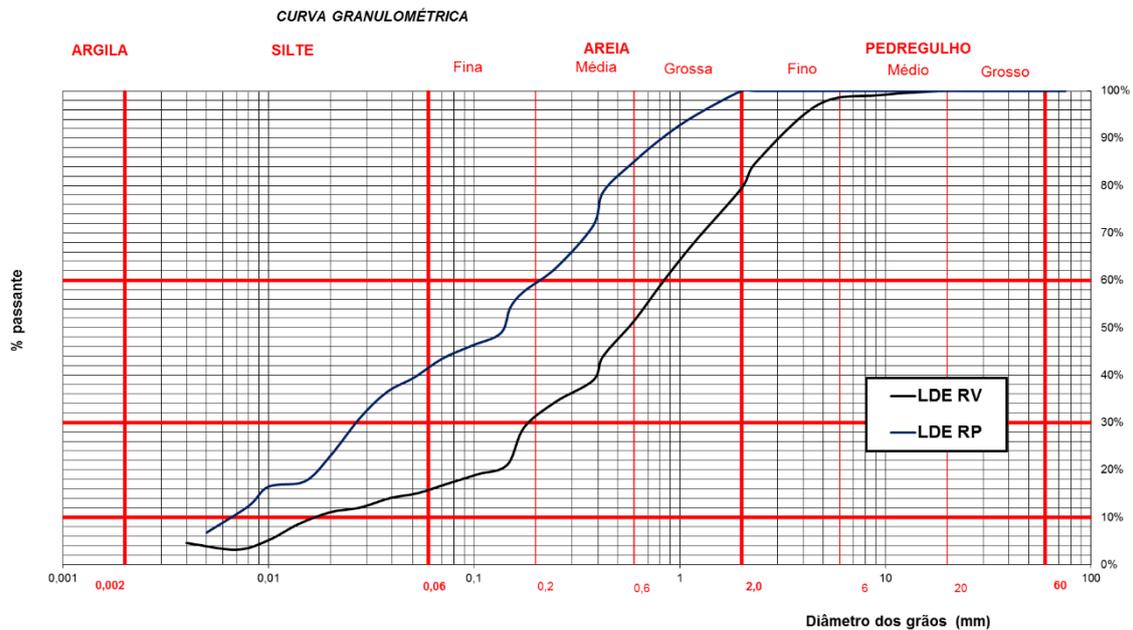


Figura 4: Curva granulométrica dos LDEs.

Os valores de D10, D30, e D60 assim como os valores do Coeficiente de Uniformidade (Cu) e o Coeficiente de Curvatura (Cc) dos lodos ensaiados também calculados pela curva granulométrica estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.2: Determinação de parâmetros granulométricos.

| Amostras | D ₁₀ | D ₃₀ | D ₆₀ | C _u | C _c |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| LDE - RV | 0,017 | 0,180 | 0,850 | 50,00 | 2,24 |
| LDE - RP | 0,0065 | 0,0270 | 0,210 | 32,30 | 0,53 |

De acordo com o coeficiente de uniformidade (C_u) os lodos não possuem uniformidade de partículas, já que possuem C_u > 15. Pelo coeficiente de curvatura (C_c) o LDE–RV é bem graduado possuindo 1 < C_c < 3 e o LDE–RP é mal graduado pois C_c < 1.

3.1.3 Compactação dos lodos

Os resultados de umidade ótima (W_{ótima}) e de massa específica máxima seca (γ_d) obtidos para os lodos puros e lodos estabilizados quimicamente com cal hidratada e com cimento Portland através de ensaio de compactação são apresentados nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.3: Massa específica e umidade ótima dos LDEs.

| Amostras | Puras | | Com cal hidratada | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|
| | | | 5% | | 7% | | 9% | | 11% | | 13% | |
| | W _{ótima} (%) | γ _d (g/cm ³) |
| LDE-RV | 36,0 | 1,22 | 39,0 | 1,788 | 40,0 | 1,791 | 42,0 | 1,792 | 43,0 | 1,793 | 45,0 | 1,805 |
| LDE-RV | 45,0 | 1,163 | 47,0 | 1,617 | 48,0 | 1,618 | 49,0 | 1,619 | 50,0 | 1,622 | 51,0 | 1,627 |

Tabela 3.5: Massa específica e umidade ótima dos LDEs.

| Amostras | Puras | | Com cimento Portland | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|
| | | | 5% | | 7% | | 9% | | 11% | | 13% | |
| | W _{ótima} (%) | γ _d (g/cm ³) |
| LDE-RV | 36,0 | 1,22 | 38,0 | 1,758 | 39,0 | 1,759 | 41,0 | 1,761 | 45,0 | 1,804 | 48,0 | 1,833 |
| LDE-RV | 45,0 | 1,163 | 47,0 | 1,559 | 50,0 | 1,571 | 50,0 | 1,578 | 54,0 | 1,582 | 57,0 | 1,598 |

Por tratar-se de materiais sedimentares, observa-se uma densidade máxima aparente seca dos lodos puros bem abaixo da de uma argila de alta plasticidade que possui geralmente uma densidade máxima aparente de 1,600g/cm³, para uma umidade ótima na faixa dos 20%. Com a estabilização química através de teores de cimento Portland e cal hidratada o que se observa é que há um acréscimo de densidade e ambos os lodos passam a ter valores de densidades comuns a solos finos geralmente aplicados em pavimentos.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

3.2.1 Ensaios de Índice de Suporte Califórnia-ISC

A Tabela 3.7 apresenta os resultados dos ensaios de ISC realizados nas amostras de lodos:

Tabela 3.7: Resultados dos ensaios de ISC.

| Material | Energia de compactação | ISC (%) | Expansão (%) |
|----------|------------------------|---------|--------------|
| LDE- RV | Intermediária | 36,3 | 0,3 |
| LDE- RP | Intermediária | 62,1 | 0,3 |

O LDE-RP apresentou resultado de ISC bem acima do LDE-RV. Os materiais pesquisados, apesar de características granulométricas muito finas, apresentam várias características semelhantes a um material granular, daí a opção de se utilizar a energia de compactação intermediária para caracterizar sua utilização. A expansão de ambos está dentro das especificações rodoviárias apresentando comportamento não expansivo de material granular. O Lodo LDE-RV possui características de suporte para sua utilização como sub-base ou reforço de subleito do pavimento.

3.2.2 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas

Foram obtidos modelos matemáticos para o comportamento dinâmico dos materiais através do ensaio de módulo de resiliência. Estes modelos podem ser apresentados em função da tensão confinante σ_3 ou tensão desvio σ_d chamados modelo simplificado ou através de ambas (modelo composto), sendo estes utilizados para caracterizar o comportamento dos materiais sob efeito de cargas dinâmicas e deformações nos diversos pontos do pavimento. A Tabela 3.8 apresenta os resultados dos ensaios triaxiais dinâmicos nos três modelos simples de comportamento do Módulo de Resiliência estudados para os lodos puros, em condições previamente definidas nos ensaios de compactação e a Figuras 6 e 7 os gráficos correspondentes aos respectivos modelos para o LDE-RP e LDE-RV:

Tabela 3.8 - Resultados da regressão linear dos três modelos simples para os lodos puros.

| Amostras | MR= $k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$ | | | MR= $k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$ | | | MR= $k_1 \cdot \theta^{k_2}$ | | |
|----------|--------------------------------|-------|----------------|--------------------------------|-------|----------------|------------------------------|-------|----------------|
| | k1 | k2 | R ² | k1 | k2 | R ² | k1 | k2 | R ² |
| LDE - RV | 39,3 | -0,20 | 0,11 | 37,0 | -0,27 | 0,34 | 49,4 | -0,26 | 0,21 |
| LDE - RP | 16,7 | -0,34 | 0,13 | 14,3 | -0,50 | 0,41 | 25,1 | -0,46 | 0,24 |

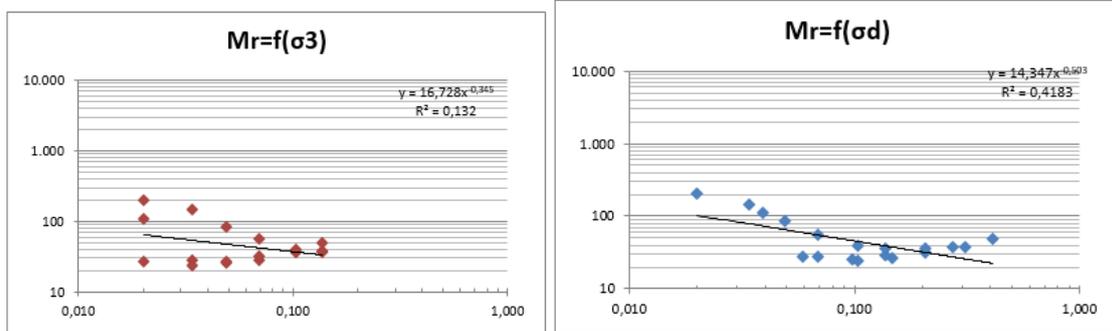


Figura 6 – Gráficos dos modelos simples do LDE–RP puro.

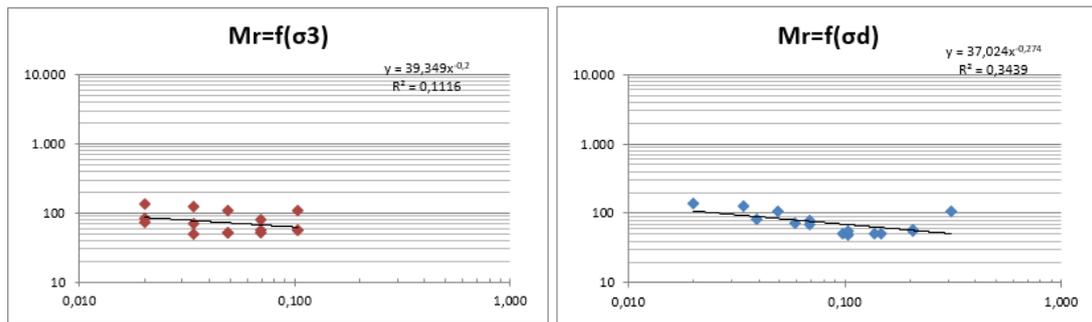


Figura 7 – Gráfico dos modelos simples do LDE–RV puro.

A regressão linear do modelo composto para os lodos puros é apresentada na Tabela 3.9 e as Figuras 8 e 9 apresentam os gráficos do modelo para o LDE-RP e LDE-RV, respectivamente:

Tabela 3.9 - Resultados da regressão linear do modelo composto para os lodos puros.

| Amostras | MR=k1*σ3 ^{k2} *σd ^{k3} | | | |
|----------|--|------|-------|----------------|
| | k1 | k2 | k3 | R ² |
| LDE - RV | 50,0 | 0,19 | -0,39 | 0,48 |
| LDE - RP | 28,0 | 0,49 | -0,83 | 0,70 |

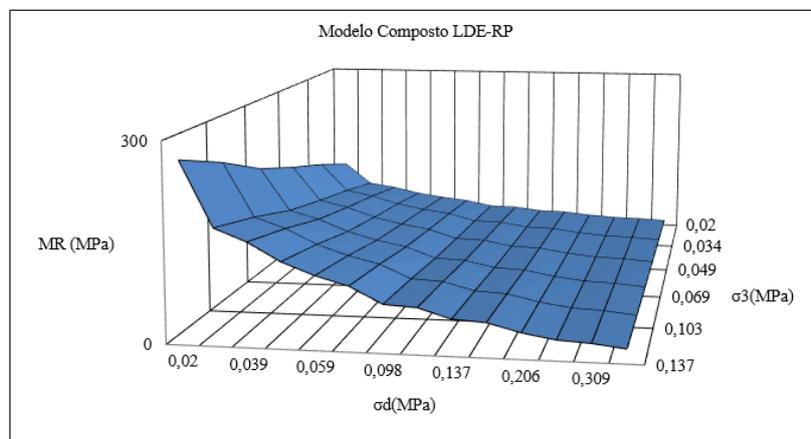


Figura 8 – Gráfico do modelo composto do LDE–RP puro.

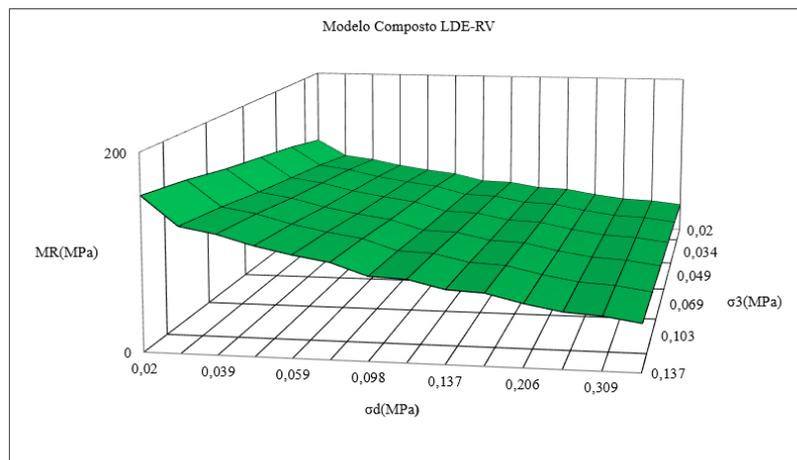


Figura 9 – Gráfico do modelo composto do LDE–RV puro.

Analisando os valores das tabelas 3.8 e 3.9 e as Figuras de 6 a 9, percebe-se que o modelo em função de σ_d e o modelo composto apresentaram os melhores valores de R^2 , sendo o ajuste do modelo composto melhor. A Tabela 3.10 apresenta os resultados da regressão linear para os três modelos simples para os lodos estabilizados quimicamente com cimento Portland nos teores utilizados na pesquisa e a Tabela 3.11 a regressão linear do modelo composto para os lodos também estabilizados com cimento.

Tabela 3.10 - Resultados da regressão linear dos três modelos simples estudados para os lodos estabilizados com cimento Portland.

| Amostras | MR=k1* σ_3^{k2} | | | MR=k1* σ_d^{k2} | | | MR=k1* θ^{k2} | | |
|----------------------|------------------------|-------|----------------|------------------------|-------|----------------|----------------------|-------|----------------|
| | k1 | k2 | R ² | k1 | k2 | R ² | k1 | k2 | R ² |
| LDE RV + 5% cimento | 50,3 | -0,39 | 0,19 | 43,1 | -0,55 | 0,57 | 79,69 | -0,51 | 0,34 |
| LDE RV + 9% cimento | 69,8 | -0,14 | 0,11 | 64,8 | -0,22 | 0,36 | 83,03 | -0,20 | 0,21 |
| LDE RV + 13% cimento | 135,4 | -0,08 | 0,03 | 110,1 | -0,19 | 0,28 | 141,17 | -0,14 | 0,11 |
| LDE RP + 5% cimento | 16,2 | -0,43 | 0,29 | 17,5 | -0,51 | 0,61 | 28,97 | -0,52 | 0,45 |
| LDE RP + 9% cimento | 37,22 | -0,66 | 0,22 | 23,47 | -1,15 | 0,72 | 79,08 | -0,97 | 0,43 |
| LDE RP+ 13% cimento | 48,4 | -0,34 | 0,22 | 45,5 | -0,46 | 0,60 | 74,0 | -0,43 | 0,38 |

Tabela 3.11 - Resultados da regressão linear do modelo composto lodos estabilizados com cimento Portland.

| Amostras | MR= k1* σ_3^{k2} * σ_d^{k3} | | | |
|----------------------|---|-------|-------|----------------|
| | k1 | k2 | k3 | R ² |
| LDE RV + 5% cimento | 87,00 | 0,53 | -0,91 | 0,72 |
| LDE RV + 9% cimento | 88,00 | -0,23 | 1,37 | 0,52 |
| LDE RV + 13% cimento | 175,00 | 0,34 | -0,42 | 0,56 |

| | | | | |
|----------------------|-------|------|-------|------|
| LDE RP + 5% cimento | 24,00 | 0,25 | -0,68 | 0,83 |
| LDE RP + 9% cimento | 65,00 | 0,65 | -1,45 | 0,75 |
| LDE RP + 13% cimento | 74,00 | 0,36 | -0,70 | 0,80 |

Novamente os modelos que apresentaram melhores valores de R^2 foram os modelos em função de σd e composto, com melhores resultados para este último. A Tabela 3.12 apresenta os resultados da regressão linear para os três modelos simples para os lodos estabilizados quimicamente com cal hidratada nos teores utilizados na pesquisa e a Tabela 3.13 a regressão linear do modelo composto para os lodos estabilizados com cal hidratada:

Tabela 3.12 - Resultados da regressão linear dos três modelos simples estudados para os lodos estabilizados com cal hidratada.

| Amostras | MR=k1* σ^3 k ² | | | MR=k1* σd k ² | | | MR=k1* θ k ² | | |
|------------------|----------------------------------|-------|----------------|----------------------------------|-------|----------------|--------------------------------|-------|----------------|
| | k1 | k2 | R ² | k1 | k2 | R ² | k1 | k2 | R ² |
| LDE RV + 5% cal | 39,1 | -0,54 | 0,26 | 33,40 | -0,81 | 0,59 | 88,77 | -0,30 | 0,04 |
| LDE RV + 9% cal | 652,66 | 0,20 | 0,42 | 423,19 | 0,07 | 0,07 | 442,22 | 0,15 | 0,26 |
| LDE RV + 13% cal | 325,4 | 0,04 | 0,02 | 238,0 | -0,08 | 0,10 | 281,4 | -0,02 | 0,003 |
| LDE RP + 5% cal | 24,10 | -0,49 | 0,20 | 27,60 | -0,56 | 0,39 | 47,07 | -0,57 | 0,30 |
| LDE RP + 9% cal | 66,50 | -0,44 | 0,46 | 80,20 | -0,47 | 0,79 | 123,6 | -0,50 | 0,64 |
| LDE RP+ 13% cal | 274,2 | 0,08 | 0,05 | 198,0 | -0,04 | 0,02 | 225,5 | 0,02 | 0,004 |

Tabela 3.13 - Resultados da regressão linear do modelo composto lodos estabilizados com cal hidratada.

| Amostras | MR= k1* σ^3 k ² * σd k ³ | | | |
|------------------|---|-------|-------|----------------|
| | k1 | k2 | k3 | R ² |
| LDE RV + 5% cal | 12,00 | -1,81 | 1,17 | 0,29 |
| LDE RV + 9% cal | 742,00 | 0,42 | -0,21 | 0,60 |
| LDE RV + 13% cal | 401,00 | 0,39 | -0,21 | 0,24 |
| LDE RP + 5% cal | 36,00 | 0,21 | -0,70 | 0,58 |
| LDE RP + 9% cal | 92,00 | 0,10 | -0,54 | 0,89 |
| LDE RP + 13% cal | 24,00 | 0,25 | -0,68 | 0,17 |

Para a estabilização com a cal, foi observado a mesma tendência que os anteriores, com o modelo composto apresentando melhores valores de R^2 para a maioria dos casos. Analisando-se os valores de R^2 obtidos com a utilização dos modelos tanto para os LDEs puros quanto para os estabilizados quimicamente com cimento Portland e cal hidratada, observou-se que o que mais se adequa é o modelo composto, embora o material apresente curva granulométrica característica de material granular e que possuem significativas variações entres os coeficientes de correlação de um modelo para o outro.

Com relação a valores indicativos, sejam eles mínimos ou máximos, não existem especificações brasileiras que indiquem estes valores. Nas especificações de serviços de pavimentação brasileiras não são indicados valores mínimos para MR. O novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis nacional (MEDINA) também não especifica valores mínimos para o MR, porém utilizam estes modelos na caracterização resiliente dos materiais de pavimentação.

3.2.3 Ensaios de Compressão Simples

Os resultados dos ensaios de compressão simples são apresentados na Tabela 3.14, para os lodos puros na umidade ótima bem como para as estabilizações com cal hidratada e com cimento Portland:

Tabela 3.14 - Resultados dos ensaios de compressão simples dos LDEs.

| Amostras | Puras | Com cal hidratada | | | | |
|----------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 5% | 7% | 9% | 11% | 13% |
| | (Mpa) | (Mpa) | (Mpa) | (Mpa) | (Mpa) | (Mpa) |
| LDE-RV | 0,28 | 0,19 | 0,26 | 0,32 | 0,44 | 0,64 |
| LDE-RV | 0,57 | 0,25 | 0,71 | 0,76 | 1,02 | 1,09 |
| Amostras | Puras | Com cimento Portland | | | | |
| | | 5% | 7% | 9% | 11% | 13% |
| | (Mpa) | (Mpa) | (Mpa) | (Mpa) | (Mpa) | (Mpa) |
| LDE-RV | 0,28 | 0,41 | 0,48 | 0,48 | 0,51 | 0,57 |
| LDE-RV | 0,57 | 0,70 | 0,79 | 0,93 | 1,02 | 1,09 |

De acordo com o DNIT (2006), misturas de cimento ao solo no teor entre 2 a 4% são denominadas solo melhorado com cimento e teores que variam de 6 a 10% de cimento em mistura solo-cimento. Seus parâmetros de resistência também variam. A especificação do Departamento de Rodovias de Rodagem do Paraná, DER/PR ES-P 11/2005, define os parâmetros mínimos de resistência à compressão simples aos 7 dias para solos melhorados com cimento com valores entre 1,5 MPa e 2,1 MPa para materiais base. Já para mistura solo-cimento, esse valor tem que ser superior a 2,1 MPa. Logo nenhum teor estabilizado nesta pesquisa atendeu as especificações desta norma.

3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

3.3.1 Ensaios de Florescência de Raios X-FRX

Os ensaios realizados mostram uma diversificada composição química dos LDEs. Sua constituição contém metais cujo percentual existente sofre variações de acordo com o tipo de polímero (coagulante) empregado no processo de potabilização. Para os LDE-RV, LDE-RP estudados nesta pesquisa bem como para os valores de referência apresentados, os compostos presentes em maior quantidade são Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 . A Tabela 3.18 apresenta os resultados da composição química dos lodos analisados através do ensaio de FRX bem como uma comparação com resultados apresentados em outras pesquisas com materiais similares.

Observa-se que os lodos analisados possuem percentuais de Fe_2O_3 superiores aos lodos das pesquisas de referência. Certamente se deve ao fato da existência deste elemento químico na composição do coagulante, e também porque rios onde são realizadas as captações estarem situados no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, local de grande predominância de minério de ferro.

Tabela 3.18 - Resultados das análises químicas por Florescência de Raios X

| Análise química quantitativa por Florescência de Raios X - FRX (%) | | | | | |
|--|---------------------|--------|--|----------------|-----------------|
| Compostos químicos | Valores encontrados | | Valores apresentados em pesquisas anteriores | | |
| | LDE-RV | LDE-RP | LUCENA (2012) | DELGADO (2016) | OLIVEIRA (2006) |
| Fe_2O_3 | 71,5 | 35,91 | 23,33 | 23,5 | 12,79 |
| Al_2O_3 | 4,54 | 31,53 | 33,39 | 37,6 | 31,71 |
| SiO_2 | 10,85 | 27,48 | 29,66 | 29,4 | 35,92 |
| MnO | 1,35 | 1,55 | - | 0,26 | 0,09 |
| K_2O | 0,45 | 1,05 | - | 0,97 | 0,58 |
| TiO_2 | - | 0,99 | - | 0,99 | 1,1 |
| CaO | 9,97 | 0,51 | - | 0,4 | 0,1 |
| SO_3 | 0,13 | 0,45 | - | 3,8 | |
| BaO | - | 0,36 | - | - | - |
| Cr_2O_3 | - | 0,11 | - | 0,06 | - |
| ZrO_2 | - | 0,02 | - | 0,04 | - |
| SrO | 0,09 | 0,18 | - | - | - |
| P_2O_5 | 0,69 | - | - | 2,24 | 0,35 |
| ZnO | 0,21 | - | - | 0,04 | - |
| Sc_2O_3 | 0,19 | - | - | - | - |

3.3.2 Ensaios de Difração de Raios X-DRX

As Figuras 10 e 11 apresentam respectivamente os espectros de DRX de análise mineralógica dos lodos analisados, cuja interpretação foi possível com o auxílio do Inorganic Crystal Structure Database-ICSD, que trata-se de um banco de dados digital que fornece informações sobre compostos orgânicos de estrutura cristalina, nomenclaturas, fórmulas moleculares, propriedades cristalográficas e condições de determinação destas propriedades e as bibliográficas de onde foram extraídas as informações. No lodo LDE-RV foram identificados compostos minerais como calcita, hematita, quartzo e alumina. Tais compostos podem evidenciar também determinada atividade pozolânica do material, mas esta análise não é objetivo deste estudo. No lodo LDE-RP foram identificados compostos como hematita, quartzo, caulinita, moscovita e chabazita.

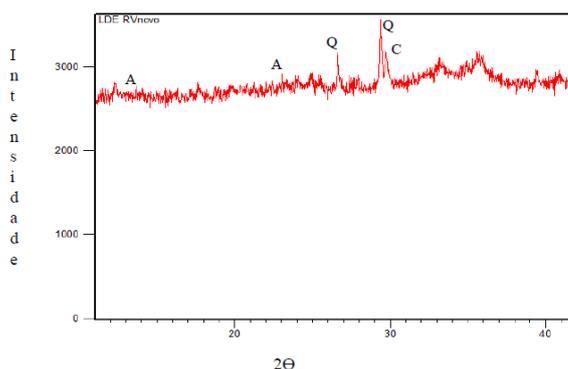


Figura 10 - Espectros de difração do LDE-RV onde: A (alumina), Q (quartzo), C (calcita)

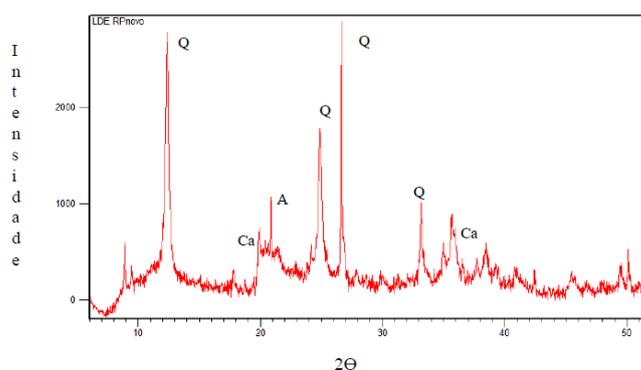


Figura 11- Espectros de difração do LDE-RP onde: A (alumina), Q (quartzo), Ca (caulinita).

3.3.3 Ensaios de determinação do pH:

Os resultados de pH encontrados para os lodos ensaiados são apresentados na Tabela 3.19:

Tabela 3.19-Resultados dos ensaios de determinação do pH.

| Amostra | Estado da amostra em ensaio | Condição para sua medição | pH |
|----------|-------------------------------------|---------------------------|------|
| LDE - RV | Semissólido (<i>in natura</i>) | Diluído em água destilada | 9,35 |
| LDE - RP | Semissólido (<i>in natura</i>) | Diluído em água destilada | 8,50 |

Observa-se de acordo com os resultados obtidos, os lodos de ETA pesquisados apresentam um pH básico. Tal fato certamente pode ser atribuído pelo percentual de adição de coagulantes no processo de tratamento da água. Outros pesquisadores como Lucena (2012), Ozorio *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2004) e Reis (2006) obtiveram em seus estudos valores de pH para o resíduo de lodo de ETA menor que 7.

3.3.4 Ensaios de Microscopia Eletrônica por Varredura-MEV:

As análises de MEV realizadas, embora em pequena quantidade, podem contribuir para o entendimento do comportamento químico e físico do material bem como auxiliar na adoção de metodologias que possam melhorar as características dos materiais para uso em camada de pavimentos. As Figuras 12 e 13 apresentam a avaliação micro estrutural dos lodos de ETA analisados o que possibilita a identificação de algumas estruturas cristalinas detectadas no ensaio de Difração de Raios X através do microscópio eletrônico de varredura.

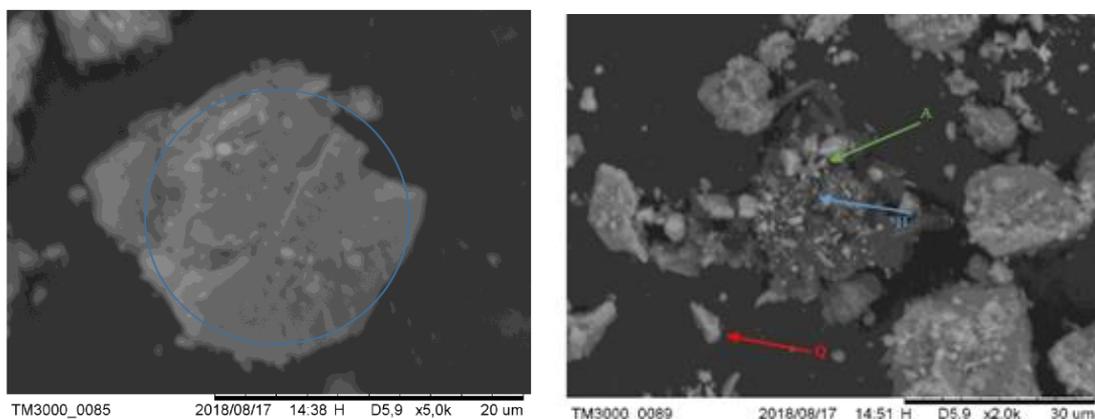


Figura 12 - Microestrutura de calcita, alumina (A), quartzo (Q) e hematita (H) LDE-RV.

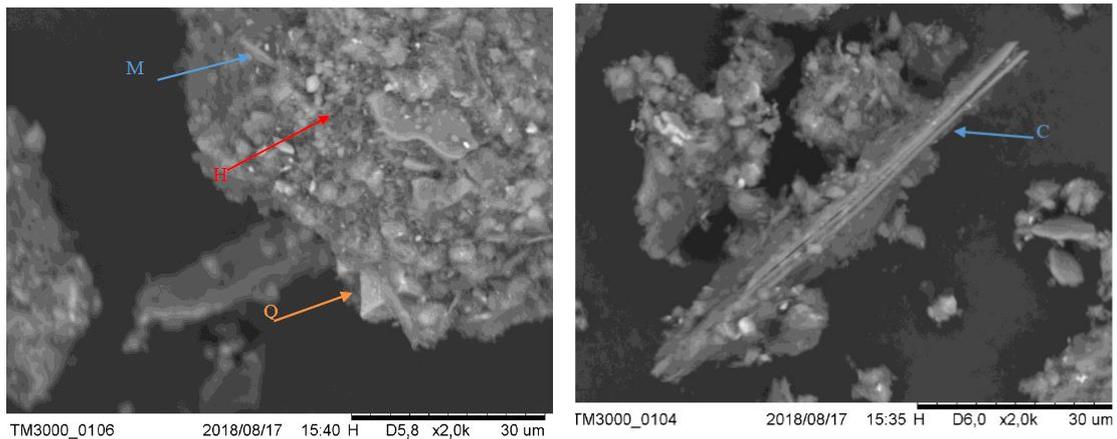


Figura 13-Microestrutura de moscovita (M), quartzo (Q) hematita (H) e caulinita (C) LDE-RP.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

3.4.1 Determinação de Coliformes totais (CT) e *Escherichia coli* (E. coli):

Realizou-se a caracterização microbiológica do lodo pela quantificação de coliformes totais e termos tolerantes, sendo esse último representado pela determinação de *Escherichia coli*. A análise foi desenvolvida com o lodo *in natura* e após o período de secagem, sendo os resultados apresentados nas Tabelas 3.20.

Tabela 3.4 - Resultados da análise de CT e E. coli dos lodos.

| LDEs "in natura" | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| Amostras | Coliformes Totais | E. Coli |
| LDE-RV | 10,1 NMP/g de lodo | 1,8 NMP/g de lodo |
| LDE-RV | 19,7 NMP/g de lodo | 1,2 NMP/g de lodo |
| LDEs "desidratados" | | |
| Amostras | Coliformes Totais | E. Coli |
| LDE-RV | 0,075 NMP/g de lodo | 0,052 NMP/g de lodo |
| LDE-RV | 0,324 NMP/g de lodo | 0,193 NMP/g de lodo |

Segundo as normas estabelecidas pela resolução n° 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA (BRASIL, 2006) a concentração de coliformes fecais segura para uso agrícola do lodo deve ficar abaixo de 10^6 NMP/g de base seca para lodos de classe B e 10^3 NMP/g de base seca para os de classe A. Os lodos de ETA se enquadram na classe A, de acordo com a mesma legislação. Nesse contexto verifica-se que tanto o lodo *in natura* quanto o desidratado são seguros para tal fim, obedecendo a margem de segurança estabelecida pela legislação.

3.4.2 Determinação do percentual de matéria orgânica

A Tabela 3.22 apresenta os resultados dos percentuais de matéria orgânica encontrados nos lodos.

Tabela 3.5 - Resultados dos percentuais de teor de matéria orgânica nos lodos.

| Amostra | Matéria orgânica (%) |
|----------|----------------------|
| LDE - RV | 25,15 |
| LDE - RP | 22,61 |

A matéria orgânica normalmente é resultante da decomposição de vegetais podendo ocasionar perda de resistência à compressão nas bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente com cal e cimento. Um valor de referência que pode ser adotado é o relacionado aos agregados miúdos para concretos e argamassas definidos pela norma ABNTABNT NBR 7211/2009 que determina um percentual máximo de matéria orgânica no material de 10%. Neste caso ambas amostras apresentam percentual bem acima do valor de referência.

3.4.3 Classificação ambiental dos lodos

Os extratos lixiviados e solubilizados dos lodos foram submetidos ao ensaio de espectrometria de emissão ótica com plasma-ICP OES que determinou a concentração de metais existentes nas amostras. A Tabela 3.23 apresenta os resultados provenientes das análises de lixiviação das amostras de lodo.

Tabela 3.6 - Resultados da análise de lixiviados dos lodos em mg/L.

| Amostra | S | As | Cu | Fe | Mg | Mn |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|------------------|
| LDE - RV | 53,56 | 0,08 | <0,1 | 40,35 | 33,20 | 0,62 |
| LDE - RP | 50,97 | - | <0,1 | 28,14 | 5,0 | 39,8 |
| Limite de Norma ¹ | 250 ² | 1,0 ¹ | 2,0 ³ | 0,3 ³ | - | 0,1 ² |

Nota:

- 1- Parâmetros e limites máximos no extrato lixiviados conforme recomendação da ABNTABNT NBR 10005 (2004b) e ABNTABNT NBR 10006 (2004c) e CFR (2003).
- 2- Valores baseados no Ministério da Saúde (MS) - Portaria No 518 de 2004 (MS, 2004).
- 3- Valores sugeridos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) - Portaria n° 195 de 2005 (CETESB,2005).

A Tabela 3.24 apresenta os resultados provenientes das análises de solubilização das amostras de lodo.

Tabela 3.7 - Resultados da análise de solubilizados dos lodos em mg/L.

| Amostra | As | Cr | Cu | Fe | Mn | Al |
|---------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| LDE - RV | 0,004 | 1,35 | 0,34 | 230,65 | 179,72 | 38,00 |
| LDE - RP | 0,006 | 1,28 | 0,11 | 214,40 | 144,70 | 1130,4 |
| Limite Norma ¹ | 0,01 ¹ | 0,05 ¹ | 2,0 ³ | 0,3 ³ | 0,1 ² | 0,2 ² |

Nota:

- 1- Parâmetros e limites máximos no extrato solubilizado conforme recomendação da ABNTABNT NBR 10005 (2004b) e ABNTABNT NBR 10006 (2004c) e CFR (2003).
- 2- Valores baseados no Ministério da Saúde (MS) - Portaria No 518 de 2004 (MS, 2004).
- 3- Valores sugeridos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) - Portaria n° 195 de 2005 (CETESB, 2005).

As análises de lixiviação e de solubilização mostram uma considerável concentração de ferro, manganês e alumínio nos lodos analisados. No processo de potabilização da água são adicionados produtos que tem estes elementos em sua constituição, o que pode justificar a grande concentração destes. É necessário avaliar se ao realizar as estabilizações químicas com cal hidratada e cimento Portland há a diminuição das referidas concentrações devido a possíveis ligações químicas. Os lodos são classificados como Resíduos Classe II A, isto é, não perigosos e não inertes devido aos elevados valores principalmente de ferro total e de manganês.

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados proporcionaram as seguintes conclusões:

- Quanto aos valores de ISC encontrados indicam que os lodos poderão ser utilizados como reforço do subleito e sub-base de pavimentos, sendo que os mesmos possuem importante capacidade de suporte;
- Quanto aos valores de MR encontrados tanto para os lodos puros quanto para os estabilizados quimicamente com cimento Portland e cal hidratada (alguns valores) foram bem inferiores aos valores de referência apresentados, mostrando que um estudo mais detalhado relativo a estabilização química dos lodos pesquisados deverá ser realizada buscando seu melhor aproveitamento em projetos de pavimentos;
- Quanto aos ensaios químicos de Difração de Raios X, Florescência de Raios X e de Microscopia Eletrônica por Varredura apontam a existência de elementos como a

caulinita, calcita e moscovita, além de alumina. Estes elementos evidenciam que os LDEs possuem certas atividades pozolânicas podendo serem utilizados na constituição de aglomerantes como o cimento Portland ou geopolímeros;

-Quanto aos ensaios de caracterização ambiental, devido as grandes concentrações de ferro total, manganês e alumínio, o emprego dos LDEs em pavimentação poderia representar perigo ambiental caso os lodos confinados em camadas de subleito, reforço de subleito e sub-base tiverem contato direto com lençóis freáticos. A estabilização química com cal hidratada e cimento Portland poderá ser um atenuante a este problema sendo que estudos mais específicos podem comprovar esta hipótese;

-Os elevados teores de matérias orgânicas encontrados podem inviabilizar a utilização dos LDEs na sua forma pura, pois a decomposição destas irá causar uma desintegração da estrutura compactada do pavimento e a perda das características físico-mecânica das camadas constituintes. A estabilização química com cal hidratada seria uma alternativa para a eliminação da referida situação;

-As análises laboratoriais confirmam a possibilidade de aplicação dos LDEs na pavimentação, o que poderá gerar ainda uma nova possibilidade de disposição dos materiais evitando-se assim disposições em aterros e impactos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 6457: Amostras de solo-Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 12253: Solo-cimento- Dosagem para emprego em camada de pavimento. Rio de Janeiro, 2012.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12025: Solo-cimento Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2012.
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 6459: Solo-Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- (5) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 6508: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 7180: Solo-Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- (7) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 7181: Solo-Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016
- (8) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 7182: Solo-Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- (9) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- (10) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 10005: Lixiviação de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- (11) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 10006: Solubilização de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- (12) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- (13) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 13.600: Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro, 1996.
- (14) BRASIL. Ministério do Meio Ambiente–Resolução nº375 de 29 de agosto de 2006, Brasília, 2006.
- (15) COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Portaria nº195 de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências. São Paulo,2005

(16) COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Coliformes termo tolerantes: Determinação em amostras ambientais pela técnica de tubos múltiplos com meio A1 - método de ensaio. Norma Técnica L5.406/2007. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/normas-tecnicas-cetesb/normas-tecnicas-vigentes/>

(17) CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE, CNT. Pesquisa CNT Rodovias, 2020.

(18) DELGADO, J.V.C, Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada. Dissertação de Mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro: 2016.

(19) DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Pavimentação Asfáltica. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2006.

(20) DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT134/2010: Pavimentação-Solos-Determinação do módulo de resiliência-Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

(21) HOPPEN, C., PORTELLA, K. F., JOUKOSKI, A., *et al.*, “Co-disposição de Lodo Centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em Matriz de Concreto: Método Alternativo de Preservação Ambiental”, *Cerâmica*, v. 51, pp. 85-95, 2005

(22) ISO 9308-1/2014Amd 2016: Water quality — Enumeration of *Escherichia coli* and coliform bacteria — Part 1: Membrane filtration method for waters with low bacterial background flora;

(23) LUCENA, L. C. Estudo de Aplicação de Misturas Solo Lodo em Base e Sub-base de Pavimentos. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2012.

(24) OLIVEIRA, E. M.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. “Caracterização de Resíduo (lodo) Proveniente de Estação de Tratamento de Águas Visando sua Utilização em Cerâmica Vermelha”, *Cerâmica*, v. 50, pp. 324-330;

(25) OZÓRIO, A., ARAÚJO, J. A., “Avaliação de Tijolos Ecológicos Compostos por Lodo de ETA e Resíduos da Construção Civil”. XI Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Resende, RJ, Brasil, 2014

(26) REIS, E. L. Abordagem Sistêmica do Sistema de Tratamento de Água de Registro, São Paulo, com Ênfase na Avaliação do Impacto do Descarte dos Resíduos na Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape. Tese de Doutorado, IPEN/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2006.