

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE ETA E ETE EM OBRAS DE ENGENHARIA

Rodrigo Nobre de Araújo¹
Leonardo Ramos da Silveira²

¹Universidade Paulista (UNIP)/ Campus Brasília – Curso de Graduação em Engenharia Civil,
rodrigonobre38@gmail.com

²Universidade Paulista (UNIP)/ Campus Brasília – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Professor Doutor em
Geotecnia leo_engambiental@hotmail.com

Resumo

Dentre os problemas globais que mais necessitam estudos e soluções frente à crise ambiental, estão os referentes ao destino dos resíduos gerados de Estações de Tratamento de Água (ETA) e de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Os resíduos gerados nas ETEs e ETAs na maioria das vezes são dispostos em aterros sanitários, de forma que não trazem benefício algum e acabam agredindo o meio ambiente. O intuito de dar uma disposição mais correta a este resíduo que é um grande agente poluidor torna-se necessário, pensando nisso, esse estudo têm por objetivo demonstrar alguns meios de reutilização do lodo que não agrida ao meio ambiente, e que apresentam aplicações na engenharia visando os possíveis benefícios ocasionados pelo lodo. Para tanto, no decorrer deste estudo são citados alguns trabalhos que estudaram as viabilidades e benefícios do lodo de ETA e ETE empregados em diversas áreas da Engenharia.

Palavras Chave: Lodo de ETA; Lodo de ETE; Reutilização de Lodo; Disposição final.

Abstract

Among the global problems that need more studies and front solutions to the environmental crisis, are those relating to the residue destination of Water Treatment Stations (WTS) and Sewer Treatment Stations (STS). The waste generated in WTSs and STSs for the most part are laid out in landfill, so that do not bring any benefit and end up attacking the environment. The order to provide a more correct disposal final in this residue which is a great pollutant becomes necessary, thinking about it, this study aim to demonstrate some sludge reuse means that does not harm the environment, and which have applications in engineering aimed at the possible benefits caused by the sludge. Therefore, in the course of this study are cited some studies to investigate the viability and benefits of sewage sludge of WTS and STS in various areas of engineering.

Keywords: Sludge WTS; Sludge STS; Reuse of sludge; final disposal

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas mundiais enfrentados pela humanidade atualmente é a grande quantidade de resíduos gerados nos centros urbanos. Este problema é ocasionado na maioria das vezes à má gestão ou falta de saneamento básico.

O saneamento básico é um dos fatores essenciais para um país, pois nele engloba os serviços de água tratada, coleta e tratamento dos esgotos o que levam à melhoria da qualidade de vidas das pessoas. No Brasil, o saneamento básico é regido pela [Lei nº. 11.445/2007](#) como o conjunto de serviços, infraestrutura e Instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais.

Na criação de uma Estação de Tratamento de Esgotos, um novo problema ambiental é gerado: a disposição que será dada ao lodo de esgoto, resíduo produzido durante o processo de tratamento das águas residuárias. Este problema é de contexto mundial, pois tais resíduos apresentam certo grau de complexidade em sua gestão.

A destinação final do lodo possui um alto grau de importância e complexidade, pois necessita de uma integração entre os setores da sociedade. Na concepção das ETEs é necessário antes mesmo de construí-la, que seja feita um estudo para verificar qual será a melhor forma de dispor seus resíduos, garantindo assim sua eficiência de operação.

A lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, ao instituir a Política Nacional de Resíduos Sólidos, foca na solução para os resíduos sólidos, na qual a gestão dos resíduos deve ser desenvolvida através de um conjunto de ações considerando as dimensões políticas, ambientais, sociais, culturais e econômicas sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

Diante da necessidade de preservação ambiental ao se destinar corretamente os resíduos sólidos resultantes do tratamento de esgoto, surge o desafio de encontrar formas economicamente viáveis e ecologicamente seguras para reutilizar o lodo, reintegrando um produto de descarte ao ciclo produtivo (Godoy, 2013).

Segundo Silveira (2014) existem diversas técnicas para a disposição do lodo de esgoto, sendo que grande parte das vezes o processo não utiliza técnicas corretas de engenharia, o que pode acarretar serias consequências para o meio ambiente em função da migração dos contaminantes contidos no lodo para o solo e os lençóis de água subterrânea, além de poder mudar as características físicas do solo local.

Nas estações de Tratamento de Água são gerados também enormes quantidades de lodo, sendo que atualmente as formas de dispor este lodo são em aterros sanitários ou simplesmente

lançando-os na rede de esgotos sanitários. No processo da decantação, é originado o lodo da Estação de Tratamento de Água, isso ocorre devido às impurezas retidas no processo de potabilização das águas naturais e dos produtos químicos utilizados como o alumínio, ferro, manganês e cromo, o que faz com que se não forem dispostos de forma adequada acabem poluindo os corpos receptores. Com isso em mente, torna-se necessário buscar alternativas para a sua reutilização de forma a não agredir o meio ambiente.

Com o foco na preservação ambiental e a reutilização desses resíduos, buscam-se meios para reduzir esse impacto ambiental gerado nas Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), no qual vem sendo estudadas e potencialmente empregadas algumas formas de disposição final, podendo trazer certos benefícios para a sua reutilização na Engenharia. Com isso, esse trabalho busca demonstrar a potencialidade do lodo de ETA e ETE empregados para diversos fins como: Pavimentação (base e sub-base), concreto, materiais cerâmicos, estabilizante de solos entre outras aplicações.

Este trabalho se subdivide em duas partes principais, a primeira demonstrando as formas de reutilização do lodo de ETA, e a segunda, do lodo de ETE. Dando enfoque nos principais resultados apresentados pelas referências, e destacando benefícios da reutilização de lodo em obras de Engenharia.

2. Tratamento de Água

O objetivo das Estações de Tratamento de Água (ETAs) são remover da água bruta organismos patogênicos e substâncias químicas orgânicas e inorgânicas que podem ser prejudiciais à saúde humana.

Segundo Steel (1966), o Sistema Público de Abastecimento de Água se constitui num conjunto de obras e serviços, com a finalidade de produzir e distribuir água para uma população em qualidade e quantidade compatível com as suas necessidades, para fins de consumo doméstico, uso comercial, serviços públicos e de recreação, consumo industrial, segurança e outros usos.

Para se obter a água tratada e potencialmente potável, é necessário o tratamento adequado, sendo os processos mais utilizados e convencionais empregados nas ETAs: Coagulação, Floculação, Decantação, filtração, correção do pH, desinfecção e fluoretação. Nos processos de Decantação, lavagem dos filtros e lavagem dos tanques de preparação de soluções é onde ocorre a geração de resíduos. Esses resíduos constituem-se de matéria orgânica e inorgânica, produtos químicos, microrganismos, partículas de solo/água e, portanto, necessita de tratamento antes de serem

descartados in natura, uma vez que podem poluir e contaminar o meio ambiente gerando um grande impacto ambiental.

Algumas formas de disposição final que se dá ao lodo de ETA são: Aterro Sanitário; Co-disposição com biossólidos; Incineração; Disposição controlada em solos; Aplicações industriais (tijolo, materiais cerâmicos, concreto não estrutural, base para pavimento).

2.1 Reutilização do lodo de ETA

Apresenta-se a seguir alguns trabalhos visando à aplicação de Lodo proveniente de ETA em obras de Engenharia.

2.1.1 Comportamento de concreto asfáltico tendo Lodo da ETA da cidade de Manaus como fíler (Silva, 2008).

Segundo Silva (2008), um meio de amenizar o impacto ambiental ocasionado pelos resíduos da ETA seria utilizar o lodo como fíler no concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), em substituição ao material tradicionalmente utilizado, o cimento Portland. O CBUQ é um revestimento flexível constituído de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler) e ligante betuminoso.

Silva (2008) realizou uma análise comparativa entre as misturas betuminosas, convencional e alternativa, com os dois tipos de fíleres (cimento e lodo). Foram moldados corpos de prova de CBUQ e analisados os resultados concernentes à estabilidade Marshall, fluência a 60°C e compressão diametral uniaxial estática, módulo de resiliência e vida de fadiga, todos a 25°C.

Segue abaixo os principais resultados obtidos por Silva (2008):

- No ensaio de compressão diametral observou-se que os CP's de CBUQ acrescidos com lodo de ETA mostraram uma melhoria da resistência à tração por compressão diametral. A substituição total do cimento pelo lodo proporcionou um ganho de resistência mecânica correspondente a 7,53%.
- Para os ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral, observou-se que em todos os CBUQ adicionados de lodo de ETA houve aumento do módulo de resiliência. Sendo que a substituição total do cimento pelo lodo proporcionou aumento de aproximadamente 28% de MR em relação à mistura de referência.
- No ensaio de Fadiga foi observado que em todos os CBUQ adicionados de lodo de ETA, houve modificações nas propriedades mecânicas tais como: resistência à carga aplicada, maior deformação resiliente, maior módulo resiliente e maior resistência à tração estática. A

priori pode-se dizer que o tempo de fadiga da mistura com lodo de ETA possui um tempo de vida de fadiga maior em comparação com a mistura de cimento Portland.

2.1.2 Aproveitamento de lodo de Estação de Tratamento de Água em cerâmica vermelha (Paixão, 2005).

Segundo Paixão (2005), alguns trabalhos reportados na literatura têm mostrado a possível reciclagem de resíduos de ETA na fabricação de produtos cerâmicos vermelhos para a utilização na construção civil.

Paixão (2005) estudou os efeitos das adições de lodo de ETA em massa cerâmica vermelha e realizou os ensaios objetivando resultados provenientes da mistura de argila com lodo de ETA nas proporções de 0%, 2%, 5% e 10%, também se realizou uma mistura com 5% de lodo calcinado e 5% de lodo moído. Os corpos de prova foram prensados e submetidos à queima de 950°C, 1000°C e 1050°C.

Foram verificados resultados satisfatórios por Paixão (2008), sendo elas citadas abaixo:

- O lodo adicionado na massa de argila contribuiu na redução de suas propriedades plásticas.
- As propriedades físico-mecânicas dos CP's confeccionados com a mistura de lodo e argila foram influenciadas pelas temperaturas de sinterização entre as temperaturas de 950°C e 1050°C.
- Algumas partículas do lodo se fundiram a 1050°C, o que causou significativo aumento de retração nesta temperatura.
- A inclusão do lodo contribuiu na fratura do corpo causando diminuição dos valores de Tensão de Ruptura à flexão dos corpos de prova.
- Os resultados obtidos com o ensaio de Tensão de ruptura à Flexão demonstraram que a adição do lodo na matriz da argila ocasionou uma diminuição de seus valores da TRF, mas mesmo assim estão dentro dos valores especificados para usa-los na construção civil.
- Os valores de retração linear de secagem, da contração linear e da contração linear total após a queima, da tensão de ruptura à flexão, da perda ao fogo, estão dentro dos parâmetros especificados para a utilização de cerâmica vermelha na construção civil.

2.1.3 Uso de lodo de Estação de Tratamento de Água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental (Hoppen et al., 2006).

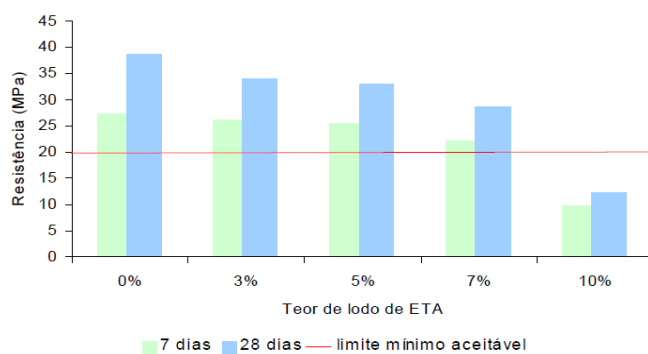
Segundo Hoppen et al. (2006), uma alternativa promissora é a incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto, que pode minimizar a disposição inadequada destes resíduos. Aplica-se o lodo de ETA na matriz de concreto buscando teores adequados para manter as suas características

de qualidade. Os fatores principais levados em consideração para a definição das melhores dosagens foram trabalhabilidade e resistência mecânica, no qual foram realizados ensaios comparando os resultados obtidos com o concreto adicionado de lodo de ETA e o concreto “referência” (sem adição de lodo).

Abaixo segue alguns resultados obtidos por Hoppen et al. (2006):

- Na figura abaixo se pode observar os resultados obtidos com o ensaio de compressão Axial simples do concreto em função do teor de lodo adicionados ao concreto.

Figura I – Resistência à compressão axial simples em função do teor de lodo



Fonte: Hoppen et al. (2006)

- Foi possível observar que os teores de lodo aplicados no concreto influenciam na redução de sua resistência à compressão. Apesar de demonstrarem redução das características mecânicas do concreto, os teores abaixo de 7% podem ser utilizados para fins não estruturais, pois os valores obtidos ainda estão acima do limite mínimo aceitável, podendo assim, ser uma forma ambientalmente benéfica para se reutilizar o lodo.
- Aos 7 dias todas as dosagens, com exceção da mistura de 10%, já atingiram valores superiores a 20 MPa, sendo este um valor comumente utilizado na construção civil.
- Verificou-se que à medida que o teor de lodo aumenta, ocorre uma diminuição da quantidade de matéria prima consumida, reduzindo assim o impacto ambiental gerado pelo lodo e pela extração dos agregados do concreto.

2.1.4 Estudo de dosagem de lodo de Estação de tratamento de Água (ETA) em argamassa (Ribeiro, 2012).

Ribeiro (2012), estudou a implementação de diferentes concentrações de lodo de ETA em substituição à areia para se fazer a argamassa. Para tal, foram confeccionados corpos de provas com 5,10 e 15 % em substituição à areia, com traço de 1:7:2 de cimento, areia e cal respectivamente. O lodo foi proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Campo Mourão-PR, na qual é utilizado como coagulante o Policloreto de Alumínio (PCA).

Nos ensaios ele obteve os seguintes resultados:

- No ensaio de granulometria, a composição granulométrica do lodo apresentou-se com aproximadamente 95% entre areia grossa, média e fina, no qual demonstra características semelhantes ao agregado miúdo convencional.
- No ensaio de resistência a compressão foi observado que o corpo de prova sem adição de lodo teve uma resistência de 2,55 MPa e módulo de elasticidade de 5 GPa. Já o corpo de prova com adição de 5 % do lodo apresentou uma resistência de 2,39 MPa e com redução do módulo de elasticidade para 4 GPa. Com a adição de 10% de lodo houve um acréscimo de resistência na qual foi obtido o valor de 2,98 MPa e o módulo de elasticidade em 5 GPa. E a adição de 15% de lodo conferiu à mistura uma significativa redução à resistência a compressão, com média de 1,84 MPa e redução do modulo de elasticidade de aproximadamente 3,33 GPa. Sendo assim a porcentagem de 15% impossibilita sua utilização, e a mistura de 10% obteve os melhores resultados podendo ser indicada para uso.
- A medida que se aumenta a quantidade absorvida de água pelos CPs, há ocorrência da diminuição da resistência a compressão, sendo que a porcentagem de 10% obteve valores insignificantes na absorção de água em relação à mistura sem adição de lodo, e que consequentemente lhe conferiu uma ótima resistência a compressão.

3. Tratamento de Esgoto

A ETE pode ser designada como o conjunto de instalações e equipamentos destinados a realizar o tratamento de esgoto sanitário, compondo-se basicamente de grades, caixas de areia, decantador primário, lodos ativados e/ou filtro biológico, decantador secundário e secagem do lodo proveniente dos decantadores. Normalmente, esse processo requer pouca área, apresenta custos de construção relativamente altos e possui índices de eficiência elevados (Sanepar, 1999).

O sistema de tratamento muito empregado nas ETEs é o biológico, por ser bastante semelhante ao processo de degradação que ocorre normalmente na natureza. Nesse processo os microrganismos presentes no esgoto degradam a matéria orgânica.

O tratamento de esgoto é usualmente dividido através dos seguintes subsistemas: Preliminar; Primário, Secundário e Terciário (Pós-tratamento).

Como “sub-produto” do tratamento de esgoto tem-se o lodo de esgoto também denominado de biossólido. O Lodo de esgoto é um resíduo rico em matéria orgânica gerado durante o tratamento das águas residuárias nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). A composição do lodo varia em função da origem do esgoto: Basicamente, o lodo de esgoto é composto de matéria orgânica e metais pesados como o cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni), chumbo (Pb), entre outros elementos.

Segundo Pegorini et al. (2003) a disposição final do lodo de esgoto se configura como um dos problemas ambientais urbanos mais relevantes atualmente, e que aumenta diariamente nos países desenvolvidos e nos em desenvolvimento, como reflexo da ampliação das redes de coleta de efluentes urbanos e acréscimo dos níveis de tratamento.

As formas mais conhecidas de disposição final do lodo de esgoto são: Aterro Sanitário; Reuso industrial (produção de agregado leve, fabricação de tijolos e cerâmica e produção de cimento); Incineração; Disposição oceânica; Recuperação de solos; “Landfarming”; Uso agrícola.

3.1 Reutilização de lodo de ETE

Apresenta-se a seguir alguns trabalhos estudados visando à aplicação de Lodo proveniente de ETE em obras de Engenharia.

3.1.1 Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos (Pereira, 2012)

Pereira (2012) buscou desenvolver sua pesquisa analisando a estabilização química de um solo composto por cimento e a avaliação da cinza de lodo calcinado a 550°C como estabilizante, verificando o comportamento mecânico das misturas solo-cimento e solo-cimento-cinza como possível utilização em base e sub-base de pavimentos rodoviários. Para realizar seus ensaios foi utilizado cimento Portland comum, lodo de esgoto calcinado e o solo classificado como silte-arenoso argiloso. Os teores de cimento adicionados ao solo foram 0%, 3%, 6% e 9%, formando assim a composição solo-cimento, e para a composição do solo-lodo foram utilizados os teores de 5%, 10%, 20% e 30%. Foram realizados os ensaios de caracterização mecânica (Compactação, CBR, Compressão simples) para a mistura solo-cimento e mistura solo-cimento-cinza.

Realizando os ensaios, Pereira (2012) obteve os seguintes resultados:

- Conforme se aumenta a energia de compactação, aumenta também a massa específica seca máxima e diminui o teor de umidade ótimo do solo.
- Houve decréscimo na massa específica dos corpos de prova dos traços com o aumento do teor de cinza de lodo, este decréscimo na massa específica deve-se ao fato da cinza de lodo apresentar massa específica inferior do solo.
- A partir do estudo de estabilização, foi verificado que o solo não é expansivo podendo ser usado em camadas de pavimentos após a estabilização com cimento, e a cinza de lodo pode ser usada como aditivo estabilizante,
- A resistência à tração e à compressão da mistura obtiveram resultados satisfatórios, no qual demonstraram um acréscimo de resistência para todos os teores de cinza incorporados a mistura solo-cimento, esse aumento pode ser atribuído devido ao lodo calcinado apresentar propriedades de materiais pozolânicos. A maior resistência à compressão simples foi obtida com o traço de 71% de solo, 9% de cimento e 20% cinza de lodo, demonstrando um aumento de 25,87% em relação ao traço de 94% de solo e 9% de cimento.

3.1.2 Lodo de Esgoto: Algumas aplicações em Engenharia (Feitosa, 2009)

Feitosa (2009) buscou com o trabalho, métodos alternativos do aproveitamento do lodo de esgotos no melhoramento de solos colapsáveis e em substituição parcial do agregado miúdo do concreto. Para tanto, foram realizados ensaios físicos, químicos, de microscopia eletrônica de varredura, condutividade hidráulica, mobilidade química, edométrico simples e duplos, resistência à compressão, índice esclerométrico, velocidade ultra-sônica e absorção por capilaridade. Os ensaios para substituição do agregado miúdo no concreto foram utilizados nas proporções de 5%, 10% e 15% de lodo de ETE.

Com os ensaios feitos por Feitosa (2009) pôde-se verificar os seguintes resultados:

- Há alterações físicas, químicas e micro estruturais no solo com a adição do lodo de esgoto no solo in natura.
- Redução dos índices de vazios, melhorando assim o empacotamento das partículas e reduzindo o grau de colapso do solo para um mesmo peso específico aparente seco. O lodo aplicado no solo demonstrou ser um método promissor para melhoramento de solos colapsáveis.
- Diminuição da condutividade hidráulica do solo com o acréscimo de lodo.
- O acréscimo de lodo como agregado miúdo ao concreto demonstrou que há redução da resistência à compressão e absorção de água em relação ao concreto com agregado

convencional, sendo que o efeito mais expressivo encontrado para adição de lodo foi de 10%.

3.1.3 Desempenho mecânico do solo condicionado com lodo de Esgoto calcinado (Madalozzo, 2008).

Madalozzo (2008) buscou em sua pesquisa a diminuição ou eliminação dos impactos gerados pelo lodo sobre o meio ambiente, no qual frisa que o resíduo (lodo de ETE) pode passar de um problema para uma solução sendo aplicado na engenharia. O estudo realizado focou na utilização de lodo de ETE no condicionamento de solos, no qual se buscou o teor ideal do resíduo para um baixo custo e melhor desempenho tanto nas características físicas quanto no desempenho mecânico do solo. Primeiramente seria utilizado o lodo caleado seco, mas foi verificado que a quantidade de matéria orgânica presente no lodo era elevada e não era aconselhado ser utilizada no solo. Então foi necessário realizar a calcinação do lodo caleado a uma temperatura aproximada de 750°C, obtendo assim um baixo nível de matéria orgânica.

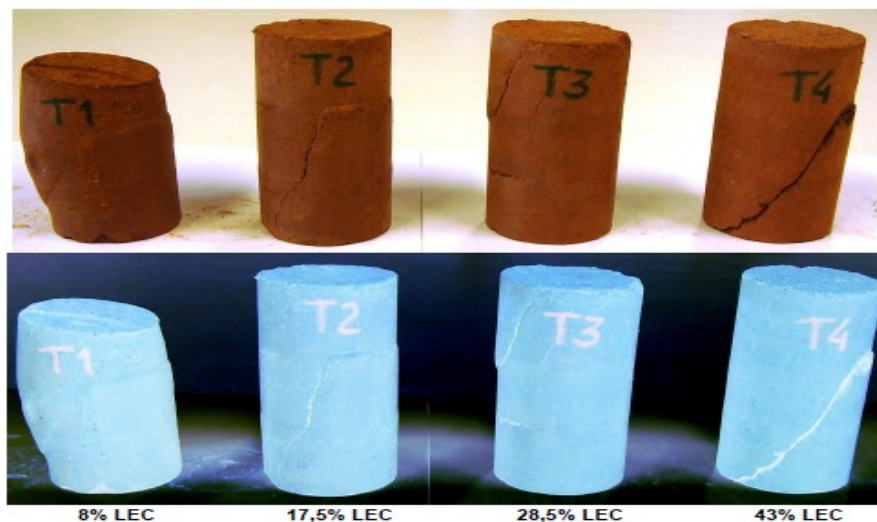
Para realizar os ensaios de desempenho mecânico (índice de compactação, índice de retração e resistência ao cisalhamento na compressão triaxial) foram utilizadas as proporções de 0, 8, 17,5, 28,5 e 43% de lodo calcinado em massa de solo.

Com os ensaios de desempenho mecânico realizados, Madalozzo (2008) obteve os seguintes resultados:

- Para o ensaio do Índice de compactação, foi observado que quanto maior a quantidade de lodo de esgoto calcinado, mais se necessita de água para atingir a umidade ótima, com diminuição da massa específica aparente seca.
- No índice de retração, pode-se observar que os corpos de prova sofreram uma redução na retração a partir dos 8% de lodo de esgoto calcinado, ocorrendo teoricamente o menor índice de retração com 28,5%, mas foi observado que com incremento de mais de 28,5% houve um aumento da retração.
- Para o ensaio de resistência ao cisalhamento na compressão triaxial, demonstrou que a adição do lodo calcinado aumentou os valores do módulo de elasticidade de forma linear. E também se observou efeitos significativos do confinamento. Com isso pode-se dizer que o Lodo de esgoto calcinado possui grande potencial para aumentar a rigidez de solos.
- A tensão axial na ruptura foi drasticamente afetada pelo reforço e pelo confinamento, passando de 144,07 kPa no solo in natura para 928,76 kPa com 43%.

- Nos planos de ruptura do ensaio de compressão triaxial, foi observada que quanto mais se adiciona lodo calcinado à mistura, adquire-se comportamento de materiais rígidos e conseqüentemente sofrem rupturas nitidamente definidas, com ruptura frágil. Então se concluiu que com a adição do lodo calcinado, a natureza do material foi alterada no qual passa de um comportamento elasto-plástico para um comportamento puramente elástico. Esse comportamento pode ser observado na figura 2:

Figura II - Imagem dos corpos-de-prova rompidos após a compressão triaxial



Fonte: Madalozzo, 2008

3.1.4 Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha (Araújo, 2008).

Segundo Araújo (2008), para atingir o equilíbrio entre consumo e a reciclagem/ reuso dos resíduos gerados nas ETEs, deve-se alcançar a viabilização técnica e econômica de modelos de sustentabilidade ambiental através da reciclagem. Com base na sustentabilidade ambiental, Araújo (2008) buscou incorporar o lodo de esgoto à massa na fabricação de produtos de cerâmica vermelha.

Araújo (2008) realizou diversos ensaios, dentre eles estão os ensaios físico mecânicos que tinham como objetivo obter a medida de retração linear, absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão. Para realizar alguns dos ensaios foram realizados corpos de prova com 6,0 x 2,0 x 0,5 cm com pressão de 200 kgf/cm² utilizando 25% de lodo de esgoto na massa da cerâmica, após, os corpos de prova foram secos em estufa a uma temperatura de 110°C durante 24h. E então foi feito a queimação dos CP's nas temperaturas de 950°C, 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1200°C.

Com os resultados obtidos por Araújo (2008) pôde-se observar:

- Os CP's após serem queimados a temperaturas inferiores a 1100°C demonstraram certa fragilidade, desmanchando-se ao toque.
- Os corpos de prova que possuíam lodo demonstraram aumento progressivo de retração até 1100°C e em seguida uma redução de valor, sendo que as retrações variam de 2,74% a 950°C até 10,31% em 1100°.
- Nos testes de resistência mecânica verificou-se que a resistência dos CP's referência (Somente Argila) é bastante significativa a 1200°C podendo chegar a uma resistência de aproximadamente 15,4 MPA.
- Os CP's elaborados com 25% de lodo de esgoto apresentaram resistência inferior a 1MPA nas temperaturas de 950°C ate 1100°C e 8,8 MPA na temperatura de 1200°C. Concluindo assim que a tensão de ruptura à flexão do CP com 25% de lodo apresentou uma redução em comparação ao CP de referência.

3.1.5 Aproveitamento do lodo de esgoto sanitário como matéria prima para a produção de material pozolânico (Morales, 1997/1999).

Morales (1997/1999) visa em seu estudo buscar novos métodos para utilização do lodo de esgoto sanitário, na qual verificou que devido a composição química do lodo há a possibilidade de reaproveitar esse resíduo na produção de material pozolânico através da calcinação.

Para a calcinação do lodo, Morales (1997/1999) trabalhou na faixa de temperatura de 600 a 800 °C e três tempos de calcinação diferentes 30, 60 e 90 minutos. Como resultados da calcinação foram obtidos várias perdas de massa de lodo como descritos pela **Tabela I**.

Tabela I: Valores de perda de lodo em massa em relação à massa inicial, em função da temperatura da mufla e do tempo de residência.

Temperatura de calcinação °C	Perda em função do tempo de residência (%)		
	30 min	60 min	90 min
600	17,62	20,31	20,55
700	17,79	21,6	22,43
800	20,09	21,61	21,68

Fonte: Morales, 1997/1999

- **Análise Termogravimétrica:** Com a realização desse ensaio foi observado que a maior porcentagem de perda do lodo de esgoto se deu na temperatura de 270°C e a perda total na temperatura de 700°C
- **Reatividade Pozolânica:** Segue os resultados do Ensaio de Chapelle na **Tabela II**.

Tabela II: Resultados do Ensaio Chapelle Modificado com o lodo bruto calcinado

Temperatura de calcinação (°C)	Tempo de residência (minutos)	Número da amostra	Chapelle modificado (mgCaO/g de cinza)
600	60	1	657,32
	120	2	685,32
700	60	3	732,92
	120	4	655,92
800	60	5	710,52
	120	6	685,32

Fonte: Morales, 1997/1999

- **Calor de hidratação do cimento:** O ensaio foi realizado com cimento Portland sem adição e com adição de 15, 25 e 35% de lodo calcinado. Com isso foi observado os seguintes resultados: O cimento Portland sem adição liberou calor de 303 J/g, já com adição de 15% liberou 304 J/g, com 25% liberou 256 J/g e com 35% liberou 240 J/g, ou seja, quanto mais se adiciona lodo calcinado ocorre uma liberação de calor menor em comparação ao cimento Portland sem mistura.
- **Microscopia eletrônica de varredura (MEV):** Nesse ensaio foi verificado que na temperatura de 700°C durante 2 horas as amostras apresentaram uma porosidade menor em relação às amostras calcinadas a 600°C, sendo os grãos calcinados a 700°C menos individualizados, com tendência a um início de aglomeração, o que alerta no sentido de não se elevar a temperatura de calcinação acima dos 700°C.
- O lodo de esgoto calcinado apresenta características satisfatórias do ponto de vista de suas características físicas, como finura e superfície específica, apresentando alto teor de fração argilosa, na qual o argilo-mineral ocasiona a reatividade pozolânica do material. Sendo a temperatura com maior índice de reatividade pozolânica a de 700°C com residência de 60 min permitindo também a completa eliminação de matéria orgânica.

3.1.6 Avaliação do uso de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto na estabilização de materiais para pavimentação (Kelm, 2014).

Kelm (2014) buscou contribuir para uma melhor interpretação da reutilização do lodo proveniente de ETE na estabilização de materiais para pavimentação em diferentes formas (in natura, seco e calcinado). Para tanto, foram efetuados ensaios para caracterização física, químicas e mecânicas dos materiais, experimento piloto, experimento com estabilizantes e caracterização ambiental do resíduo.

A partir das análises feitas por Kelm (2014) foi verificado que:

- O lodo de esgoto in natura apresentou altíssimos valores de LL e LP. Já o lodo seco em estufa a 60°C e a cinza de lodo foram classificados como não plásticos.
- Quando adicionada a cinza de lodo de ETE, observa-se um aumento na umidade ótima e uma diminuição na massa específica aparente seca máxima.
- Observa-se uma expansão de 44,30% do resíduo lodo de esgoto. há grande diminuição da expansão do solo quando se adiciona a cal, cerca de 6 vezes, e quando se adiciona lodo nesta mistura, há um aumento na expansão de aproximadamente 0,97%.
- Para o lodo seco a 60°, quanto maior o teor de lodo acrescentado na mistura menor será o valor obtido de módulo de resiliência.
- A mistura composta por lodo in natura, pó de pedra e cimento foi a que obteve os melhores resultados de módulo de resiliência e expansão, e melhor economia com menor espessura de base no dimensionamento do pavimento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados dos experimentos realizados pelos autores citados neste trabalho, no qual se reutilizou o lodo de ETA e ETE em obras de Engenharia foi possível concluir que:

- A calcinação do lodo de ETE melhora sua incorporação em materiais como o solo, isso ocorre devido às cinzas do lodo apresentar características de material pozolânico.
- A temperatura de incineração a 700°C com tempo de incineração de 60 minutos demonstrou ser a mais adequada para condicionar o solo, pois elimina por completo a matéria orgânica e possui um maior índice de reatividade pozolânica.
- Do ponto de vista ambiental é visivelmente viável a utilização do lodo de esgoto à massa na fabricação de cerâmicas vermelhas, sendo que a temperatura recomendada é a de 1200°C para sua fabricação, resolvendo assim o problema da inadequada disposição deste resíduo.
- A adição de lodo de ETA na fabricação de cerâmica vermelha alterou as propriedades mecânicas da argila, diminuindo sua resistência, entretanto ainda apresentando propriedades dentro dos limites estabelecidos para cerâmicas vermelhas para uso na construção civil, sendo recomendada a adição de até 10% do lodo de ETA em massa de argila.
- Os resultados obtidos com os ensaios realizados por Silva (2008) demonstraram que a mistura confeccionada com o lodo como fíler do CBUQ apresentou desempenho mecânico satisfatório, ocorrendo melhorias significativas de suas propriedades comparadas à mistura convencional confeccionado com cimento Portland.

- Para a utilização do lodo em concreto, apesar dos ensaios realizados por Hoppen et al (2006) demonstrarem redução das características mecânicas do concreto, os teores de lodo abaixo de 7% podem ser utilizados para fins não estruturais.
- A incorporação do lodo de esgoto em concreto pode ser uma alternativa viável e ambientalmente correta, acarretando em uma diminuição dos resíduos que seriam dispostos em aterros e cursos d'água e diminuindo também o consumo de agregados naturais.
- Na estabilização de solos colapsáveis é possível ter uma economia quanto ao uso do cimento para estabilizar o solo, uma vez que há um ganho de resistência da mistura solo-cimento com a adição de cinza de lodo de esgoto.
- O lodo de esgoto calcinado a 750°C demonstrou ser um potencial estabilizador de solos, melhorando sua rigidez, e aumentando a sua resistência de ruptura axial em até 47%.
- Do ponto de vista ambiental todos os estudos citados apresentaram serem ótimas alternativas para a reutilização de lodo de ETA e ETE, diminuindo assim o grande problema que seria ocasionado pela disposição inadequada deste resíduo.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, F. S. D. 2008. **Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 91p.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 de ago. 2010
- BRASIL, Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2005. **Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e da outras providências**. Diário Oficial União [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 5 de jan. 2007.
- FEITOSA, M. C. A. 2009. **Lodo de Esgoto: Algumas aplicações em Engenharia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, 120p.
- GODOY, L. C. 2013. A logística na destinação do lodo de esgoto. **Fatec Guaratinguetá**, 2(1): 79-90.
- HOPPEN et al. 2006. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental. **Química Nova**, 29(1): 79-84.
- KELM, T. A. 2014. **Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 230p.

MADALOZZO, I. L. 2008. **Desempenho mecânico do solo condicionado com lodo de esgoto calcinado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 101p.

MORALES, G. 1999. Aproveitamento do lodo de esgoto sanitário como matéria prima para a produção de material pozolânico. **Semina: Ci. Exatas/Tecnol.** 18/20(4): 39-45.

PAIXÃO, L. C. C. 2005. **Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha.** Monografia (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - UFOP - CETEC - UEMG, 129p.

PEGORINI, E. S. et al. 2003. Qualidade do lodo de esgoto utilizado na reciclagem agrícola na região metropolitana de Curitiba – PR. In: I Simpósio Latino Americano de biossólido, 2003, São Paulo. 11p.

PEREIRA, K. L. A. 2012. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 125p.

RIBEIRO, R. F. 2012. **Estudo de dosagem de lodo de Estação de tratamento de Água (ETA) em argamassa.** TCC (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 61p.

SANEPAR. 1999. **Uso e manejo do lodo na agricultura.** Ed. única. Curitiba: Prosab, 98p.

SILVA, J. F. A. 2008. **Comportamento de concreto asfáltico tendo lodo da ETA da cidade de Manaus como fíler.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, 181p.

SILVEIRA, L. R. 2014. **Aspectos geotécnicos e ambientais para a disposição adequada de lodo de esgoto.** Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, 214p.

STEEL, E.W. 1966. **Abastecimento de Água e Sistemas de Esgoto.** Ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 592p.