

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA APLICAÇÃO DE LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E AGREGADO SIDERÚRGICO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS COMO BASE ESTABILIZADORA DE SOLO

Autores: Adaiane Brandão^{1,2}, Carol Andrade², Cleuber Rodrigues¹, Leonardo Caux¹, Marcus Veloso¹

¹ Cenibra., Belo Oriente, Brasil

² Unileste, Coronel Fabriciano, Brasil

RESUMO

As buscas por alternativas tecnológicas sustentáveis tem sido uma premissa importante para a redução da geração de resíduos nas fábricas e na siderurgia. Nesse contexto, somando aos recursos naturais cada vez mais escassos, este trabalho teve como desafio principal a aplicabilidade do lodo da estação de tratamento de água e agregado siderúrgico como base estabilizada em pavimentação. Usualmente, o lodo gerado a partir do processo de tratamento de água, também denominado como Lodo ETA, é disposto em aterros. Na produção do aço são gerados resíduos de materiais de descarte diversos, dentre eles o agregado siderúrgico, resíduo muito utilizado na construção civil e rodoviária. No projeto foram avaliados os parâmetros químicos, físicos-mecânicos e ambientais, via laboratórios, das amostras em diversas proporções, sendo: 10% lodo ETA + 90% agregado siderúrgico (M1090), 20% lodo ETA + 80% agregado siderúrgico (M2080), 25% lodo ETA + 75% agregado siderúrgico (M2575), 50% lodo ETA + 50% agregado siderúrgico (M5050). Os resultados dos ensaios mostraram que lodo ETA proporciona características adequadas para ser empregado como agregado miúdo (solo) em pavimentação. Três misturas (M1090, M2080 e M2575) apresentam desempenho satisfatório em conformidade granulométrica, expansão controlada e altos valores de Índice de Suporte de Califórnia, sendo viável a aplicação como material de base de pavimentos rodoviários. Devido à escassez de trabalhos diretamente relacionada à mistura de lodo com agregado siderúrgico, a proposta deste é apresentar seu alto desempenho para utilização em pavimentação, podendo destinar o lodo para essa finalidade.

Palavras-chave: Lodo. ETA. Agregado siderúrgico. Pavimentos. Resíduos. Base estabilizada.

INTRODUÇÃO

Atualmente, a palavra resíduo ganhou novo sentido e tudo aquilo que poderia ser descartado, muitas vezes, pode retornar aos processos produtivos, ser incorporado como matérias-primas e, conseqüentemente, reduzir de forma significativa as emissões, diminuindo a extração de matérias-primas virgens e reduzindo a pressão sobre o meio ambiente.

A geração de resíduos é um dos problemas mais agravantes das empresas e indústrias em relação à preservação do meio ambiente. Esses desafios são reforçados pelo crescimento gradativo e desordenados da população e pelo crescimento acentuado dos bens de consumo.

Diante desse cenário, muitas organizações adotam programas de gestão de resíduos. Esses programas são desafiadores, pois devem atuar não só de forma a garantir a coleta, o tratamento e a disposição, mas principalmente deve estimular a redução, a reutilização e a reciclagem desde a fonte geradora. O reaproveitamento de resíduos significa uma solução técnica, econômica e ecológica, podendo, muitas vezes, se tornar até uma fonte de faturamento para a empresa.

Dentre todas as áreas da construção civil, a de pavimentação (rodovias e ferrovias) é a maior consumidora dos recursos naturais. A presente escassez desses recursos para melhoria da infraestrutura viária motiva a busca de alternativas para a implantação e/ou recuperação da malha rodoviária de todo país. Por esse motivo, o reaproveitamento e a reutilização dos resíduos, além de reduzir a extração de recursos naturais não renováveis, minimiza a disposição deles em aterros, firmando a ideia de desenvolvimento sustentável.

A pavimentação consome um volume elevado de materiais, sendo a maior parte composta por agregados, e a maior parte destinada à construção de estradas. Por esse motivo, estudar a viabilidade de emprego desses resíduos na pavimentação pode se mostrar uma alternativa de aplicação interessante e racional.

Uma das etapas do segmento industrial é o tratamento da água tanto para consumo humano quanto para o processo de produção. Nesse processo é gerado o lodo da estação de tratamento de água (ETA), decorrente dos decantadores e lavagem dos filtros (SILVA *et al.*, 2012).

As empresas siderúrgicas enfrentam dificuldades em relação à destinação de seus resíduos, por sua grande quantidade de resíduos gerados pelo processo de fabricação do aço, como por exemplo, o agregado siderúrgico. Devido à grande demanda por aço e à conseqüente geração desse resíduo, também necessita de medidas preventivas e mitigadoras dos impactos causados ao meio ambiente (AÇOBRAZIL, 2018). Neste sentido, é oportuno

pensar na reutilização deste, principalmente por suas propriedades mecânicas, já consolidadas em aplicações rodoviárias.

Atualmente, os resíduos industriais têm recebido uma atenção maior para a reciclagem e para a aplicação em outras áreas, uma vez que não há tanta disponibilidade de áreas de armazenamento, e objeções a novos licenciamentos de áreas para construções de novos aterros industriais ou sanitários.

Foram avaliados no trabalho, por meio de ensaios laboratoriais e aplicação em campo, a possibilidade do uso de mistura do lodo da ETA e agregado siderúrgico como alternativa para utilização em pavimentação, como base estabilizadora de solo. Para essa finalidade, foram testados os percentuais de misturas dos resíduos e a melhor alternativa para utilização como base estabilizada granulometricamente, promovendo assim a sustentabilidade do processo construtivo de forma viável e eficiente.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010, todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível, são denominados resíduos sólidos.

Todo resíduo deve ser destinado de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e ao meio ambiente, de modo a evitar a contaminação do solo, do ar e das águas. Por esse motivo, ainda de acordo com a PNRS, ficou definido que todos os geradores de resíduos, seja de pessoa física ou jurídica, de poder público ou privado, são responsáveis desde a geração até a destinação ambientalmente correta de seus resíduos (TAUFFER, 2010).

A destinação final dos resíduos inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação, o aproveitamento energético, dentre outras. O que diferencia cada tipo de destinação é a alteração ou não que se dá nas propriedades físico-químicas ou biológicas do resíduo. Quando o resíduo passa por um processo

de alteração dessas propriedades, diz-se que ele foi reciclado, pois foi transformado em outro produto. Já a reutilização é o processo de aproveitamento em que o resíduo é utilizado diretamente, sem nenhuma alteração nas suas propriedades (BRASIL, 2010).

Os resíduos que não podem mais ser recuperados ou tratados por processos tecnológicos economicamente viáveis são definidos como rejeitos e devem ser enviados para a disposição final ambientalmente adequada. A disposição final dos rejeitos se dá pela sua distribuição ordenada em aterros sanitários ou industriais projetados e construídos seguindo normas específicas (BRASIL, 2011).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos industriais são classificados de acordo com sua periculosidade, em resíduos perigosos (Classe I) e resíduos não perigosos (Classe II A – não inertes e Classe II B – inertes). A periculosidade de um resíduo está relacionada ao seu potencial de causar danos à saúde pública e ao meio ambiente, de acordo com os limites máximos de concentrações de seus constituintes definidos no anexo F e G.

Os resíduos perigosos (Classe I) são aqueles que, devido à suas propriedades físico-químicas e biológicas, apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Os resíduos não perigosos não inertes (Classe II A) apresentam características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, como restos de alimentos. Já os resíduos não perigosos inertes (Classe II B) são aqueles que, quando amostrados de forma representativa, não apresentam nenhum dos seus constituintes solubilizados.

As estações de tratamento de água têm como finalidade tratar água inadequada para o consumo humano ou para uso industrial para que esteja de acordo com padrões determinados. Esse tratamento consiste em várias etapas e, para que seja bem-sucedido, torna-se necessário remover, de maneira eficiente, microrganismos, substâncias químicas e matéria orgânica presentes na água bruta, por meio da adição de produtos químicos.

Os processos adotados no tratamento convencional são: coagulação, floculação, decantação, filtração, correção de pH e, no caso de uso final para consumo humano, desinfecção e fluoretação (CORDEIRO, 1999).



Figura 1. Estação de tratamento de água (ETA)

No sistema convencional, a lavagem periódica dos decantadores/floculadores e dos filtros de uma ETA têm como finalidade de remover o lodo depositado nesses sistemas, de modo a evitar as suas perdas de eficiência. Esse lodo é constituído de água e sólidos em suspensão acrescido de produtos resultantes dos reagentes aplicados à água nos processos de tratamento, bem como suas impurezas (RICHTER, 2001).

A geração do lodo se deve à floculação da matéria coloidal e orgânica presente nas águas dos rios e corpos de água de captação, ocorrendo maior geração nas estações chuvosas devido às condições erodidas das bacias hidrográficas brasileiras que proporcionam maiores arrastes de argila, silte e areia.

O lodo possui cor escura, baixo pH, residual dos floculantes empregados no tratamento da água e granulometria fina (BOURGEOIS *et al.*, 2004).

As duas das principais rotas tecnológicas adotadas para a produção de aço são: a rota integrada e a rota semi-integrada. A primeira possui três fases básicas de produção: redução, refino e laminação. Já a rota semi-integrada possui somente as etapas de refino e laminação.

Durante sua produção, as usinas siderúrgicas geram, além do aço, outros materiais chamados coprodutos. Dentre os coprodutos resultantes da produção do aço, podemos citar como exemplo: escórias de aciaria, escória de alto forno, pós, lamas, carepas, refratários, fluff, dentre outros (AÇO BRASIL, 2018).

De acordo com o Relatório de Sustentabilidade de 2018, realizado pelo Instituto Aço Brasil, as escórias representaram cerca de 69% dos coprodutos gerados pelo processo produtivo do aço em 2017. Portanto, encontrar alternativas para estes materiais é de grande importância.

MÉTODOS

O lodo ETA, resíduo proveniente da estação de tratamento de água, de aspecto amarelo avermelhado, utilizado na pesquisa foi disponibilizado pela empresa Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA), localizada em Belo Oriente. O agregado siderúrgico, resíduo proveniente da fabricação de aço, de cor escura acinzentada, foi coletado na Antiga Pista de Pouso, pátio de estocagem, o material foi disponibilizado pela USIMINAS de posse da prefeitura municipal de Santana do Paraíso.

Nesta seção estão apresentados nos quadros abaixo, e os métodos adotados para cada tipo de ensaio. No Quadro 1 é apresentada a relação dos ensaios realizados para classificação ambiental e ocupacional, propriedades físico-químicas e para determinação das características mecânicas do lodo ETA e agregado siderúrgico, respectivamente.

No Quadro 2, é apresentada a relação dos ensaios realizados para determinação de suas características mecânicas das misturas do lodo ETA e do agregado siderúrgico referentes à aplicação em pavimentos, bem como os métodos de ensaio adotados.

Quadro 1. Relação dos ensaios realizados e os respectivos métodos de ensaio adotados

Tipo de Ensaio	Ensaio	Método de Ensaio
Classificação Ambiental e Ocupacional	Classificação ABNT 10.004 (2004) (Lixiviação e Solubilização)	NBR 10005 (ABNT, 2004)
		NBR 10006 (ABNT, 2004)
Ensaio físico-químico	Difração de raios-X	Metodologia exploratória
	TGA/DTG	Metodologia exploratória
	Espectrometria de absorção atômica	NBR 10005 (ABNT, 2004)
	Reologia	Metodologia exploratória
Ensaio físico-mecânico	Análise Granulométrica por sedimentação	NBR 7181 (ABNT, 1984)
	Análise Granulométrica por peneiramento	NBR 7181 (ABNT, 1984)
	Limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 1984)
	Limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 1984)
	Índice de Suporte Califórnia	NBR 9895 (ABNT, 2016)
	Compactação	NBR 9895 (ABNT, 2016)
	Expansibilidade	NBR 9895 (ABNT, 2016) NBR 16364 (ABNT, 2015)

Quadro 2. Relação dos ensaios realizados na mistura e os respectivos métodos de ensaio adotados

Tipo de Ensaio	Ensaio	Método de Ensaio
Ensaio físico-mecânico	Análise Granulométrica por peneiramento	NBR 7181 (ABNT, 1984)
	Índice de Suporte Califórnia	NBR 9895 (ABNT, 2016)
	Compactação	NBR 9895 (ABNT, 2016)
	Expansibilidade	NBR 9895 (ABNT, 2016)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados e discutidos os resultados da fase experimental do estudo de aplicabilidade do lodo ETA como constituinte de camadas de pavimentos. Inicialmente, encontram-se os resultados dos ensaios de classificação ambiental, caracterização físico-químicos e físico-mecânica do lodo ETA e agregado siderúrgico, seguido dos resultados dos ensaios realizados nas misturas.

Lodo ETA e Agregado Siderúrgico

Classificação dos materiais

O lodo ETA foi classificado como resíduo não perigoso, não inerte (Classe II A) e o agregado siderúrgico como resíduo não perigoso, inerte (Classe II B), ambos obedecendo os parâmetros adequados indicados na NBR 10004 (ABNT, 2004).

Difração de Raio-X

Na Tabela 1, são apresentados os resultados obtidos na composição dos materiais analisados, lodo ETA e agregado siderúrgico, apresentando características de fases cristalinas.

A caulinita é responsável pelo desenvolvimento da plasticidade em mistura com água e o quartzo é o responsável pelo aumento de porosidade, diminuição da retração volumétrica, teor de umidade e plasticidade (MACEDO, 1997).

Pelos resultados obtidos é possível afirmar que o lodo possui fases cristalinas semelhantes às das argilas, conforme constatado por Paixão (2006), Teixeira *et al.* (2006) e Margem (2008).

Os resultados obtidos para o ensaio de difração de raio X para o agregado siderúrgico estudado demonstram a ocorrência das fases mineralógicas dos padrões difratométricos e são semelhantes aos encontrados por Resende (2010).

TGA/DTA

As Figuras 2A e 2B mostram as curvas de TGA para a amostra de Lodo de ETA, considerando as repetições denominadas Lodo-1 e Lodo-2. Na Figura 2C estão apresentadas as mesmas curvas das Figuras 2A-B para fins de comparação das replicatas.

Tabela 1. Composição dos materiais

LODO ETA	AGREGADO SIDERÚRGICO
óxido de silício (SiO ₂)	quartzo (SiO ₂)
caulinita (Al ₂ Si ₂ H ₄ O ₉)	hematita (Fe ₂ O ₃)
hematita (Fe ₂ O ₃)	calcita (CaCO ₃)
quartzo (SiO ₂)	halita (NaCl)
muscovita (Al ₃ Si ₃ H ₂ KO ₁₂)	óxido de silício (SiO ₂)
-----	wustita (FeO)

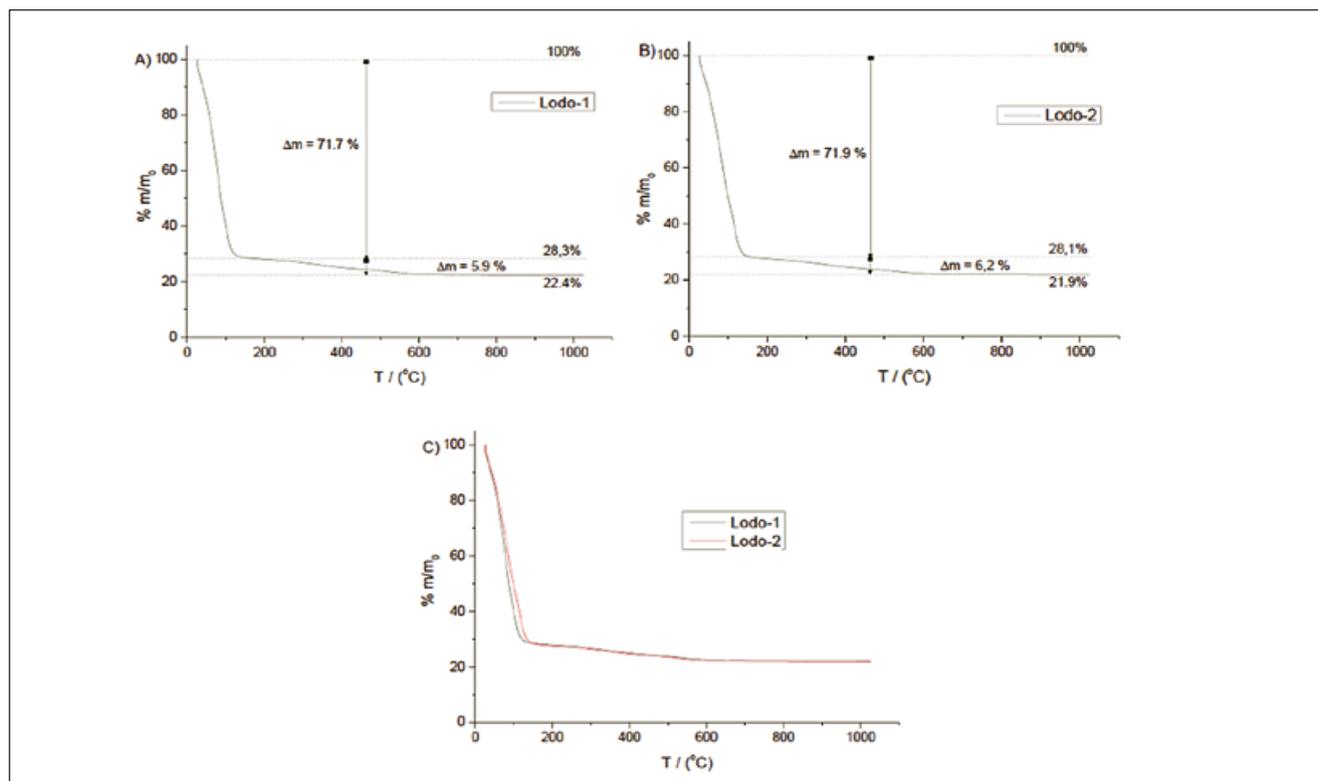


Figura 2. A) TGA da amostra Lodo-1. B) TGA da amostra Lodo-2. C) Figura comparativa das amostras Lodo-1 e Lodo-2

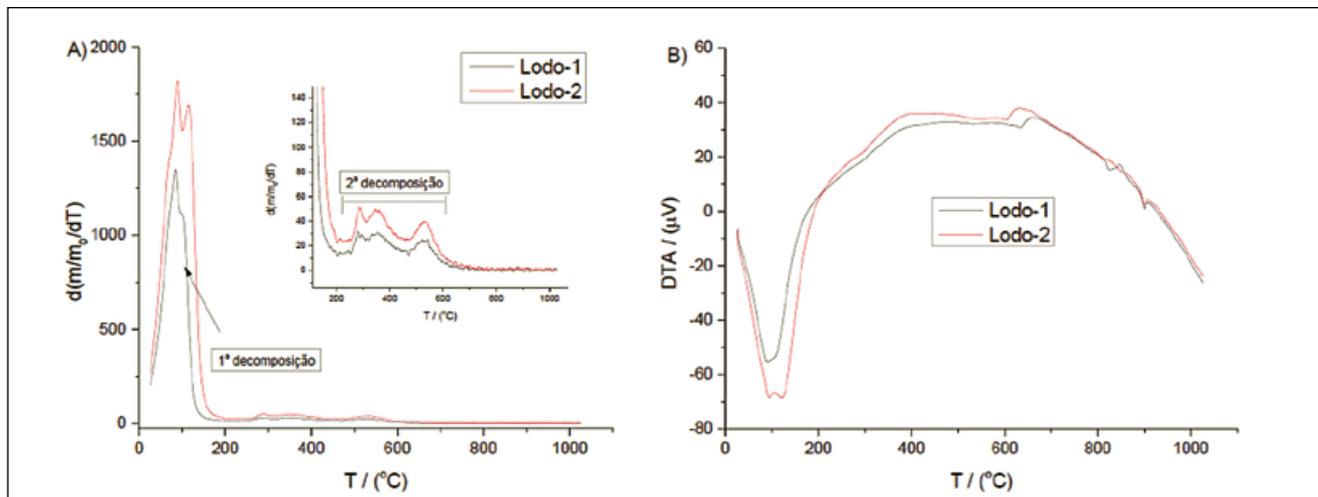


Figura 3. A) DTA das amostras Lodo-1 e Lodo-2. B) DTA das amostras Lodo-1 e Lodo-2

Na Figura 3A e 3B estão apresentados, respectivamente, as curvas de DTGA e DTA das duas amostras.

No geral, o material também se mostrou bastante homogêneo, uma vez que todas as temperaturas referentes às transições, bem como os percentuais de perda de massa observadas nas curvas de TGA foram bem próximos, com baixos desvios padrões, tanto é que a TGA/DTGA e DTA são muito similares.

Reologia

Inicialmente, a amostra de lodo de ETA foi submetida a ensaio reológico estacionário, com taxa de cisalhamento fixa de 1 s-1 e isotermicamente (T = 25 °C). Esse valor de taxa de cisalhamento foi utilizado devido a amostra apresentar elevada

viscosidade e pelo fato de que elevadas taxas levam a um desprendimento da amostra do rotor, produzindo erros na medida. O experimento foi realizado com dois objetivos, sendo o primeiro deles, para apagar o histórico reológico da amostra, e o segundo, para verificar a possível tixotropia do material conforme Figura 4.

Análise Granulométrica

Para o lodo ETA foram realizados dois tipos de ensaio de granulometria, sendo: peneiramento e sedimentação. Nos resultados apresentados na Tabela 2 e Figura 5, observa-se que no ensaio de peneiramento a classificação foi feita de acordo com o SUCS. Já o ensaio de sedimentação de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995).

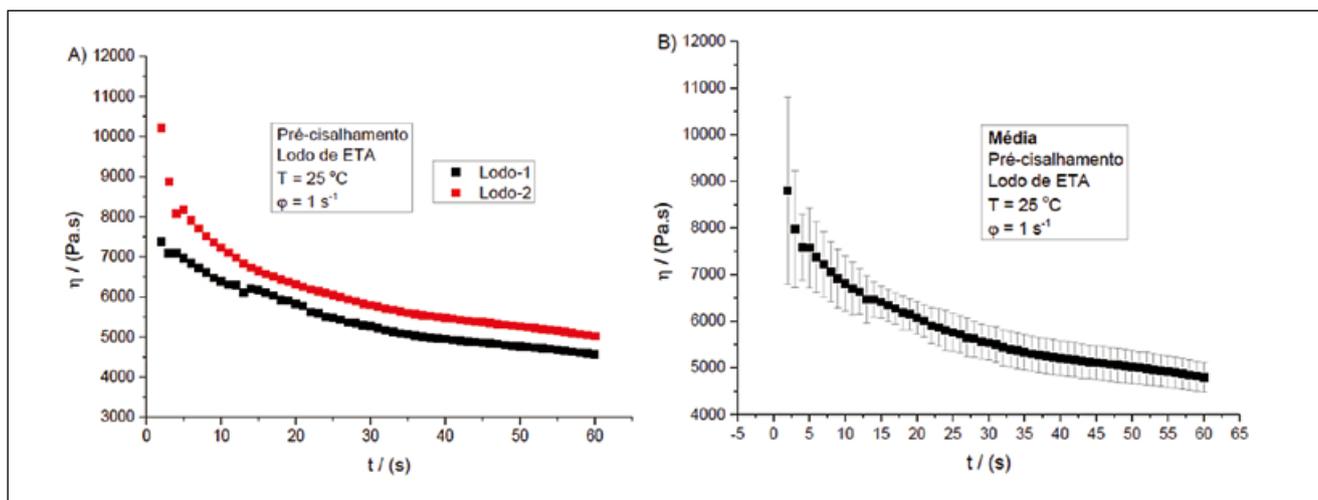


Figura 4. Ensaio reológico estacionário, em função do tempo. T = 25°C e j = 1 s-1

Tabela 2. Análise Granulométrica Lodo ETA

Ensaio	Pedregulho	Areia		Silte	Argila
		Grossa	Fina		
Peneiramento	0,6%	16,4%	13,9%	69,1%	
Sedimentação	-	18,6%		15,1%	66,3%

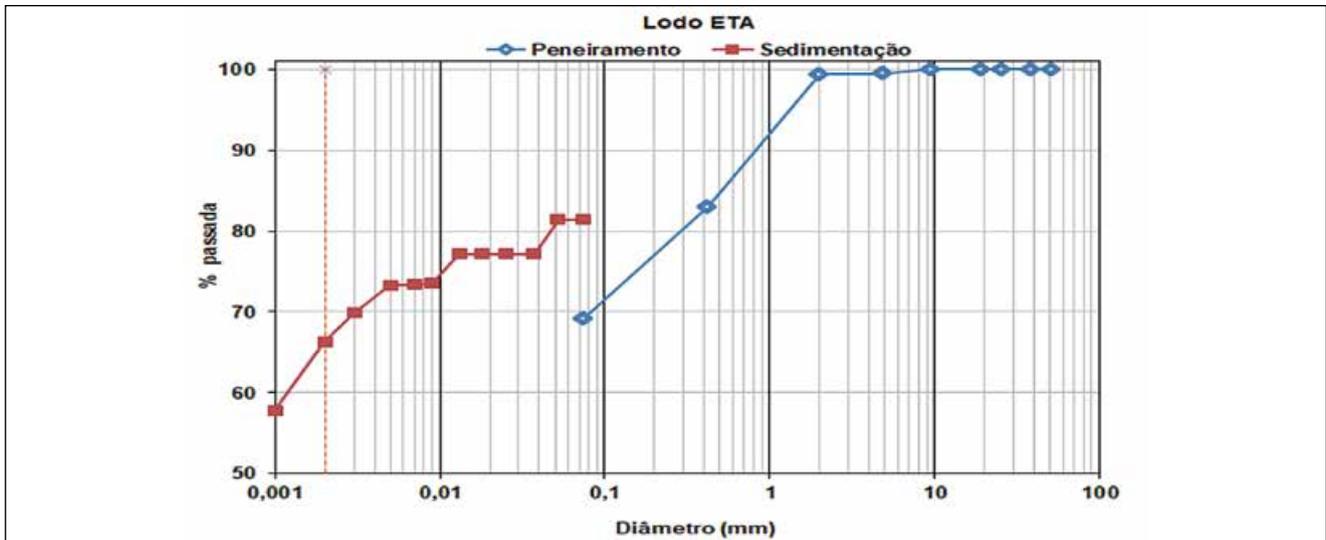


Figura 5. Curvas granulométricas do lodo ETA

O lodo estudado por Margem (2008) também apresentou resultados com grande quantidade de argila (86,5%) e segundo Motta (1993) algumas das propriedades das argilas são atribuídas ao teor de matéria orgânica presente, propriedades tais como plasticidade, de floculação, lixiviação de óxidos, corantes entre outras.

O lodo ETA apresentou características semelhantes à do autor supracitado. De acordo com o DNIT (2006), as argilas são solos de granulação fina, com grãos de formas lamelares,

alongadas e tubulares cuja constituição principal é de minerais argílicos como a caulinita. Devido à finura, forma e composição mineralógica de seus grãos, o comportamento geral das argilas varia sensivelmente com a quantidade de água, sendo muito deformáveis.

A classificação pelo Sistema AASHTO do agregado siderúrgico resultou no enquadramento no grupo A-1-a, ao qual pertencem materiais constituídos, principalmente de pedregulhos, com ou sem material fino bem graduado, funcionan-

Tabela 3. Análise Granulométrica do Agregado Siderúrgico

Ensaio	Pedregulho	Areia		Silte	Argila
		Grossa	Fina		
Peneiramento	51,2%	20,9%	23,3%	4,7%	

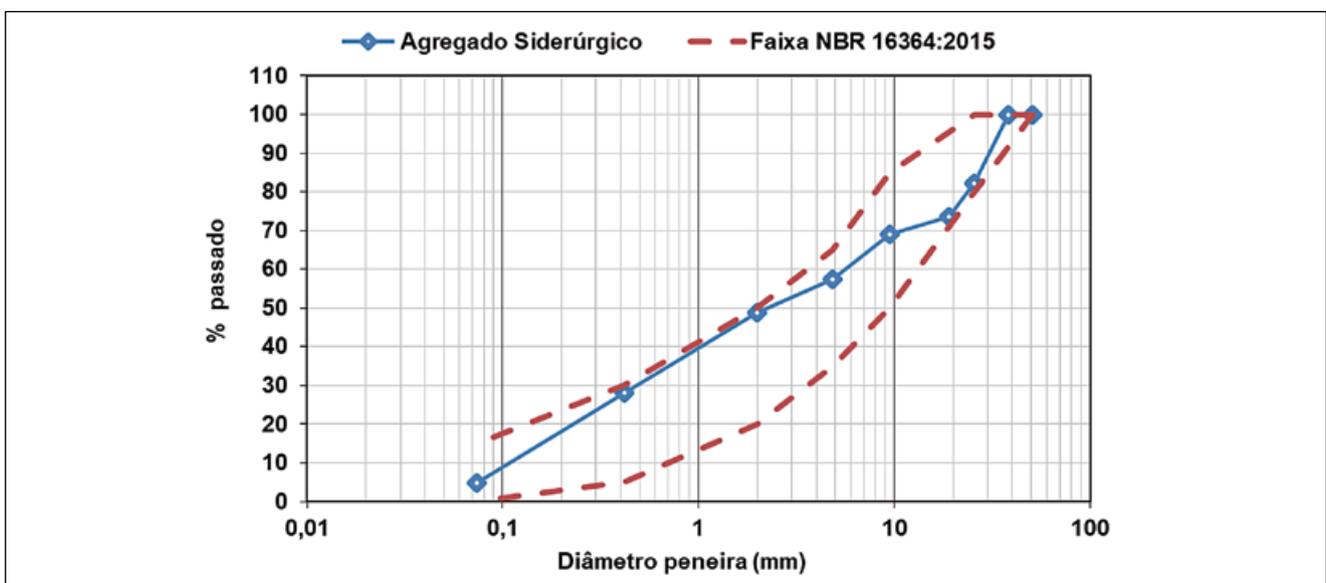


Figura 6. Curvas Granulométricas Agregado siderúrgico

do como aglutinante. Abaixo, a Tabela 3 e Figura 6 demonstram as análises granulométricas.

De acordo com DNIT (2006) areias e pedregulhos (solos de comportamento arenoso) são solos de granulação grossa, constituídos principalmente de quartzo. São solos desprovidos de coesão; sua resistência a deformação depende fundamentalmente do entrosamento e atrito entre os grãos e da pressão normal que atua sobre o solo.

Em geral, do ponto de vista granulométrico, o agregado siderúrgico cumpre com as características requeridas da NBR 16364 (ABNT, 2015), mas na prática, é comum e necessário a mistura de solos com características granulares e solos com características coesivas, para obtermos uma mistura com propriedades ideais de resistência e trabalhabilidade.

Limites de Atterberg ou Limites de Consistência

Na Tabela 4 são apresentados os dados obtidos no ensaio para a determinação do limite de liquidez, segundo o método NBR 6459 (ABNT, 1984). O resultado obtido apresenta valor igual a 110,1%. Souza *et al.* (2000) citam que quanto maior for a porcentagem da fração argila no solo, maior influência terá sobre o limite de liquidez.

A determinação do limite de plasticidade do solo foi realizada através do método determinado pela NBR 7180 (ABNT, 1984), obtendo-se um valor de 92,4%.

Com os resultados de limite de liquidez e limite de plasticidade obteve-se um valor de Índice de plasticidade (IP) de

17,7%. O IP pode ser interpretado como a quantidade máxima de água que pode ser adicionada ao solo, a partir de seu limite de plasticidade, de modo que o solo mantenha a sua consistência plástica. O valor de IP determinado para esse solo indica sua alta plasticidade. Marcolin (2006) verificou correlação positiva entre o teor de argila e os limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade.

Os ensaios realizados por Wolff (2008), apresentados na Tabela 4, mostram a dissemelhança entre eles. Vale ressaltar que, tratando-se do lodo ETA de mesma origem, as condições da Bacia do Rio Doce foram modificadas após o rompimento da barragem da cidade de Mariana, em 2015.

Diante dos resultados obtidos foi possível realizar a classificação do solo pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, utilizando a carta de plasticidade idealizado pelo Prof. Artur Casagrande (Figura 7). O solo pertence aos grupos MH – OH, que são solos argilo-siltosos de alta plasticidade. Pela classificação da Associação Norte-Americana de especialistas rodoviários e de transporte - AASHTO, o solo foi classificado no grupo A7-6, que inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

Por apresentar elevada plasticidade, o lodo não pode ser aplicado sem adição de um material dito como não plastificante, devido a sua elevada plasticidade. O agregado siderúrgico por sua vez é um material que pode ser incorporado ao lodo para obtenção de melhores resultados.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg

Limites de Atterberg	As autoras (2019)	Wolff (2008)
Limite de liquidez	110,1%	79%
Limite de plasticidade	92,4%	57%
Índice de plasticidade	17,7%	22%

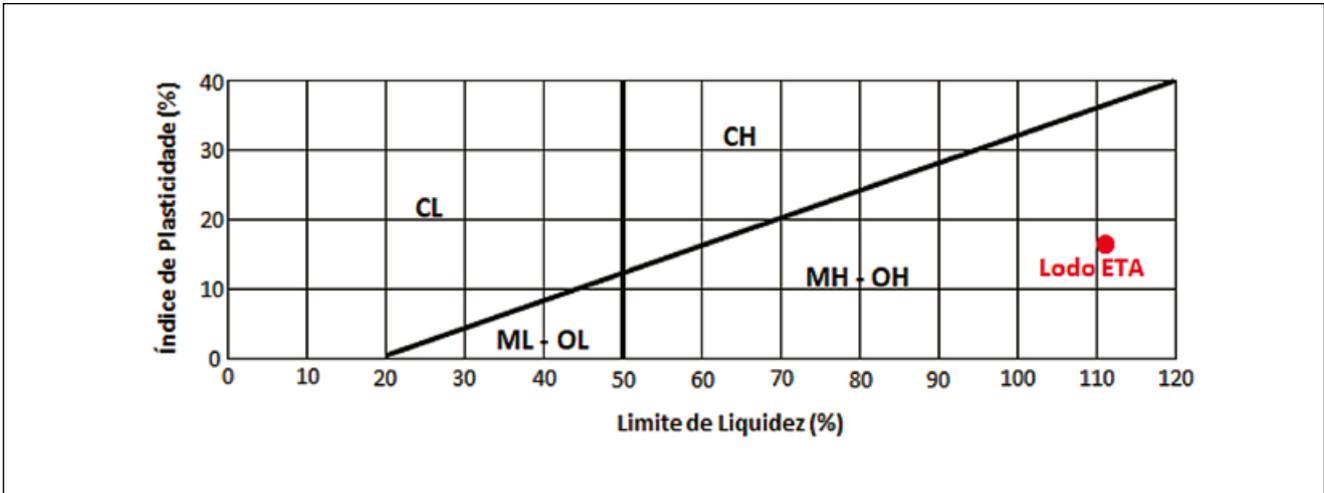


Figura 7. Carta de Plasticidade de Casagrande empregada no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

Ensaio de compactação

A curva gerada a partir do ensaio de compactação permite a interpretação do ponto de densidade máxima seca, em que se obteve o teor de umidade ótima para a compactação. Os resultados obtidos para o lodo ETA e agregado siderúrgico estão apresentados na Figura 8.

De acordo com o ensaio, o valor obtido para o lodo ETA de densidade máxima seca e o teor de umidade ótima de compactação foi de 1,308kg/dm³ e 6,6%, respecti-

vamente. Para o agregado siderúrgico foram encontrados 2,558kg/dm³ de densidade máxima seca e teor de umidade de ótima de 7,6%.

Para a determinação do valor de densidade máxima seca e o teor de umidade ótima de compactação para o lodo ETA e agregado siderúrgico utilizados nesta pesquisa, foi realizada uma análise conjunta dos resultados dos ensaios de compactação e índice de suporte de Califórnia identificando o ponto de melhor desempenho do material.

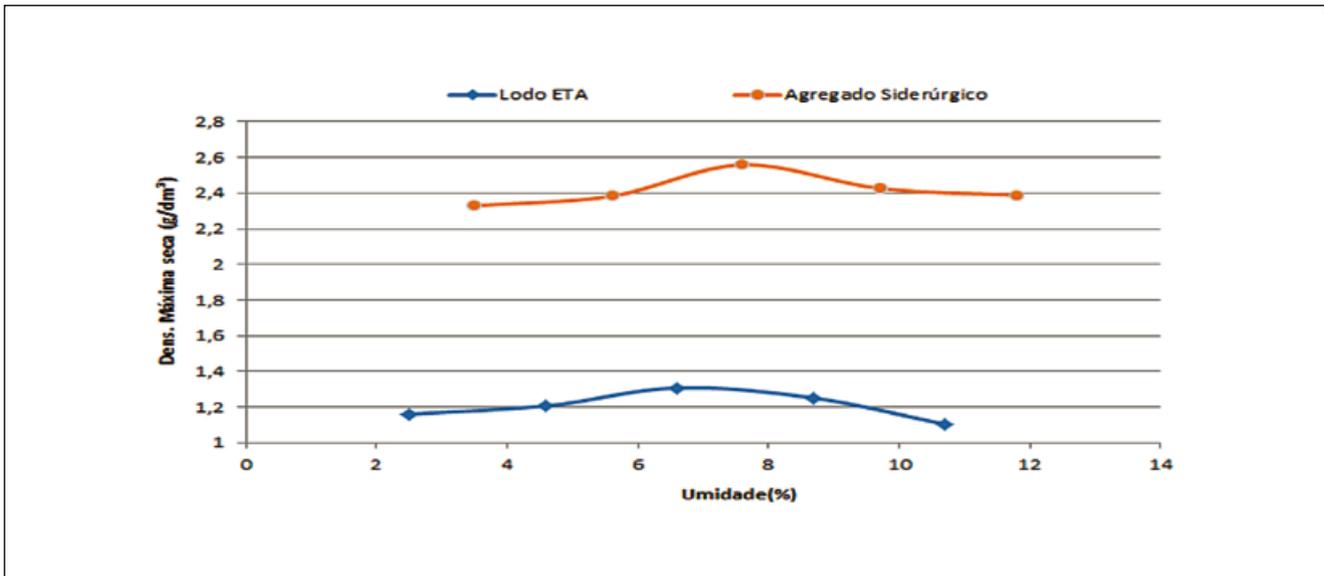


Figura 8. Curvas de compactação

Índice de Suporte Califórnia

Os ensaios de ISC foram realizados nos 3 corpos-de-prova utilizados na construção da curva de compactação. Após a etapa de imersão em água dos corpos de prova, foi realizada a etapa de penetração na prensa automática, obtendo-se dados de pressão no pistão relativos às penetrações estabelecidas para cada amostra.

O ensaio de Índice de Suporte de Califórnia foi realizado em todos os corpos-de-prova moldados, sendo que para o lodo ETA no ensaio de compactação foi utilizado energia de Proctor interintermediário e para o agregado siderúrgico foi utilizado energia de Proctor modificado.

Tabela 5. Resultados dos ensaios de expansibilidade e do ISC para o lodo ETA

Nº molde	Teor de Umidade(%)	Expansão(%)	ISC (%)
10	4,6	0,21	15,1
15	6,6	0,30	20,4
19	8,7	0,22	19,0

Tabela 6. Resultados dos ensaios da expansibilidade e do ISC para o agregado siderúrgico

Nº molde	Teor de Umidade (%)	Expansão (%)	ISC (%)
19	5,6	0,03	92,8
11	7,61.9	0,00	135,6
09	9,7	0,00	83,4

Na Tabela 5 e Tabela 6 são apresentados os resultados dos ensaios de expansibilidade e do índice de suporte Califórnia para os materiais.

O lodo ETA apresenta um valor máximo de ISC de 20,4% na umidade ótima de compactação, percebendo-se que com o aumento ou diminuição no teor de umidade os valores do índice de suporte Califórnia decrescem. Devido ao baixo valor encontrado no ensaio de ISC para o lodo ETA, o mesmo não atende as especificações da NBR 16364 (ABNT, 2015) para aplicação em pavimentos.

Nos resultados de Índice de Suporte de Califórnia, o maior valor obtido foi de 135,6% para a amostra com 7,6% de umidade de compactação.

A NBR 16364 (ABNT, 2015) estabelece que o agregado siderúrgico como material constituinte de base e sub-base de pavimentos deve apresentar um índice de suporte de Califórnia igual ou superior a 80% com energia de compactação de Proctor modificado no ponto de teor de umidade ótima de compactação. Por tanto o agregado siderúrgico ensaiado cumpre com este requisito, com valores muito acima desse limite.

Ensaio de Expansibilidade

Analisando os resultados apresentados na Figura 9, temos que no final dos 14 dias de duração do ensaio a maior expansão apresentada pelo agregado siderúrgico foi de 2,13%, observada no corpo de prova compactado no ramo úmido.

A realização deste ensaio fornece informações reais do potencial de expansão. O material foi submetido à ação de altas temperaturas nas condições testadas de submersão e saturação. Dessa forma, o agregado siderúrgico, utilizado nesta pesquisa, cumpre com as especificações em termos de expansão para sua aplicação em camadas de pavimentos rodoviários.

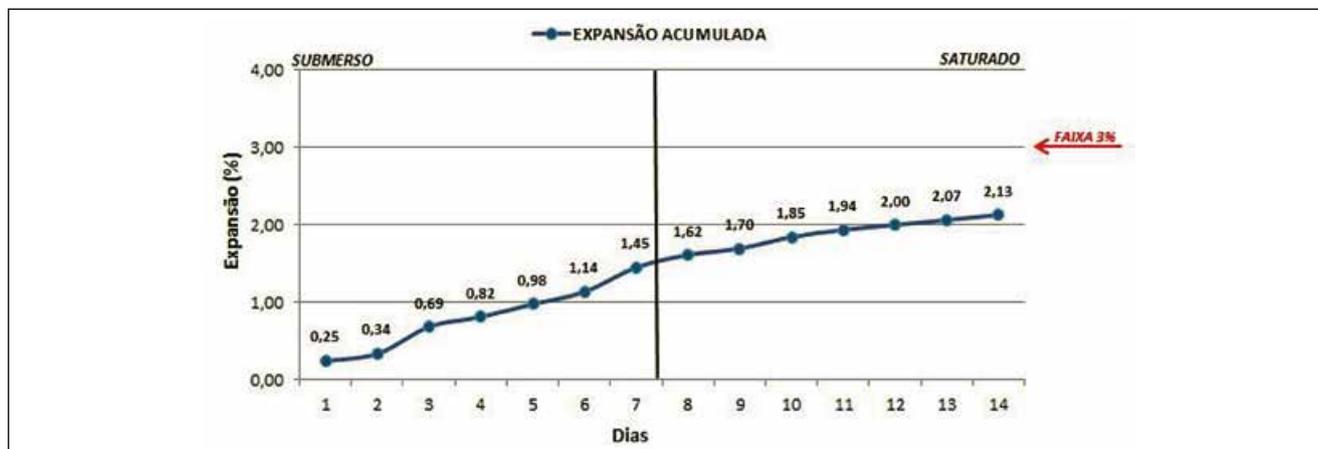
Rodrigues (2007) apresentou resultados do ensaio de expansão de 2,85%, semelhantes aos resultados encontrados acima.

Resende (2010) e Buitrago (2016), que realizaram pesquisas voltadas para pavimentação rodoviária, apresentaram resultados de 0,96% e 0,6%, respectivamente, inferiores a faixa de 3% determinada pela NBR 16364 (ABNT, 2015).

Misturas do Lodo ETA e Agregado Siderúrgico

A seguir, estão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos laboratoriais realizados nas quatro misturas determinadas:

- M1090 - Mistura de 10% Lodo ETA + 90% agregado siderúrgico.
- M2080 - Mistura de 20% Lodo ETA + 80% agregado siderúrgico.
- M2575 - Mistura de 25% Lodo ETA + 75% agregado siderúrgico.
- M5050 - Mistura de 50% Lodo ETA + 50% agregado siderúrgico.

**Figura 9. Curva da taxa de expansão acumulada no tempo de ensaio**

Análise Granulométrica

Foram realizadas análises granulométricas das misturas pelo método de peneiramento. A partir dos resultados pode-se classificar o material dentro da faixa granulométrica da NBR 16364 (ABNT, 2015) para misturas de lodo ETA e agregado siderúrgico.

A mistura M1090, M2080 e M2575 se encontram dentro da faixa granulométrica D. Essa faixa estabelece uma distribuição granulométrica com maior quantidade de finos quando comparada com as faixas A, B e C, também aceitas para suportar tráfegos com $N^{(1)} > 5 \times 10^6$.

A mistura M5050 ao contrário das demais avaliadas, se enquadra dentro da faixa granulométrica C, cumprindo também com as especificações granulométricas para uso em bases de

pavimentos rodoviários com tráfego $N > 5 \times 10^6$. Esta faixa C comparada com a faixa D, tem um valor menor de material fino que pode estar presente na mistura, conforme Tabela 7.

Os resultados obtidos para o ensaio de granulometria das quatro misturas de lodo ETA e agregado siderúrgico, demonstrados na Figura 10, atendem as especificações da NBR 16364 (ABNT, 2015) para uso em bases de pavimentos rodoviários com tráfego $cm N > 5 \times 10^6$.

Ensaio de Compactação

Para uma análise conjunta do efeito da compactação nas misturas, apresenta-se na Figura 11 as curvas de compactação obtidas nesta pesquisa.

Tabela 7. Análise granulométrica das misturas, faixa granulométrica da norma e suas tolerâncias

Peneiras	% em massa passante				Faixa granulométrica C	Faixa granulométrica D	Tolerância da faixa (%)
	M1090	M2080	M2575	M5050	% em massa passante	% em massa passante	
2"	100	100	100	100	-	-	± 7
1"	80,3	95,2	87,3	88,7	100	100	± 7
3/8"	70,9	84,6	74,6	81,7	50-85	60-100	± 7
Nº 4	64,7	71,9	64,6	69,4	35-65	50-85	± 5
Nº 10	55,8	58,1	47,7	45,2	25-50	40-70	± 5
Nº 40	38,3	39	22,5	23,2	15-30	25-45	± 2
Nº 200	13	17	21,1	8,1	5-15	10-25	± 2

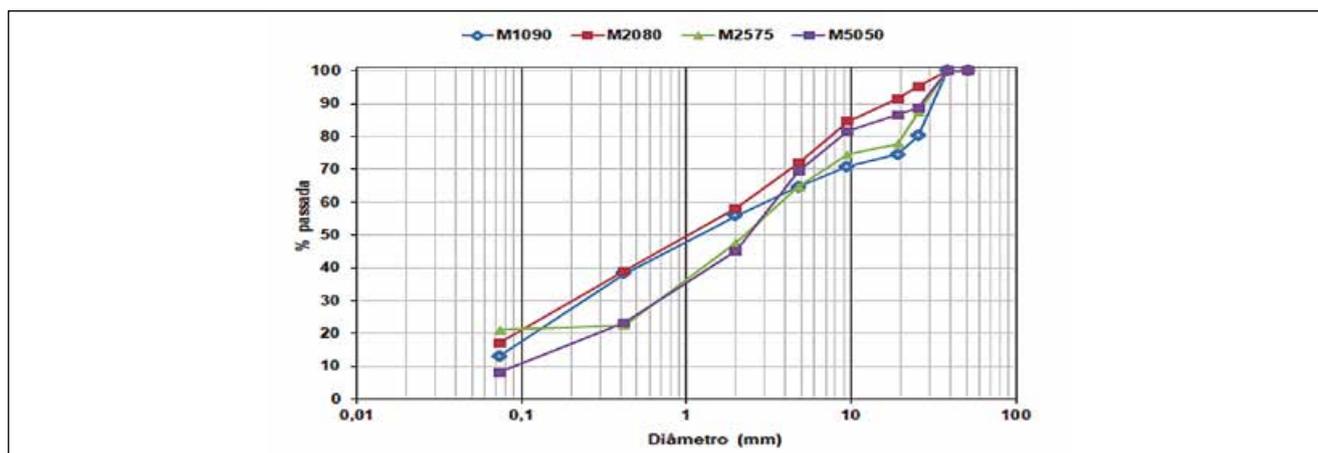


Figura 10. Resumo Curvas de Granulometria das Misturas

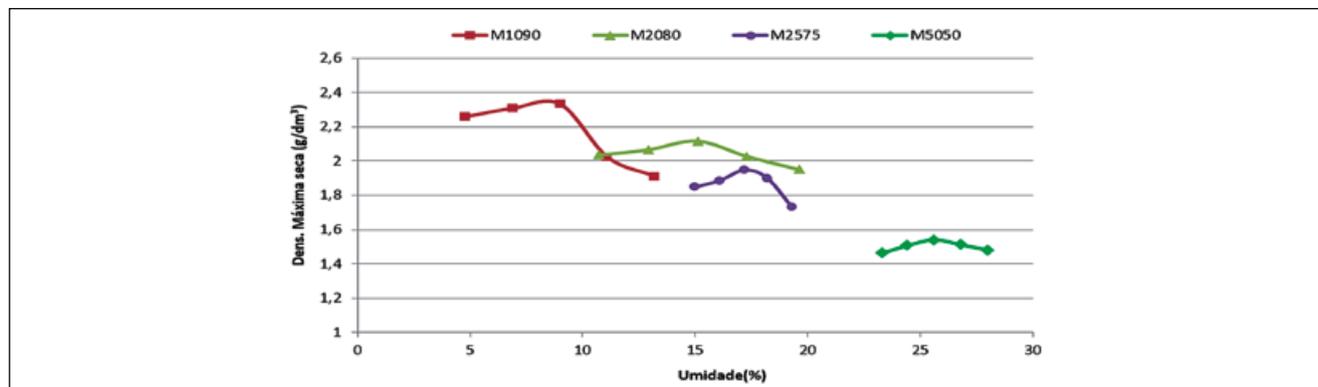


Figura 11. Resumo Curvas de Compactação

¹ Número de solicitações ao eixo simples padrão de 8,2t, utilizado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Pode se observar que as misturas que apresentam maior proporção de lodo ETA, apresentam características de solos coesivos, porém verifica-se que a densidade máxima seca é reduzida expressivamente à medida que o percentual de umidade aumenta.

Apesar do lodo ETA ser um material ligante, semelhantes as argilas, existe uma fração limite de proporção que pode ser incorporado com o agregado siderúrgico. Entretanto, outros ensaios mecânicos devem ser avaliados em conjunto para definição da melhor proporção para aplicação em pavimentos.

Índice de Suporte Califórnia

De acordo com a Tabela 8 e Figura 12, os resultados para ISC das misturas apresentadas valores diferenciados. As mis-

turas que apresentaram os melhores resultados foram: M1090, M2080 e M2575.

Teste In Loco

Foram realizados testes em um trecho de aproximadamente 1 km para avaliar o comportamento mecânico da mistura M2575.

As etapas para execução da base estabilizada estão a seguir:

O Agregado siderúrgico foi disposto a cada 50 m e o lodo ETA a cada 65m no trecho de 1Km. Após este procedimento, o material foi espalhado em todo percurso. Entretanto, houve um período de pausa para perda de umidade do lodo, com espalhamento após 60 dias, conforme demonstrado na Figura 13.

Tabela 8 – Resumo do Índice de Suporte Califórnia das misturas

Mistura	Teor de Umidade (%)	ISC (%)
M1090	9,0	104,3
M2080	15,1	101,2
M2575	17,2	94,9
M5050	25,6	61,0

A mistura M5050 não obteve valor mínimo de 80% do ISC, conforme estabelecido na NBR 16364 (ABNT, 2015) para N>5x10⁶.

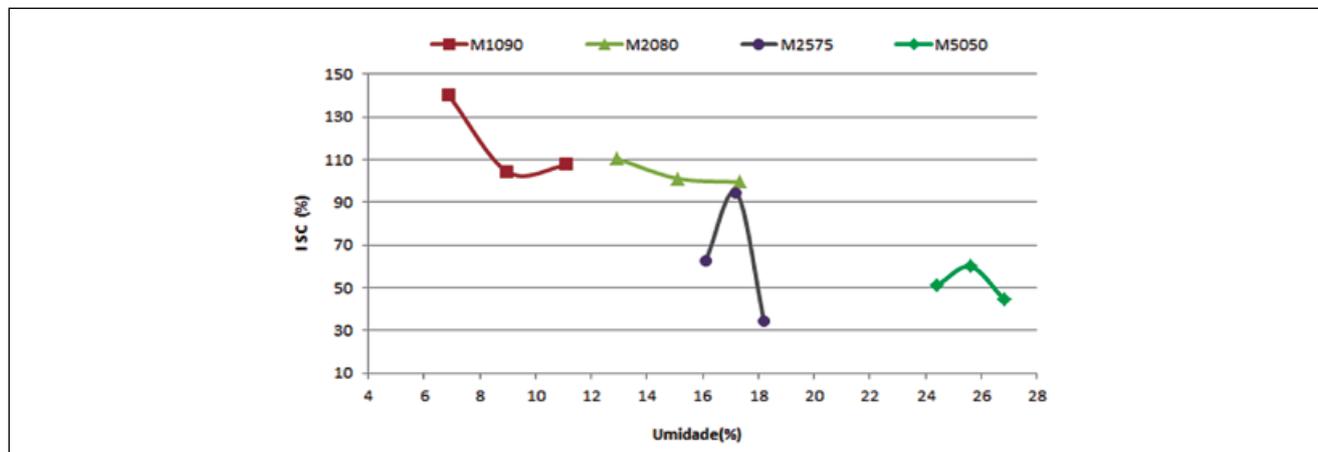


Figura 12. Resumo da Curva de Índice de Suporte Califórnia



Figura 13. Distribuição dos materiais



Figura 14. Escarificação e tombamento



Figura 15. Escarificação e tombamento



Figura 16. Umidificação



Figura 17. Compactação com rolo pé de carneiro



Figura 18. Compactação com rolo liso para acabamento



Figura 19. Base finalizada M2575

Para agregar os materiais, são realizadas duas etapas com um único implemento, escarificação e o tombamento do material para obtenção da mistura, conforme Figura 14.

Para obtenção do material homogêneo também é realizada a mistura com grade de disco, conforme demonstrado na Figura 15.

Vale ressaltar que entre uma etapa e outra sempre há a utilização do caminhão pipa para irrigação da estrada na obtenção da umidade ótima, conforme Figura 16.

Por fim, temos a etapa da compactação de superfície com rolo pé de carneiro e rolo compactador (também utilizado para acabamento), conforme indicado nas figuras 17 e 18.

Conforme Figura 19, percebe-se a obtenção de uma superfície estabilizada, atendendo aos critérios para tráfego em estradas não pavimentadas.

Levando em consideração o gerenciamento e os recursos disponíveis na prática (em campo) da infraestrutura rodoviária,

após testes da mistura M2575, em laboratório e resultados favoráveis apresentados acima, houve a necessidade de se testar demais trechos para avaliar o comportamento em diferentes solos na mesma região, em período chuvoso, após período chuvoso e após carregamento de madeira (período de tráfego intenso na estrada). Dessa forma, foram obtidos os resultados das figuras 20, 21 e 22 abaixo:



Figura 20. Durante o período chuvoso



Figura 21. Teste em trecho de 250 m após período chuvoso

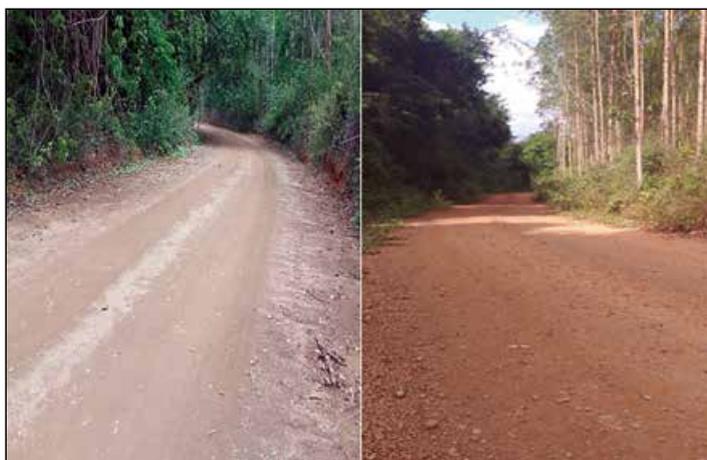


Figura 22. Trecho de Tráfego – Carregamento

CONCLUSÕES

Com base no estudo, pode-se concluir que:

- O lodo ETA pode ser utilizado como substituto da argila na base de pavimentos, porém, sua elevada plasticidade requer o emprego de outros materiais ditos como não plastificantes. Por isso, o uso de materiais ricos em óxidos alcalinos, como o agregado siderúrgico, fez-se necessário nas misturas com o lodo;
- Os ensaios de granulometria dos materiais apresentaram uma distribuição dentro das faixas exigidas pela NBR 16364 (ABNT, 2015). O lodo, por apresentar granulometria muito fina, pressupõe sua aplicação como material ligante ao agregado siderúrgico;
- O lodo de ETA possui temperatura crítica de secagem em 80 °C. Porém, secagem a temperatura ambiente, acima de 30 °C poderá ser uma alternativa mais econômica para eliminação de umidade, pois nessas condições não é necessário um investimento em fornos de secagem;
- Foi observado que após sessenta dias de secagem do lodo ETA em temperatura ambiente, o espalhamento do material em campo foi mais eficiente, comparado à aplicação com intervalos menores;
- A expansão nas amostras analisadas apresentou baixo resultado, mantendo-se dentro da especificação de 0,5%, da NBR 16364 (ABNT, 2015);
- As quatro misturas atenderam às especificações granulométricas da NBR 16364 (ABNT, 2015). Por esses motivos, essas misturas são consideradas adequadas como material de base para projetos de pavimentação rodoviária com tráfego estimado de $N > 5 \times 10^6$;
- Dentre as quatro misturas, somente três delas (M1090, M2080 e M2575) satisfazem amplamente os requerimentos do Índice de Suporte Califórnia da NBR 16364 (ABNT, 2015), para serem empregados como material de base de pavimentos rodoviários;
- Após aplicação da mistura *in loco*, observou-se um odor forte característico do lodo da ETA nos primeiros dias. Entretanto, considerando os fatores climáticos, em 20 dias da aplicação esse odor foi dissipado, não sendo mais perceptível.
- O lodo ETA, em mistura com agregado siderúrgico, por apresentar boas características mecânicas, é uma alternativa para compor bases estabilizadas granulometricamente em pavimentação;
- Após o período chuvoso, a base estabilizada com o Lodo ETA e o Agregado Siderúrgico se manteve preservada, preservando as características de resistência e conservação. ■

REFERÊNCIAS

- AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade de 2018. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 10 jun. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16364: Execução de sub-base e base estabilizadas granulométricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- BRASIL. Lei n. 12.305, 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 22 nov. 2019.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria no 2914/GM/MS, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/MatrizesConsolidacao/comum/5727.html>. Acesso em: 01 nov. 2019.
- BOURGEOIS, J. C.; WALSH, M. E.; GAGNON, G. A. Comparison of process option for treatment of water treatment residuals streams. J. Environ. Eng. Sci. vol. 3, n. 6, p. 477-484, 2004. In: SOTERO-SANTOS, R. B., ROCHA, O. POVINELLI, J. Evaluation of water treatment sludges toxicity using the Daphniabioassay. Water Research, vol. 39, p. 3909-3917, 2005.
- CASTELO BRANCO, V. T. F. Caracterização de Misturas Asfálticas com o uso de Escória de Aciaria como agregado. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- CORDEIRO, J. S. Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. (coord.) Noções Gerais do Tratamento de Disposição Final de Lodos de ETA. 1.ª ed. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 1999. cap. 1, p.1-19.
- CPMTC. Difração de raio-X. Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2018. Disponível em: www.cpmtc-igc-ufmg.org/laboratorios2.htm. Acesso em: 16 nov. 2019.
- DENARI, G. B. Princípios e Aplicações de Análise Térmica. Dissertação de Mestrado (USP), São Paulo, 2013.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 041/94: Solos – Preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 262/94: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT. Manual de Pavimentação. 3.ª ed. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 406/2017 (ES): Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulométricamente com Açobrita® – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2017.
- MACEDO, R. S. Estudo das matérias-primas e tijolos furados produzidos no Estado da Paraíba. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química (CCT/UFCG), Campina Grande (PB), 1997.
- MARGEM, J. I. Caracterização e Incorporação de Lodo de Decantação de Estação de Tratamento de Água (E. T. A.) em Cerâmica Vermelha. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes (RJ), 2008.
- MOTTA, J. F., TANNO, L. C., JÚNIOR, M. C., Argilas Plásticas para Cerâmica Branca no Estado de São Paulo – Potencialidade Geológica, *Revista Brasileira de Geociências*, v. 23, n. 2, p. 158-173, 1993.
- PAIXÃO, Luiz Carlos Cardoso. Aproveitamento do lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha. 2005. 125 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais (REDEMAT, UFOP, CETEC, UEMG). Ouro Preto (MG), 2005.
- RESENDE, A. D. Utilização da escória de aciaria pura e com adição de argila como camada de base em pavimentação rodoviária. Orientador: Prof. Dr. Gilberto Fernandes. 2010. 317 f. (Dissertação de Mestrado em Geotecnia) (UFOP), Ouro Preto (MG), 2010.
- RICHTER, C. A. Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 102p., 2001.
- SILVA, C. A.; SILVEIRA, C.; SILVA, F. A.; KLEN, M. R. F.; BERGAMASCO, R. (2012). Classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação/floculação da água com os coagulantes PAC e Moringa Oleifera. *Engevista*, v. 14, n. 3. p. 302-309.
- SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L.; VIEIRA, L. B. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, n. 3, p.460-464, 2000. Campina Grande (PB), DEAg/UFPB, 2000. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br/revista/v4n3/460.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2019.
- TEIXEIRA, S. R. *et al.* Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (E. T. A.) nas propriedades de material cerâmico estrutural. *Cerâmica: São Paulo*, v. 52, n. 323, p. 215-220, 2006.