

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM SOLO COM ADIÇÃO DE REJEITO DE FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO PARA UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS

Lorena Lemos Dias Lara
Bianca Groner Queiroz
Sérgio Pacífico Soncim
Marconi Oliveira de Almeida
Carlos Augusto de Souza Oliveira
Fernanda Maria Belotti

Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira

Erinaldo Hilário Cavalcante

Universidade Federal de Sergipe

Laís Resende

Vale S.A.

RESUMO

A mineração de ferro exerce um papel importante na economia brasileira, entretanto inerente ao processo de beneficiamento do minério, são gerados grandes volumes de resíduos, denominados de rejeitos. Atualmente, a principal forma de disposição desses resíduos ocorre em estruturas denominadas barragens, que quando mal operadas, conferem riscos ao meio ambiente e à segurança pública. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento mecânico de misturas de um solo de comportamento laterítico com adição de rejeito de flotação de minério de ferro, para aplicação como material de reforço de subleito e sub-base de pavimentos rodoviários. Os resultados revelaram aumento nos valores do ISC do solo com adição do rejeito de minério de ferro, e a diminuição da expansão. Resultados de ensaios triaxiais cíclicos confirmaram a adequabilidade do modelo composto resiliente aplicado às misturas, que as habilitam ao uso como camadas de pavimentos, especialmente como material de reforço de subleito e sub-base.

ABSTRACT

Iron mining is important role in the Brazilian economy, however, typical to the production process, a large amount of waste is generated. Nowadays, the main application form of these wastes is build structures called dams, which when wrong operated, put at risk the environment and public safety policy. The objective of this work was to evaluate the mechanical behavior of a lateritic soil with addition of iron ore flotation tail for application as subgrade reinforcement material and sub base of road pavements. The results showed an increase in soil CBR values with addition of iron ore tail, and a decrease in the expansion. Results of cyclic triaxial tests confirmed the suitability of the resilient composite model applied to the mixtures, which enable them to be used as pavement layers, especially as subgrade reinforcement material and sub base material.

1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro é utilizado como matéria prima para a produção de diversos bens de consumo, sendo considerado um componente essencial para as indústrias de base. O Brasil apresenta importantes jazidas desse minério, posicionando-se entre os maiores produtores do mundo. Assim, a atividade de mineração de ferro exerce um papel importante na economia brasileira, tanto na geração de empregos diretos e indiretos quanto na geração de renda, em decorrência dos impostos.

O Estado de Minas Gerais abriga a maior região mineral do país, respondendo por 51,6% da produção nacional de minério de ferro (IBRAM, 2016), uma estrutura geológica denominada Quadrilátero Ferrífero. Nesse Estado, a cidade de Itabira/MG tem sua história marcada pela presença da empresa Vale S.A., configurando-se como um importante polo minerador, no qual a mineração de ferro é responsável por movimentar a economia, como principal atividade geradora de renda.

Em contrapartida aos benefícios econômicos promovidos pela atividade de mineração, para que seja possível a comercialização do minério explorado, são necessários processos de beneficiamento, a partir dos quais são gerados resíduos denominados de estéreis e rejeitos. Os estéreis são gerados no processo de remoção do solo de cobertura (decapeamento da mina) e desmonte da rocha. Já os rejeitos são produtos resultantes de processos físicos e químicos que objetivam modificar a granulometria e aumentar a pureza do produto final, removendo os minerais sem valor econômico.

Atualmente, no Brasil, a principal forma de disposição de rejeitos ocorre em estruturas denominadas barragens. Tais estruturas, quando mal operadas, conferem riscos ambientais e à segurança pública, causando impactos ambientais, desde a sua construção até a etapa de fechamento de mina, além de representar um alto custo de manutenção e monitoramento.

Nesse contexto, as empresas mineradoras têm buscado alternativas mais sustentáveis que vão além da disposição em barragens, visando principalmente a redução e a reutilização do rejeito, como forma de minimizar os problemas provocados pelos resíduos gerados durante suas operações. Diversos estudos têm indicado que a construção civil, especialmente a rodoviária, é uma opção viável para o aproveitamento do rejeito de minério de ferro.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento geotécnico de misturas de solo com o rejeito de flotação de minério de ferro da empresa Vale S.A., localizada no município de Itabira-MG. Esse trabalho faz parte de uma pesquisa desenvolvida pela Universidade Federal de Itajubá, em parceria com a mineradora Vale S.A., cujo objetivo é estudar a viabilidade técnica de utilização do rejeito de flotação do minério de ferro em camadas estruturais de pavimentos asfálticos rodoviários, com base em ensaios de laboratório e por meio da sua aplicação em um trecho experimental, a etapa posterior. Avaliou-se o comportamento das misturas de solo com rejeito, nas proporções 25%, 50% e 75% de rejeito, em massa, visando-se a aplicação dessas misturas em camadas de subleito, reforço de subleito e em sub-base. Após a caracterização do solo e do rejeito, foram realizados ensaios de compactação (nas energias normal e intermediária), Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) e módulo de resiliência (MR), para avaliação do comportamento mecânico das misturas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em consequência do aumento do volume de obras de infraestrutura nos últimos anos, a aplicação de diferentes materiais, inclusive alternativos (como são os rejeitos), na construção de estruturas de pavimentos tornou-se crescente, a exemplo da reutilização de rejeito de minério de ferro em pavimentação asfáltica, como forma de reaproveitamento.

A lavra é a primeira etapa para a extração do minério de ferro, e nesse processo ocorre a escavação para a retirada do solo de recobrimento e o desmonte da rocha (Campanha, 2011). Os resíduos gerados nessa etapa são denominados estéreis e não apresentam valor econômico, sendo dispostos em pilhas. Posteriormente, o minério de ferro é encaminhado para uma série de etapas, onde ocorre o beneficiamento, que visam prepará-lo granulometricamente, concentrá-lo ou purificá-lo por métodos físicos e químicos sem alteração da constituição química dos minerais. Os produtos derivados dessas etapas são o concentrado e o rejeito.

Atualmente, a flotação é o principal processo de concentração utilizado para o beneficiamento de minérios com baixo teor e granulometria fina, devido à sua grande versatilidade e

seletividade. Para que o processo de flotação ocorra de maneira eficiente é necessário a adição de alguns reagentes, com o propósito de modificar a superfície dos minerais. No caso dos minérios itabiríticos, formados predominantemente por hematita e quartzo, dois minerais naturalmente hidrofílicos, utiliza-se a flotação catiônica reversa de silicatos, como o quartzo, para a separação desses minerais (Queiroz, 2017). Ao final da etapa de concentração, por meio do processo de flotação, são produzidos resíduos denominados de rejeito, sendo gerados na forma de lama ou pasta, cuja destinação final tem sido o lançamento em barragens de disposição de rejeitos (Campanha, 2011). Esses rejeitos têm sido utilizados por vários pesquisadores, visando seu aproveitamento como material de pavimentos.

Saraiva (2006), por exemplo, utilizou o rejeito de minério de ferro proveniente da barragem de contenção da Mina de Conceição, em Itabira, como elemento de mistura em solos para utilização em camada de base para a construção de um trecho experimental de 300 m de extensão inseridos na rodovia de ligação Itabira – Senhora do Carmo. Os ensaios realizados demonstraram o potencial de aplicação do rejeito para a garantia de maiores valores de ISC (Índice de Suporte Califórnia) para a mistura, auxiliando também na correção da curva granulométrica da mistura nas faixas prescritas pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes): a mistura com composição de 25% de rejeito fino, 25% de argila e 50% de jigue apresentou CBR igual a 34%, enquanto que a mistura com apenas 50% de argila e 50% de jigue, resultou num CBR da ordem 25%.

Campanha (2011) analisou a aplicabilidade dos rejeitos da usina de beneficiamento Alegria, da empresa Vale S.A., localizada em Mariana-MG. As análises demonstraram que os rejeitos poderiam ser utilizados em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis. Aquele autor observou que esses rejeitos apresentam potencial para uso especialmente quando melhorados com cimento, possibilitando até mesmo a utilização em construção de bases.

As pesquisas realizadas por Dantas (2015) tiveram como finalidade a estabilização de resíduos de minério de ferro, da mineradora do grupo Mhag Serviços e Mineração S/A, da mina Bonito, localizada no município de Jucurutu – RN, com um solo granular do município de Macaíba – RN. Foram encontrados altos teores de minério de ferro no próprio resíduo, provocando alta densidade ao material. Determinaram-se três composições de misturas, e a partir das quais concluiu-se que há viabilidade técnica para a utilização de rejeitos oriundos do beneficiamento do minério de ferro, nas energias de compactação intermediária e modificada, em camadas de base, sub-base, reforço de subleito e subleito.

A estabilização de solos finos com cangas de minério de ferro foi avaliada por Sanchez (2015). A mistura testada pelo autor, composta de 50% de solo e 50% de canga, apresentou comportamento mecânico melhorado ou semelhante ao do solo puro. O resíduo, neste caso, atuou como melhoria granulométrica, influenciando pouco no dimensionamento, mas sendo visto como um material que possa ser utilizado na composição de camadas de sub-base em pavimentos com baixo volume de tráfego. Rodrigues (2018) estudou a substituição parcial de um solo, inadequado para a utilização em rodovias, por rejeitos de espirais do beneficiamento de minério de ferro. As misturas foram preparadas substituindo-se massa de solo seco por massa equivalente de rejeito seco, nas percentagens de 10%, 20% e 30% do rejeito. O autor concluiu que a adição do rejeito ao solo mostrou-se válida tanto do ponto de vista ambiental quanto do lado técnico. Os resultados mostraram significativos ganhos em termos de massa específica seca e nos valores do CBR com o aumento do teor de rejeito.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta pesquisa consistiu em duas etapas: i) inicialmente, foi escolhida a jazida de solo a ser empregada nos ensaios, adotando-se como critério a disponibilidade de material e a permissão de uso, bem como a distância de transporte até o local onde se planeja construir uma pista experimental; ii) em seguida, foram definidas as porcentagens do rejeito de flotação de minério de ferro a serem empregadas nas misturas. A partir disso, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, de resistência e deformabilidade dos materiais, incluindo o ensaio triaxial cíclico.

3.1 Materiais

Esta pesquisa propõe o aproveitamento de um rejeito da mineração, oriundo do processo de beneficiamento de minério de ferro, em mistura com um solo residual, visando aproveitar um passivo ambiental como material alternativo na pavimentação de estradas.

3.1.1 Solo

A amostra de solo utilizada nesta pesquisa foi coletada na jazida denominada “Borrachudos”, localizada dentro da área operacional da Mina de Conceição, sob o domínio da Vale S.A, na cidade de Itabira – MG, especialmente para o presente estudo geotécnico, que foi desenvolvido na Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira. O solo foi classificado conforme a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) estabelecida pela norma rodoviária DNER-CLA 259/96, como um solo tropical, fino, vermelho, argiloso de comportamento laterítico, tipo LG’, característico dos encontrados na região de Itabira-MG.

3.1.2 Rejeito de flotação de minério de ferro

O subproduto industrial utilizado nesta pesquisa é um resíduo oriundo da cadeia produtiva da mineração, denominado rejeito de flotação de minério de ferro. Esse material foi cedido pela mineradora Companhia Vale S.A., empresa parceira do projeto, através da sua unidade exploratória denominada mina de Cauê, localizada no município de Itabira-MG.

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização mineralógica e química do rejeito de flotação de minério de ferro

A caracterização mineralógica e química das amostras do rejeito de flotação de minério de ferro foi realizada através da combinação das técnicas analíticas de Difração de Raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no modo Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS). A análise das amostras por MEV foi realizada utilizando o microscópio JEOL modelo JSM-6510 e a análise das amostras por Difração de Raios-X, foi realizada pelo método do pó, utilizando o equipamento *Panalytical* modelo *Empyrean*.

3.2.2 Ensaios de caracterização geotécnica, compactação e ISC

Para a caracterização geotécnica das amostras de solo, foram empregadas as normas do DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Vale ressaltar que antes do início dos ensaios geotécnicos foi realizado o preparo do solo e das amostras de acordo com a NBR 6457/16. Os ensaios realizados para a caracterização geotécnica do solo e do rejeito estão apresentados na Quadro 1. Pelo fato do rejeito de mineração se comparar a uma granulometria de areia fina, igualmente foram procedidos com esse material ensaios de caracterização geotécnica, empregando-se, para isso, as normas técnicas já mencionadas. Além dos ensaios com o solo puro e com o rejeito puro, foram realizados ensaios com as misturas de solo-rejeito,

adicionando-se os percentuais de 25%, 50% e 75% do rejeito, em massa, após secagem prévia. Neste caso, entraram também em operação os ensaios de compactação, conforme as diretrizes da NBR 7182/16 (nas energias Normal e Intermediária) e o ISC (Índice de Suporte Califórnia), seguindo o estabelecido na Norma DNIT 172/2016.

Quadro 1: Ensaios de caracterização geotécnica do solo e do rejeito

Ensaios	Metodologia
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181
Densidade Real	DNER – ME 093
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459
Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180
Equivalente de areia	DNER – ME 054

3.2.3 Ensaios de carregamento repetido – Módulo de Resiliência

Nessa fase de pesquisa, o desempenho mecânico do solo e das misturas foi analisado à luz dos resultados obtidos dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, também denominado ensaio triaxial cíclico, que fornece o Módulo de Resiliência (MR) ou o módulo de elasticidade sob carregamento repetido dos materiais utilizados na construção de pavimentos, parâmetro resultante da relação entre os pares de tensão-desvio (σ_d) e pressão confinante (σ_3) aplicados ao corpo de prova e a correspondente deformação resiliente. Ou seja, o comportamento resiliente de um solo está diretamente relacionado às suas propriedades elásticas, e, conseqüentemente, à sua rigidez. O ensaio de carregamento repetido foi realizado no laboratório de Estradas a Escola de Engenharia de São Carlos - USP, conforme as recomendações da norma DNIT 134/2010-ME. Para interpretação dos resultados dos ensaios de MR foi aplicado o modelo denominado universal ou composto, conforme mostrado na Equação 1.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

em que,

MR: Módulo de resiliência [kPa];

σ_3 : tensão confinante [kPa];

σ_d : tensão desviadora [kPa];

k_1 , k_2 e k_3 : parâmetros experimentais.

Os ensaios de MR foram realizados em corpos de prova (CP) medindo 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, conforme prescrito na AASHTO T 307-99, empregando-se os níveis de tensões recomendados para camadas de bases e sub-bases de pavimentos. Os CP foram compactados de forma estática, em cinco camadas, objetivando reproduzir os parâmetros de compactação obtidos dos ensaios Proctor realizados nas energias normal e intermediária. Na moldagem dos CPs procurou-se fazer com que o teor de umidade ótima (w_{ot}) ficasse na faixa $w_{ot} \pm 0,3\%$, enquanto que a massa específica aparente seca máxima obtida fosse correspondente ao grau de compactação $GC = 100 \pm 2\%$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Composição mineralógica e química do rejeito

Os resultados da caracterização mineralógica das amostras de rejeito de flotação de minério de ferro por Difração de Raios-X indicam que o rejeito possui mineralogia composta por silicatos (quartzo, caulinita, talco, pirofilita e muscovita), óxido de ferro (hematita) e hidróxido de alumínio (gibbsita). Os resultados da Difração de Raios-X também revelaram

que as amostras de rejeito são compostas principalmente por quartzo, hematita e caulinita, sendo o quartzo, o mineral que aparece em maior proporção, com teores acima de 50%.

Os resultados da análise mineralógica por MEV/EDS demonstraram que as amostras são compostas pelos elementos silício (Si), oxigênio (O), ferro (Fe), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na), corroborando os dados da Difração de Raios-X. Os elementos Si, O, Fe, Mg e K são provenientes dos minerais que compõem o rejeito; enquanto que os elementos Ca e Na são considerados impurezas. A presença do elemento sódio é relacionada ao emprego do hidróxido de sódio (NaOH) como agente gelatinizador no processo de flotação do minério de ferro. A Figura 1(a) apresenta uma imagem do rejeito de flotação e a Figura 1(b) apresenta uma imagem obtida por meio de MEV, em escala de 100 μm .

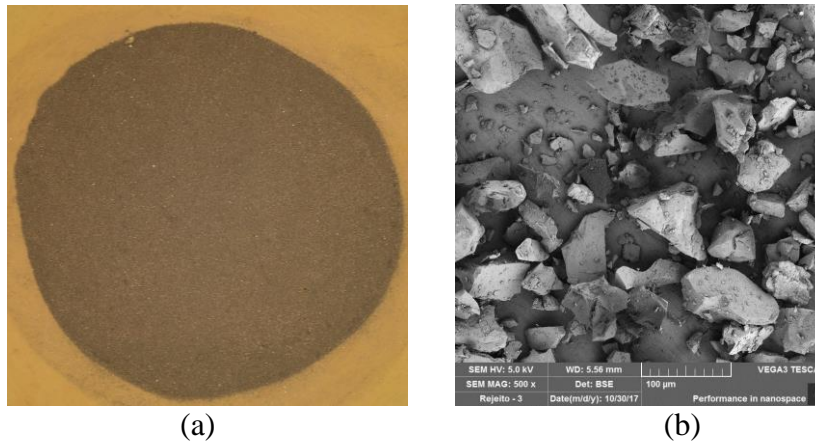


Figura 1: (a) amostra do rejeito de minério de ferro em escala real; (b) micrografia dos grãos do rejeito em escala ampliada

Pela observação da Figura 1(b) pode-se notar que existe uma heterogeneidade no formato e tamanho das partículas, variando de tamanho de partículas menores do que 10 μm até partículas com dimensões um pouco maiores do que 100 μm .

4.2 Caracterização geotécnica

Os gráficos das Figuras 2a e 2b apresentam as curvas granulométricas do rejeito de flotação de minério de ferro e do solo argiloso de comportamento laterítico LG', respectivamente.

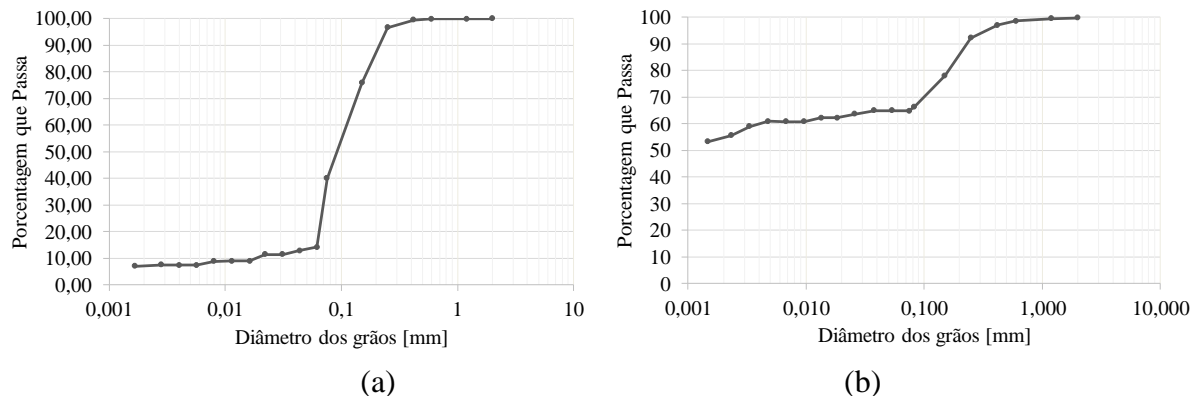


Figura 2: (a) Curva granulométrica do rejeito de flotação de minério de ferro; (b) curva granulométrica do solo argiloso de comportamento laterítico LG'

A Tabela 1 mostra as porcentagens equivalentes a cada fração granulométrica presente nos materiais estudados de acordo com a escala de grãos estabelecida pela NBR 6502 (1995).

Tabela 1: Composição granulométrica do solo LG' e do rejeito

	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
Solo LG'	55,63	10,12	34,25	0
Rejeito	0	26,78	73,22	0

Pela análise da Figura 2a observa-se que o rejeito possui cerca de 40% do seu material passante na peneira de nº 200 (0,075mm), e 100% passante na peneira nº 40. O resíduo aponta para uma graduação uniforme, ou seja, apresentam a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa estreita, caracterizando uma curva granulométrica bastante íngreme. Já, pela análise da Figura 2b observa-se que o solo possui cerca de 65% do seu material passante na peneira de nº 200 (0,075mm), e 97% passante na peneira nº 40. Pode-se notar que tanto o rejeito quanto o solo apresentam elevado teor de finos. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de caracterização geotécnica para a densidade real, limites de consistência e equivalente de areia.

Tabela 2: Densidade real, limites de consistência e equivalente de areia

	Densidade real (g/cm³)	Limites de consistência (%)			Equivalente de areia (%)
		LL	LP	IP	
Solo	2,57	44	30	14	0
Rejeito	2,98	NL	NP	NP	59

O rejeito flotação de minério de ferro, em comparação com o solo, apresentou maior valor de densidade real, como se poderia esperar, visto que por se tratar de um material com elevado teor de quartzo e de óxidos de ferro residuais nas amostras de rejeito faz aumentar sua densidade. Quanto aos ensaios de limites de *Atterberg*, por se tratar de material granulometricamente semelhante a uma areia, o rejeito de minério de ferro foi considerado como não líquido (NL) e, também sem apresentar plasticidade, não plástico (NP). Por outro lado, para o solo se obtiveram os valores de LL = 44% e de LP = 30%, resultando em um IP = 14%, o que o caracteriza como um material de plasticidade média, conforme se poderia esperar para um solo de matriz argilosa.

Os resultados do ensaio de equivalente de areia mostraram que para o rejeito de flotação de minério de ferro foi obtido o valor de 59%. Esse resultado confirma sua característica arenosa e a tendência, mencionada por Campanha (2011), da maioria dos rejeitos de minério de ferro (cerca de 60 a 70% de areia) apresentarem propriedades de areias finas e médias siltosas. Para o solo estudado foi obtido o valor de 0% para o equivalente de areia, corroborando os ensaios de limites de *Atterberg*.

4.3. Compactação

As Figura 3a e 3b mostram os resultados dos ensaios de compactação nas energias Proctor Normal e Intermediária obtidas para o solo e para as misturas de solo com rejeito, em que, MS100/0 é o solo referência puro, MS75/25 é a mistura composta por 75% de solo e 25% de

rejeito, MS50/50 é a mistura composta por 50% de solo e 50% de rejeito, e MS25/75 é a mistura composta por 25% de solo e 75% de rejeito, sendo todas as proporções em massa seca.

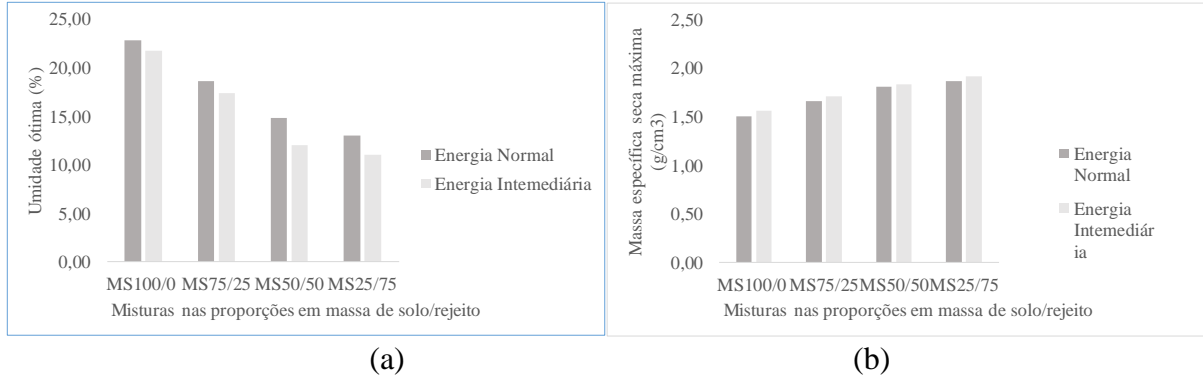


Figura 3: (a) Umidade ótima; (b) Massa específica seca máxima

Da Figura 3b observa-se que com o aumento do teor de rejeito há uma tendência de aumento da massa específica seca das misturas, isso pode ser explicado pelo fato do rejeito ser um material mais denso que o solo estudado. Por outro lado, o aumento no percentual de rejeito nas misturas gerou a redução no teor de umidade de compactação ótima (Figura 3a), o que já era esperado, visto que misturas com composição maior de materiais não-coesivos apresentam redução no teor da umidade.

Fazendo-se uma comparação geral entre os resultados obtidos sob as duas energias de compactação, pode-se notar um aumento nas massas específicas aparentes secas das misturas compactadas na energia intermediária, bem como a diminuição nos teores de umidades ótimas. Porém, essas variações foram mínimas, mantendo as massas específicas secas, das duas energias, em um intervalo de 1,36 a 1,91 g/cm³ e das umidades de 7,32 a 26,24%.

4.5. Índice de Suporte Califórnia

Conforme pode-se observar na Figura 4a a medida que aumentou-se o percentual de rejeito ao solo, o valor do ISC também aumentou. O ISC obtido da mistura MS25/R75 é quase três vezes maior que o da MS100/R0. Vale ressaltar que este fenômeno foi observado nas duas energias de compactação analisadas.

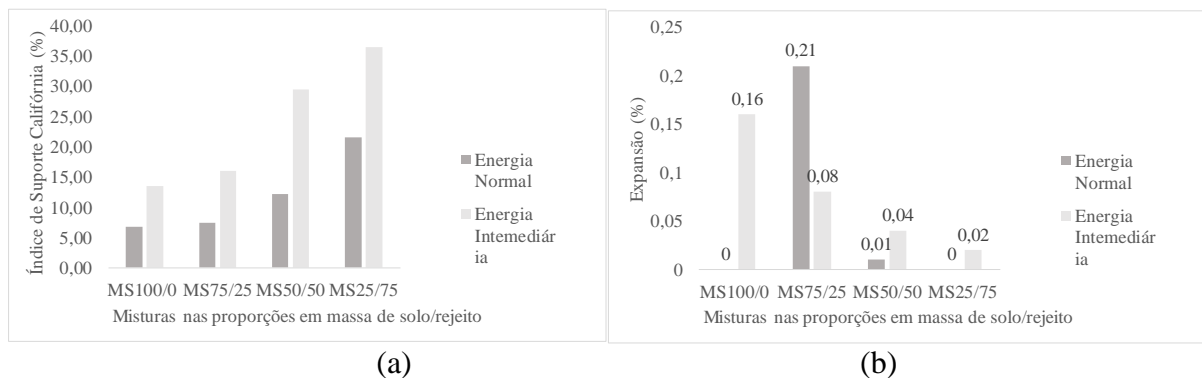


Figura 4: (a) Índice de Suporte Califórnia; (b) Expansão

Conforme se pode observar na Figura 4b, os valores das expansões medidas tanto com o solo puro quanto com as misturas são relativamente baixos, todos inferiores a 0,5%. A norma DNIT 137/2010 determina que o material do subleito deve apresentar expansão máxima igual 2%. Levando-se somente este parâmetro em consideração, a mistura sem adição de resíduo (MS100/R0), a mais propensa a apresentar expansão elevada, está com expansão máxima igual a 0,16%, e, portanto, atende à especificação da referida norma na energia intermediária, não apresentando expansão na energia normal.

Quanto às misturas que contém o rejeito de minério de ferro, representando os teores de estabilização granulométrica para reforço do subleito, atendem o que é preconizado na norma DNIT 138/2010 acerca dos valores de expansão: este deve ser menor ou igual a 1%. De acordo com a norma DNIT 139/2010, as misturas com 50% e 75% de rejeito também poderão ser aplicadas na construção de camadas de sub-base estabilizada granulometricamente, pelo fato do ISC obtido estar acima de 20%.

4.6. Módulo de resiliência

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de MR obtidos com o solo e com as misturas de solo-rejeito, em percentuais de 25% e 50%, usando-se as energias de compactação do Proctor Normal e Intermediária. Nessa tabela constam os valores dos parâmetros experimentais k_1 , k_2 e k_3 , bem como os respectivos coeficientes de determinação R^2 obtidos com o modelo aplicado.

Tabela 3: Parâmetros dos modelos obtidos do ensaio triaxial cíclico

Material	Energia	k_1	k_2	k_3	R^2
MS100/0	Normal	3399	0,0240	-0,5953	0,96
	Intermediária	4580	-0,0109	-0,5421	0,98
MS75/25	Normal	2046	0,0921	-0,5920	0,95
	Intermediária	2892	0,0426	-0,5370	0,99
MS50/50	Normal	157	0,5897	-0,5372	0,95
	Intermediária	871	0,2193	-0,4552	0,96

Vários autores tem recomendado a aplicação da Equação 1 para a análise do comportamento resiliente de solos de qualquer natureza, a exemplo de Ferreira (2002), Medina e Motta (2005) e Klinsky (2009), os quais têm obtido uma boa previsão do MR, independente da granulometria do solo em estudo, diferente de outros modelos existentes na literatura, que se aplicam apenas a um tipo de solo. A própria NCHRP 1-28 (1997) faz a recomendação do uso do mencionado modelo, razão pela qual este foi o escolhido para análise neste trabalho.

Tomando-se como parâmetro de análise o coeficiente de determinação R^2 , o critério comumente empregado para se avaliar os modelos resilientes aplicados aos materiais granulares, pode-se observar na Tabela 3 os excelentes ajustes obtidos, com o menor valor de R^2 igual a 0,95. Consultando a literatura técnica, como por exemplo, o Guia de Dimensionamento de Pavimentos da AASHTO (2002), tem-se a indicação de que o modelo utilizado neste trabalho é muito adequado ao estudo do comportamento resiliente dos materiais desta pesquisa, uma vez que os valores de R^2 estão todos acima de 0,90. A Figura 5 apresenta a variação dos resultados do módulo de resiliência em MPa para o solo e as misturas estudadas, para os pares de tensões aplicados no ensaio.

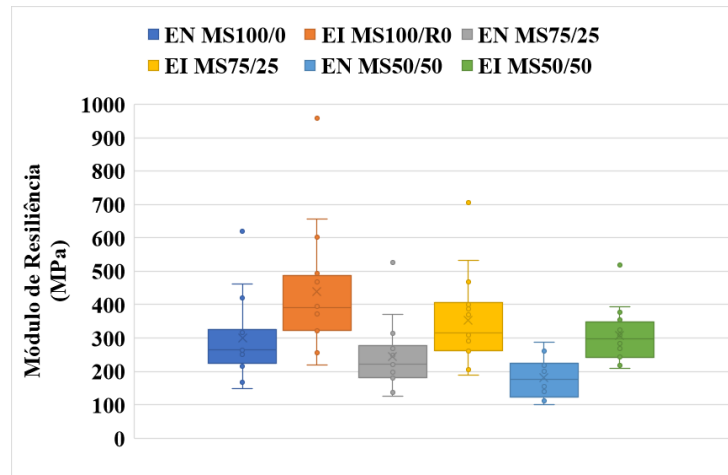


Figura 5: Variação nos resultados de módulo de resiliência para os pares de tensões do ensaio

Pela análise da Figura 5 pode-se notar que o valor do módulo de resiliência, para os valores de pares de tensões ensaiados, variou em função da energia de compactação e do teor de rejeito adicionado ao solo. Conforme mencionado por Macêdo (1996), em geral, considera-se o módulo de resiliência de solos como um parâmetro dependente do estado de tensões. Dessa forma, a magnitude dos valores de módulo de resiliência numa camada estrutural de pavimento vai depender das tensões vertical (σ_v) e horizontal (σ_h), atuantes naquela camada, para, então, se calcular o valor do módulo de resiliência demandado.

Neste caso, a retroanálise com base em ensaios de campo para se avaliar o nível de tensão é uma metodologia empregada. O uso de programas de elementos finitos, tendo-se como parâmetros de entrada o tipo e espessura do revestimento, bem como as tensões atuantes sobre ele podem também indicar as tensões que atingem as camadas inferiores. De qualquer forma, para o caso de solos coesivos, a dependência do módulo de resiliência é preponderantemente da tensão desvio, enquanto que para materiais granulares, a pressão confinante é quem controla o comportamento resiliente.

Conforme Rada e Witczak (1981) e Motta (1991), os valores de módulo de resiliência tendem a crescer com o aumento da densidade do material ou com a energia de compactação, assim como ocorre com os valores de k_1 , ao passo que k_2 permanece praticamente constante, o que foi corroborado pelos resultados obtidos nesta pesquisa, o que permite concluir que os parâmetros para o cálculo do módulo de resiliência obtidos neste trabalho estão compatíveis com a literatura, e estes poderão ser utilizados nas camadas da estrutura do pavimento de acordo com o níveis de tensões previstos para cada uma.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação do rejeito da flotação de minério de ferro ao solo estudado proporcionou aumento da massa específica aparente seca máxima e diminuição da umidade ótima de compactação das misturas nas duas energias empregadas, normal e intermediária. Este comportamento é justificado pela presença de hematita e quartzo presentes na composição mineralógica do resíduo.

As massas específicas aparentes secas máximas e as umidades ótimas das misturas foram semelhantes nas duas energias de compactação estudadas. No entanto, quando as energias

foram comparadas à luz dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia, percebeu-se que as misturas compactadas na energia intermediária apresentaram valores de ISC de até 48% maiores do que os valores obtidos com amostras compactadas sob os efeitos da energia do Proctor normal.

O aumento observado nos valores do ISC de acordo com o aumento da energia de compactação das misturas também foi observado individualmente para cada energia em comparação ao ISC do solo puro. Dessa forma, foi alcançando o valor máximo do ISC igual a 36% para a mistura que incorporou 75% de rejeito, na energia de compactação intermediária, contra um ISC igual a 13% obtido para o solo puro, um aumento superior a 270%. O aumento do percentual de rejeito na matriz de solo provocou uma tendência de queda nos valores da expansão medida durante os ensaios de ISC.

Os valores do parâmetro de qualidade (coeficiente de determinação, R^2) usado para avaliar o modelo resiliente aplicado aos dados dos ensaios triaxiais cíclicos realizados com os materiais desta pesquisa indicaram que o modelo universal, que considera de forma combinada a tensão desvio e a pressão confinante, se apresentou muito adequado ao estudo, uma vez que os valores de R^2 obtidos estão todos acima de 0,90. Portanto, para se obter os valores de módulo de resiliência das camadas previstas para uso nesta pesquisa, em etapas posteriores, basta se estimar os valores das tensões (vertical, σ_v , e horizontal, σ_h) distribuídas em cada camada, usando-se um programa adequado.

Os resultados apresentados e discutidos nesta pesquisa mostram que o rejeito de flotação de minério de ferro apresentou características técnicas para aplicação como material a ser incorporado à camada de reforço de subleito e sub-base em pavimentos rodoviários, para misturas com o solo estudado. No entanto, apesar de os ensaios de caracterização mineralógica e química do material não terem apresentado elementos potencialmente contaminantes ao solo, torna-se necessário a realização de ensaios de lixiviação e solubilização com o propósito de se classificar o rejeito e as misturas estudadas, quanto a sua periculosidade, para que a sua aplicação não possa incorrer em danos ao meio ambiente.

Agradecimentos

À Fapemig – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e à mineradora Vale S.A.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2002). Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures. 17th edition. 740p.
- ABNT (1995) NBR 6502 – *Rochas e Solos*. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) NBR 6457 – *Amostras de solo – Preparação para ensaios de caracterização*. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) NBR 6459 – *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) NBR 7180 – *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) NBR 7181 – *Solo – Análise granulométrica*. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) NBR 7182 – *Solo – Ensaio de compactação*. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- Campanha, A. (2011) *Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em Pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa.
- Dantas, A. A. N. (2015) *Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal.

- DNER (1996) CLA 259/96 - *Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura*. Departamento Nacional De Estradas De Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) ME 054/94 - *Equivalente de areia*. Departamento Nacional De Estradas De Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) ME 093/94 - *Solos – determinação da densidade real*. Departamento Nacional De Estradas De Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) 134/2010 - *Solos – Determinação do módulo de resiliência - Método de Ensaio*. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) 137/2010 - *Pavimentação – Regularização do subleito – Especificação de serviço*. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) 138/2010 - *Pavimentação – Reforço do subleito – Especificação de serviço*. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) 139/2010 - *Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço*. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. Rio de Janeiro.
- DNIT (2013) 164/2013 - *Solo – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio*. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. Rio de Janeiro.
- DNIT (2016) 172/2016 - *Solo – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio*. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. Rio de Janeiro.
- Ferreira, J. G. H. M. (2002) *Elaboração e análise da base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da COPPE/UFRJ*. Dissertação (Mestrado) – PEC, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- IBRAM (2016) *Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração*. Relatório Econômico. Brasília.
- Klinsky, L. M. G. e Fabbri, G. P. F. (2009) Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. *Revista Transportes - volume XVII, número 2*. Rio de Janeiro. ISSN: 1415-7713.
- Macêdo, J. A. G. (1996) *Interpretação de Ensaio Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis*. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Medina, J. e M., L. M. G. (2005) *Mecânica dos Pavimentos*. Editora COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Motta, L. G. M. (1991) *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas*. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- NCHRP. (1997) *Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design*. NCHRP Web Document 14 for Project 1-28. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Queiroz, B. G. (2017) *Avaliação do comportamento de solos estabilizados com cimento e adição de rejeito de flotação de minério de ferro*. 2017. 67 f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itabira.
- Rada, G. and Witczak, M. W. (1981) Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Material. TRR 810, Transportation Research Boarding.
- Rodrigues, K. H. P. (2018) *Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas – Núcleo de Geotecnia. Ouro Preto.
- Sanchez, P. N. I(2015) *Avaliação da Aplicabilidade de Canga de Minério de Ferro na Estabilização de dois Solos para Camadas de Pavimento*. Projeto de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2015.
- Saraiva, S. L. C. (2006) *Metodologia e análise experimental do comportamento geotécnico da estrutura de pavimentos rodoviários*. Dissertação de mestrado: UFOP.

Lorena Lemos Dias Lara (lorenaldlara@yahoo.com.br)

Bianca Groner Queiroz (biancagronerq@gmail.com)

Sérgio Pacífico Soncim (sergiops@unifei.edu.br)

Marconi Oliveira de Almeida (marconi.almeida@unifei.edu.br)

Carlos Augusto de Souza Oliveira (carlosoliveira@unifei.edu.br)

Fernanda Maria Belotti (fernandabelotti@unifei.edu.br)

Rua Irmã Ivone Drumond, 200 – Distrito Industrial II, Itabira – MG

Erinaldo Hilário Cavalcanti (erinaldo@ufs.br)

Rua Cláudio Batista s/n, Cidade Nova, Aracaju – SE

Lais Resende (lais.resende@vale.com)

Vale S. A. – Av. Dr. Marco Paulo Simon Jardim, 3580 – Vila da Serra, Nova Lima - MG