

AValiação DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE UM SOLO LATERÍTICO ESTABILIZADO COM CAL E REJEITO DE FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

Bianca Pereira Grasse

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

Estudos envolvendo a utilização de rejeito de flotação resultante do processo de beneficiamento do minério de ferro, em diferentes nichos de mercado, se mostram cada vez mais necessários diante do grande passivo ambiental causado pela sua disposição em aterros, uma vez que se tratam de resíduos gerados em grandes volumes e que apresentam baixo valor econômico para as empresas mineradoras. O objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho geotécnico de um solo de comportamento laterítico estabilizado quimicamente, empregando-se 2%, 4% e 6% de cal, em massa, com a adição do rejeito de flotação de minério de ferro, visando-se a aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Os resultados revelaram aumento em mais de 100% nos valores de ISC das misturas solo-cal com a adição de rejeito de flotação. Concluiu-se ainda que a adição do resíduo promoveu um aumento expressivo nos valores de resistência à compressão simples das misturas.

ABSTRACT

Studies involving the use of iron ore tailings from the beneficiation process in different market niches are increasingly necessary due to the large environmental liabilities caused by their disposal in dams, since they are waste generated in high volumes and which have low economic value for mining companies. The work objective was to mechanically study the effect of the addition of the iron ore flotation tailing on a soil of chemically stabilized lateritic behavior with 2%, 4% and 6% of lime, for application in base and sub-base layers of road pavements. The results showed an increase in ISC values of the soil-lime mixtures with the addition of iron ore flotation tailing, and the decrease of the expansion. It was concluded that the waste addition caused positive changes in the values of unconfined compression strength of the soil-lime mixtures.

1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro é considerado um componente essencial para as indústrias de base e as atividades provenientes de sua extração constituem um pilar expressivo na economia brasileira, colocando o país como um dos maiores produtores do mundo. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2016), o estado de Minas Gerais responde por 51,6% da produção nacional de minério de ferro, abrigando a maior região mineral do país em uma estrutura geológica denominada Quadrilátero Ferrífero.

Em contrapartida às vantagens econômicas, com a finalidade de concentrar e retirar os minerais de interesse, são necessários processos de beneficiamento que antecedam a comercialização do minério de ferro, a partir dos quais são gerados resíduos de baixo valor econômico, denominados rejeitos. Os rejeitos gerados a partir do processo de beneficiamento por flotação do minério de ferro são comumente dispostos em reservatórios conhecidos como barragens. De forma geral, a construção dessas barragens, por si só, já representa uma medida importante na intenção de minimizar os impactos ambientais. Por outro lado, a necessidade de

áreas cada vez maiores para a formação desses reservatórios caracteriza um passivo ambiental que, por sua vez, qualificam um risco ao meio que os circundam.

A dificuldade de estocagem, associada aos altos custos de monitoramento e manutenção de barragens, são fatores que têm justificado estudos voltados para o emprego deste subproduto como matéria-prima alternativa em outros nichos do mercado. Diversos estudos têm indicado que a construção civil, especialmente se tratando de infraestrutura viária, pode ser uma opção viável para o aproveitamento do rejeito de minério de ferro. Nesse setor, em que são utilizados volumes consideráveis de materiais, o rejeito surge como alternativa para reduzir também, os impactos gerados pela extração de recursos naturais para a construção e o reparo das rodovias.

Uma vez que o material natural nem sempre é ideal para a realização do projeto, são realizadas correções com a finalidade de melhorar seu desempenho. Nesse contexto, a estabilização de solos é o método de modificação de suas propriedades, cuja alteração pode ser feita a partir de processos mecânicos, granulométricos ou químicos, como por exemplo, neste último caso, a partir da incorporação da cal.

Diante deste cenário, o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento geotécnico de um solo estabilizado com cal e rejeito de flotação de minério de ferro, e compará-lo com o comportamento geotécnico do mesmo solo estabilizado apenas com cal. Este 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 de minério de ferro em camadas estruturais de pavimentos asfálticos rodoviários. O estudo contou com etapas de caracterização do solo e do rejeito e do estudo do comportamento geotécnico de misturas solo-cal e solo-cal-rejeito, empregando-se em ambas, teores de cal de 2% a 6%, em massa. A dosagem de rejeito considerada foi igual a 50% da massa total seca de solo e rejeito, calculado por metodologia de substituição do teor de cal. Após a caracterização do solo e do rejeito, foram realizados ensaios de compactação (Proctor) na energia intermediária, Índice de Suporte Califórnia (ISC), Resistência à Compressão Simples e Módulo de Resiliência (MR).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017) a densidade de malha rodoviária pavimentada no Brasil é muito baixa, totalizando apenas 12,3% e conferindo ao país a 111ª posição (entre 138 países) no ranking do Relatório de Competitividade Global 2016-2017. Como oportunidades de melhorias apontadas pela CNT, destacam-se os ensaios de materiais para seleção de melhores insumos e uso de materiais alternativos mais eficientes para a pavimentação. Nesse sentido, o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro em pavimentação asfáltica, surge como alternativa para a promoção da sustentabilidade e consequente diminuição do volume destes materiais nas barragens de rejeito.

Segundo Boscov (2008), a lavra, primeira etapa do processo de extração, consiste na retirada do minério da jazida (decapeamento da mina), responsável por gerar as pilhas de estereis constituídas de material escavado sem valor econômico. O beneficiamento, por sua vez, é o processo responsável por gerar o produto da atividade mineradora, compreendido pelos processos de cominuição, classificação e concentração.

O processo de concentração por flotação é um dos processos mais utilizados para minérios de baixos teores e granulometria fina $< 150 \mu\text{m}$ (Schneider *et al.*, 2016). Nessa técnica o material em suspensão na polpa processada tem sua hidrofobicidade alterada pela adição de reagentes químicos. No caso dos minérios itabiríticos, formados predominantemente por hematita e quartzo, dois minerais naturalmente hidrofílicos, utiliza-se a flotação catiônica reversa de silicatos para a separação desses minerais, por se tratar da rota menos dispendiosa devido à alta densidade da hematita se comparada à do quartzo (Queiroz, 2017). De acordo com Amaral *et al* (2019), os tipos de rejeito variam conforme o método de concentração empregado e as características da jazida mineral lavrada. Ao final do processo de concentração por flotação são gerados dois tipos de rejeito, o rejeito de flotação (rejeito arenoso) e a lama ou rejeito ultrafino.

Saraiva (2006), por exemplo, estudou a utilização desses resíduos de mineração de ferro como materiais de camada de base, misturados a solos argilosos e com a incorporação de geossintéticos. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica da utilização do rejeito de minério de ferro na composição de misturas para pavimentos, especialmente em relação a elevação de valores de ISC. A composição estudada pelo autor com 50% argila e 40% jigüe apresentou ISC de 24,7%, enquanto a incorporação de rejeito em substituição de 25% da argila provocou aumento desse valor para 33,8%.

Campanha (2011) analisou as características químicas, mineralógicas e geotécnicas dos rejeitos de minério de ferro da região do quadrilátero ferrífero. Os resultados da sua pesquisa indicaram que há viabilidade técnica da aplicação de rejeitos de minério de ferro em obras de construção rodoviária, observando a compatibilidade para emprego em camadas de base e sub-base, principalmente quando melhorados com cimento, tanto quanto à granulometria quanto aos valores de ISC e Expansão.

A estabilização de solos, afirmam Brito e Paranhos (2017), tem sido considerada a principal rota de pesquisas no segmento de geotecnia e engenharia civil, de forma a buscar saídas eficientes e econômicas para o emprego de solos que não oferecem características suficientes para o bom desempenho à finalidade a que se destinam. Azevedo (2010), explica que a estabilização química de solos com cal é feita quando a necessidade é estrutural e se tem um ganho significativo de resistência com o emprego do aditivo, a exemplo do uso em bases de pavimento ou revestimento de taludes.

A porcentagem de cal a ser incorporada ao solo deve ser determinada em relação à massa de solo seco, e a mistura deve ser dosada de acordo com os critérios pré-definidos no projeto. Na literatura, são encontradas considerações a respeito das dosagens para a estabilização de solos coma a cal. Bernucci *et al.* (2010) menciona teores de 4% a 10% em massa, enquanto Vargas (1977) indica que essa porcentagem se encontra entre 2% a 5% para solos granulares e para solos plásticos, entre 5% a 10%. No campo da pavimentação, entretanto, o Manual do DNIT (2006) sugere que o teor de cal mais frequente nas misturas solo-cal é de 5% a 6%. Em contrapartida, Baptista (1976), diz que para estabilização de subleitos, bases e sub-bases, em geral, esse teor varia na ordem de 2% a 4%.

Bastos (2013) verificou a aplicabilidade do rejeito de minério de ferro estabilizado granulométrica e quimicamente buscando materiais alternativos que pudessem contribuir em obras de infraestrutura de pavimentação. Para a estabilização química do rejeito foram

utilizados como estabilizantes o cimento, a cal e a escória de aciaria, no qual a mistura rejeito-cal foi testada nos teores de 1%, 2%, 5% e 10%. Os resultados alcançados mostraram que incrementos na quantidade da cal produziram aumento nos valores de ISC. Para a dosagem de 2% de cal, verificam-se aumentos da ordem de 25% nos valores do ISC, enquanto que para os percentuais de 5% e 10% de cal, o ISC aumentou para 30% e 50%, respectivamente, comparadas à dosagem com 1% do aglomerante.

Silva (2016) estudou o comportamento de dois solos estabilizados quimicamente com cal do tipo CH-III, sendo um solo laterítico (LG') e outro não laterítico (NG'). Para o solo LG', o qual foi testado o teor de cal de 4%, observou-se valores de resistência à compressão na condição saturada iguais a 103 kPa e 135 kPa para as idades de rompimento de 7 e 28 dias, respectivamente, enquanto o valor encontrado para o solo puro foi nulo, devido à desintegração do material em condição submersa. O autor também observou que a parcela mais significativa do ganho de resistência devido à adição da cal aconteceu aos 7 dias de cura, ao passo que após os 28 dias, há uma tendência de estabilização nesse ganho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta pesquisa consistiu em quatro etapas: i) a primeira referente à amostragem e preparação dos materiais; ii) em seguida, foi realizada a caracterização física do solo e do rejeito; iii) determinação das dosagens de estudo, referente ao solo, rejeito e cal, para a confecção dos corpos de prova e; iv) por último, a realização dos ensaios mecânicos.

3.1. Materiais

Os materiais utilizados neste estudo são o solo e a cal, por sua vez caracterizada como estabilizante químico. Como material alternativo destaca-se o rejeito de flotação, oriundo do processo de beneficiamento de minério de ferro.

3.1.1. Solo

A amostra de solo utilizada nesta pesquisa foi coletada em uma jazida denominada "Borrachudos", às margens da Rua Humberto Campos, próximo ao acesso à MG -120 pelo bairro João XXIII, no município de Itabira/MG e está localizada dentro da área operacional da Mina da Conceição, sob o domínio da Vale S.A. De acordo com a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), estabelecida pela norma rodoviária DNER-CLA 259/96, o solo foi classificado como 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

Como subproduto industrial, neste programa experimental foram trabalhadas amostras de rejeito oriundas do processo de beneficiamento por flotação do minério de ferro. As amostras foram fornecidas pela Mineradora Vale S.A. e coletadas na mina do Cauê no município de Itabira, em Minas Gerais.

3.1.3 Cal hidratada

Foi utilizada a cal hidratada CH I- tipo cálcica, por ser um produto indicado para o preparo de argamassas, bem como na estabilização química de solos.

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização geotécnica, compactação, ISC e resistência à compressão simples

Os ensaios realizados para a caracterização geotécnica do solo estão apresentados no Quadro 1. Para o rejeito, por ser tratar de um material de granulometria semelhante às areias finas, as metodologias adotadas para sua caracterização foram as mesmas adotadas para o solo. Vale ressaltar que, para ambos os materiais, foram realizados procedimentos de preparo e amostragem de acordo com a NBR 6457/16 que precederam os ensaios de caracterização geotécnica.

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

Ensaio	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

Além dos ensaios com solo e com rejeito, foram realizados ensaios com as misturas solo-cal e solo-cal-rejeito, ambas empregando os teores de 2%, 4% e 6% de cal. Os traços estão apresentados na Tabela 1, ressaltando que todas as porcentagens foram adotadas em massa. Neste caso, a avaliação do comportamento geotécnico das misturas foi feito com base nos ensaios de compactação Proctor, na energia intermediária, conforme as diretrizes da NBR 7182/16, Índice de Suporte Califórnia (ISC), seguindo-se o estabelecido na Norma DNIT 172/2016, e, por fim, o ensaio de determinação da resistência à compressão simples preconizado pelo DNER-ME 180/94 (neste caso, a NBR 5739/18 é citada como norma complementar).

Tabela 1: Traços das misturas ensaiadas com e sem adição de rejeito

Traço	Solo (%)	Cal (%)	Rejeito (%)
S98.C2	98	2	0
S96.C4	96	4	0
S94.C6	94	6	0
S49.C2.R49	49	2	49
S48.C4.R48	48	4	48
S47.C6.R47	47	6	47

3.2.2. Ensaios de carregamento repetido – Módulo de Resiliência

Nessa fase de pesquisa, o comportamento geotécnico das misturas solo-cal e das misturas com rejeito na sua composição 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. Os parâmetros obtidos são resultantes 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, conforme as recomendações da norma DNIT 134/2018-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 [MPa];

σ_3 : tensão confinante [MPa];

σ_d : tensão desviadora [MPa];

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, 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 na energia 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 a massa específica aparente seca máxima obtida fosse correspondente ao grau de compactação igual a 100%, com tolerância de $\pm 2\%$. Os ensaios foram realizados aos sete dias de cura para um corpo de prova por tipo de dosagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização geotécnica

Os gráficos das Figuras 1 apresentam as curvas granulométricas do rejeito de flotação de minério de ferro (a) e do solo argiloso de comportamento laterítico LG' (b), respectivamente. A Tabela 2 mostra as porcentagens equivalentes a cada fração granulométrica presente nos materiais estudados, de acordo com a escala de grãos estabelecida pela NBR 6502 (1995).

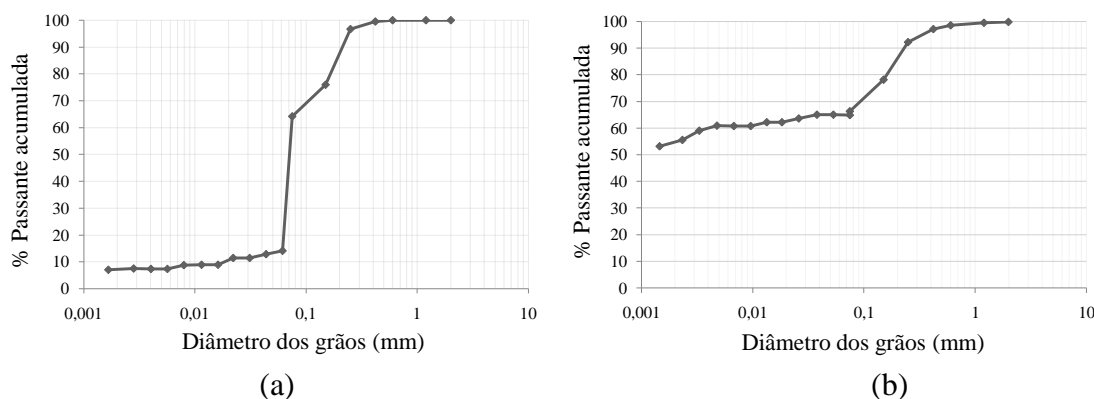


Figura 1:(a) Curva granulométrica do rejeito de flotação de minério de ferro; (b) curva granulométrica do solo argiloso de comportamento laterítico LG'

Tabela 2: 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

Da Figura 1a, observa-se que o rejeito possui consideráveis porções finas em sua composição, apresentando aproximadamente 40% de seus grãos passante na peneira de n°. 200 (abertura de 0,074 mm), e 100% passante na peneira n°. 40 (abertura de 0,42 mm). O rejeito de flotação indica uma graduação quase uniforme, apresentando a maioria de suas partículas com tamanhos semelhantes, caracterizando uma curva granulométrica bem íngreme, que se assemelha às areias finas e siltes. A curva granulométrica do solo (Figura 1b) revela que o material possui cerca de 65% de seus grãos passante na peneira de n°. 200, ao passo que 97% passa na peneira n°. 40, apresentando, de forma análoga a do rejeito, elevado teor de finos. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos dos demais ensaios de caracterização geotécnica, especificamente a densidade real, os limites de consistência e o equivalente de areia.

Tabela 3: Valores de densidade real, limites de consistência e equivalente de areia dos materiais empregados nesta pesquisa.

	Densidade real (g/cm ³)	Limites de consistência (%)			Equivalente de areia (%)
		LL	LP	IP	
Solo	2,57	44	30	14	0
Rejeito	2,98	NL	NP	NP	59

De acordo com os dados da Tabela 3, observa-se que o rejeito de flotação de minério de ferro possui densidade real elevada quando comparada à do solo. Esse resultado pode ser justificado em função dos teores de minério de ferro residuais e pelo elevado teor de quartzo nas amostras de rejeito, que faz sua densidade aumentar. Quanto aos ensaios de limites de *Atterberg*, o rejeito se revelou como um material não líquido (NL) e não plástico (NP), exibindo a falta de coesão por ser tratar de um material granulometricamente semelhante a uma areia. Para o solo, entretanto, foram obtidos valores de LL = 44% e LP = 30%, resultando num IP = 14%, o que o caracteriza como um material de plasticidade média, já esperado para um solo de caráter argiloso, o que inviabilizaria o uso do solo em camadas de pavimentos à luz das especificações tradicionais (IP > 6%)

No ensaio de equivalente de areia, o valor obtido para o rejeito de flotação de minério de ferro foi igual a 59%, resultado esse que confirma sua característica arenosa conforme mencionada por Campanha (2011), que relatou a tendência dos rejeitos de apresentarem propriedades de areias finas e médias siltosas (cerca de 60 a 70% de areia). Para o solo, o valor obtido foi de 0%, atestando os ensaios de limites de *Atterberg*.

4.2. Compactação

Os gráficos da Figura 2 (a) e (b), respectivamente, mostram os resultados para a massa específica seca máxima e valores de umidade ótima das misturas com e sem adição de rejeito, obtidos a partir das curvas de compactação para energia intermediária.

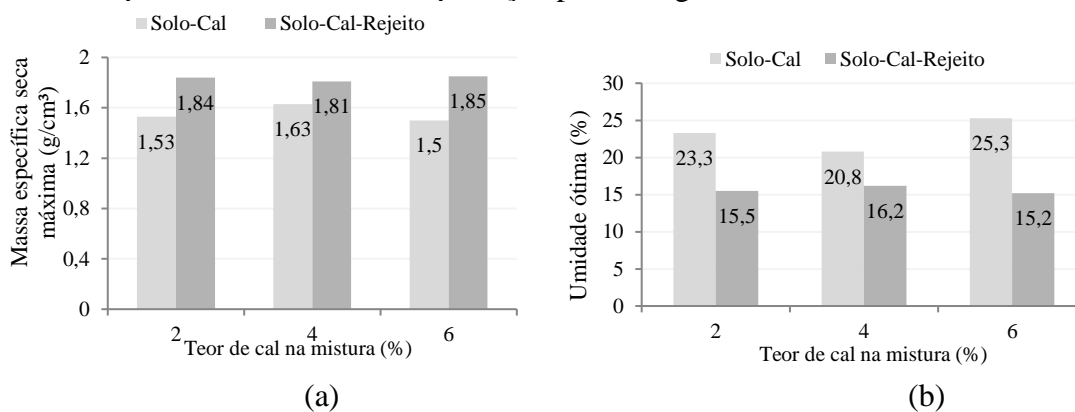


Figura 2:(a) Umidade ótima; (b) Massa específica aparente seca máxima

Da Figura 2 é possível notar que a adição de rejeito às misturas solo-cal provocou um aumento médio de 18,21% na massa específica aparentes seca máxima das misturas, e uma redução significativa de aproximadamente 32%, em média, no teor de umidade ótima de compactação, o que já se poderia esperar, visto que foram incorporados materiais não-coesivos à mistura. O aumento na massa específica ocorrido com a mistura se deve ao fato do rejeito ser um material de maior densidade que o solo estudado. Da mesma forma, a elevação no teor de cal na composição das misturas de 2% para 4% causou efeito semelhante à adição

de rejeito, com aumento da massa específica aparente seca máxima e diminuição do teor de umidade ótimo. Já, para o teor de cal igual a 6%, o comportamento observado foi inverso, mostrando aumento no teor de umidade ótima, para a mistura solo-cal.

4.3. Índice de Suporte Califórnia

A Figura 3 mostra os efeitos do rejeito no ISC das misturas solo-cal. Conforme se pode observar, a incorporação do rejeito às misturas solo-cal impactou positivamente nos valores de Índice de Suporte Califórnia. O valor do ISC obtido para a mistura com teor de cal igual a 6% aumentou 2,2 vezes ao se adicionar o rejeito à mistura. De modo geral, a adição de rejeito resultou em um aumento médio nos valores ISC da ordem de 115,73%.

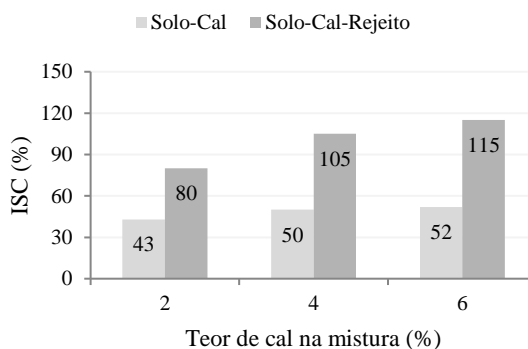


Figura 3: Índice de Suporte Califórnia

Segundo as especificações do DNIT (2006), para utilização em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários, além dos requisitos de baixa plasticidade, o material deve apresentar valores de ISC iguais ou superiores à 30% e 60%, respectivamente, ou seja, houve adequabilidade das misturas com a adição do resíduo para ambos os casos, enquanto que as misturas sem adição de rejeito não se qualificam para aplicação em camadas de base.

4.4. Resistência à Compressão Simples (RCS)

As Figuras 4 (a), (b) e (c) mostram os resultados dos ensaios de compressão simples, e subsidiam uma análise comparativa entre as misturas, tomando-se por base os valores da resistência à compressão simples na condição saturada, obtidos para as misturas sem e com adição de rejeito, agrupadas de acordo com o tempo de cura. Na Figura 4(d), observam-se os resultados das misturas com adição do resíduo e o efeito do aumento do teor de cal na mistura para cada tempo de cura.

Observando-se os gráficos da Figura 4, constata-se que, de modo geral, tanto a cal quanto o rejeito exercem função importante na resistência à compressão simples das amostras. A incorporação de rejeito à mistura solo-cal resultou num aumento de 2,1 vezes no valor de resistência alcançada (Figura 4c) para o tempo de cura de 14 dias, enquanto que no pior dos casos, o aumento ainda foi da ordem de 1,19 vezes (Figura 4a) para o tempo de cura de 28 dias. Quanto à influência da cal, um incremento de apenas 2% na mistura acarretou um aumento de até 1,86 vezes (Figura 4d) para o tempo de cura de 28 dias com 4% de cal, o que corresponde a um acréscimo médio de resistência igual a 0,55 MPa.

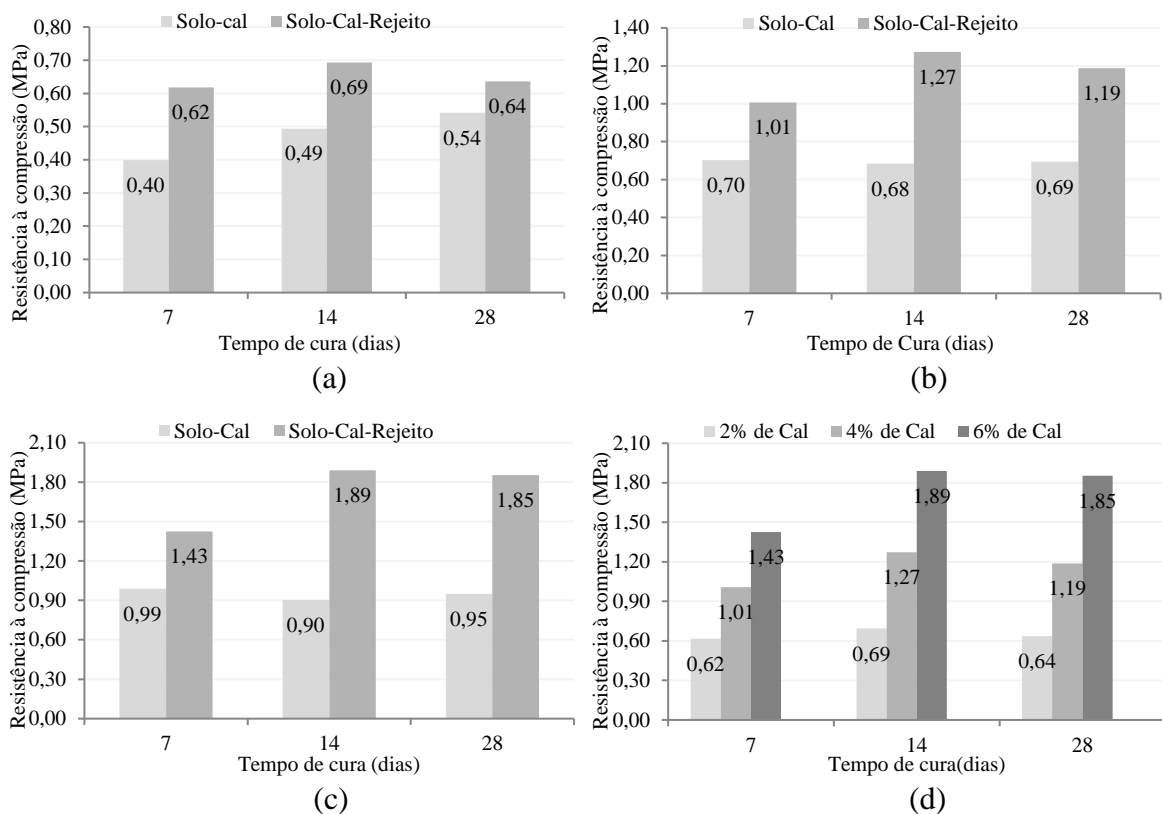


Figura 4: Resistência à compressão simples das misturas: (a) com 2% de cal, (b) com 4% de cal, (c) com 6% de cal; (d) com adição de rejeito em função do aumento do teor de cal.

4.6. Módulo de resiliência

A Tabela 4 apresenta os parâmetros dos ensaios de MR obtidos para as misturas de solo-cal e solo-cal-rejeito, usando-se a mesma energia de compactação empregada nos demais ensaios, a do Proctor Intermediário. 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 a partir do modelo aplicado.

Tabela 4: Parâmetros dos modelos obtidos do ensaio triaxial cíclico

Material	k_1	k_2	k_3	R^2
S49.C2.R49	5612,99	-0,0224	-0,5166	0,95
S48.C4.R48	4147,36	0,1556	-0,5507	0,97
S47.C6.R47	3572,89	0,1895	-0,5207	0,98
S98.C2	19012,72	-0,1932	-0,5747	0,96
S96.C4	7584,55	0,0641	-0,6996	0,96
S94.C6	10792,77	-0,1334	-0,5739	0,96

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, podem ser observados na Tabela 4 os excelentes ajustes obtidos, onde o menor valor de R^2 obtido foi 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 plenamente adequado ao estudo do comportamento resiliente dos materiais empregados nesta pesquisa, pelo fato dos valores de R^2 estarem todos acima de 0,90. A Figura 5 apresenta a variação dos resultados do módulo em MPa para o solo e para as misturas estudadas, em função dos pares de tensões aplicados no ensaio.

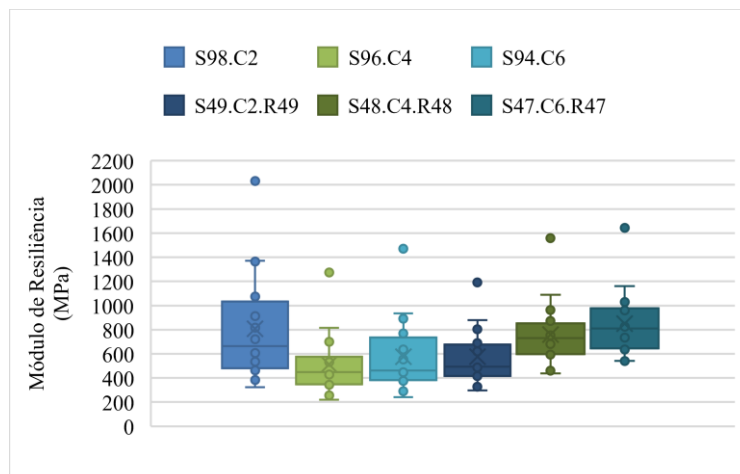


Figura 5: Variação nos resultados de módulo de resiliência para os pares de tensões do ensaio.

Analisando-se os gráficos da Figura 5 pode-se observar que os valores do módulo de resiliência, para os valores de pares de tensões ensaiados, variaram em função da adição da cal e do rejeito. Quando se analisa o efeito da adição da cal ao solo sem adição de rejeito, nota-se que não se obteve uma tendência de comportamento dos resultados de MR. No entanto, ao se analisar o comportamento da mistura solo-cal com adição do rejeito, pode-se perceber que o rejeito proporcionou uma tendência de aumento no MR, à medida que a cal foi adicionada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse trabalho foi analisar o comportamento geotécnico de um solo estabilizado com cal e rejeito de flotação de minério de ferro, e compará-lo com o comportamento geotécnico do mesmo solo estabilizado com cal, para aplicação como material a ser incorporado às camadas estruturantes de base e sub-base de pavimentos rodoviários. O rejeito atuou como estabilizante granulométrico na mistura, enquanto a cal trabalhou como estabilizante químico.

A incorporação do rejeito de flotação de minério de ferro à mistura solo-cal proporcionou aumento médio na massa específica aparente seca máxima em 18,21% e reduções significativas da umidade ótima de compactação sob energia intermediária, para todos os teores de cal ensaiados, reduzindo o teor de umidade ótimo 32%, em média. Este comportamento é justificado pela presença de hematita e quartzo presentes na composição mineralógica do resíduo, o material com maior densidade.

No que se refere ao ISC, as misturas solo-cal se mostraram eficientes para aplicação em camadas de sub-base de pavimentos rodoviários, e a adição do rejeito na mistura promoveu o aumento dos valores, em média, em 105%, o que habilita as misturas para aplicação como material de base de pavimentos. Para o teor de 2% de cal, o valor ISC obtido da mistura com adição do rejeito foi 80%, enquanto para os teores de 4% e 6% os valores aumentaram para 105% e 115%, respectivamente. Portanto, as misturas solo-cal-rejeito apresentaram desempenho muito satisfatório, com valores de ISC para todas as misturas superando ao mínimo exigido no Manual de Pavimentação do DNIT, que estipula valor mínimo de CBR igual a 60% para camadas de base de pavimentos rodoviários estabilizados com cal.

Assim como aconteceu com os ensaios de ISC, os ensaios de resistência à compressão simples também indicaram um bom desempenho do material ao se incorporar o rejeito à mistura solo-cal. Da mesma forma, incrementos no teor de cal provocaram melhorias consideráveis nos valores observados. A maior resistência alcançada para as misturas com adição do rejeito se deu aos 14 dias de cura, com o teor de cal igual a 6%, cujo valor de RCS obtido foi igual a 1,89 MPa, enquanto que para a mistura solo-cal sem adição do rejeito, o valor máximo encontrado era quase a metade, ou seja, 0,99 MPa. De forma comparativa, a incorporação do rejeito às misturas solo-cal chegou a causar um acréscimo de resistência igual a 2,1 vezes. Quanto à influência da cal, um incremento de 2% na mistura solo-cal acarretou um acréscimo médio de resistência igual a 0,55 MPa.

Com relação ao Módulo de Resiliência, analisando-se o efeito da adição da cal ao solo sem rejeito, nota-se que não se obteve uma tendência de comportamento dos resultados de MR, enquanto que, ao se adicionar o rejeito à mistura, uma tendência de aumento no MR foi observada, a medida que a cal foi adicionada. Além disso, o 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 plenamente 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 distribuídas em cada camada, usando-se um programa adequado.

Portanto, a análise do comportamento mecânico das misturas usadas nesta pesquisa indicou que o rejeito de flotação de minério de ferro apresenta potencial para ser aplicado como material em misturas de solo-cal para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. Como houve redução no teor de umidade ótimo, um ganho secundário é a redução no consumo de água durante o processo de compactação em campo. Além disso, a inserção do rejeito como material alternativo constituinte das camadas de base e sub-base contribui para a redução do rejeito como passivo ambiental. Entretanto, para que sua aplicação não implique em danos ao meio ambiente, se faz necessária a realização de ensaios de lixiviação e solubilização, a fim de se avaliar se existe potencial risco de contaminação ao meio ambiente por parte do material inserido nas misturas.

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.

- Amaral, R.; Resende, L.; Malheiros, C. (2019). *Strategy and Innovations for Reuse of Iron Ore Tailings*, Minexcellence Congress, Chile.
- Azevêdo, A. L. C. de. (2010) *Estabilização de solos com adição de cal: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Baptista, C. N. (2013) *Pavimentação: Compactação dos Solos no Campo, Camadas de base, Estabilização de Solos*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Bastos, L. A. de C. (2013) *Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Bernucci, L. B; Motta, L. M. G. da; Ceratti, J. A. P; Soares, J. B. (2006) *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. Petrobras: Abeda.
- Boscov, M. E. G. (2008) *Resíduos sólidos: rejeitos de mineração, lodos de ETA, resíduos da construção civil*. In: _____. Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos.
- Brito, L. C; Paranhos, H. da S. (2017) *Estabilização de Solos*. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438. ISSN:2448-0959.
- Campanha, A. (2011) *Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em Pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa.
- CNT (2017). *Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial*. CNT: SEST: SENAT.
- 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 180/94 - *Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada - determinação da resistência à compressão simples - Método de ensaio*. 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 (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.
- Lovato, R.S. (2004) *Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação*. Dissertação de mestrado: UFRGS.
- 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.
- Saraiva, S. L. C. (2006) *Metodologia e análise experimental do comportamento geotécnico da estrutura de pavimentos rodoviários*. Dissertação de mestrado: UFOP.
- Schneider, C. L.; Matiolo E.; Neumann R.; Gomes O. F. M. (2016) *Beneficiamento de minérios*. In: MELFI, Adolpho José et al (Org.). *Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. p. 257-262.
- Silva, M. F. da. (2016) *Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico*. Dissertação de mestrado: USP.
- Vargas, M. (1977) *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, Ed. Da Universidade de São Paulo. 509p.

Bianca Pereira Grasse (biancaperg@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