UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS

Thomas Schatzmayr Welp Sá[1]; Romildo Dias Toledo Filho[2]; Sandra Oda[3]; Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar[4]

(1) COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: thomas.sws@poli.ufrj.br; (2) COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: toledo@coc.ufrj.br; (3) POLI - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: sandraoda@poli.ufrj.br; (4) FAU - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: vivian@coc.ufrj.br

RESUMO

Os rompimentos das barragens de Mariana, em 2015, e de Brumadinho, em 2019, colocou em questionamento o método de disposição dos rejeitos de mineração por barragens. O reuso e a reciclagem dos rejeitos são alternativas que podem reduzir os impactos ambientais relacionados à sua destinação, promovendo o desenvolvimento sustentável. As obras de pavimentação requerem um elevado consumo de materiais em suas camadas estruturais. A incorporação de rejeitos de mineração em camadas dos pavimento – como na base, sub-base e reforço de subleito –, tem o potencial de reduzir o consumo de recursos naturais, promover um novo destino aos rejeitos de mineração, e, possivelmente, de reduzir os custos relacionados às obras de pavimentação. Para um bom desempenho dos pavimentos, é necessário avaliar o comportamento dessas misturas em cada camada, verificando se atendem aos requisitos estabelecidos pela especificação técnica vigente. Este trabalho tem como objetivo avaliar misturas de solo-cimento com diferentes proporções de solo e rejeitos de minérios de ferro. Os resultados dos ensaios mostram que as misturas de solo-cimento com rejeito podem ser uma excelente alternativa como material para pavimentação.

Palavras-chave: rejeitos de minério de ferro; reciclagem de rejeitos; solo-cimento; obras de pavimentação.

UTILIZATION OF IRON ORE TAILINGS IN STRUCTURAL LAYERS OF PAVEMENTS

ABSTRACT

Mariana's dam collapse, in 2015, and Brumadinho's, in 2019, puts the dam disposal method in a questionable position. The reuse and recycle of mining tailings are alternatives that could reduce the environmental impact related to its destination, and, also, to promote a sustainable development. Pavements constructions requires a high amount of materials on its structural layers. The incorporation of mining tailings in pavement layers, such as base, subbase and subgrade, have the potential to reduce the natural resources consumption, to promote a new destination to the mining tailings, and, possibly, to reduce the costs related to pavement construction. For a good pavement performance, each layer must attend the requirements established by the technical specification, and, therefore, it is necessary to evaluate the behavior of these mixtures, verifying if those requirements are attended. This article aims to evaluate soil cement mixtures with different proportions of soil and iron ore tailings. The results show that soil cement mixtures with iron ore tailings can be an excellent alternative as a pavement material.

Key-words: iron ore tailings, mining tailings recycle, soil cement, pavement construction.

1. INTRODUÇÃO

A atividade de extração mineral no Brasil tem grande importância social e econômica para o país. Segundo o IPEA, em 2010, essa atividade era responsável por 4,2% do PIB e por 20% das exportações brasileiras(1). Em 2015, foram produzidas aproximadamente 400 milhões de toneladas de minério de ferro(2).

Acompanhado da grande extração de minérios está a produção de resíduos de mineração, que no ano de 2005 atingiu o valor de 290 milhões de toneladas de rejeitos gerados. Constatou-se o ferro como o minério que mais contribuiu para essa quantidade de rejeito, com 35,08%(1). Estima-se ainda que, no ano de 2030, a geração de rejeitos será de mais de 680 milhões de toneladas(1).

Em função da quantidade produzida anualmente fica evidente a necessidade de buscar por novos destinos para os rejeitos de mineração. Uma possibilidade está relacionada ao reaproveitamento desse material em obras de pavimentação.

As obras de pavimentação requerem um elevado consumo de materiais naturais, principalmente solos e materiais granulares e, consequentemente, de recursos financeiros. Utilizados em camadas de base, sub-base e/ou reforço de subleito, os rejeitos de mineração têm o potencial de reduzir o consumo de recursos naturais, promovendo o desenvolvimento sustentável. Além disso, a destinação dos rejeitos de mineração como material de construção reduz a disposição desse material em barragens, diminuindo os impactos ambientais gerados pela atividade, aumentando a segurança tanto para a população, quanto para as empresas mineradoras.

Segundo a Confederação Nacional dos Transportes, o Brasil é um país rodoviarista, pois mais de 61% das cargas e 95% dos passageiros são transportados pelo modo rodoviário. Em 2017, a extensão da malha rodoviária brasileira era de 1.735.621 km, dos quais apenas 12,3% (212.886 km) estavam pavimentadas. Isso implica numa densidade da malha rodoviária pavimentada total muito pequena, de 25,0 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km² de área. Comparativamente, os EUA e a China, possuem 437,8 km e 421,6 km de rodovias pavimentadas para cada 1000 km²(3).

Não obstante, os pavimentos brasileiros se encontram em um péssimo estado de conservação e utilização. A maior parte (77%) da malha viária foi pavimentada nas décadas de 1970 (37,2%), 1980 (28,1%) e 1990 (11,7%), sendo que a maioria (96,4%) é composta por revestimento asfáltico na sua camada superficial (pavimentos flexíveis), e apenas 3,6% (7.650 km) da extensão total da malha viária pavimentada é constituída por pavimentos rígidos, construídos nas últimas décadas(3).

Geralmente, o pavimento flexível é projetado para atender o tráfego durante uma vida útil de 10 anos, enquanto no projeto do pavimento rígido a vida útil considerada varia de 20 a 30 anos. Em função disso, todos os pavimentos que foram construídos nas décadas de 1970 a 2000 já deveriam ter sido reconstruídos – ou, pelo menos, reforçados –, mas nem todas as estruturas receberam os cuidados necessários. Isso se reflete na baixa qualidade dos pavimentos e, consequentemente, nos valores gastos anualmente com serviços de manutenção, que consomem mais da metade dos investimentos disponibilizados para o setor de infraestrutura rodoviária.

A incorporação de rejeitos de minério de ferro, nas camadas dos pavimentos pode também auxiliar no cenário descrito anteriormente, através da redução da utilização dos recursos naturais, e, possivelmente, da redução do custo de construção dos pavimentos.

Essa pesquisa tem como objetivo avaliar a incorporação de rejeitos de mineração da dragagem da UH Risoleta Neves em misturas estabilizadas de solo-cimento para camadas de base, sub-base e/ou reforço de subleito. Dessa maneira, busca-se reduzir o consumo de recursos naturais para as obras de pavimentação. O objetivo da pesquisa é estudar o comportamento de misturas de solo-cimento com adições de diferentes percentuais de rejeitos (sedimentos de dragagem), e verificar, através de ensaio mecânico, se as misturas atendem ao limite mínimo de resistência à compressão estipulado por norma para serem empregadas nas camadas dos pavimentos.

2. REJEITOS DE MINERAÇÃO

Na atividade de mineração, a quantidade de resíduos gerada varia de acordo com o processo utilizado para extração do minério, da concentração da substância mineral estocada na rocha matriz e da localização da jazida em relação à superfície[1]. Vale destacar que, na geração de resíduos de mineração, existem os resíduos sólidos de extração (estéreis) e os resíduos gerados do processo de tratamento/beneficiamento (rejeitos)[2]. Os estéreis são produzidos a partir das atividades de escavação (lavra) e compõem, aproximadamente, 75% dos resíduos de mineração. Eles não possuem valor econômico e são dispostos, geralmente, em pilhas. Os rejeitos são resíduos resultantes do processo de beneficiamento do minério e compõem, aproximadamente, 25% dos resíduos de mineração[1]. O transporte e deposição dos rejeitos é mais complexo por envolver uma grande quantidade de água. O método de disposição mais comumente usado é a partir de reservatórios criados por diques de contenção ou barragens[2].

Os rejeitos podem ser classificados quanto a sua granulometria. Os rejeitos de granulometria fina são denominados lama, e rejeitos de granulometria grossa (acima de 0,075 mm) são denominados rejeitos granulares[2].

Dentre os rejeitos de mineração, o rejeito relacionado ao minério de ferro encontra-se com a pesquisa em estágio mais avançado. Tal fato está relacionado com a grande participação desse mineral na economia brasileira e com a elevada quantidade extraída anualmente. Em 2007, o valor da produção de minério de ferro atingiu 19,2 bilhões de reais, representando 50% do valor da produção mineral brasileira. Em 2005, o minério de ferro era responsável por cerca de 32,95% dos rejeitos de mineração gerados no Brasil, com a expectativa de ultrapassar os 40% nos anos seguintes[2].

A utilização de rejeito de minério de ferro em pavimentos pode ser realizada de diferentes formas[4][5][6]:

- Misturas de solo e rejeito;
- Misturas estabilizadas quimicamente (rejeito + cimento ou rejeito + cal);
- Misturas estabilizadas granulometricamente (agregados + rejeito);
- Concreto (concreto + rejeito);
- Piso intertravado (blocos de rejeito + cimento);
- Misturas Asfálticas (rejeito + asfalto).

No Brasil, as diversas pesquisas realizadas empregando o rejeito de minério de ferro em materiais para pavimentação têm apresentado resultados promissores. No entanto, as misturas realizadas geralmente são compostas por dois materiais como rejeito e solo ou rejeito e cimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais empregados na pesquisa são: solo, cimento e rejeito de minério de ferro.

O solo utilizado é proveniente da jazida de Begot, localizada no município de Marituba, no estado do Pará[7]. O solo pertence a camada compreendida entre as profundidades de 1,00 m e 1,50 m.

O cimento utilizado pertence à classe CP-II, da marca Votorantim.

O rejeito de minério de ferro foi obtido da dragagem da UHE Risoleta Neves. A Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (conhecida por Candonga), instalada no rio Doce, no limite entre os municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, no estado de Minas Gerais, foi a segunda hidrelétrica a ser

atingida pela inundação de lama de rejeitos de minério da mineradora Samarco Mineração S.A. um dia após o rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana, em 2015. A barragem funcionou como um bloqueio da lama que seguiu um percurso de 77 km desde a barragem de Fundão. O reservatório tornou-se drasticamente tomado pela lama, com um acúmulo de rejeitos de minério de, pelo menos, 10 milhões de metros cúbicos de material sólido na barragem. Após determinação do IBAMA para realização da retirada do material acumulado, a mineradora tem feito a dragagem da lama acumulada (sedimento) do reservatório para mitigar os danos ambientais causados na região do reservatório e para evitar um possível rompimento desta barragem[8].

O rejeito foi submetido a um processo de preparo antes de sua aplicação nas misturas de solo-cimento. Todo o material recebido para a pesquisa (m = 150 kg) foi despejado em linha reta sobre uma lona plástica, de um sentido ao outro, entre as extremidades da lona até a colocação de todo o lote formando uma pilha (Figura 1a). As duas extremidades da pilha foram separadas (Figura 1b), inseridas em baldes e despejadas acima da pilha formada, por todo o seu comprimento. Durante o procedimento de homogeneização do material, descrito anteriormente, também foram realizadas as retiradas de impurezas (Figura 1c), tais como, raízes e plásticos, e de rochas de grandes dimensões (Figura 1d), que foram descartadas. Por fim, o material homogeneizado foi inserido em sacos plásticos, que foram vedados. A Figura 1 ilustra as etapas de preparo do rejeito.

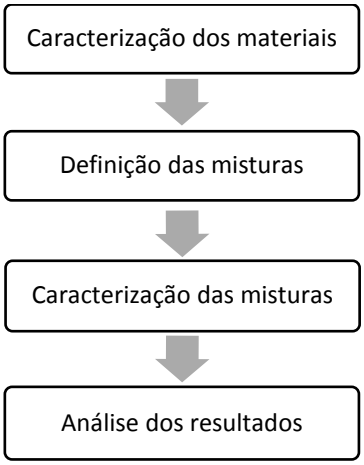
Figura 1: Preparo do rejeito: (a) Material empilhado; (b) Corte das frações nas extremidades; (c) Parte das impurezas retiradas; (d) Parte das rochas grandes retiradas.



(a) (b) (c) (d)

Para avaliar o comportamento das misturas de solo-cimento com o sedimento de dragagem foi elaborado um planejamento experimental, composto por 4 etapas, que são apresentadas no fluxograma da Figura 2.

Figura 2: Planejamento experimental.



3.1. Caracterização dos Materiais

A primeira etapa consistiu da caracterização dos materiais através dos seguintes ensaios: granulometria, massa específica e composição química.

Os resultados da caracterização do solo são apresentados na Tabela 1[7], onde pode-se verificar que os valores de IP e LL estão acima dos limites da especificação (IP ≤ 6% e LL ≤ 25%) para emprego como material para camada de pavimento, não sendo recomendado o uso do material puro. Além disso, apesar de apresentar valor de CBR alto (42,80%), também não atende ao limite mínimo exigido para camada de base (CBR ≥ 60%).

Tabela 1: Resultados de caracterização do solo.

Parâmetro	Valor	Norma
Massa Específica Aparente Seca (g/cm³)	2,01	DNIT 172/2016-ME[9]
Umidade Ótima (%)	9,80	DNIT 172/2016-ME[9]
CBR (%)	42,80	DNIT 172/2016-ME[9]
Expansão (%)	0,28	DNIT 172/2016-ME[9]
Índice de plasticidade, IP (%)	13,3	DNER-ME 082/1994[10]
Limite de liquidez, LP (%)	25,3	DNER-ME 122/1994[11]
Classificação MCT	LA'	DNER-CLA 259/1996[12]
Classificação HRB	A-2-6	[13]

O rejeito e o solo tiveram suas composições granulométricas determinadas de acordo com as prescrições da norma NBR 7181[14]. Os ensaios do rejeito foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos, da POLI/UFRJ, através de peneiramento mecânico. As informações sobre o ensaio do solo são detalhadas em SOUSA (2017)[7]. Para as análises granulométricas do rejeito foi

necessária a secagem de aproximadamente 3 kg do material, a partir da exposição ao sol e ao ambiente externo por 72 h. A massa seca do material foi separada em 3 amostras, as quais foram submetidas separadamente ao peneiramento mecânico por 6 minutos. A partir do resultado de cada amostra, foi obtida a média aritmética da massa retida em cada peneira e determinada a composição granulométrica (Tabela 2). O resultado apresentado identificou elevadas porcentagens de pedregulhos e areia grossa (Tabela 3).

Tabela 2: Granulometria do rejeito e do solo.

Peneira Abertura (mm)	Rejeito	Solo
	% Passante	% Passante
25,00	100,00%	100,00%
19,00	96,09%	
9,50	78,41%	99,29%
4,75	56,05%	97,54%
2,00	31,68%	94,21%
0,85	17,26%	
0,60	14,88%	
0,42	12,16%	87,52%
0,30	10,04%	
0,15	5,55%	
0,075	2,18%	36,30%

Tabela 3: Composição granulométrica do rejeito e do solo.

Material	Rejeito	Solo
Pedregulho	68,32%	2,46%
Areia Grossa	16,80%	6,69%
Areia Média	6,38%	58,82%
Areia Fina	6,50%	
Silte	2,00%	9,07%
Argila		22,96%
Total	100,00%	100,00%

Os ensaios de massa específica do sedimento de dragagem e do cimento foram realizados em um Picnômetro a Gás AccuPyc 1340 (Micromeritics), nas dependências do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Os ensaios de superfície específica do sedimento de dragagem e do cimento foram feitos de acordo com a norma NBR 16372[15], nas dependências do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.A amostra de sedimento de dragagem sofreu o processo de moagem e foi previamente seca em estufa por 72 h antes dos ensaios, a uma temperatura de aproximadamente 105ºC. Os resultados são

apresentados na Tabela 4, com valores individuais de massa específica e resultados médios de três ensaios por material para a superfície específica.

Tabela 4: Massas específicas e superfícies específicas do cimento e do sedimento de dragagem.

	Cimento CP-II	Sedimento de dragagem
Massa Específica (g/cm³)	2,9697	2,8010
Superfície Específica (cm^2/g)	5200	1640

As composições químicas do sedimento de dragagem e do cimento foram determinadas a partir de análises semi-quantitativas realizadas por espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva de raios-X em equipamento Shimadzu (Modelo EDX 800), do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. No ensaio, a amostra é atingida por raios X, e, quando isso ocorre, elétrons das camadas mais internas são ejetados para camadas mais internas. Ao retornar para suas camadas originais, os elétrons emitem energias características para cada elemento. Todas as etapas do ensaio foram realizadas nas dependências do NUMATS e do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Composições químicas do cimento e do sedimento de dragagem.

Composto Químico	Composição (%)	
	Cimento CP-II	Sedimento de dragagem
CaO	63,17	0,63
SiO_2	19,13	53,52
Al_2O_3	9,25	-
SO_3	3,96	-
Fe_2O_3	2,82	41,81
K_2O	0,56	1,64
TiO_2	0,48	1,53
MnO	0,39	0,29
SrO	0,25	-
Sm_2O_3	-	0,41
ZrO_2	-	0,07
V_2O_5	-	0,06
Y_2O_3	-	0,04

3.2. Definição das Misturas

Foram escolhidas 3 misturas diferentes para serem estudadas: uma mistura de referência, contendo apenas solo e cimento, uma mistura com 10% de sedimentos de dragagem e uma mistura com 20% de sedimentos de dragagem.

Inicialmente foi realizada a dosagem do teor de cimento empregando o método da Associação Brasileira de Cimento Portland, em função das características do solo (NBR 12253)[16]. O teor de cimento provável foi de 7%. Foram moldados corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, na umidade ótima e com o teor provável de cimento igual a 7%. Após 7 dias de cura úmida, foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples nos dois cilindros. Como os resultados obtidos (média de 0,6 MPa) foram inferiores ao limite mínimo de 2,1 MPa (NBR 12253)[16], a norma recomenda que seja adotado o valor provável de mais 2% de cimento. No entanto, adotou-se o valor de 10% de cimento, por ser o valor já utilizado em outras pesquisas e, a partir disso, foram definidas as misturas de solo-cimento com rejeito. A Tabela 6 apresenta as denominações e as composições das misturas.

Tabela 6: Composição das misturas estudadas.

Nomenclatura	% Cimento	% Sedimentos de Dragagem
C10SD00	10%	0%
C10SD10	10%	10%
C10SD20	10%	20%

3.3. Moldagem e Cura dos Corpos de Prova e Preparo das Superfícies

As dimensões escolhidas dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios de compressão uniaxial nas misturas de solo-cimento foram de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O preparo das misturas e a moldagem foram feitos na seguinte ordem:

- Medições das massas dos materiais necessárias para dois moldes cilíndricos por mistura;
- Adição do cimento, solo e rejeito, nessa respectiva ordem, na cuba da argamassadeira com capacidade de 20 litros (Figura 3a e Figura 3b);
- Homogeneização dos materiais em argamassadeira por 1 minuto;
- Interrupção da mistura para a raspagem do material aderido à superfície da cuba;
- Homogeneização dos materiais em argamassadeira por mais 1 minuto, enquanto foi adicionada a água (Figura 3c);
- Pesagem dos moldes;

- Adição da mistura aos moldes em 3 camadas, onde o material de cada camada foi compactado utilizando a energia intermediária do ensaio de Proctor;
- Retirada de uma amostra de cada corpo de prova para a obtenção da umidade da mistura;
- Pesagem de cada molde + corpo de prova;
- Colocação dos moldes preenchidos em um armário de cura envolvidos por um cobertor encharcado com água para a cura (Figura 3d);
- Desmoldagem dos corpos de prova após um período de cura de 24 horas;
- Selagem dos corpos de prova com filme plástico (Figura 3e);
- Colocação dos corpos de prova selados em câmara úmida, onde permaneceram por 6 dias, concluindo um período total de cura de 7 dias.

Devido à falta de colarinho no molde de adotado, observou-se que a última camada de cada corpo de prova não foi compactada de maneira adequada durante a moldagem. A solução para o problema citado foi a realização do corte manual com uma serra metálica de 0,5 cm do topo de cada corpo de prova após o período total de cura. Os corpos de prova cilíndrico possuíram, portanto, 19,5 cm de altura. A fim de garantir o paralelismo entre as superfícies de topo e base e sua uniformidade, os corpos de prova foram submetidos, após a cura e antes dos ensaios de compressão, ao capeamento com enxofre e cinza volante.

Figura 3: Preparo e moldagem das misturas: (a) Argamassadeira; (b) Colocação dos materiais granulares na cuba; (c) Realização da mistura após a inserção da água; (d) Corpos de prova moldados no armário de cura; (e) Corpos de prova selados com filme plástico.



(a) (b) (c) (d) (e)

3.4. Procedimentos de Ensaios das Misturas

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial seguiram os procedimentos da norma NBR 12025[17] e foram realizados em uma prensa de ensaios Shimadzu UH-F 1000 kN com capacidade de 100 toneladas (Figura 4a), com a velocidade de deslocamento da mesa igual a 0,1

mm/min. Os deslocamentos axiais foram medidos por dois transdutores elétricos fixados na zona central do corpo de prova (Figura 4b). O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos pertencente ao Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. A partir da aquisição dos dados de força e deslocamentos axiais foi possível a determinação da curva tensão *versus* deformação axial de cada corpo de prova. Com a curva tensão versus deformação de cada corpo de prova foi determinado o módulo de elasticidade secante, a partir da Equação A.

$$E = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}} \right) \quad \text{(A)}$$

onde: E = Módulo de elasticidade (GPa);

σ_2 = Tensão correspondente a 40% da tensão máxima (MPa);

σ_1 = Tensão correspondente à deformação ε_{a1} (MPa);

ε_{a2} = Deformação axial correspondente à tensão σ_2 (mm/mm);

ε_{a1} = Deformação axial igual a 5×10^{-5} (mm/mm).

Figura 4: Ensaio de compressão uniaxial: (a) Prensa Shimadzu; (b) Corpo de prova com transdutores elétricos.



(a)



(b)

A umidade do corpo de prova foi obtida empregando a Equação B[17]:

$$h = \frac{m_{bh} - m_{bs}}{m_{bs} - m_c} \times 100\% \quad \text{(B)}$$

onde: h = teor de umidade da amostra, em %;

M_{bh} = massa do recipiente mais amostra úmida, em g;

M_bs = massa do recipiente mais amostra úmida da amostra seca, em g;

M_c = massa do recipiente, em g.

A massa específica aparente seca do corpo de prova, γs, foi obtida empregando a Equação C[17]:

$$\gamma_s = \frac{\gamma}{h+100} \times 100, \text{ em kg/m}^3 \text{ ou g/cm}^3 \qquad \text{(C)}$$

onde: γ = massa específica aparente do corpo de prova;

$\gamma_s = \frac{M_h}{V}$, em kg/m^3 ou g/cm^3;

M_h = massa do corpo de prova igual à massa do conjunto molde mais corpo de prova úmido menos a massa do molde, em kg ou g;

V = volume do corpo de prova compactado (volume do molde), em m^3 ou cm^3.

3.5. Resultados e Análise de Resultados

A Figura 5 apresenta as curvas tensão *versus* deformação dos corpos de prova da mistura de referência C10SD00A, sem o rejeito em sua composição. A Figura 6a e a Figura 6b mostram as curvas tensão *versus* deformação dos corpos de prova das misturas com rejeito em suas composições C10SD10 e C10SD20, respectivamente. A Tabela 7 apresenta os resultados das propriedades mecânicas de resistência à compressão uniaxial e Tabela 8 apresenta os resultados de umidade e massa específica aparente seca.

Figura 5: Ensaio de compressão uniaxial: Curvas tensão-deformação da mistura C10SD00.

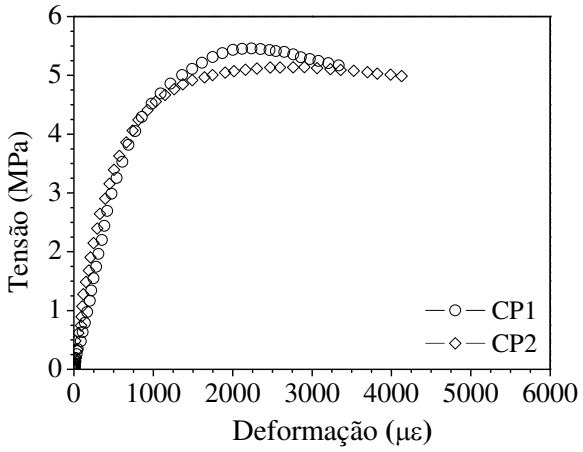


Figura 6: Ensaio de compressão uniaxial: (a) Curvas tensão-deformação da mistura C10SD10; (b) Curvas tensão-deformação da mistura C10SD20.

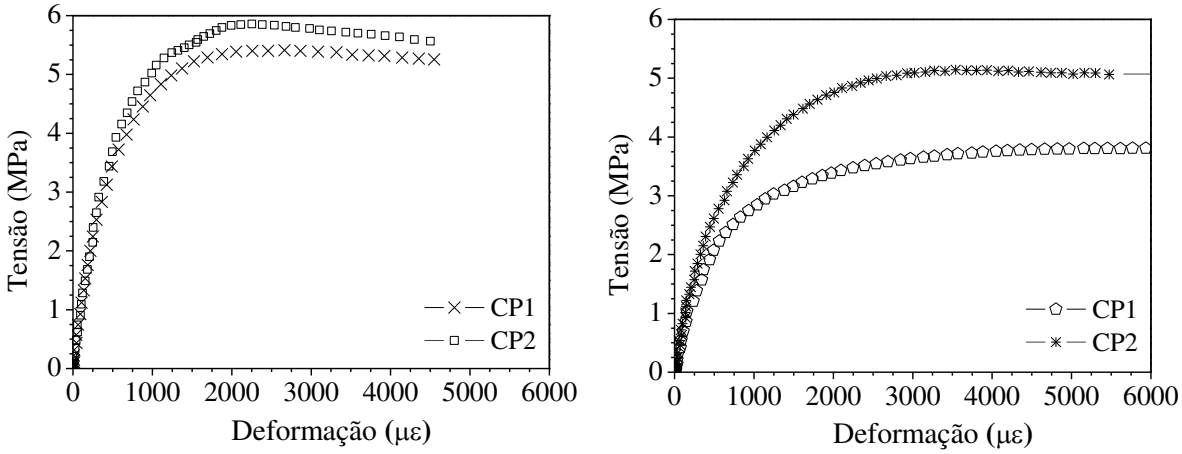


Tabela 7: Propriedades mecânicas de compressão simples.

Amostra	Resistência à Compressão de Ruptura (MPa)	Deformação Axial de Ruptura (με)	Módulo de Elasticidade (GPa)
C10SD00	5,31	2461	7,5
C10SD10	5,65	2224	9,1
C10SD20	4,48	4711	5,7

Tabela 8: Resultados de umidade e massa específica aparente seca.

Amostra	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm^3)
C10SD00	10,18	2,241
C10SD10	8,89	2,313
C10SD20	9,58	2,286

A partir dos resultados apresentados na Tabela 7 pode-se verificar que todas as misturas apresentaram resistência à compressão simples acima do valor mínimo de 2,1 MPa recomendado pela norma NBR 12253[16] para misturas de solo-cimento para camadas de base de pavimentos.

4. CONCLUSÕES

A quantidade de rejeito de mineração, particularmente de minério de ferro, gerada anualmente no Brasil faz com que seja necessária a busca por alternativas para utilização do rejeito. Atualmente já existem pesquisas sobre o uso desses materiais em diversas aplicações, como na pavimentação.

O consumo de materiais naturais (solos e agregados) nas camadas de pavimentos é alto, chegando a 9800 toneladas/km. Muitas vezes, os materiais disponíveis nas regiões da execução da obra não atendem as especificações, não sendo recomendado o emprego do material puro em camadas do

pavimento. Para servir como alternativa é necessária a estabilização com aditivos que possam aumentar sua resistência e melhorar as suas propriedades para ser empregado como material para pavimentação.

Os resultados da adição de rejeito de mineração nas misturas de solo-cimento mostraram que essa pode ser uma excelente alternativa como material para pavimentação, uma vez que as misturas com adição de 10% e 20% de sedimentos de dragagem apresentaram resistência à compressão simples bem acima do mínimo exigido pela especificação (de 2,1 até 2,7 vezes), sendo que a mistura com 10% de rejeito teve um aumento de 6,33% na resistência a compressão simples em comparação com a mistura de referência, mostrando que o rejeito pode ser considerado um bom aditivo para o solo. Tal fato pode estar relacionado a nova granulometria da mistura e, consequentemente, melhor compactação do material.

Além disso, o uso de rejeitos de mineração em camadas de pavimento também contribui para dar um novo destino aos resíduos gerados pela mineração, reduzindo o problema ambiental, além, de, possivelmente, reduzir os custos relacionados às obras de pavimentação.

5. REFERÊNCIAS

1. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Sumário Mineral.** 2016.
2. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. 2012.
3. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Estudo da Viabilidade Técnica de Utilização de Rejeitos de Minério de Ferro em Pavimentos Rodoviários**. 2018.
4. GALHARDO, D. C. **Estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de rejeitos de mineração de ferro em camadas de pavimentos rodoviários**. 2015. 186f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2015.
5. BASTOS, L. A. de C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. 2013. 97f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2013.
6. CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. 2011. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.
7. SOUSA, J. G. M. de **Potencial para a utilização do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado em pavimentação**. 2017. 122f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2017.
8. WIKIPIDEIA. **Usina Hidrelétrica Risoleta Neves**. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_Hidrel%C3%A9trica_Risoleta_Neves. Acesso em 14/06/2019.
9. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ES 172/16**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2016.

10. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 082/94**: Determinação do limite de plasticidade. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994.
11. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 122/94**: Determinação do limite de liquidez - método de referência e método expedito. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994.
12. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-CLA 259/96** - Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, RJ, 1996.
13. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. IPR. Publicação 719. 3ª ed., 274p. Rio de Janeiro, RJ, 2006.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica - Método de ensaio. Rio de janeiro, RJ, 2016.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar de cimento Portland. Rio de Janeiro, RJ, 2015.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253**: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 2012.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2012.