



ESTADO DA ARTE DO USO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO EM 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

As atividades de mineração, no Brasil, desempenham um importante papel social e econômico no país. Aliado a este fato, a mineração produz uma grande quantidade de rejeitos, os quais a destinação é um desafio econômico e ambiental para as empresas mineradoras. Os resíduos de mineração são estudados como fonte alternativa de materiais para diversas aplicações, e, dentre elas, para a construção de pavimentos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento da pesquisa relacionada ao uso de rejeitos de mineração em pavimentos. Foram encontrados trabalhos relacionados aos rejeitos de minério de ferro, bauxita, cobre e tungstênio. O rejeito de minério de ferro apresentou maior número de publicações e, conseqüentemente, uma maior abrangência de temas explorados, quando comparado com os demais. Os rejeitos de mineração foram estudados em misturas asfálticas, misturas cimentícias para pavimentos rígidos e blocos de pavimento intertravado, e, em misturas para compor as camadas de base, sub-base e reforço de subleito.

Palavras-chave: rejeito de mineração; pavimentação; materiais alternativos

STATE-OF-THE-ART USE OF MINING TAILINGS IN PAVEMENTS

ABSTRACT

Mining activity, in Brazil, plays an important social and economic role on the country. Allied to this fact, the mining activity produces a large quantity of mining tailings, which destination are an economical and environmental challenge to mining companies. The mining tailings are been studied as an alternative material source for different applications, and amongst them, for pavement construction. This article presents the research development related to the use of mining tailings in pavements. Publications related to iron ore bauxite (red mud), copper and tungsten tailings were found. The iron ore tailings presented the majority of publications, and, consequently, a wider range of themes explored, when compared to the others. The mining tailings were studied in asphalt mixtures, cement mixtures for rigid pavements, concrete interlocked pavement, and, in base, subbase and subgrade layers.

Key-words: mining tailings, pavements, alternative materials.



1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais países produtores de minérios. A indústria extrativa brasileira teve participação de 2,1% no PIB, em 2015, com um crescimento de quase 5% em relação ao ano anterior⁽¹⁾. As substâncias minerais com maior destaque, em toneladas, no setor de mineração brasileiro são: o ferro, calcário, bauxita, fosfato, manganês e caulim⁽²⁾. A tabela 1 apresenta a produção beneficiada de alguns dos principais minérios extraídos no Brasil e a respectiva participação mundial. No cenário mundial, o Brasil destaca-se por ser o maior produtor de nióbio, o segundo maior produtor mundial de tântalo e magnesita e o terceiro maior produtor de bauxita, ferro, crisotila e grafita natural⁽¹⁾.

Tabela 1 – Produção beneficiada de algumas das principais substâncias minerais no Brasil

Substância	Produção Beneficiada 2015 (t)	(%) do Mundo 2015
Bauxita	35.715.410	13,0
Calcário Agrícola	29.433.000	-
Cobre	265.469	1,4
Crisotila	232.052	12,0
Cromo	526.744	1,7
Ferro	430.838.137	13,0
Fosfato	6.100.000	2,7
Grafita Natural	81.762	6,9
Magnesita	1.621.425	18,9
Nióbio	80.465	93,1
Níquel	43.936	7,0
Ouro	84.814	2,8
Tântalo	268	20,3
Titânio	80.975	1,3
Tungstênio	432	0,5
Zinco	270.714	1,2

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (2016)⁽¹⁾

A atividade de mineração causa um grande impacto ambiental em seu local de extração. Grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados, e a geração de resíduos depende da localização da jazida em relação à superfície, da concentração da substância mineral estocada na rocha matriz e do processo de extração do minério⁽²⁾.

Os dois principais resíduos sólidos gerados pelo processo de extração são os estéreis e os rejeitos. Os estéreis, também conhecido como lavra, são os materiais gerados pelas atividades de extração que ficam dispostos em pilhas, mas não têm valor econômico. Os rejeitos são gerados a partir do processo de beneficiamento dos minérios, que busca “purificar” o minério, removendo minerais associados sem valor econômico, aumentando a qualidade ou o teor do produto final⁽²⁾.



Na gestão dos rejeitos de minérios, a reciclagem e o reuso são estratégias mais favoráveis do que a simples disposição dos rejeitos, usualmente feita em diques ou barragens.

As obras de pavimentação estão relacionadas a um grande consumo de materiais e, portanto, de elevado custo financeiro. Além disso, são causados impactos ambientais significativos para a extração dos agregados naturais utilizados para compor as camadas dos pavimentos⁽³⁾. O uso dos rejeitos de minério de ferro em obras de pavimentação apresenta uma nova finalidade para o rejeito, gerando um desenvolvimento sustentável, reduzindo a necessidade de agregados naturais, e, possivelmente, reduzindo os custos para a construção de novos pavimentos.

Este trabalho tem como objetivo apresentar a atual conjuntura da pesquisa relacionada à utilização de diversos rejeitos de mineração em pavimentos, apresentando resultados de ensaios obtidos por diferentes autores, mostrando a viabilidade técnica do uso de rejeitos de mineração em pavimentos.

2. REJEITOS DE MINERAÇÃO

2.1. Rejeitos de Minério de Ferro

Dentre os rejeitos de mineração estudados nesse trabalho, o rejeito relacionado ao minério de ferro é aquele que se encontra com a pesquisa mais desenvolvida. Tal fato está relacionado com a grande participação desse mineral na economia brasileira e com a elevada quantidade de mineral extraída anualmente. Em 2015, o Brasil era o terceiro maior produtor mundial de minério de ferro, com o valor da produção chegando a 41,9 bilhões de reais⁽¹⁾. Em 2005, o minério de ferro era responsável por cerca de 32,95% dos rejeitos de mineração gerados no Brasil, com expectativas de ultrapassar os 40% nos anos seguintes⁽²⁾. Neste trabalho, a utilização de rejeito de minério de ferro em pavimentos foi dividida em 6 classes:

- Classe I - Misturas de solo e rejeito;
- Classe II - Misturas estabilizadas quimicamente;
- Classe III - Misturas estabilizadas granulometricamente;
- Classe IV - Concreto;
- Classe V - Piso Intertravado;
- Classe VI - Misturas Asfálticas.

As características experimentais e os resultados obtidos para cada classe são apresentados a seguir.



2.1.1. Misturas de Classes I, II e III

As misturas pertencentes às classes I⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾, II e III⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ foram desenvolvidas com o mesmo intuito: de aplicar os rejeitos em camadas estruturais de pavimentos, como camadas de base, sub-base e reforço de subleito. A classe I pode ser subdividida em duas subclasses: I-a) Misturas de rejeito de minério de ferro, com solo granular, e, I-b) Misturas de rejeito de minério de ferro com solo laterítico. A classe II é dividida em 3 subclasses: classe II-a, para misturas estabilizadas com cimento; classe II-b, para misturas estabilizadas com cal; e classe II-c para misturas estabilizadas com escória.

A Tabela 2 apresenta as características das misturas estudadas e as devidas proporções dos materiais utilizados.

Tabela 2 - Composições das misturas estudadas – Classes I, II e III.

Classe I-a		Classe I-b		Classe II-a	Classe II-b	Classe II-c	Classe III	
% de Rejeito	% de Solo Granular	% de Rejeito	% de Solo Laterítico	% de Cimento	% de Cal	% de Escória	% de Rejeito	% de Escória
0%	100%	0%	100%	1%	1%	1%	30%	70%
15%	85%	10%	90%	2%	2%	2%	50%	50%
25%	75%	20%	80%	3%	-	-	70%	30%
40%	60%	30%	70%	4%	-	-		
50%	50%	40%	60%	5%	5%	5%		
100%	0%	50%	50%	10%	10%	10%		

Fonte: ANTT (2018); DANTAS (2015); GALHARDO (2015); BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).

As análises e ensaios abordados compreenderam caracterizações físicas⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾, químicas⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾, mecânicas⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ e ambientais⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾. As caracterizações físicas abordaram ensaios de granulometria, massa específica e determinação dos limites de Atterberg (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade). Alguns dos resultados apresentados se encontram resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização dos materiais.

Materiais	Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)	Limites de Atterberg (%)		
		LL	LP	IP
Rejeito	2,664 - 3,996	Não Líquido	Não Plástico	Não Plástico
Solo Laterítico	2,653 - 3,018	43	29	14
Solo Residual	2,510 - 2,556	40	Não Plástico	Não Plástico
Misturas Solo-Rejeito	2,625 - 3,213	Não Líquido	Não Plástico	Não Plástico

Fonte: ANTT (2018); DANTAS (2015); GALHARDO (2015); BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).

As caracterizações químicas foram realizadas através de ensaios de fluorescência de raios-X e de difração de raios-X. Esses ensaios contribuem para a identificação dos constituintes do solo e do rejeito, podendo, assim, explicar o comportamento das amostras avaliadas. Em geral, os resultados para as caracterizações químicas dos rejeitos de minério de ferro, apresentaram maiores quantidades de hematita (Fe₂O₃), quartzo (SiO₂), caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) e gipsita (Al(OH)₃).



As caracterizações mecânicas compreenderam ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia (CBR), expansão e módulo de resiliência. Para a classe II e a classe III foram realizados, também, ensaios de compressão simples, absorção de água e durabilidade. Esses ensaios são fundamentais para compreender o comportamento estrutural dos materiais (mistura de rejeito com solo) no pavimento e auxiliar no dimensionamento por parte dos projetistas. Os resultados dos ensaios são apresentados nas Tabelas 4 a 7.

Por último, as caracterizações ambientais consistiram na verificação do rejeito de minério de ferro de acordo com as normas: NBR 10004/04 – Resíduos Sólidos – Classificação, NBR 10005/04 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, e NBR 10006/04 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Em função dos resultados encontrados, Peixoto (2006)⁽⁶⁾ e Bastos (2013)⁽⁶⁾ classificaram o rejeito como material classe II A – não perigoso e não inerte. Entretanto, Galhardo (2015)⁽⁵⁾ classificou o material como classe II B – não perigoso e inerte.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de compactação dos materiais.

Mistura	Proctor	Umidade Ótima (%)	Massa Específica Aparente Seca (g/cm³)
Rejeito	Normal	9,20 - 14,50	2,22 - 2,58
	Intermediário	9,26 - 16,10	1,96 - 2,60
	Modificado	10,10 - 10,46	2,53 - 2,75
Solo Laterítico	Modificado	18,18	2,13
Solo Residual	Normal	9,76	2,02
	Intermediário	9,59 - 20,50	1,69 - 2,08
	Modificado	8,86	2,11
Misturas com Solo Laterítico	Intermediário	11,70 - 13,40	2,01 - 2,09
	Modificado	12,50 - 16,50	2,15 - 2,20
Misturas com Solo Residual	Normal	9,88 - 10,27	2,11 - 2,34
	Intermediário	9,07 - 19,20	1,77 - 2,40
	Modificado	8,07 - 8,70	2,25 - 2,52
Misturas com Cimento	Intermediário	12,20 - 14,20	2,22 - 2,41
Misturas com Cal	Intermediário	12,20 - 16,00	2,16 - 2,41
Misturas com Escória (Quimicamente)	Intermediário	12,20 - 14,40	2,27 - 2,41
Misturas com Escória (Granulometricamente)	Intermediário	7,40 - 11,40	2,50 - 2,63

Fonte: ANTT (2018); DANTAS (2015); GALHARDO (2015); BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de CBR e expansão.

Mistura	Índice de Suporte Califórnia - CBR (%)			Expansão (%)
	Energia Normal	Energia Intermediária	Energia Modificada	
Rejeito	9,0 - 23,5	19,4 - 40,8	37,2 - 53,0	<0,40
Solo Laterítico	-	-	53,7	0,00
Solo Residual	-	1,4 - 16,5	25,0	0,12 - 6,10
Misturas com Solo Laterítico	-	46,5	44,2 - 90,8	0,00
Misturas com Solo Residual	-	14,7 - 30,5	23,7 - 57,7	0,04 - 3,90
Misturas com Cimento	-	45,0 - 180,0	-	<0,30
Misturas com Cal	-	38,0 - 32,0	-	<0,32
Misturas com Escória (Quimicamente)	-	28,0 - 47,0	-	<0,36
Misturas com Escória (Granulometricamente)	-	52,0 - 85,0	-	<0,11

Fonte: ANTT (2018); DANTAS (2015); GALHARDO (2015); BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).



Tabela 6 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.

Compressão não confinada - Cura em câmara úmida – 7 dias	
Mistura	Resistência (MPa)
Rejeito	0
5% Cimento	1,07 - 1,44
10% Cal	0,79
10% Escória (Quimicamente)	0
50% Escória (Granulometricamente)	0,24
70% Escória (Granulometricamente)	0,30

Fonte: ANTT (2018); DANTAS (2015); GALHARDO (2015); BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem.

Durabilidade por molhagem e secagem	
Mistura	Perda de Massa
Rejeito	100%
5% Cimento	20% - 24%
10% Cal	29%
Escória (Granulometricamente)	100%

Fonte: BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).

A partir dos resultados apresentados nas tabelas 4 a 7, é possível concluir que a aplicação de rejeito puro e misturas de escória e rejeito, estabilizados granulometricamente, é inviável devido à perda de massa de 100% nos ensaios de durabilidade⁽⁶⁾. Os ensaios de CBR apresentaram valores interessantes, principalmente para misturas de rejeito e cimento, nas quais os valores de CBR variaram entre 45% e 180%⁽⁶⁾. Esses resultados apresentam valores maiores que o mínimo, de 30%, estabelecido pelo DNIT⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾, para misturas de solo melhorado com cimento para camadas de sub-base. Para a utilização como camada de base, apenas poucos materiais atenderam o mínimo recomendado de CBR $\geq 80\%$ ⁽¹¹⁾. Os ensaios de expansão também foram satisfatórios e atenderam as recomendações exigidas para a utilização da mistura como camada de base (expansão máxima de 0,5%) e sub-base (expansão máxima de 1%).

Analisando a resistência à compressão do solo-cimento⁽⁶⁾, os resultados dos ensaios apresentaram valores inferiores aos recomendados pelo DNIT⁽⁹⁾ para resistência mínima aos 7 dias que deve ser entre 1,4 e 2,1 MPa para que a mistura possa ser utilizada como camada de sub-base.

2.1.2. Misturas de Classes IV e V

Os estudos relacionados às classes IV⁽⁸⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾ e V⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ (produção de concreto para pavimentação e produção de blocos intertravados para pavimentação, respectivamente) tiveram como objetivo a utilização dos resíduos de minério de ferro como um possível material para a substituição da areia natural, para a produção de concreto. No caso da classe IV, o concreto pode ser empregado em camadas de base e revestimento de pavimentos rígidos, enquanto que para a



classe V pode ser usado apenas em camadas de revestimento. As tabelas 8 e 9 apresentam as proporções de materiais estudadas para a produção de concreto (classe IV) e piso intertravado (classe V), respectivamente.

Tabela 8 - Proporções de materiais – Classe IV.

Classe IV	
% de Rejeito	% de Areia
5%	95%
10%	90%
20%	80%
40%	60%
50%	50%
60%	40%
80%	20%
100%	0%

Fonte: PEIXOTO (2006); CHE (2019), PANDITHARADHYA (2017).

Tabela 9 - Proporções de materiais – Classe V.

Classe V			
% de Rejeito	% de Areia	% de Pó de Pedra	% de Brita 0
10%	90%	-	-
20%	80%	-	-
50%	50%	-	-
50%	25%	25%	-
75%	25%	-	-
75%	-	25%	-
75%	75%	-	25%
80%	20%	-	-
90%	10%	-	-
100%	-	-	-

Fonte: PEIXOTO (2006); COSTA (2009), SANT'ANA FILHO (2013), GUERRA (2014), RAVI KUMAR (2012).

Os ensaios realizados para as classes IV e V são, em geral, diferentes dos ensaios realizados para as classes I, II e III, uma vez que o material é diferente e a finalidade dele também. Para a caracterização mecânica, foram realizados ensaios de compressão, flexão, durabilidade, absorção de água, retração. Alguns dos resultados são apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.

Compressão simples (MPa) – 28 dias	
Mistura	Resistência
Concreto C30 5%	55,0
Concreto C30 10%	63,0
Concreto C30 20%	49,3
Concreto C30 40%	50,3
Concreto C30 50%	52,0
Concreto C30 60%	41,6
Concreto C30 80%	41,1
Concreto C30 100%	33,8
Piso Intertravado 10% - 80%	34,8 - 62,4
Piso Intertravado Adição 5% - 25%	24,0 - 35,2

Fonte: PEIXOTO (2006); CHE (2019), PANDITHARADHYA (2017), COSTA (2009), SANT'ANA FILHO (2013), GUERRA (2014), RAVI KUMAR (2012).



Tabela 11 - Resultados dos ensaios de flexão simples.

Flexão simples (MPa) – 28 dias	
Mistura	Resistência
Concreto C30 5%	4,0
Concreto C30 10%	4,5
Concreto C30 20%	3,7
Concreto C30 40%	3,5
Concreto C30 50%	3,9
Concreto C30 60%	2,8
Concreto C30 80%	2,0
Concreto C30 100%	1,4

Fonte: PEIXOTO (2006); CHE (2019), PANDITHARADHYA (2017)

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de absorção.

Absorção de Água (%)	
Mistura	Absorção
Piso Intertravado 10% - 80%	0,7 - 7,1
Piso Intertravado Adição 5% - 25%	2,4 - 6,8

Fonte: PEIXOTO (2006); CHE (2019), COSTA (2009), GUERRA (2014), RAVI KUMAR (2012).

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 10 e 11 pode-se verificar que o incremento da substituição do agregado natural por rejeito de minério de ferro tende a reduzir as resistências a compressão e a flexão. Para a utilização de placas de concreto como base e revestimento de pavimentos rígidos, é recomendável que a resistência à tração na flexão seja de 4,5 MPa⁽⁹⁾. Pode-se perceber que as misturas de concreto com 10% de substituição do agregado natural por rejeito de minério de ferro, atingiu a esta recomendação e foi a mistura com a maior resistência a compressão. Por Peixoto (2006)⁽⁸⁾, blocos intertravados com maiores adições de rejeitos de minério de ferro apresentaram menor absorção de água, indicando aumento durabilidade. Entretanto, elevadas quantidades de rejeito de minério de ferro na mistura apresentaram grandes perdas por abrasão. Misturas entre 10% e 50% de rejeito apresentaram os melhores resultados entre absorção de água e abrasão.

Os trabalhos também contaram com caracterizações físicas⁽⁸⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾, químicas⁽⁸⁾⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ e ambientais⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾ dos rejeitos de mineração. Os resultados para as caracterizações físicas e químicas foram similares aos apresentados, anteriormente, para as classes I, II e III. Para a classificação ambiental, o autor Guerra (2014)⁽¹⁶⁾, caracterizou o rejeito como um material de classe II A – não perigoso e não inerte. Já Costa (2009)⁽¹⁴⁾, classificou o rejeito como classe II B – não perigoso e inerte.

2.1.3. Misturas de Classe VI

O rejeito de minério de ferro também foi avaliado como material alternativo para compor misturas asfálticas para revestimento de pavimentos flexíveis⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾. Os estudos compreenderam a



adição do rejeito em ligantes asfálticos e também em misturas asfálticas. Para avaliar os ligantes foram realizados os seguintes ensaios: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e ductilidade. Os ensaios realizados para avaliar as misturas asfálticas foram: módulo de resiliência, fadiga, uniaxial de carga repetida, resistência à tração por compressão diametral e perda por umidade induzida. Alguns resultados dos ensaios realizados são comentados a seguir.

Quando adicionado no ligante asfáltico, os valores de penetração diminuíram com o aumento do teor de rejeito adicionado, enquanto que o ponto de amolecimento aumentou com a incorporação do rejeito. Isso mostra que a adição de rejeito de minério de ferro em ligantes asfálticos aumenta a sua consistência. Os ensaios de ductilidade confirmam esse resultado, onde pode-se observar valores inferiores aos limites mínimos para o asfalto puro, indicando que o material se torna menos dúctil antes da sua ruptura. Além disso, quando analisado em uma mesma temperatura, pode-se verificar que ocorreu um aumento da viscosidade com o uso do rejeito, e, portanto, as temperaturas de usinagem e compactação devem ser mais altas. No caso das misturas asfálticas, a resistência à tração por compressão diametral foi maior nas misturas contendo o rejeito de minério de ferro.

2.2. Rejeitos de Bauxita

A bauxita é o terceiro mineral, em volume, mais produzido pelo Brasil, com cerca de 32 milhões de toneladas anuais⁽²²⁾. Para que a produção de alumínio seja economicamente viável, a bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) aproveitável⁽²³⁾.

A bauxita é o primeiro elo da cadeia produtiva da indústria de alumínio. A partir da purificação da bauxita são produzidos os óxidos de alumínio (alumina), e, destes, são produzidos os alumínio metálicos. São necessários 5 a 7 toneladas de bauxita para produzir 2 toneladas de alumina (óxido de alumínio), que se convertem em 1 tonelada de alumínio⁽²³⁾.

Foram estudadas 5 formas de incorporar o rejeito de bauxita em pavimentos:

- Misturas de solo-rejeito, com dosagens de 60% solo e 40% rejeito⁽²⁴⁾.
- Misturas de rejeito estabilizado com 4% de cinzas volantes⁽²⁴⁾.
- Argamassas com rejeito, em substituição ao cimento, nos teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%⁽²⁵⁾.
- Rejeito puro, como camada de subleito para pavimentos⁽²⁶⁾.
- Uso de rejeito de bauxita como agregado graúdo, e realização de misturas estabilizadas com outros rejeitos industriais⁽²⁷⁾. No oeste da Austrália, os depósitos de bauxita apresentam



elevadas quantidades de quartzo, que gera frações graúdas para o rejeito⁽²⁷⁾. Esse fenômeno não é usual e, portanto, essa utilização não será levada em consideração para este trabalho.

Foram realizadas caracterizações físicas⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾, químicas⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾ e mecânicas⁽²⁴⁾ para o rejeito de bauxita e para as misturas estudadas. Os ensaios realizados foram: massa específica, limites de Atterberg, granulometria, módulo de elasticidade, compactação e índice de suporte Califórnia (CBR). Alguns dos resultados dos ensaios são apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de caracterização do rejeito de bauxita.

Mistura	Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)	Limites de Atterberg (%)		
		LL	LP	IP
Rejeito	3,33 - 3,95	25 - 37	18 - 33	4 - 7

Fonte: KEHAGIA (2008); ARHIN (2017); DAS (2015)

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de compactação.

Compactação			
Amostra	Proctor	Umidade Ótima (%)	Massa Específica Aparente Seca (g/cm ³)
Rejeito	Normal	18,5	2,02
Solo - Rejeito (60% - 40%)	Normal	13,1	2,05
Rejeito - 4% Cinza Volante	Normal	21,2	1,68

Fonte: KEHAGIA (2008); DAS (2015)

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de CBR.

Índice de Suporte Califórnia - CBR (%)	
Misturas	Energia Normal
Rejeito	27
Solo - Rejeito (60% - 40%)	34
Rejeito - 4% Cinza Volante	19

Fonte: KEHAGIA (2008); DAS (2015)

Para os ensaios de caracterização química, foram realizadas análises de espectrometria de fluorescência de raios-X e de difração de raios-X. Os resultados apresentaram maiores concentrações para hematita (Fe₂O₃), alumina (Al₂O₃), cal (CaO), quartzo (SiO₂), óxido de sódio (Na₂O) e óxido de titânio (TiO₂).

A verificação da viabilidade técnica da utilização de rejeitos de bauxita em pavimentos carece de mais estudos. Os ensaios de CBR foram realizados com energia do Proctor Normal (energia inferior à recomendada pelo DNIT) e apresentaram valores próximos, e até mesmo superiores (para o caso de mistura de solo-rejeito), para a utilização dessas misturas como camada de sub-base. Ensaios de CBR com energia intermediária, expansão, ensaios de compressão, flexão e durabilidade são necessários para avaliar o comportamento dessas misturas.

Outras possibilidades de pesquisas futuras é o estudo de misturas estabilizadas, placas de concreto para pavimentos rígidos e a incorporação do rejeito em misturas asfálticas.



2.3. Rejeito de Minério de Cobre

O cobre ocupa a oitava posição da produção anual, em volume, de bens minerais no Brasil, com 219.000 toneladas anuais⁽²²⁾.

O rejeito de cobre foi estudado em 2 situações:

- Em mistura de solo-rejeito, para compor camadas de base e sub-base de pavimentos⁽²⁸⁾;
- Em adição a misturas asfálticas, para camadas de revestimento⁽²⁹⁾.

Para a mistura de solo-rejeito, foi utilizado um solo laterítico, com proporções de 50% solo e 50% rejeito, e 70% solo e 30% rejeito. Neste estudo foram realizadas caracterizações físicas⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾, químicas⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾, ambientais⁽²⁹⁾ e mecânicas⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾ do rejeito e das misturas. Para as caracterizações físicas, foram realizados ensaios de granulometria, limites de Atterberg e massa específica dos grãos. Esses resultados são apresentados na tabela 16. Os ensaios mecânicos constituíram de ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia (CBR), expansão e módulo de resiliência. Alguns dos resultados apresentados são resumidos nas tabelas 17 e 18.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de caracterização das misturas com rejeito de minério de cobre.

Mistura	Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)	Limites de Atterberg (%)		
		LL	LP	IP
Rejeito	2,895	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico
Solo - Rejeito (50% - 50%)	2,755	24,2	9,1	15,1
Solo - Rejeito (70% - 30%)	2,660	16,5	3,1	13,4

Fonte: SOUSA (2017); KATO (2016)

Tabela 17 - Resultados dos ensaios de compactação.

Compactação			
Amostra	Proctor	Umidade Ótima (%)	Massa Específica Aparente Seca (g/cm ³)
Rejeito	Intermediário	11,5	1,91
Solo - Rejeito (50% - 50%)	Intermediário	9,5 - 12,0	2,01 - 2,12
Solo - Rejeito (70% - 30%)	Intermediário	7,9	2,15

Fonte: SOUSA (2017).

Tabela 18 - Resultados dos ensaios de CBR.

Índice de Suporte Califórnia - CBR (%)		Expansão (%)
Misturas	Energia Intermediária	
Solo - Rejeito (50% - 50%)	21,8	0,75
Solo - Rejeito (70% - 30%)	51,9	0,28

Fonte: SOUSA (2017).

A caracterização química foi realizada através dos ensaios de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. A difração de raios X indicou a presença, no rejeito de minério de cobre, dos seguintes compostos: hidróxido de silicato alumínio e magnésio; quartzo; sulfato alumínio potássio; hidróxido duplo de ferro molibdênio; hidróxido silicato de magnésio.



A pesquisa relacionada ao uso de minério de cobre em pavimentos também carece de estudos. É possível perceber que o aumento do uso de rejeitos em misturas de solo-rejeito, reduz o limite de liquidez, a umidade ótima e aumenta o peso específico aparente seco. Entretanto, há uma grande redução do valor do CBR e um aumento da expansão. Para a mistura de 70% solo e 30% rejeito, o resultado do ensaio de CBR e expansão adequa a mistura como uma camada de sub-base.

A realização de outros ensaios, como compressão, flexão e durabilidade, e novas misturas, como misturas cimentícias, asfálticas e granulares, utilizando o rejeito de minério de cobre, são necessários para enriquecer a pesquisa, compreender o comportamento do material e a sua viabilidade técnica como um material alternativo para uso em pavimentação.

2.4. Rejeito de Minério de Tungstênio (Scheelita)

A scheelita é um dos principais minérios extraídos para a obtenção de tungstênio. Apesar da exploração brasileira do tungstênio não ser muito expressiva, em âmbito mundial, para efeitos regionais, o reaproveitamento dos rejeitos de minério de tungstênio em pavimentação, pode trazer muitos benefícios ambientais e econômicos. As principais jazidas brasileiras de tungstênio se localizam no estado do Rio Grande do Norte ⁽¹⁾.

O rejeito de scheelita foi estudado para as seguintes finalidades:

- Como material de substituição de agregado miúdo na produção de concretos ⁽³⁰⁾;
- Como misturas de solo-rejeito e cimento-rejeito ⁽³¹⁾

Foram realizadas caracterizações físicas⁽³⁰⁾⁽³¹⁾, químicas⁽³¹⁾ e mecânicas⁽³⁰⁾⁽³¹⁾ para o rejeito de scheelita. As caracterizações físicas englobaram análises granulométricas, determinação dos Limites de Atterberg e da massa específica. Alguns dos resultados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de caracterização das misturas com rejeito de scheelita.

Mistura	Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)	Limites de Atterberg (%)		
		LL	LP	IP
Rejeito	3,15	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico

Fonte: BATISTA (2018); LINHARES (2014).

A caracterização química indicou a presença de, principalmente, Cal (CaO), Quartzo (SiO₂), Hematita (Fe₂O₃) e Alumina (Al₂O₃). Os ensaios mecânicos compreenderam ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR) para as misturas de solo-rejeito e cimento-rejeito. Para o concreto com rejeito, foram realizados ensaios de resistência a compressão, tração na flexão e tração por compressão diametral. Os resultados são apresentados nas Tabelas 20 e 21.



Tabela 20 - Resultados dos ensaios de CBR.

Índice de Suporte Califórnia - CBR (%)	
Misturas	Energia Normal
Rejeito	45,5
Solo - Rejeito (60% - 40%)	28,4
Rejeito - Cimento (99% - 1%)	62,1

Fonte: LINHARES (2014).

Tabela 21: Resultados dos ensaios de resistência dos concretos.

Mistura	Compressão simples (MPa)	Tração por Compressão Diametral (MPa)	Tração na Flexão (MPa)
Concreto Convencional	29,3	3,2	4,2
10% de Rejeito (em substituição)	27,2	2,7	3,5
20% de Rejeito (em substituição)	24,1	2,6	3,3
30% de Rejeito (em substituição)	28,6	2,5	3,2

Fonte: BATISTA (2018).

O rejeito de scheelita apresentou o maior valor de CBR, mesmo utilizando uma menor energia de compactação. Estudos complementares são necessários, mas o rejeito puro apresenta um potencial de aplicação como reforço de subleito e como camada de sub-base. A mistura de rejeito com 1% de cimento apresentou uma melhora significativa do CBR, apontando uma outra alternativa de mistura.

Para o concreto, a substituição do agregado natural pelo rejeito de scheelita tende a reduzir suas resistências. Nenhuma das amostras analisadas na tração na flexão, atingiu o valor recomendado de 4,5 MPa⁽⁹⁾. Outras dosagens podem ser avaliadas a fim de atingir a resistência desejada. Ensaio de compressão, flexão, durabilidade e ensaios ambientais são necessários para o estudo de viabilidade técnica desse rejeito.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de rejeitos de mineração em pavimentos possui uma vasta aplicabilidade e, portanto, um amplo campo de estudo, englobando misturas asfálticas, misturas cimentícias, pavimentos intertravados e misturas granulares para compor camadas de base sub-base e reforço de subleito. A pesquisa relacionada a rejeito de minério de ferro foi aquela que se encontrou em um estado mais avançado, abrangendo um maior número de possibilidades de usos e, também, um maior número de ensaios realizados. Dessa forma, possibilita um maior entendimento do comportamento e do desempenho das misturas com a incorporação do rejeito. Os rejeitos de bauxita, minério de cobre e tungstênio apresentam potencial de aplicação, porém necessitam de estudos complementares.

Vale ressaltar, também, que a distância entre o local de extração dos minérios, ou do local de beneficiamento destes, e o local de aplicação dos rejeitos pode influenciar nos custos de transporte, assim como o estado do material (líquido ou sólido), afetando a viabilidade do uso do rejeito. Outra



observação importante é que podem existir significativas diferenças das propriedades desses rejeitos dependendo do local de extração, por isso, essas propriedades devem ser estudadas antes de sua aplicação. Os valores apresentados neste artigo servem de indicadores para futuros estudos.

O uso dos rejeitos de mineração em obras de pavimentação pode, possivelmente, reduzir o consumo de material, promover uma nova destinação para os rejeitos, reduzir impactos ambientais e reduzir os custos das obras. Com isso, o estudo da utilização desse material alternativo é interessante e necessário para promover um desenvolvimento sustentável no país.

4. 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. DANTAS, A. A. N. **Caracterização dos resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 88f, 2015.
5. GALHARDO, D. C. **Estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de rejeitos de mineração de ferro em camadas de pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 186f, 2015.
6. BASTOS, L. A. de C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 97f. 2013.
7. CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 86f. .2011.
8. PEIXOTO, R. F. *et. al.* **Utilização de rejeitos de barragens de minério de ferro na construção civil**. Relatório de Pesquisa – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 56f. 2006.
9. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentos Rígidos**. 2005.
10. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço**. DNIT 140/2010 – ES. 2010.
11. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço**. DNIT 142/2010 – ES. 2010.
12. CHE, T. K. *et. al.* **Utilization of iron tailings as fine aggregates in low-grade cement concrete pavement**. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 479 – Dalian, China, 2019.
13. PANDITHARADHYA, B. J., *et. al.* **A study of utilization of iron ore tailings as partial replacement for fine aggregates in the construction of rigid pavements**. In: *National Conference on Roads and Transport* – Karnataka, Índia, 2017.



14. COSTA, A. V. **Utilização do rejeito de *sinter feed* como agregado na produção de peças de concreto para pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 155f. 2009.
15. SANT'ANA FILHO J. N. de. **Estudo de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para fabricação de blocos intertravados de uso em pátios industriais e alto tráfego.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 121f. 2013.
16. GUERRA, A. N. L. P. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro *pellet feed* em pavimentos de blocos intertravados de concreto.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 124f. 2014.
17. RAVI KUMAR, C. M. *et. al.* **A study of utilization of iron ore tailings as partial replacement for fine aggregates in the construction of rigid pavements.** *International Journal of Earth Sciences and Engineering* – vol. 5, p. 501-504, 2012.
18. SILVA, R. G. O. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 205f. 2017.
19. ARÊDES, M. L. A. de **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 147f. 2016.
20. APAZA, F. R. *et. al.* **Estudo sobre a utilização de resíduo de minério de ferro em microrrevestimento asfáltico.** *Revista Transportes – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes* – 2016.
21. MOURÃO B. G. *et. al.* **Ligante Asfáltico modificado com rejeito de mineração de ferro.** XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – 2016.
22. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração.** 2015.
23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **Bauxita no Brasil: Mineração Responsável e Competitividade.** 2017.
24. KEHAGIA, F. **An innovative geotechnical application of bauxite residue.** *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* – vol. 13, 2008.
25. ARHIN, D. D. *et. al.* **Awaso bauxite red mud-cement based composites: characterisation for pavement applications.** *Case Studies in Construction Materials* – vol. 7, p. 45-55, 2017.
26. DAS, S. K., ROUT, S., ALAM, S. **Characterization of red mud as a subgrade construction material.** *3rd Conference of Transportation Research Group of India* – 2015.
27. JITSANGIAM, P., NIKRAZ, H. **Coarse bauxite residue for roadway construction materials.** *International Journal of Pavement Engineering* – vol. 14, p. 265-273, 2012.
28. SOUSA, J. G. M. de **Potencial para a utilização do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado em pavimentação.** Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 122f. 2017.
29. KATO, R. B. **Estudo da influência do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado nas propriedades do concreto asfáltico.** Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 147f. 2016.
30. BATISTA, L. S. *et. al.* **Análise da incorporação de resíduo de scheelita em concreto alternativo para fins de pavimentação.** IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental – 2018.
31. LINHARES, A. de S., SILVA, B. T. A. da **Aplicação do rejeito da scheelita em camadas granulares de pavimentos.** XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – 2014.