

## PROPOSTA DE REVESTIMENTO PRIMÁRIO A PARTIR DE RESÍDUOS MINERÁRIO E SIDERÚRGICO PARA CONTROLE DA EMISSÃO DE PARTICULADOS ORIUNDA DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS, MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS NA MINERAÇÃO

**Kellen Poliana Mendes de Medeiros (\*), Gustavo Ferreira Simões**

\* Universidade Federal de Minas Gerais, kellen.medeiros@yahoo.com.br

### RESUMO

Dentre os principais problemas ambientais oriundos da mineração, a poluição do ar por emissão de particulados pode ser considerada um dos impactos de maior relevância devido à frequência em que ocorre na atividade minerária, principalmente devido ao tráfego de equipamentos e veículos pesados.

Frente à necessidade do controle das emissões, várias técnicas são empregadas, sobretudo, às pistas de rolagem. O uso de polímeros orgânicos e o processo de umidificação com água são os mais comuns. No entanto, são ações temporárias, com resultados de baixa duração e necessidade de manutenções constantes e onerosas.

Considerando esses fatores, presume-se que o revestimento das pistas seja, dentre as alternativas, o melhor método para a contenção/redução da emissão de particulados em estradas, além de um método mais seguro quando considerada a probabilidade de acidentes de tráfego.

Devido à dinâmica das minerações e às alterações constantes das estradas de serviço, optou-se pelo estudo da utilização do tipo revestimento primário, sem a aplicação de todas as camadas da pavimentação tradicional.

Para o revestimento primário, será estudada a utilização de resíduos industriais provenientes das atividades minerária e siderúrgica – estéril e agregado siderúrgico, popularmente conhecido como escória – como forma de valorização e recuperação desses resíduos. O desempenho qualitativo do revestimento primário será avaliado após a construção de um trecho experimental.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escória de alto forno, Estéril da mineração, Valorização de resíduos, Pavimentação, Revestimento primário, Controle de emissão de particulados na mineração.

### ABSTRACT

Among the environmental problems arising from mining, air pollution by particulate emission can be considered one of the most relevant impacts due to the frequency that occurs in mining activities, mainly due to machinery and heavy vehicles traffic.

Concerning the control of emissions, several techniques are used, mainly those related to the treatment of the wearing course. The use of organic polymers and road humidification process are the most common. However, they are temporary actions, with short duration results and constant and costly maintenance.

Considering these factors, it is assumed that sealing the roads, among the alternatives, is the best method for reduction of particulate emission, besides a safer method when considering the probability of traffic accidents.

Due to a mining dynamics, with constant changes of the service roads, this paper aims at studying the use of only a wearing course or gravel road, without the use of all layers of a traditional pavement.

For the wearing course, the use of industrial waste from the mining and steel industry – waste rock-soil and steel aggregate, popularly known as "slag" - will be studied, promoting the waste valorization and reuse. The qualitative performance of the wearing course will be evaluated after the construction of an experimental track.

**KEY WORDS:** Blast furnace slag, Mining waste, Waste valorization, Paving, Primary coating, Particle emission control in mining.

### INTRODUÇÃO

O Brasil é reconhecido internacionalmente pela sua diversidade geológica propícia à existência de vários minerais, com posições de destaque tanto em reservas quanto em produção mineral. A pauta dos bens minerais exportados pelo Brasil no ano de 2016 atingiu um volume de 394 milhões de toneladas e representou, em dólares, US\$ 21,6 bilhões, representando 11,6% das exportações totais do país e 33% do saldo comercial (IBRAM, 2017).

De acordo com Tonietto e Silva (2011), as reservas de minérios medidas e indicadas no Brasil, totalizam 28,9 bilhões de toneladas, sendo que, desses, 67% estão localizadas no estado de Minas Gerais. No Estado, destaca-se a região do

Quadrilátero Ferrífero, uma área geológica de aproximadamente 7000 km<sup>2</sup>, abundante em reservas minerais, que se estende entre as cidades de Ouro Preto e Belo Horizonte.

Além das arrecadações com vendas e impostos, a mineração também pode ser considerada como um dos setores básicos mais importantes da economia, pois contribui de forma decisiva para a melhoria da qualidade de vida da população, uma vez que gera expressivo número de empregos direta e indiretamente. A indústria mineral empregou em 2016 cerca de 185 mil trabalhadores diretamente (IBRAM, 2017).

Apesar de instigar positivamente a economia do país, as atividades minerárias também estão associadas a diversos impactos ambientais. A poluição do ar a partir da emissão de particulados pode ser considerada um dos impactos de maior relevância tendo em vista a frequência em que ocorre na atividade minerária. Essas partículas são produzidas em decorrência das atividades de perfuração, desmonte, lavra e, principalmente, o carregamento e transporte de rochas e minérios em estradas não pavimentadas.

Frente à necessidade do controle da emissão de particulados na mineração, várias técnicas são empregadas, sobretudo, às pistas de rolagem. O uso de polímeros orgânicos e o processo de umidificação com água são os mais comuns. No entanto, são ações temporárias, com resultados de baixa duração e necessidade de manutenções constantes e onerosas, uma vez que há a carência de equipamentos, mão-de-obra e produtos em constante utilização. Estradas não pavimentadas, quando comparadas às estradas que possuem algum tipo de revestimento, também são mais propícias a defeitos estruturais, com consequência direta no seu desempenho, interferindo diretamente em fatores como o consumo de combustível e lubrificantes, manutenção e amortização, vida útil dos pneus e o risco de acidentes devido à derrapagem, escorregamento e atolamento de veículos e equipamentos em vias úmidas ou enludadas (Tabela 1).

**Tabela 1. Índice dos elementos do custo de operação segundo a natureza da superfície de rolamento em unidade de medida – base 100.**

Fonte: Senço, 2007.

1. Automóveis e veículos de duas rodas	Combustível	Lubrificantes	Lubrificantes	Pneus
Pavimento/revestimento muito bom	Base 100	Base 100	Base 100	Base 100
Pista não-revestida regular	115	125	130	200
Pavimento/revestimento em mau estado, ou caminho de terra	130	150	180	350
2. Caminhões	Combustível	Lubrificantes	Lubrificantes	Pneus
Pavimento/ revestimento muito bom	100	100	100	100
Pista não-revestida regular	130	140	150	200
Pavimento/revestimento em mau estado, ou caminho de terra	170	200	250	450

Considerando o desempenho estrutural das vias, a economia na manutenção dos veículos e a maior segurança no tráfego, presume-se que a utilização de revestimento nas estradas de mineração seja, dentre as alternativas, o melhor método para a contenção da emissão de particulados em pistas de rolagem.

Segundo Senço (2007), pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada, técnica e economicamente, a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los, melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento. A pavimentação, tradicionalmente, é um sistema de várias camadas de espessuras finitas que se assenta sobre um semi-espaço infinito (Figura 1) e exerce a função de fundação da estrutura, chamado subleito (SENÇO,2007).

Uma seção transversal típica de um pavimento – com todas as camadas possíveis – consta de uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais determinados por inúmeros métodos de dimensionamento (SENÇO, 2007), sendo elas o reforço de subleito, sub-base, base e revestimento. Cada uma das camadas exerce papel específico na pavimentação, podendo ser necessárias ou não (Quadro 1).

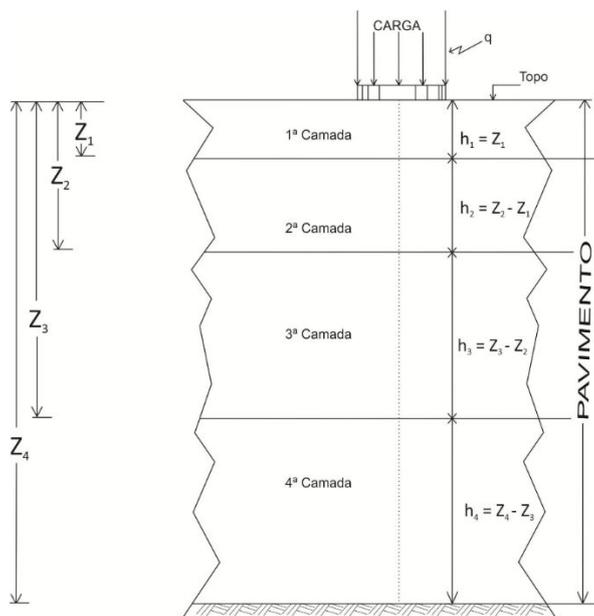


Figura 1: Seção transversal típica de um pavimento. Fonte: Senço, 2007 (adaptado).

### Quadro 1. Camadas típicas da pavimentação por especificação.

Fonte: Senço, 2007.

Camada	Denominação	Especificação
4ª	Reforço do Subleito	Tem a função de melhorar a qualidade do subleito, e regularizar a espessura da sub-base. É uma camada de espessura constante transversalmente e de variável longitude, de acordo com o dimensionamento do pavimento. Deve ser executada sobre o subleito regularizado.
3ª	Sub-base	Complementar, essa camada geralmente é utilizada para regularizar a espessura da base. Deve ser construída quando não for aconselhável execução da base diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço, por circunstâncias técnicas e/ou econômicas.
2ª	Base	Camada que resiste e distribui os esforços oriundos do tráfego ao subleito.
1ª	Revestimento	É camada que suporta diretamente a ação do rolamento dos veículos. Deve ser o tanto quanto possível impermeável, e servir para melhorar as condições do rolamento, quanto à comodidade e segurança, e resistente ao desgaste. Também pode ser chamada de capa ou camada de desgaste.

A necessidade da utilização de diferentes e variáveis camadas no pavimento, assim como os materiais utilizados relacionam-se à utilização pretendida da via. Devido à dinâmica das minerações e às alterações constantes da localização das estradas, é inviável a confecção de uma pavimentação convencional, com todas as camadas usuais e materiais de alto valor agregado. Partindo desse princípio, será trabalhado apenas o revestimento primário, constituído por uma camada assentada diretamente sobre o subleito, com insumos de baixo custo.

O estéril é um resíduo da indústria minerária, formado a partir de agregados naturais sem nenhum valor econômico. Pode ser constituído de um ou mais minerais, obtido na mineração durante a atividade de lavra para a obtenção do minério.

Os estéreis são descartados em pilhas na condição natural dentro das próprias minerações. Apesar de não constituir risco ambiental quando disposto de forma ordenada e ambientalmente correta, há a necessidade da disponibilidade de grandes áreas para a sua acumulação, causando alterações significativas no relevo e paisagem local. Quando sem



# 1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

GRAMADO-RS

12 a 14 de junho de 2018

controle, o estéril é susceptível a erosões, podendo ser carregado pela ação de chuvas e ventos, contaminando e soterrando corpos hídricos.

A indústria siderúrgica, assim como a minerária, é um dos principais pilares da economia brasileira. De acordo com o Instituto Aço Brasil - IAB (2017), em 2016 a indústria siderúrgica foi responsável pela produção de 31,3 milhões de toneladas de aço bruto e 30,2 milhões de toneladas de produtos siderúrgicos, com um saldo comercial de US\$ 3,9 bilhões.

O principal resíduo da siderurgia é o agregado siderúrgico, popularmente conhecido como escória, que possui a função de agregar as impurezas do processo, separando-as dos metais (BALTAZAR, 1995). O agregado pode ser formado em duas etapas do processo siderúrgico, no alto forno – na produção do ferro gusa - ou na aciaria – na produção do aço -, empregando o nome do processo ao resíduo. Na produção do aço são gerados resíduos que giram em torno de 450 kg a 500 kg por tonelada de aço bruto produzido (COSTA 2017). Deste total, as escórias representam mais de 70% (COSTA, 2017), e, assim como o estéril, utiliza de grandes áreas para sua disposição.

Diante do grande volume de resíduos gerados pela indústria, fazem-se necessários métodos de reaproveitamento dos materiais, frente à alternativa da disposição em aterros. O reaproveitamento de resíduos permite a redução da extração de matérias primas, preservando os recursos naturais e zelando pela qualidade ambiental (COSTA 2017).

O estudo e a reutilização dos agregados siderúrgicos em processos já são bastante difundidos mundialmente. De acordo com Hooton (1987), a produção de cimentos com escórias granuladas já eram desenvolvidas em 1863 na Europa. A utilização do agregado para pavimentação é consagrada e tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores em todo o mundo. ElNouthy (2013) estudou o efeito e a possibilidade do uso de um cimento a partir de agregado siderúrgico na produção de unidades de pavimentação interligadas, viabilizando sua utilização para a fabricação de blocos. Passeto (2010) analisou a utilização do agregado siderúrgico como substituto de agregados naturais na composição de base e concreto de asfalto para pavimentos flexíveis na Itália, tendo observado que todos os testes apresentaram melhores características mecânicas do que as dos asfaltos correspondentes com agregado natural e satisfizeram os requisitos de aceitação nas normas técnicas do setor rodoviário italiano, apresentando-se adequado para uso na construção de estradas.

## OBJETIVOS

Com base nesses estudos e conhecida a necessidade de reaproveitamento desses dois resíduos, estéril e agregado siderúrgico, será estudada a hipótese de sua aplicação como insumo para revestimento primário visando melhoria do desempenho de estradas da mineração e consequente contenção ou diminuição da emissão de particulados gerados pelo tráfego de veículos e equipamentos.

Esse trabalho objetiva-se ao estudo da aplicação dos resíduos das indústrias minerária e siderúrgica como alternativa de insumos para a pavimentação, em especial para o revestimento primário.

Para tal, serão analisadas as propriedades físicas e mecânicas dos resíduos e das misturas destes para sua aplicação de acordo com a norma brasileira DNIT nº 141/2010, bem como o desempenho estrutural desse revestimento in loco. Adicionalmente serão monitoradas e comparadas as emissões de PTS antes e após a aplicação do revestimento por tráfego de veículos e equipamentos da mineração.

## METODOLOGIA

O revestimento é a camada destinada a resistir ao desgaste imposto pela ação do tráfego, devendo a sua execução ser procedida de detalhados ensaio de dosagem e acompanhada por rigorosos ensaios de controle (SENÇO, 2007). O revestimento primário constitui-se de uma camada de material disposta diretamente sobre o subleito regularizado. Essa camada é obtida pela compactação de uma mistura de material argiloso e material granular (ODA, 1995). Portanto é necessário que os insumos de estudo, argila e agregado siderúrgico, possuam essas características físicas. Na mistura, o objetivo da adição de argila no material granular é o de atuar como ligante e regularizar a superfície final de rolamento, enquanto que o objetivo do uso do material granular é aumentar o atrito da pista com as rodas dos veículos (ODA, 1995).

Para a realização do experimento, serão utilizados estéril proveniente do processo de obtenção de minério de ferro da Mina do Andrade, em Bela Vista de Minas – MG, e agregado siderúrgico proveniente da Usina Siderúrgica da cidade de João Monlevade-MG, ambas empresas pertencentes à ArcelorMittal Brasil S/A. As unidades foram escolhidas para esse experimento, principalmente, devido à proximidade das unidades (cerca de 5km) e disponibilidade dos materiais.

O trabalho é dividido em duas vertentes, sendo a primeira de análises laboratoriais, e outra, posterior, de aplicação in loco e acompanhamento qualitativo do desempenho do revestimento.

## Ensaio Laboratoriais para o Revestimento Pretendido

Segundo Oda (1995), o agregado ideal para revestimento primário deve possuir proporções em volume em torno de 1 de argila para 2,5 de material granular. Dessa forma, foram realizadas análises de composição granulométrica dos insumos, estéril e agregado siderúrgico, em uma mistura contendo 70% de agregado siderúrgico, e 30% de estéril argiloso como primeiro teste.

Ainda, para a mistura, foram realizados ensaios de compactação – Proctor modificado, índice de suporte Califórnia – CBR, determinação do limite de liquidez e determinação do limite de plasticidade. Todos os ensaios laboratoriais foram executados utilizando-se dos métodos propostos pela ABNT. Esses ensaios foram estabelecidos segundo diretrizes da norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT nº 141/2010, de 17/11/2010, utilizado para a interpretação dos resultados laboratoriais.

Segundo a norma DNIT nº 141/2010, para a correta interpretação dos dados laboratoriais, é imprescindível que seja determinado o tráfego de veículos, a fim de se obter melhor desempenho e durabilidade do revestimento primário. Para tal, a norma recomenda que sejam feitos os cálculos pelo método U.S. Army Corps of Engineers, ou USACE. O revestimento, pelo método USACE, será dimensionado em função do número equivalente (N) de operações do eixo padrão de 8,2tf (SOUZA, 1981), durante o período de projeto escolhido, calculado pela equação 1.

$$N = 365 \times TMDA \times FV \times FR \times FD \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

N = número de operações do eixo padrão de 8,2tf;

TMDA = Tráfego Médio Diário Anual na rodovia

FV = fator veículo da frota (tipo de veículo, com FV tabelado);

FR = fator climático regional (adota-se FR=1,0);

FD = Fator Direcional (considerado como sendo 50% no caso de rodovia de pista simples), (SOUZA, 1981).

Ainda, segundo a norma, a mistura deve possuir composição granulométrica satisfatória a uma das faixas da Tabela 2, de acordo com o número N de tráfego calculado.

**Tabela 2. Composição granulométrica satisfatória por faixa N**

Fonte: norma DNIT nº 141/2010.

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Tolerâncias de faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
Peneiras	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

A fração que passar na peneira nº 40 deve apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%. Quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deve ser maior que 30%. A porcentagem do material que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº

40. O valor do Índice suporte Califórnia para a mistura deve ser maior ou igual para a 60% para  $N \leq 5 \times 10^6$  e maior ou igual a 80% para Número  $N > 5 \times 10^6$ . A expansão deve apresentar valor máximo de 0,5%.

## Aplicação *in loco*

A fase de teste em campo será realizada em uma mineração de minério de ferro, em uma estrada de, aproximadamente, 500m de extensão, com leve declive, porém plana. A mistura será ordenada e compactada, considerando a umidade ideal especificada nos ensaios laboratoriais. A estrada já possui canaletas para a drenagem de água pluvial.

Segundo a norma DNIT nº 141/2010, devem ser efetuadas as seguintes determinações e ensaios antes e após a aplicação do revestimento:

- a) Ensaio de teor de umidade do material, imediatamente antes da compactação para cada 100 m de pista a ser compactada, em locais escolhidos aleatoriamente. A tolerância admitida para o teor de umidade deve ser de 2 pontos percentuais em relação à umidade ótima;
- b) Ensaio de massa específica aparente seca “*in situ*” para cada 100 m de pista determinada, em locais escolhidos aleatoriamente. Como a extensão da pista é inferior a 4000m<sup>2</sup>, devem ser feitas pelo menos cinco determinações para o cálculo do grau de compactação (GC);
- c) Os cálculos do grau de compactação devem ser realizados utilizando-se os valores da massa específica aparente seca máxima obtida no laboratório e da massa específica aparente seca *in situ*, obtida na pista. Não devem ser aceitos valores de grau de compactação inferiores a 100%.

A espessura da camada compactada não deve ser inferior a 10 cm, nem superior a 20 cm (norma DNIT nº 141/2010).

## Avaliação do Desempenho do Revestimento

Após a aplicação, o desempenho do revestimento será avaliado considerando o tráfego de máquinas e equipamentos. O desempenho estrutural será avaliado de forma qualitativa, com o monitoramento visual de defeitos na pista, como corrugações, buracos, trilhas de rodas e segregação de agregados.

O monitoramento quantitativo da emissão de particulados também será avaliado, antes e após a aplicação do revestimento. Ao longo da estrada de teste. Preliminarmente, foram instalados 4 pontos de monitoramento, sendo 3 deles para a análise da taxa de poeira sedimentáveis total (PS01, PS02 e PS03) e 1 para a análise de particulados totais em suspensão – PTS (PTS01). Uma miniestação meteorológica também foi instalada, visto que as condições climáticas são de extrema importância para esse monitoramento, uma vez que não é aconselhável o monitoramento em dias úmidos e chuvosos.

A medição da taxa de poeira sedimentável total é realizada através do método do jarro de poeira. São vasilhames instalados em locais definidos e expostos ao tempo por um período de 30 dias. Após esse período, o material presente nos jarros é encaminhado para análise laboratorial, onde é pesado. O resultado é obtido em g/m<sup>2</sup>.

Para o monitoramento do PTS, é utilizado um amostrador de grandes volumes, Hi-Vol, que direciona o fluxo do ar ambiente por um filtro, coletando as partículas em suspensão no ar. Posteriormente ao tempo determinado de coleta, o material é encaminhado para pesagem em laboratório, e o resultado é dado em µg/m<sup>3</sup>. Foi estabelecida a realização de amostragens a cada 6 dias, com 24 horas de duração, pelo período de 30 dias – os mesmos dos monitoramentos da taxa de poeira sedimentável total.

Além das normas ABNT para os ensaios, também é considerada a norma US EPA.

Para a análise dos resultados, serão utilizadas as normativas CONAMA 03/90 e IQA para a análise das PTS e COPAM 01/81 para a poeira sedimentável, que, respectivamente, dispõem sobre padrões de qualidade do ar, e sobre a proteção, conservação e melhoria do meio ambiente no Estado de Minas Gerais, considerando a necessidade de operacionalizar imediatamente a proteção ambiental no Estado, e fixa padrões para qualidade do ar.

## RESULTADOS

### Resultados Preliminares

A fim de se conhecer a relação entre a emissão de particulados e o tráfego de veículos em estrada não pavimentada, em meados de agosto e setembro de 2017, foram realizados testes preliminares de qualidade do ar ao longo da pista que servirá de teste para o revestimento pretendido. Esses testes são de grande valia para a comparação de dados previamente e posteriormente à aplicação da mistura.

Para o monitoramento de poeira sedimentável total, considerada a metodologia ABNT para a coleta e análise, foram dispostos 3 jarros em pontos previamente definidos ao longo da estrada teste, denominados PS01, PS02 e PS03 por 30 dias. Após esse período, os recipientes foram coletados e encaminhados para laboratório para pesagem, configurando os resultados apresentados na Tabela 4.

**Tabela 04: Resultados das análises de poeira sedimentável**

Ponto	Amostra	Data	Concentração (g/m <sup>2</sup> /30dias)	Limite segundo DN COPAM 01/81
PS01	8795/17-01	11/08/17 a 12/09/17	65,3	10 g/m <sup>2</sup> /30dias
PS02	8795/17-02		71,3	
PS03	8795/17-03		50,6	

A Deliberação Normativa n.º.01, de 26 de maio de 1981, estabelece para a poeira sedimentável o limite de 10 g/m<sup>2</sup>/30dias para áreas industriais, e 5 g/m<sup>2</sup>/30dias para as demais áreas, inclusive residenciais e comerciais. Dessa forma, observa-se que as emissões de poeira sedimentável ultrapassaram o limite em todos os pontos amostrados, com um pico de 7 vezes o valor máximo permitido pela legislação para áreas industriais.

Para o monitoramento de partículas totais em suspensão (PTS), considerada a metodologia ABNT para coleta e análise da amostra, foi realizada amostragem por 30 dias, com duração de 24 horas a cada 6 dias. O material retido em filtro, logo após cada uma das amostragens, foi encaminhado para laboratório para pesagem, configurando os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6.

**Tabela 5: Resultados das análises de PTS e os limites estabelecidos pela CONAMA 03/90**

Ponto	Amostra	Data	Concentração (µg/m <sup>3</sup> )	Limite segundo CONAMA 03/90
PTS01	9125/17-01	23/08/2017	142	240 µg/m <sup>3</sup> (Concentração Máxima Diária). Não deve ser excedido mais de uma vez ao ano.
	9126/17-01	29/08/2017	54	
	9127/17-01	05/09/2017	182	
	9128/17-01	11/09/2017	176	
	9129/17-01	17/09/2017	201	
	9130/17-01	23/09/2017	148	
	9131/17-01	29/09/2017	112	

**Tabela 6: Resultados das análises de PTS e os limites estabelecidos pela metodologia IQA (US EPA)**

Ponto	Amostra	Data	IQA	Qualidade do ar (US EPA)
PTS01	9125/17-01	23/08/2017	70	REGULAR
	9126/17-01	29/08/2017	34	BOA
	9127/17-01	05/09/2017	82	REGULAR
	9128/17-01	11/09/2017	80	REGULAR
	9129/17-01	17/09/2017	88	REGULAR
	9130/17-01	23/09/2017	72	REGULAR
	9131/17-01	29/09/2017	61	REGULAR

Os resultados apresentados na Tabela 5 foram analisados segundo a normativa CONAMA 03/90, que determina o limite de amostragem em  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , e os resultados da Tabela 6 segundo o modelo IQA.

Pela CONAMA 03/90, não houve extrapolação dos valores em nenhum dos dias monitorados. No entanto, pelo método IQA, apenas em um dia (29/08/2017) a qualidade do ar foi considerado boa, sendo os demais dias monitorados – 85,7% - considerados regulares.

Para a interpretação das análises laboratoriais do revestimento de estudo, foram utilizadas as diretrizes da norma DNIT nº 141/2010, que define a sistemática a ser empregada na execução da camada de base do pavimento utilizando solo estabilizado granulometricamente, bem como os limites que devem ser considerados nas análises físicas para determinação de um revestimento primário ótimo. A norma também impõe os requisitos para a aplicação do teste in loco.

Inicialmente, foi realizada a análise granulométrica dos insumos estéril e agregado siderúrgico, obtendo a mistura uma classificação como pedregulho areno argilo siltoso, viabilizando, dessa forma, a utilização dos insumos para o revestimento do tipo primário.

O agregado retido na peneira nº 10, foi caracterizado como constituído de partículas duras e resistentes, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, e isento de matéria vegetal ou outra substância prejudicial, conforme determinado na norma DNIT 141/2010 (Tabela 7).

**Tabela 7. Composição do agregado retido na peneira nº 10 da análise granulométrica**

Composição	Pedregulho	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila	Total
Definição (mm)	>4,8	4,8 – 2,0	2,0 – 0,42	40 - 200	0,05 – 0,005	< 0,005	-
Valor Retido (%)	25,96	14,67	19,77	39,60	-	-	100

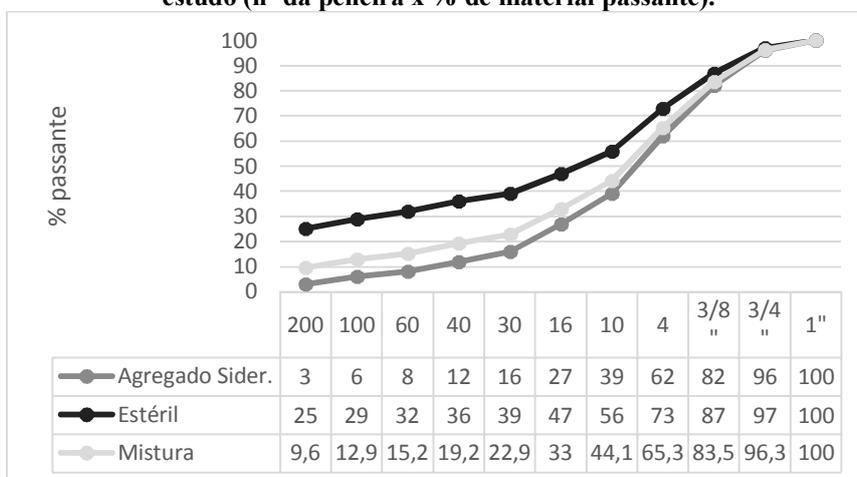
Posteriormente, foram realizados, também para a mistura, análises para a obtenção da massa específica aparente seca máxima ( $\rho_d$ ), umidade ótima (w), CBR, expansão, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP), com os resultados apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8. Resultados das análises laboratoriais.**

Análise	$\rho_d$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	W (%)	CBR (%)	Expansão (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Resultado	2,292	12,6	102,1	0	60	34	25

A análise da composição granulométrica dos insumos argila e agregado siderúrgico e da mistura na proporção pretendida também foi efetuada, com os resultados apresentados no Gráfico 1. Essa análise é importante para a definição da faixa de trabalho do projeto (norma DNIT nº 141/2010) e a verificação da do desempenho estrutural do revestimento pretendido.

**Gráfico 1. Composição granulométrica dos insumos e mistura de agregados pretendidos para o revestimento em estudo (nº da peneira x % de material passante).**



Para o cálculo do número N, foi considerado período de projeto (P) de 1 (um) ano e volume médio diário de tráfego apresentado na Tabela 9, com predominância de caminhões médios e pesados do tipo 2C, 3C e 4C. Foram adotados os valores de FR para carga máxima permitida por veículo.

- Caminhões com dois eixos, sendo o primeiro eixo simples, com rodas simples, e o segundo com eixo simples e rodas duplas. Dessa forma, cada veículo possui 2 eixos e 6 pneus, classificado como 2C;
- Caminhões com dois eixos, sendo o primeiro eixo simples, com rodas simples, e o segundo com eixo duplo tandem. Dessa forma, cada veículo possui 3 eixos e 10 pneus, classificado como 3C;
- Caminhões com dois eixos, sendo o primeiro eixo simples, com rodas simples, e o segundo com eixo triplo tandem. Dessa forma, cada veículo possui 4 eixos e 14 pneus, classificado como 4C.

**Tabela 9. Valores utilizados para o cálculo do fator N**

Fonte: SOUZA, 1981

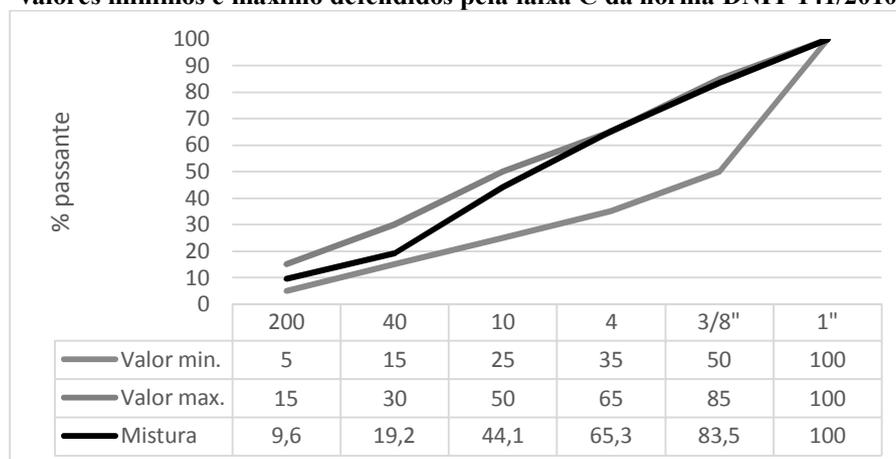
Classificação do veículo	TMDA	FV	FR	FD
2C	8	7,738	1,0	0,5
3C	16	17,438		
4C	138	16,930		

A partir do cálculo da equação 1, obteve-se o valor do fator  $N > 5 \times 10^6$ .

Para a verificação da aceitação da faixa granulométrica da mistura para um revestimento viável, foram comparados os resultados da composição granulométrica da mistura de agregados pretendidos para o revestimento em estudo (Gráfico 1) e a composição granulométrica satisfatória por faixa N (Tabela 2). Os resultados foram satisfatórios para a faixa C definida pela norma DNIT nº 141/2010 (Gráfico 2), caracterizando a proporção do material (70% agregado siderúrgico e 30% estéril argiloso).

Ainda, dentro do estudo da composição granulométrica da mistura, a norma cita que a porcentagem do material que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar em mais de 2/3 a porcentagem que passa na peneira nº 40. Nas análises, foi mensurado um percentual de material passante de 9,6 e 19,2 para as peneiras nº 200 e nº 40, respectivamente, atendendo a essa condição.

**Gráfico 2. Comparação dos valores da composição granulométrica obtida para a mistura em adequação aos valores mínimos e máximo defendidos pela faixa C da norma DNIT 141/2010.**



Para a utilização da mistura na proporção sugerida, o resultado da análise do CBR, considerando  $N > 5 \times 10^6$ , deveria ser maior ou igual a 80%, e o da expansão menor ou igual a 0,5. Conforme os valores apresentados na tabela 8 para CBR e expansão iguais a 102,% e 0%, respectivamente, as condições foram alcançadas, não havendo, inicialmente, necessidade de ensaios com outras proporção dos insumos sugeridos.

## Próximas etapas

Deverá ser definida metodologia para a aplicação do revestimento no trecho experimental da estrada pretendida, considerando a compactação e umidade definidas como ótimas no ensaio laboratorial.

Após a aplicação do revestimento e liberação do tráfego de veículos, deverão ser analisados o desempenho estrutural da estrada, bem como realizados novos monitoramentos da qualidade do ar para a comparação das emissões de particulados em solo não pavimentado e solo revestido.

## Resultados Pretendidos

Após a finalização dos ensaios laboratoriais da mistura pretendida, bem como confirmadas as proporções dos insumos necessários, será realizada a aplicação do revestimento em campo conforme metodologia ainda em fase de definição.

O revestimento aplicado deverá ser monitorando qualitativamente quanto ao seu desempenho estrutural, bem como a sua taxa de emissão de particulados em virtude do tráfego, a fim de comprovação de sua eficiência para o fim proposto.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo a apresentação dos resultados preliminares de um estudo que objetiva à a avaliação da viabilidade da utilização de resíduos siderúrgicos e da mineração em obras de pavimentação, visando a valorização desses materiais e contribuindo para a melhora do desempenho estrutural de estradas da mineração e a redução de impactos ambientais relacionados à emissão de particulados pelo tráfego. Considerando as exigências normativas, a mistura estudada atendeu aos requisitos técnicos. A próxima etapa consiste na implantação de um trecho experimental, que terá seu desempenho avaliado qualitativamente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BALTAZAR, R. P. **Caracterização de uma rede municipal de estradas não pavimentada**. Tese (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 186. 1995

2. BRASIL. **Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>. Acesso em: 23 mar. 2018.
3. COSTA, K.A. et al. **Study of controlled leaching process of steel slag in soxhlet extractor aiming employment in pavements.** Matéria (Rio J.) vol.22 no.2 Rio de Janeiro, 2017 Epub June 01, 2017.
4. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2010) DNIT ES 141/2010: **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010, 9 p.
5. ELNOUHY, H. *et al.* **Properties of paving units incorporating slag cement.** HBRC Journal, 9 (1) (2013), pp. 41-48
6. HOOTON, R. D. **The Reactivity and Hydration Products of Blast Furnace Slag.** In: MALHOTRA, V. M. **Supplementary Cementing Materials for Concrete.** Canada centre for mineral and energy technology (CANMET), 1987. cap 4, p. 247 – 280.
7. IBRAM. **Relatório Anual de Atividades – Junho de 2016 a Junho de 2017.** 2017. Disponível em: < [http://portaldaminerao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2017/08/WEB\\_REL\\_IBRAM\\_2017.pdf](http://portaldaminerao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2017/08/WEB_REL_IBRAM_2017.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2018.
8. INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados do setor 2016.** 2017. Disponível em: < <http://www.acobrasil.org.br/site2015/dados.asp>>. Acesso em: 06 nov. 2017.
9. MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 1, de 26 de maio de 1981.** Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=88>. Acesso em: 23 mar. 2018.
10. ODA, S. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Viçosa. Viçosa, p. 93. 2001.
11. PASSETO, M. *et al.* **Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags.** Journal of Hazardous Materials, Volume 181, Issues 1–3, 15 September 2010, Pages 938-948.
12. SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** Vol. 1. 2ª ed. São Paulo: Pini, 2007, 761p.
13. SOUZA, M. L. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis.** 1981. IPR/DNER. 3ª ed. Rio de Janeiro. 1981.
14. TONIETTO, A.; SILVA, J. J. M. C. **Valoração de danos nos casos de mineração de ferro no brasil.** Revista brasileira de criminalística, v.1, n.1, pp. 31-38. 2011
15. US EPA. **Air quality index: a guide to air quality and your healthy.** U.S. Environmental Protection Agency, ago. 2009. Disponível em [https://www3.epa.gov/airnow/aqi\\_brochure\\_02\\_14.pdf](https://www3.epa.gov/airnow/aqi_brochure_02_14.pdf). Acesso em: 23 mar. 2018.