

Utilização de estéreis e rejeitos de minério de ferro na infraestrutura de pavimentos rodoviários

Evandro Moraes da Gama¹
Bruno Duarte Cândido²



10.56238/rcsv14n5-020

RESUMO

O aumento na geração de resíduos provenientes das atividades de mineração tem motivado reflexões a respeito da sustentabilidade frente aos graves problemas ambientais e sociais causados pela disposição de tais produtos no meio ambiente. Atualmente, a cultura de disposição dos rejeitos e estéreis de mineração de ferro se baseia na construção de barragens de rejeito e estoque em pilhas de estéril. Estes procedimentos vão totalmente contra a um desenvolvimento sustentável por parte dos empreendimentos minerários, pois demandam grandes áreas do meio ambiente para sua existência, além de não ter finalidade alguma e colocar em risco a vida de populações e biomas vizinhos às minas. Paralelamente, o Brasil ainda passa por outro problema que consiste em melhorar a atual situação das rodovias, em termos de qualidade e de quantidade de estradas pavimentadas. Esse fato compromete seriamente o desenvolvimento econômico interno do país, uma vez que as rodovias são o principal meio de transporte de cargas e representam grande importância para investimentos no setor da indústria em geral. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo propor um destino alternativo para resíduos de mineração de ferro através do seu emprego em camadas de pavimentos rodoviários. A metodologia foi baseada na análise física e mecânica de misturas contendo tais resíduos em ensaios de compactação, CBR e expansão, bem como a posterior comparação dos resultados com as normas vigentes no país, impostas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Os resultados obtidos foram bem satisfatórios, alcançando elevados índices CBR e expansões dentro dos limites exigidos.

Palavras-chave: Rejeitos de Minério de Ferro, Pavimentos Rodoviários, Infraestrutura, Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade que, embora seja de extrema necessidade ao ser humano, pode causar danos irreparáveis ao meio ambiente. Diante disso, a busca pela sustentabilidade enquanto se realiza uma atividade desse porte é fundamental. Atualmente, porém, têm sido difícil conciliar esses dois pilares.

A geração constante de quantidades significativas de resíduos provenientes da atividade mineradora implica em grandes impactos ambientais e sociais. Dois dos maiores desses impactos são, sem dúvida, a implantação de pilhas de estéril e a construção de barragens de rejeito, uma vez que demandam o desmatamento de áreas enormes do ambiente ao redor da mina. Além disso, a existência

¹ Professor Titular Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia Universidade Federal de Minas Gerais

² Engenheiro Civil Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia

de barragens de rejeito põe em risco a vida de populações e biomas vizinhos às minas, uma vez que seu rompimento é um risco real.

Assim, espera-se que todo estudo que tenha como propósito minimizar os problemas ambientais e sociais causados pelas atividades do setor será de grande importância para as gerações futuras.

Diante disso, o presente trabalho propõe um destino alternativo a estéréis e rejeitos de mineração de ferro através do seu uso nas sub-camadas de pavimentação (base, sub-base e reforço do subleito) visando proporcionar pavimentos de melhor qualidade e menor custo.

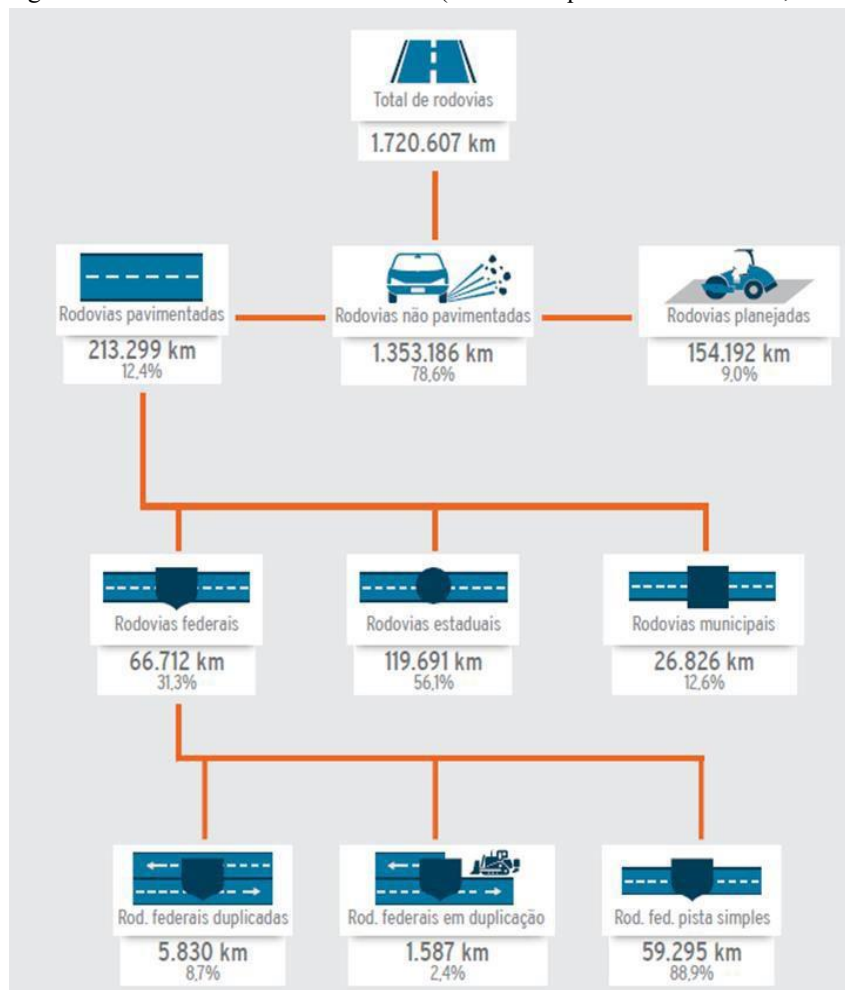
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS TEMAS

1.2.1 Breve panorama da condição das rodovias brasileiras

Um dos grandes desafios a vencer pelo Brasil na área de infra-estrutura é melhorar a situação das estradas existentes. O péssimo estado das rodovias provoca centenas de mortes a cada ano e limita seriamente as possibilidades de crescimento econômico do país (Silva, 2010).

A figura abaixo ilustra, em números, como estão distribuídas as rodovias pelo país segundo dados da CNT do ano de 2015.

Figura 1.1 – Malha rodoviária brasileira (Fonte: Pesquisa CNT Rodovias, 2015).



No ranking de qualidade, somente entre países da América do Sul, o Brasil fica em sexto lugar, atrás de Chile, Uruguai, Argentina, Bolívia e Peru. Os investimentos federais em infraestrutura de transporte como porcentagem do PIB vêm caindo sistematicamente desde a década de 1970 quando era de 1,84%, passando a 0,29% em 2014. Somente entre 2010 e 2014, estes investimentos públicos sofreram um encolhimento de 30,27% (Gama, 2017).

Tendo em vista as condições em que se encontra a malha rodoviária nacional, nota-se a necessidade de iniciativas e investimentos neste setor de infra-estrutura que tenham como finalidade a construção de estradas que proporcionem melhores condições de rolamento quanto à comodidade, à qualidade e à segurança.

Diante desse contexto, a aplicação de resíduos de mineração na constituição de pavimentos pode representar uma alternativa viável para a redução dos passivos ambientais causados pelos mesmos, além de contribuir imensamente para a redução dos custos para o Estado referentes ao consumo de agregados convencionais para tal fim pela construção civil.

Para a construção de rodovias duráveis, a exemplo daquelas nos países mais desenvolvidos, é necessário aumentar a resistência de camadas da base, através da adição de cimento ou outro aglomerante, criando a mistura solo-cimento ou solo-cal, diminuindo a entrada de água e melhorando a resistência a cargas aplicadas (Gama, 2017).

Para a obtenção de misturas solo-cimento ou solo-cal de alta qualidade com melhor relação custo-benefício, pode-se substituir a parte do cimento pela pozolana obtida através do processamento de rejeitos de minério de ferro. Em estradas vicinais, a construção e compactação adequadas de uma base de solo-cimento substituem razoavelmente a pavimentação final com asfalto, proporcionando a existência de “estradas de terra” com alta qualidade e durabilidade e a um menor custo (Gama, 2017).

1.2.2 Considerações iniciais sobre estéril e rejeito de minério de ferro

A mineração pode ser entendida como o processo de extração de produtos minerais de valor econômico encontrados na crosta terrestre com o intuito de fornecer produtos à população.

Em Minas Gerais imensas reservas de minério de ferro estão localizadas na região conhecida como Quadrilátero Ferrífero que compreende uma área de aproximadamente 7000 km². Nesta região inúmeras empresas mineradoras exploram intensamente o mineral resultando em significativos volumes de resíduos, compreendendo os estéreis e os rejeitos (Pereira, 2005).

Os estéreis são rochas sem valor econômico, retiradas junto à rocha rica durante as atividades de lavra, onde são comumente depositados sob a forma de pilhas em áreas verdes e valiosas para o meio ambiente. Essas rochas (por exemplo, metabásica e filito, no caso da mineração do ferro) possuem

filossilicatos (argilas) com propriedades pozolânicas (capacidade de reagir com cal hidratada na presença de água formando compostos com propriedades cimentícias).

Já os rejeitos são coprodutos oriundos do processo de beneficiamento do minério, os quais são dispostos diretamente sob a forma de polpa ou lama em grandes reservatórios conhecidos como barragens de rejeito. Durante as atividades de concentração do minério de ferro, na qual ocorre a separação seletiva dos minerais, podem ser gerados dois tipos de resíduos denominados rejeito granular, de natureza arenosa, e rejeito fino (lama), de natureza argilosa, ambos contêm filossilicatos, com propriedades pozolânicas e pigmentantes.

A Figura 1.2 mostra de maneira simplificada e apenas ilustrativa o fluxograma típico de um processo de mineração de ferro para maior compreensão do processo.

Figura 1.2 – Esquema típico do processo de mineração de ferro (Fonte: Silva, 2010).



A intensa exploração das jazidas e o aprimoramento das técnicas de lavra e de beneficiamento, ao longo do tempo, promovem o aproveitamento de minérios com teores cada vez menores elevando, conseqüentemente, a geração de estéreis e rejeitos, exigindo áreas maiores para sua deposição. O estado de Minas Gerais é responsável por uma geração considerável de rejeitos de mineração, o que demanda cada vez mais investimentos em estruturas de contenção para sua disposição.

Minerações em áreas urbanas produzem impactos ambientais que são inerentes à atividade, gerando desconforto à população local e possíveis conflitos socioambientais. As implicações ambientais envolvidas no processo de mineração de ferro, a proximidade de áreas urbanas e a pressão da opinião pública têm dificultado o licenciamento de áreas para a construção de novas barragens ou

de alteamento de barragens existentes, despertando a necessidade de se investigar novos métodos para o reaproveitamento dos rejeitos (Guimarães, 2011).

A enorme quantidade e volume de estéreis e rejeitos da mineração e processamento do minério de ferro, somada à falta de incentivos e estratégias corporativas para seu reaproveitamento, levaram à utilização de estruturas para seu armazenamento, sobretudo barragens e pilhas, as quais geram custos elevados de construção, manutenção e descomissionamento ao minerador, sem qualquer geração de retorno econômico ou social (Gama, 2017).

Quando esses depósitos ficam muito volumosos, tornam-se, por si mesmos, instáveis e sujeitos a escorregamentos localizados. A constante ruptura dos sistemas de contenção desses materiais vem causando considerável impacto ao meio ambiente, como por exemplo, a ruptura da Barragem de Fundão em Mariana/MG em novembro de 2015 – um dos maiores acidentes ambientais da história do Brasil (Martins, 2017). No dia 25 de janeiro de 2019, às 12h28, a barragem da Mina Córrego do Feijão, da mineradora Vale, em Brumadinho, se rompeu, causando a morte de 272 pessoas e espalhando resíduos de minério pela bacia do Rio Paraopeba. Em 2023, a tragédia completa quatro anos os anos de 1969 e 2001 em São Sebastião das Águas Claras - MG, o rompimento de uma barragem de contenção de rejeitos de minério, provocou a morte de operários e um grave impacto ambiental, que afetou toda a bacia do município, comprometida com a imensa deposição deste rejeito de minério no leito de seus córregos e riachos. O acidente assoreou o Córrego Alegria, um dos principais cursos d'água da região (Silva, 2017).

A transformação dos estéreis, rejeitos e lamas gerados pelas mineradoras em matéria prima para produtos a serem utilizados em obras de engenharia, promove sinergia entre o setor minerário com o parque da construção civil, otimizando a utilização da matéria prima, incorporando novos mercados e geração de receita às mineradoras, diminuindo os riscos e danos ambientais, transformando passivos ambientais e seus custos em receita, maximizando o uso dos recursos explorados e criando novos empregos (Gama, 2017).

Uma alternativa para a destinação de resíduos gerados em usinas de minério de ferro, com características argilosas, é a produção de material pozolânico calcinado em um processo de calcinação Flash. Estudos prévios de especialistas na área possibilitaram o desenvolvimento desta substância, que já vem sendo utilizada em países como a França. Este material tem aplicação no setor siderúrgico, como aglomerante para a produção de pelotas, e no setor de construção civil, podendo ser utilizado na pavimentação de vias, entre diversas outras utilidades (Gama, 2016).

1.2.2.1 Breves considerações sobre materiais pozolânicos

Os materiais pozolânicos são materiais silicosos e argilosos finamente divididos que, em

temperatura ambiente e na presença da água, combinam-se com cal hidratada para formar compostos cimentícios estáveis (Manual de pavimentação do DNIT, 2006).

Esses materiais podem substituir de 10% a 40% do cimento nos concretos, melhorando sua trabalhabilidade e reduzindo a exsudação, a segregação e o calor de hidratação. O aumento da impermeabilidade e da resistência às águas agressivas dos concretos em que se introduzem estes materiais recomendam seu uso em grandes estruturas encontradas em solos (condições agressivas) (Manual de pavimentação do DNIT, 2006).

Os materiais pozolânicos mais comumente empregados são: microssílica, cinzas volantes, cinzas vulcânicas, terras diatomáceas tratadas pelo calor, xisto bruto ou argilas tratadas pelo calor (Manual de pavimentação do DNIT, 2006).

1.2.2.2 A calcinação flash aplicada aos rejeitos e estéreis de mineração de ferro

A calcinação flash é uma instalação de tratamento térmico rápido para materiais pulverizados. Essa técnica permite transformar mineralogicamente ou quimicamente certos produtos. O tratamento térmico não dura mais que alguns segundos e é designado como flash no caso de partículas pulverizadas sofrerem uma transformação mineralógica (Martins, 2017)

No caso da mineração de ferro, a calcinação é ideal para a produção do metacaulim, a partir da caulinita, argilo-mineral retirado junto à lavra do minério. Essa argila está associada a diferentes minerais (filossilicatos, quartzo e óxidos de ferro) em proporções variáveis de acordo com o depósito mineral, o Caulim.

O Caulim é uma rocha de capeamento de várias reservas minerais como itabirito (rocha fonte de minério de ferro) e calcário. É formada por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente a caulinita (DNPM, 2018).

Segundo Gama (2016), o processo inovador baseado em uma rápida calcinação, aplicado aos estéreis e lamas de barragens, desenvolve importantes propriedades tais como, o aumento da superfície específica e o aumento do índice de pozolanicidade (capacidade de reagir com Ca(OH)_2 na presença de água) do material, transformando-o em um aglomerante ativo. Este aglomerante é ligante de alta resistência, utilizado no tratamento de solos, em base e sub-base para estradas bem como adição em concretos, argamassas e materiais cerâmicos.

1.2.2.3 O uso de estéreis e rejeitos na pavimentação

No Brasil, ainda há uma carência de pesquisas e trabalhos publicados que abordam o uso de rejeito de minério de ferro em pavimentação, em comparação aos resíduos industriais (Silva, 2010). O material pozolânico proveniente de rejeitos e estéreis de mineração pode ser aplicado na pavimentação

de vias. Este material é utilizado partindo da base e sub-base e capeamento asfáltico a frio durante o processo em questão. Tal medida se apresenta como mais uma solução viável e sustentável para o problema do acúmulo de resíduos de mineração em barragens e diques nas usinas (Gama, 2016).

Um inconveniente das estradas construídas a partir de argila, areia e lodo (solos considerados fracos) é que elas perdem suas propriedades de resistência com o passar do tempo, à medida que ocorre um aumento da concentração de água. Sabendo que há uma variação na concentração de água nestes materiais ao longo do ano, a durabilidade da via fica comprometida, tornando mais cara a manutenção da mesma. Nesse contexto, uma vantagem do uso de material pozolânico na infra-estrutura de rodovias está no fato de que ligantes produzidos a partir da calcinação Flash dos estéreis e rejeitos de mineração, aplicados na base e sub-base do pavimento melhora consideravelmente as propriedades do solo, aumentando sua resistência e durabilidade e diminuindo sua suscetibilidade a entrada de água.

Na França já está consolidado o uso de materiais especiais produzidos a partir de estéreis e rejeitos de mineração como material de construção aplicáveis à estruturação de pavimentos rodoviários. Há de se destacar que, no caso da França, a tecnologia é normatizada, legalizada e referenciada pelos organismos públicos e privados para o uso e emprego em construções de pavimentos e vias de acesso. Portanto, sua migração para o Brasil passaria apenas pelo incentivo de seu uso nas esferas federal, estaduais e municipais, visto que os materiais e suas aplicações já se encontram normatizadas pela ABNT e pelo DNIT (Gama, 2017).

1.2.3 Considerações iniciais sobre pavimentos

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), pavimento de uma rodovia é uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infra-estrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito. As camadas são constituídas de materiais de diferentes resistências e deformabilidades que são colocadas em contato resultando disso um elevado grau de complexidade no que diz respeito ao cálculo de tensões e deformações atuantes nas mesmas, provenientes das cargas impostas pelo tráfego.

1.2.3.1 Classificação dos pavimentos

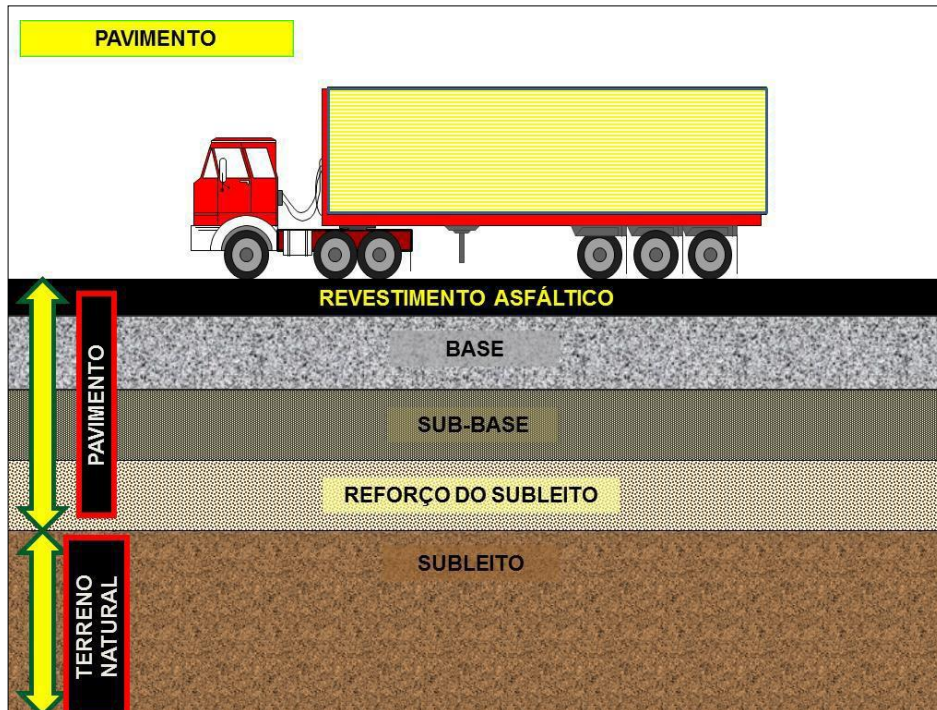
De uma forma geral, os pavimentos podem ser classificados em: flexíveis, rígidos e semi-rígidos (DNIT, 2006).

1.2.3.1.1 Pavimentos flexíveis

Pavimentos flexíveis são aqueles constituídos por camadas que não trabalham à tração.

Normalmente são constituídos de revestimento betuminoso delgado sobre camadas puramente granulares. A capacidade de suporte é função das características de distribuição de cargas por um sistema de camadas superpostas, onde as de melhor qualidade encontram-se mais próximas da carga aplicada. Um exemplo de uma seção típica pode ser visto na figura 1.3 a seguir.

Figura 1.3 – Estrutura típica de um pavimento flexível (Silva, 2017).

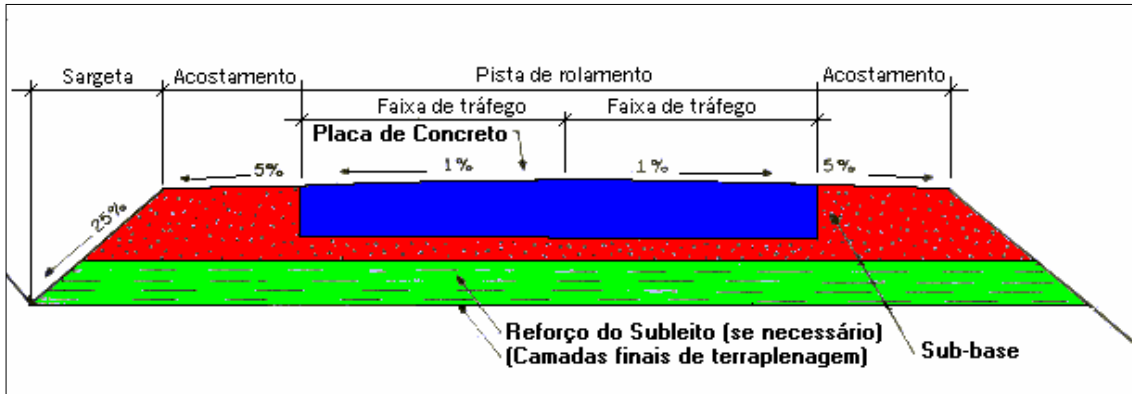


No dimensionamento tradicional são consideradas as características geotécnicas dos materiais a serem usados, e a definição da espessura das várias camadas depende do valor do Índice de Suporte Califórnia (CBR) e do mínimo de sollicitação de um eixo padrão (8,2 ton.).

1.2.3.1.2 Pavimento rígido

Os pavimentos rígidos são constituídos por camadas que trabalham essencialmente à tração. Seu dimensionamento é baseado nas propriedades resistentes de placas de concreto de cimento Portland, as quais são apoiadas em uma camada de transição, a sub-base. A determinação da espessura é conseguida a partir da resistência à tração do concreto e são feitas considerações em relação à fadiga, coeficiente de reação do sub-leito e cargas aplicadas. São pouco deformáveis com uma vida útil maior. O dimensionamento do pavimento flexível é comandado pela resistência do sub-leito e do pavimento rígido pela resistência do próprio pavimento (Marques, 2016). Uma seção característica deste tipo pode ser visto na figura 1.4.

Figura 1.4 – Seção transversal típica de um pavimento rígido (Marques, 2016).



1.2.3.1.3 Pavimento semi-rígido

Um pavimento semi-rígido se trata de uma situação intermediária entre os pavimentos rígidos e flexíveis. É o caso das misturas solo-cimento, solo-cal, solo- betume dentre outras, que apresentam razoável resistência à tração. Quando se tem uma base cimentada sob o revestimento betuminoso, o pavimento é dito semi-rígido. O pavimento reforçado de concreto asfáltico sobre placa de concreto é considerado como pavimento composto. Abaixo, a figura 1.5 ilustra um pavimento dito semi-rígido.

Figura 1.5 – Seção transversal típica de pavimento semi-rígido (Fonte: ecivilnet.com).



Esta última é a categoria de pavimentos que mais se adequa ao propósito deste trabalho (pavimentos semi-rígidos), pois aceita materiais alternativos em sua composição.

1.2.4 Nomenclatura das camadas dos pavimentos

Segundo o DNIT (2006) as principais camadas constituintes da estrutura do pavimento e as

características dos materiais usados na execução são:

- Revestimento: camada da superfície, impermeável, que recebe a ação direta do tráfego de veículos e destinada a melhorá-la, quanto à segurança, conforto e resistir ao desgaste.
- Base: Camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento.
- Sub-base: Camada diretamente inferior à base. Pode ser usada para regularizar a espessura da base.
- Reforço do sub-leito: É a camada de espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente, de acordo com o dimensionamento do pavimento, fazendo parte integrante deste e que, por circunstâncias técnico econômicas, será executada sobre o sub-leito regularizado. Serve para melhorar as qualidades do sub-leito e regularizar a espessura da sub-base.
- Regularização do sub-leito (nivelamento): É a operação destinada a conformar o leito, transversal e longitudinalmente. Poderá ou não existir, dependendo das condições do leito. Compreende cortes ou aterros até 20 cm de espessura.
- Subleito: É o terreno de fundação onde se constrói o pavimento.

1.2.5 Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas

Segundo o DNIT (2006) as bases e sub-bases podem ser agrupadas de acordo com o esquema abaixo:

Figura 1.6 – Esquema de classificação das bases e sub-bases (Manual de Pavimentação do DNIT, 2006).



Diante do esquema exposto, percebe-se que a adição de cal a um material é uma técnica usada para promover a estabilização do solo resultante, o que está de acordo com o propósito deste trabalho

1.2.6 Estabilização de solos

Segundo Vargas (1997), estabilizar um solo é utilizar um processo de forma a obter uma maior resistência às solicitações de carga, ações climáticas e desgaste. Esta técnica é empregada quando não se dispõe de material com competência adequada ou quando grandes distâncias entre a jazida e a obra tornam os custos com transporte elevados para serem usados em camadas de pavimentos, reforços de fundações ou estabilidade de taludes.

Sob o ponto de vista rodoviário, estabilizar um solo é submetê-lo a tratamentos com ou sem a presença de aditivos, de forma que as camadas dos pavimentos: subleito, sub-base e base, sejam capazes de suportar as condições de tráfego impostas - sem deslocamentos consideráveis - resistindo ao desgaste e às intempéries sem degradação (Baptista, 1976).

Toda estabilização envolve o estudo dos solos, sendo necessário caracterizar estes materiais e suas propriedades. Portanto, o emprego de materiais em proporções adequadas, juntamente com o domínio das técnicas de estabilização é de fundamental importância na construção de estradas, impactando diretamente no custo da obra e conseqüentemente no cronograma.

Segundo Oliveira (2010), o processo de estabilização dos solos tem por objetivo melhorar as características geotécnicas para suportar a obra projetada, ou seja, aumentar o ganho de resistência e estabilidade nas propriedades do solo, e apresenta as seguintes definições:

- Solo estabilizado: quando se tem um ganho significativo de resistência com o emprego do aditivo;
- Solo melhorado: quando a adição busca melhoria de outras propriedades (redução da plasticidade e da expansão e contração), sem um ganho significativo de resistência.

Assim, pode-se dizer que os principais métodos de estabilização de solos são a mecânica, a granulométrica e a química.

2 OBJETIVOS E RELEVÂNCIA

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral propor um destino alternativo para rejeitos e estéréis de mineração de ferro através do seu uso na infra-estrutura de pavimentos rodoviários (base, sub-base e reforço do subleito) visando proporcionar pavimentos de melhor qualidade e menor custo, haja vista os problemas causados atualmente para o descarte e deposição desses materiais no meio ambiente e as más condições atuais das estradas do país.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Verificar o comportamento físico e mecânico de misturas contendo rejeito e estéril de mineração de ferro, nas devidas proporções, através dos ensaios de compactação, CBR, e expansão.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

O material utilizado neste estudo foi doado pela Mineração Samarco assim como a caracterização mineralógica e a distribuição granulométrica do rejeito utilizado.

A constituição informada do material foi a seguinte:

- 85% de rejeito arenoso de minério de ferro
- 15% de metakflex (material ligante constituído de 60% de rocha metabásica calcinada proveniente dos estéreis retirados junto à lavra do minério de ferro + 40% de cal hidratada)

Em termos de massa, a proporção da amostra foi de:

- 35 kg: massa total da amostra
- 29,75 kg: rejeito arenoso
- 3,15 kg: metabásica
- 2,1 kg: cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$

3.1.2 Caracterização mineralógica do rejeito arenoso

Os minerais que constituem a porção de rejeito utilizada estão mostrados na tabela 3.1 abaixo:

Tabela 3.1 – Caracterização mineralógica da amostra.

Amostra – Rejeito arenoso	
Mineral	%
Caulinita	9,1
Mica	-
Rutilo	-
Goethita	17,5
Feldspato	-
Hematita	9,3
Magnetita	-
Gibbsita	-
Quartzo	50,7
Talco	13,4

Fonte: Disponibilizada pelo professor Evandro Moraes da Gama

Dados da densidade:

- Densidade aparente: 1,20 g/cm³
- Densidade real: 2,89 g/cm³

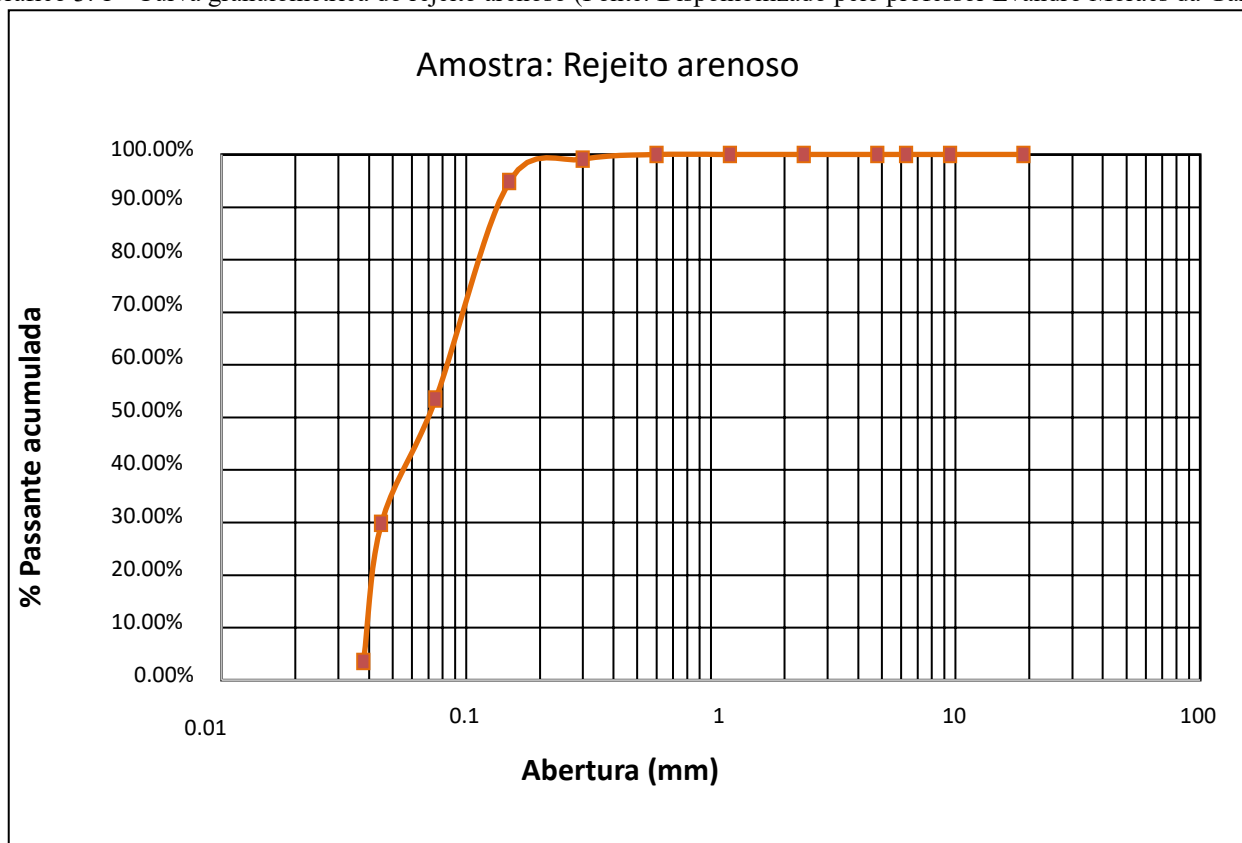
Tabela 3.2 – Granulometria do rejeito.

Análise Granulométrica Rejeito arenoso				
Peneira (mm)	Massa (g)	% retida	% retida acumulada	% passante acumulada
19	0	0,00%	0,00%	100,00%
9,5	0	0,00%	0,00%	100,00%
6,3	0	0,00%	0,00%	100,00%
4,8	0	0,00%	0,00%	100,00%
2,4	0	0,00%	0,00%	100,00%
1,2	0	0,00%	0,00%	100,00%
0,6	0	0,00%	0,00%	100,00%
0,3	0,880	0,89%	0,89%	99,11%
0,15	4,160	4,22%	5,11%	94,89%
0,075	40,840	41,39%	46,50%	53,50%
0,045	23,400	23,72%	70,22%	29,78%
0,038	25,890	26,24%	96,46%	3,54%
< 0,038	3,490	3,54%	100,00%	0,00%
Total	98,660	100,00%	-	-

Fonte: Disponibilizada pelo professor Evandro Moraes da Gama.

A respectiva curva granulométrica do rejeito arenoso é mostrada no gráfico abaixo:

Gráfico 3.1 - Curva granulométrica do rejeito arenoso (Fonte: Disponibilizado pelo professor Evandro Moraes da Gama).



3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Primeiramente, foi feita a secagem do material em estufa por 24 horas para que os estudos se iniciassem com o material em sua umidade mínima possível. A figura 3.1 abaixo representa o material em seu estado “natural”.

Figura 3.1 – Material in natura.



Todos os ensaios realizados neste trabalho foram feitos no Laboratório de Geotecnia e Transportes da Escola de Engenharia da UFMG.

3.3 COMPACTAÇÃO DE SOLOS

Segundo o Manual de pavimentação do DNIT (2006), compactação é a operação da qual resulta o aumento da massa específica aparente de um solo pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, o que faz com que as partículas constitutivas do material entrem em contato mais íntimo, pela expulsão de ar. Com a redução da percentagem de vazios de ar, consegue-se também reduzir a tendência de variação dos teores de umidade dos materiais integrantes do pavimento, durante a vida de serviço.

Após esse processo, a área de contato das partículas sólidas aumenta, aumentando também a resistência do solo e diminuindo a sua deformabilidade. Além disso, o solo compactado se torna obviamente mais denso, o que dificulta a passagem da água em seu interior, ou seja, torna-se menos permeável.

Em escala laboratorial, toma-se uma massa de solo úmido num cilindro e, aplicando-lhe certo número n de golpes através da queda de altura H , de um soquete de peso P , resulta, após a compactação, um certo volume V . O objetivo do processo é obter uma curva de compactação de onde se identifica o teor de umidade ótima e o valor de sua densidade aparente seca máxima. Ou seja, a umidade ótima é a umidade na qual o material apresentará o maior valor para sua densidade aparente seca.

Chama-se Energia de Compactação o esforço aplicado no processo. Repete-se o processo para diferentes amostras com diferentes teores de umidade, pressupondo que a umidade ótima para o

material esteja entre os teores de umidade utilizados.

Segundo o DNIT (2006), a energia de compactação para os materiais de base e sub-base de pavimentos deve ser a energia modificada, na qual se utiliza o cilindro pequeno e o soquete grande na compactação de 5 camadas do solo aplicando-se 27 golpes em cada camada, conforme a norma NBR 7182.

3.3.1 Ensaio de compactação

Para o ensaio de compactação foram pesadas 5 amostras de 2,0 kg cada, e adicionou-se diferentes quantidades de água a cada amostra de modo a pressupor os teores de umidade de 11%, 13%, 15%, 17% e 20%.

Cada amostra foi bem homogeneizada em uma bandeja metálica revolvendo-a continuamente à medida que se adicionava a quantidade de água necessária para atingir a umidade em questão. Após a homogeneização, o material foi separado em 5 porções aparentemente iguais, correspondentes a cada camada de compactação, conforme a figura a seguir.

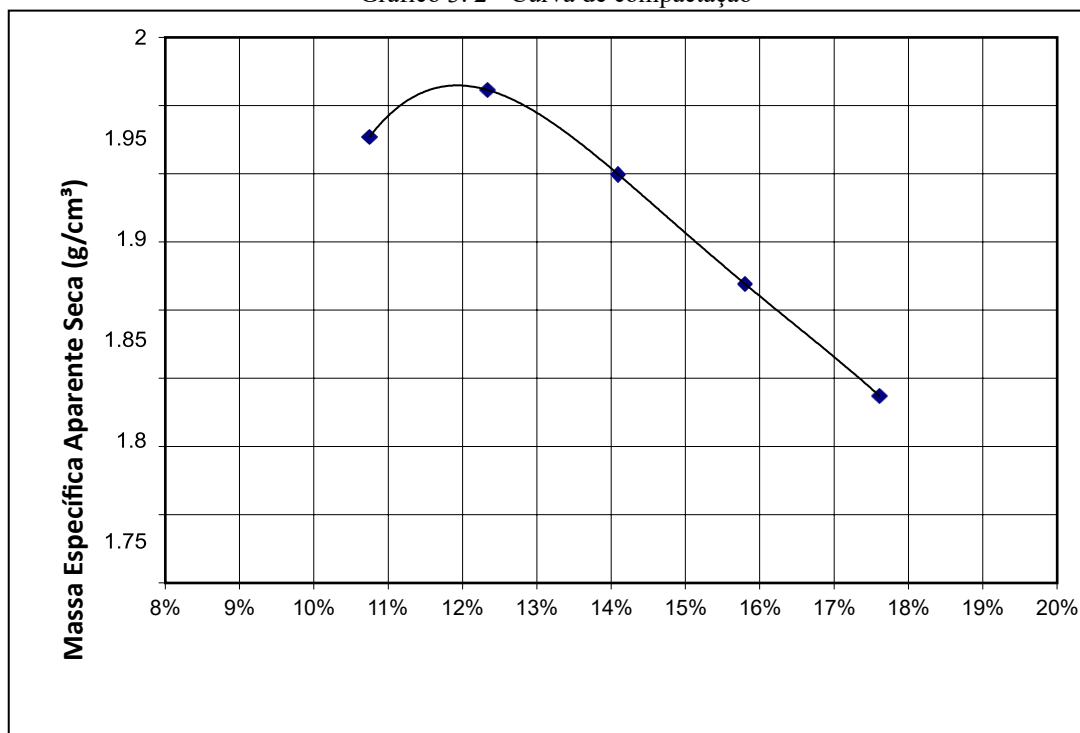
Figura 3.2 – Separação da amostra em cinco porções.



O material foi então compactado no molde cilíndrico, em cinco camadas, recebendo 27 golpes em cada camada, distribuídos uniformemente sobre a superfície de cada camada. Após a compactação de cada mistura, foi retirado o cilindro complementar e rasado o material na altura exata do molde com o auxílio de uma régua biselada. Feito isso, pesou-se a massa do conjunto (molde + solo úmido) e subtraiu-se o peso do molde, de modo a obter o peso do solo úmido. Na sequência foram retiradas pequenas amostras em triplicata do solo úmido e colocadas na estufa por 24 horas, para determinar a umidade real de cada mistura.

Obtiveram-se os valores de teor de umidade de 10,7%, 12,3%, 14,1%, 15,8% e 17,3%, e de densidade aparente seca (g/cm^3) de 1,93, 1,96, 1,90, 1,82 e 1,74, respectivamente. A partir desses teores foi traçada uma curva de compactação conforme mostrado no gráfico abaixo.

Gráfico 3. 2 - Curva de compactação



Os resultados obtidos foram umidade ótima de 12% e densidade aparente seca máxima de 1,965 g/cm^3 .

3.3.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou CBR (California Bearing Ratio)

O ensaio CBR consiste em determinar a relação entre a pressão necessária para produzir a penetração de um pistão em um corpo de prova e a pressão necessária para produzir a mesma penetração em uma brita padronizada. O resultado é expresso em porcentagem.

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), as exigências para os materiais das camadas de base, sub-base e reforço do subleito de pavimentos, com relação aos valores de CBR são:

- Base: $\text{CBR} \geq 60\%$
- Sub-base: $\text{CBR} \geq 20\%$
- Reforço do subleito: $\text{CBR} \geq 2\%$

3.3.2.1 Procedimentos

A partir do resultado obtido no ensaio de compactação para a umidade ótima do material (12%),

foram preparadas 5 amostras para o ensaio CBR com esta mesma umidade para dar mais credibilidade ao estudo através da comparação dos cinco resultados.

A energia de compactação utilizada foi novamente a energia modificada, conforme exigência do DNIT, porém, desta vez no cilindro grande e soquete grande, tamanhos indicados para os ensaios CBR, bem como a adição de um disco espaçador padronizado na base do molde.

Novamente, cada amostra foi bem homogeneizada em uma bandeja metálica revolvendo-a continuamente à medida que se adicionava a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima determinada (12%). Após a homogeneização, o material foi novamente separado em 5 porções aparentemente iguais, correspondentes a cada camada de compactação. Cada camada recebeu 55 golpes (energia modificada), distribuídos uniformemente sobre cada camada.

Após a compactação de cada corpo de prova, foi retirado o cilindro complementar e rasado o material na altura exata do molde com o auxílio de uma régua biselada. Feito isso, inverteu-se o cilindro, retirou-se o disco espaçador da base e foi colocado no espaço deixado pelo disco espaçador um prato perfurado com haste de expansão e, sobre ele, dois discos para sobrecarga que somam um total de 4540 ± 20 g.

Após esse procedimento os corpos de prova foram submetidos a completa imersão em um tanque com água para analisar a expansão dos mesmos em relação à altura inicial do corpo de prova (altura do molde cilíndrico). Foi acoplado na haste de cada prato perfurado um extensômetro para a leitura da expansão do solo. Procedeu-se com as leituras de expansão de 24 em 24 horas durante 4 dias.

Ainda segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), as exigências para os materiais das camadas de base, sub-base e reforço do subleito de pavimentos, com relação aos valores de expansão são:

- Base: Expansão $\leq 0,5$
- Sub-base: Expansão ≤ 1
- Reforço do subleito: Expansão ≤ 1

Os resultados obtidos estão mostrados na tabela abaixo:

Tabela 3.3 – Resultados de expansão dos corpos de prova.

Corpo de prova	1	2	3	4	5
Leitura no extensômetro (mm) após 1 dia	0,60	0,38	0,65	0,61	0,41
Leitura no extensômetro (mm) após 2 dias	0,55	0,45	0,56	0,55	0,50
Leitura no extensômetro (mm) após 3 dias	0,44	0,47	0,51	0,54	0,55

Leitura no extensômetro (mm) após 4 dias	0,44	0,50	0,51	0,54	0,55
Expansão (%)	0,384	0,436	0,445	0,471	0,479

Terminado o período de imersão, o corpo de prova foi retirado do tanque e deixado na bancada para a água escoar. O conjunto foi então preparado para a penetração conforme a Figura 3.3.

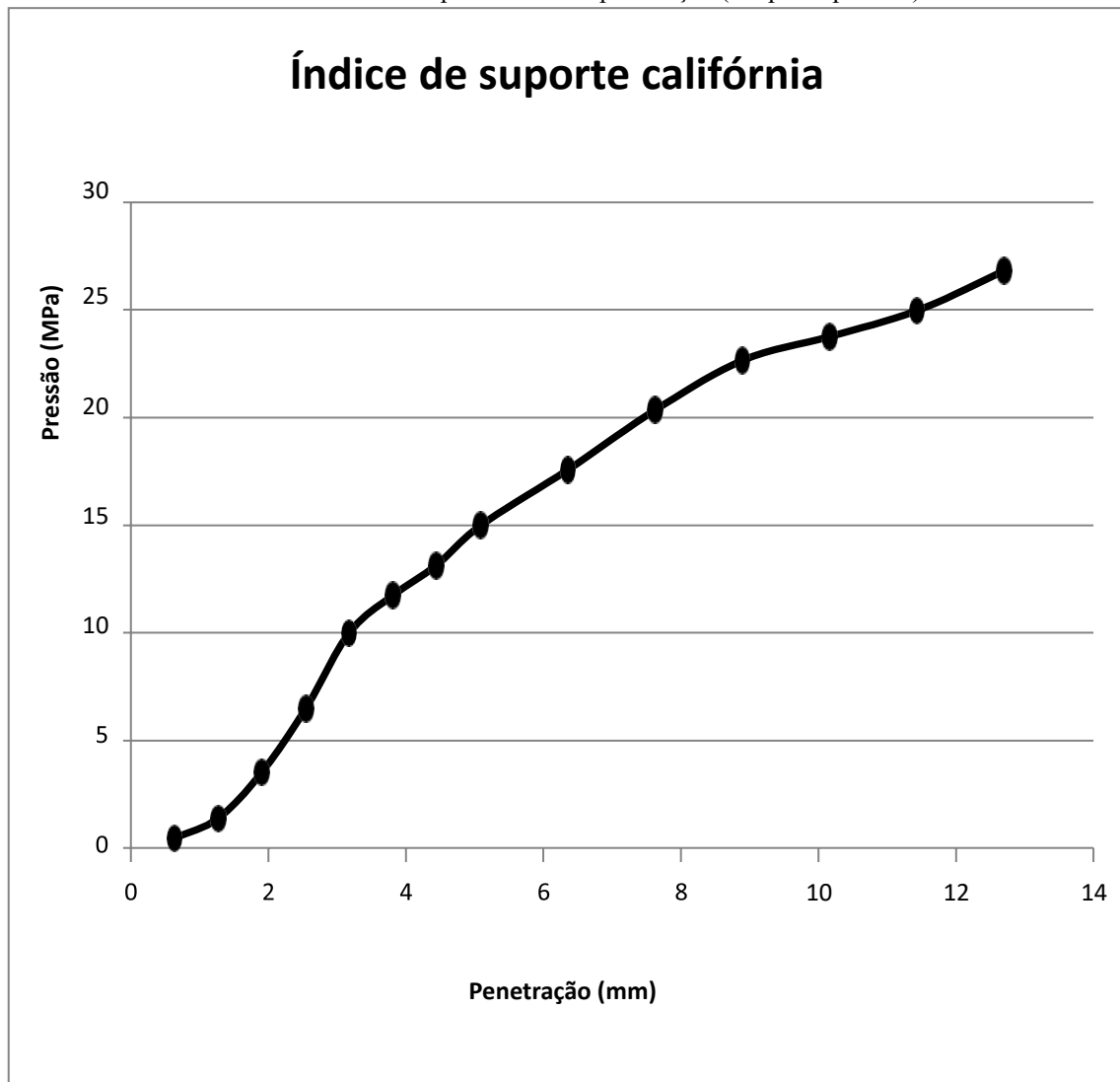
Figura 3.3 – Prensa elétrica.



A penetração dos corpos de prova se dá a uma velocidade constante de 0,05 pol/min (ou 1,27 mm/min). A cada 0,5 min foi realizada a leitura (mm) do extensômetro do anel da prensa. Cada leitura considerada é função de uma penetração do pistão no corpo de prova e de um tempo especificado. A partir dessas leituras, é possível determinar a carga (N) e a pressão (MPa) exercida pela prensa.

Foi construída então uma curva de pressão (MPa) em função da penetração (mm) para cada corpo de prova, que podem ser visualizadas abaixo nos respectivos gráficos e, na sequência, foram montadas as respectivas tabelas com os dados usados para o cálculo de CBR de cada corpo de prova.

Corpo de prova 1
 Gráfico 3.3 - Curva pressão versus penetração (Corpo de prova 1)



Os pontos de leitura correspondente a 2,54 mm (0,1 pol) e 5,08 mm (0,2 pol) de penetração fornecem os valores de pressão para determinar o índice CBR, cujo cálculo é feito dividindo-se a pressão calculada pela pressão padrão e multiplicando o valor por

100. Adota-se para o índice CBR, o maior dos valores obtidos nas penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm:

$$CBR = \frac{\text{Pressão calculada} \times 100}{\text{Pressão padrão}}$$

Tabela 3.4 – Índice de Suporte Califórnia (Corpo de prova 1).

Penetração (mm)	Pressão (MPa)		CBR (%)	CBR adotado (%)
	Calculada	Padrão		
2,54	6,4726	6,90	93,81	144,73
5,08	14,9796	10,35	144,73	

Corpo de prova 2
 Gráfico 3. 4 - Curva pressão versus penetração (Corpo de prova 2)

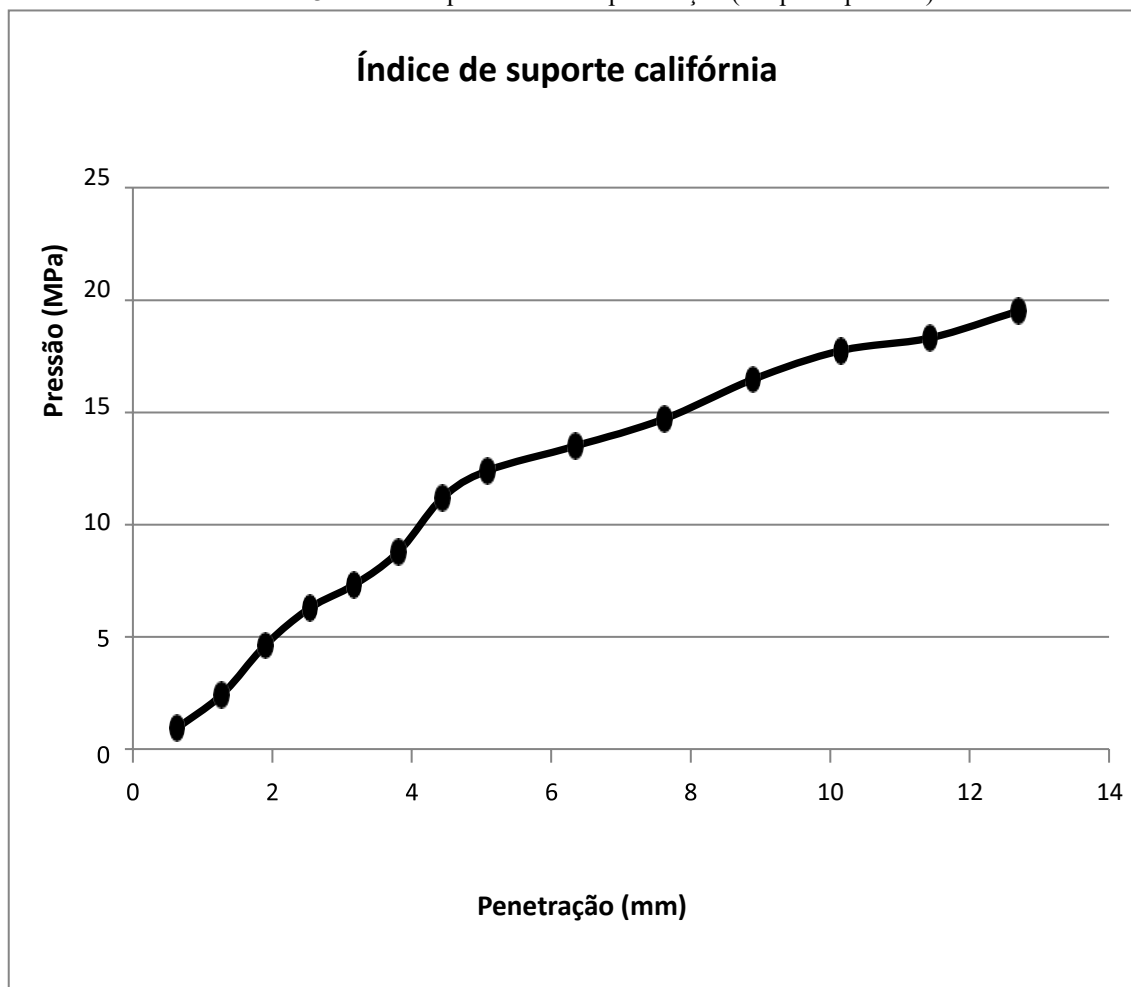


Tabela 3.5 – Índice de Suporte Califórnia (Corpo de prova 2).

Penetração (mm)	Pressão (MPa)		CBR (%)	CBR adotado (%)
	Calculada	Padrão		
2,54	6,2877	6,90	91,13	
5,08	12,3905	10,35	119,71	119,71

Corpo de prova 3
 Gráfico 3.5 - Curva pressão versus penetração (Corpo de prova 3)

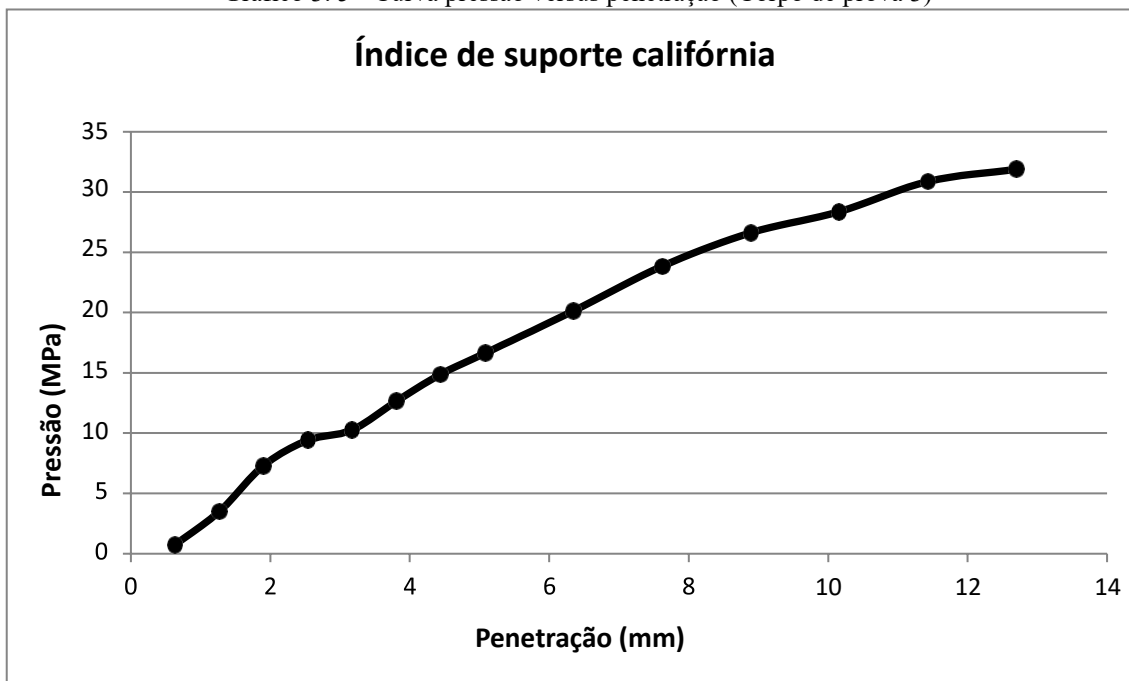


Tabela 3.6 – Índice de Suporte Califórnia (Corpo de prova 3).

Penetração (mm)	Pressão (MPa)		CBR (%)	CBR adotado (%)
	Calculada	Padrão		
2,54	9,4316	6,90	136,69	
5,08	16,6440	10,35	160,81	160,81

Corpo de prova 4
 Gráfico 3. 6 - Curva pressão versus penetração (Corpo de prova 4)

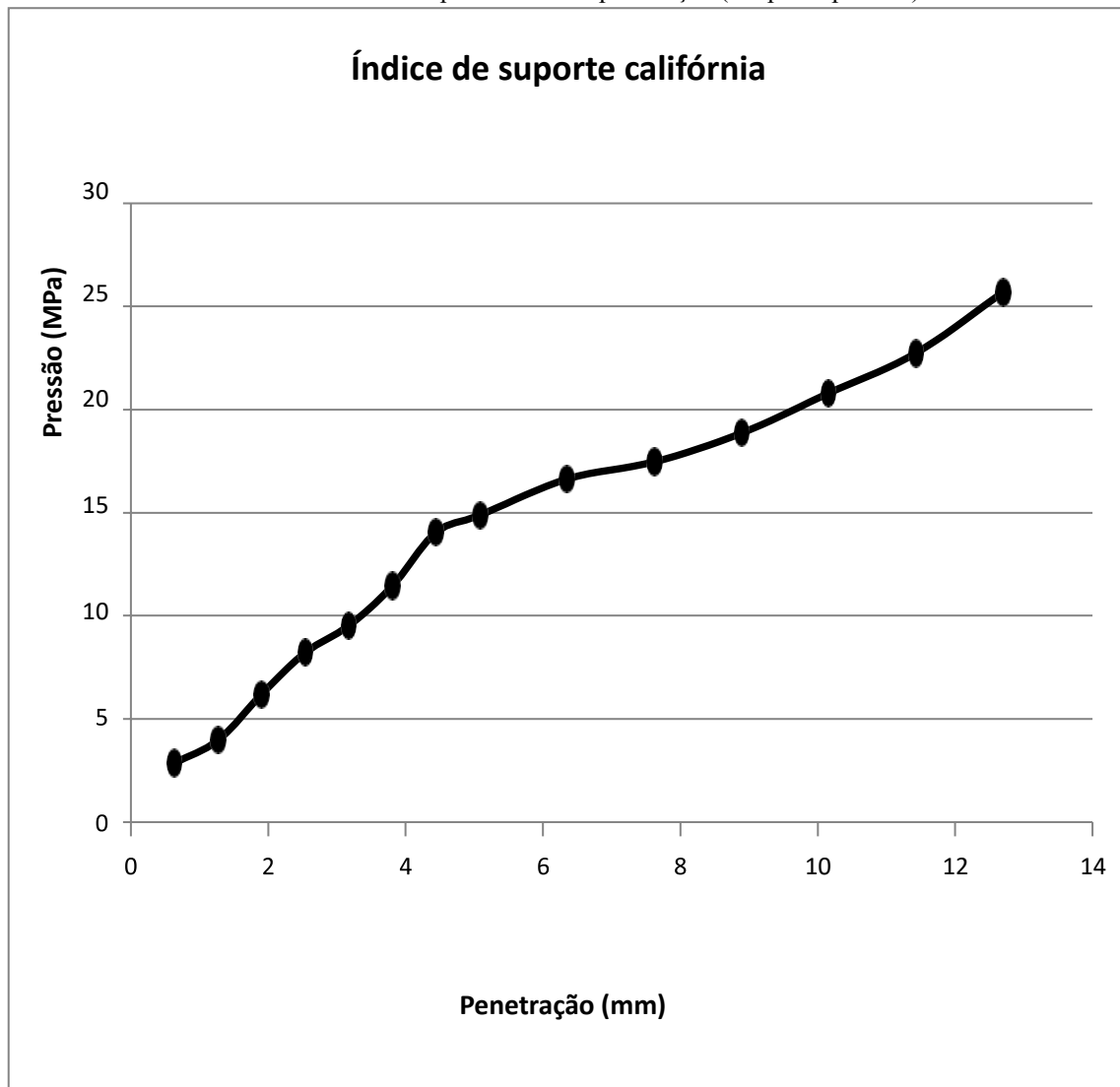


Tabela 3.7 – Índice de Suporte Califórnia (Corpo de prova 4).

Penetração (mm)	Pressão (MPa)		CBR (%)	CBR adotado (%)
	Calculada	Padrão		
2,54	8,2295	6,90	119,27	
5,08	14,8871	10,35	143,84	143,84

Corpo de prova 5
Gráfico 3.7 - Curva pressão versus penetração (Corpo de prova 5)

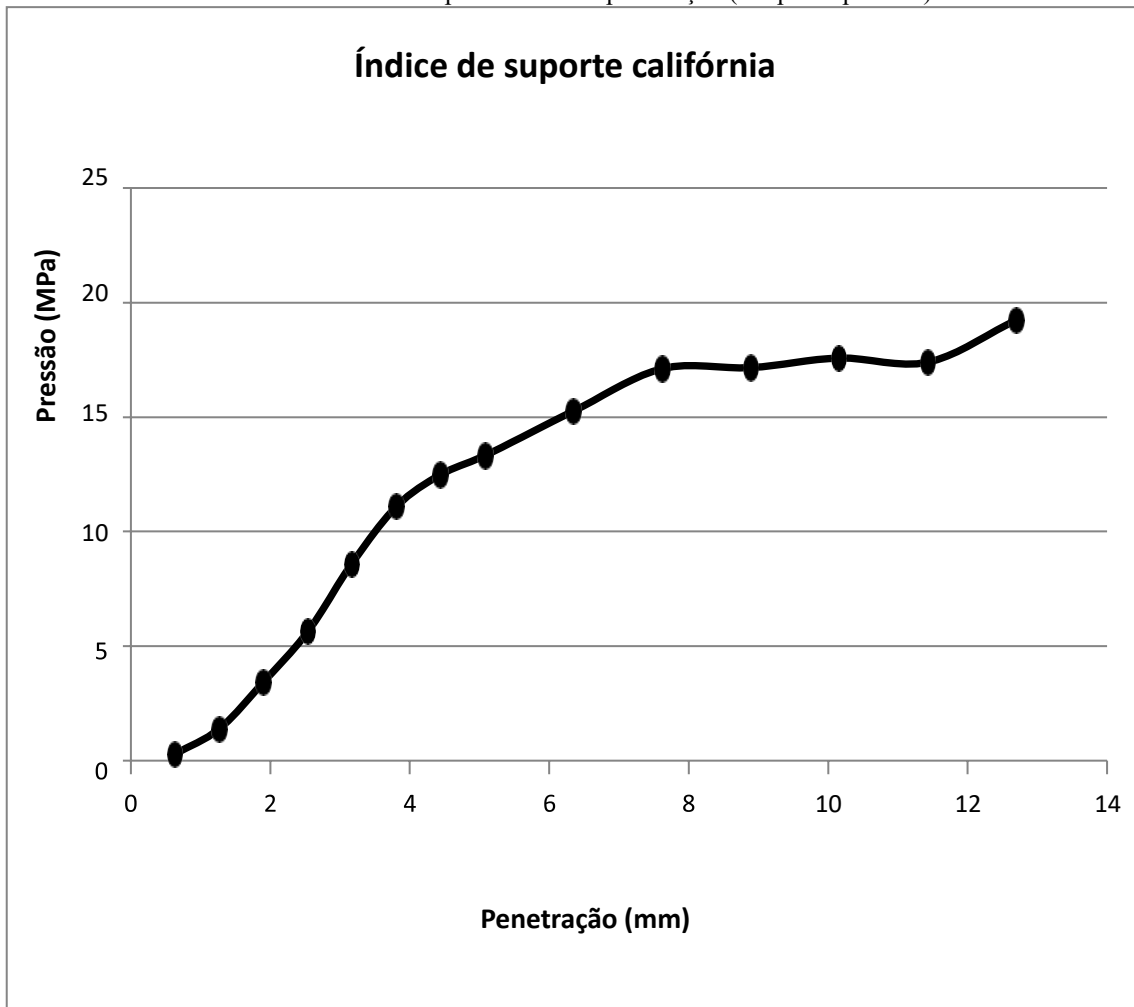


Tabela 3.8 – Índice de Suporte Califórnia (Corpo de prova 5)

Penetração (mm)	Pressão (MPa)		CBR (%)	CBR adotado (%)
	Calculada	Padrão		
2,54	5,6404	6,90	81,74	128,65
5,08	13,3152	10,35	128,65	

Observação: Além dos valores de CBR e de expansão para os materiais constituintes das camadas de pavimentação, o DNIT ainda faz algumas exigências quanto aos Limites de Atterberg (ou Limites de Consistência), são eles o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP).

- Limite de liquidez: é o estado em que o solo apresenta teor de água que, acima deste valor, o solo se comporta como líquido.
- Limite de plasticidade: é o estado em que o solo apresenta teor de água que, acima deste valor, o solo se comporta como líquido.
- A norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que regulamenta os

ensaios para LL e LP é a NBR-6457, onde é especificado que o material para a realização de tais ensaios deve ter granulometria superior a 0,42 mm. No entanto, o material utilizado neste trabalho possui granulometria muito inferior (entre 0,038mm e 0,075mm basicamente), conforme mostrado na distribuição granulométrica fornecida anteriormente no texto. Diante disso não foi possível a realização de tais ensaios.

- Esse fato, porém, não compromete a utilização do material para os fins de pavimentação em questão no trabalho, haja vista os estudos citados no texto. Além disso, os ensaios realizados (Compactação, CBR e Expansão) comprovam que o material possui resistência mecânica suficiente, pois os resultados se enquadram nos requisitos do DNIT.

4 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos nos ensaios e comparando-os com os requisitos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), pode-se considerar a utilização de rejeitos e estéréis de minério de ferro na indústria de construção civil como matéria-prima no processo de pavimentação de vias, como boa alternativa para a destinação de tais resíduos. O material possui uma grande demanda, com projeção de crescimento, além de fornecedores de matéria-prima bastante interessados. Adicionalmente, o uso de tal material estimula as práticas sustentáveis no setor de mineração, diminuindo os passivos ambientais e sociais causados pela atual forma de deposição desses resíduos no meio ambiente (barragens de rejeito e pilhas de estéril), bem como proporcionando pavimentos de qualidade e com custos inferiores aos pavimentos construídos com agregados convencionais.

REFERÊNCIAS

- BASTOS, L. A. C. Utilização de Rejeito de Barragem de Minério de Ferro Como Matéria Prima Para Infraestrutura Rodoviária. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2013. 113p. (Dissertação de Mestrado).
- BAPTISTA, C. F. N. (1976). Pavimentação. 2. ed. Porto Alegre: Globo. Fundação Nacional de Material Escolar.
- CAMPANHA, A. Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- FERNANDES, Gilberto (2005). Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados à Geossintéticos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília. 250p.
- GAMA, E. M.; Projeto - Avaliação do potencial do mercado consumidor para os produtos derivados do aproveitamento dos resíduos da mineração de ferro e estudo de alternativas e soluções para o aproveitamento de produtos derivados do tratamento dos resíduos (estéreis e rejeitos) da mineração de ferro; Relatório parcial DNPM ; Belo Horizonte, Fevereiro de 2017.
- GAMA, E. M. Aproveitamento de estéreis e rejeitos de mineração para a pelletização e pavimentação. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, 2016.
- GUIMARAES, J. E. P. Estabilização de Solos com Cal: princípios básicos. Associação dos Produtores de Cal. São Paulo. 102p. 1992.
- GUIMARAES, J. E. P. (2002). A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. Associação dos Produtores de Cal. 2ª Ed. São Paulo. 341p.
- GUIMARÃES, N. C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- INGLES, O. E.; METCALF, J. B. (1972). Soil Stabilization – Principles and Practice. Butterworths. 374p.
- LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. Estabilização dos solos III: Mistura Solo-cal para Fins Rodoviários. Caderno Didático n.334, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 40 p, 1993.
- LITTLE, D. N. (1995). Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Published by Kendall/hunt Publishing Company.
- LITTLE, D.N. (1999). Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized and Aggregates. Volume 1: Summary of Findings. Prepared for The National Lime Association.
- MARQUES, G. L. O. Notas de aula da disciplina Pavimentação. Juiz de Fora: Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Transportes e Geotecnia, 2016.
- MARTINS, D. C. Avaliação da atividade pozolânica de potenciais metacaulins produzidos a partir de rejeitos e estéreis de mineração por meio de Calcinação flash. Belo Horizonte: Escola de Engenharia

da UFMG, 2017. 76p. (Trabalho de Conclusão de Curso).

OLIVEIRA, E. (2010). Emprego da Cal na Estabilização de Solos Finos de Baixa Resistência e Alta Expansão: Estudo de Caso no Município de Ribeirão das Neves/MG. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 171p.

PEREIRA, E. L. (2005). Estudo Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estatístico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Ouro Preto. 185p

PETRY, T. M.; GLAZIER, E. J. (2005). The Effect of Organic Content on Lime Treatment of Highly Expansive Clay. IN: 2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREATMENT AND RECYCLING OF MATERIALS FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE, 15P., Paris.

PRUSINSKI, J. R., BHATTACHARJA, S. (1999). Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. Transportation Research Record, Washington, D.C., nº 1652, p. 215-227.

ROAD, R. L. (1951). Mecânica dos Solos para Engenheiros Rodoviários. Publicação: São Paulo : Edgard Blücher Editor. Vol 1. 301p.

SARAIVA, S. L. C. (2006). Metodologia e Análise Experimental do Comportamento Geotécnico da Estrutura de Pavimentos Rodoviários. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 123p.

SENÇO, W. (2002). Pavimentação. Escola Politécnica de São Paulo. Vol. 1 e 2. 2ª edição. São Paulo.

SILVA, R.G.O. Estudo Laboratorial do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduos Industriais de Minério de Ferro. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2010. 151p. (Dissertação de Mestrado).

SILVA, R.G.O. Caracterização de Concreto Asfáltico Elaborado com Rejeitos de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2017. 270p. (Tese de Doutorado).

VARGAS, M. (1977). Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo.

VICK, S. G. Planning, design and analysis of tailing dams. New York: John Wiley & Sons, 1983. 369 p.