

BRENO SANTOS ARRIVABENI

**ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA
E QUÍMICA DE SOLO DE ESTRADAS FLORESTAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A775a Arrivabeni, Breno Santos, 1989-
2017 Alternativas para estabilização granulométrica e química de
solo de estradas florestais / Breno Santos Arrivabeni. – Viçosa,
MG, 2017.
vii,53f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Carlos Cardoso Machado.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.49-53.

1. Mecânica do solo. 2. Solos florestais. 3. Química do
Solo. 4. Solo - Compactação. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDD 22 ed. 624.15136

BRENO SANTOS ARRIVABENI

**ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA
E QUÍMICA DE SOLO DE ESTRADAS FLORESTAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 15 de fevereiro de 2017.



Doutor Giovanni Levi
Sant'Anna



Prof. Cláudio Henrique de
Carvalho Silva
(Coorientador)



Prof. Carlos Cardoso Machado
(Orientador)

Dedico esse trabalho a Deus, à Santo Expedito, à minha família e aos meus amigos; todos sempre presentes e pilares essenciais na sustentação desse objetivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por cada passo, vitória e aprendizado nesse caminho trilhado. À minha família, pelo amor incondicional, incentivo e apoio ininterruptos. À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal, pelo acolhimento e oportunidade. Ao Professor Carlos Machado pelos ensinamentos, confiança e paciência na realização desse sonho. Ao Professor Cláudio, pelo acompanhamento e disponibilidade demandados. Ao técnico e amigo Giovani Levi Sant'Anna, sem o qual este trabalho não seria possível. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro prestado. Ao Laboratório de Engenharia Civil, pela recepção, direcionamentos e amizades. Aos estagiários, pelo empenho em colaborar sempre. Aos meus amigos e irmãos de coração que sempre estiveram presentes nessa luta, fazendo dos momentos difíceis mais toleráveis. E finalmente a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que a realização desse sonho fosse possível, tornando a maestria um objetivo de vida alcançável.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. JUSTIFICATIVA.....	3
3. OBJETIVOS	3
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
4.1. Estradas não pavimentadas.....	4
4.2. Erosão.....	6
4.3. Estabilização mecânica.....	6
4.4. Estabilização granulométrica.....	7
4.5. Estabilização química.....	9
4.5.1. Uso do cimento como estabilizante de solo.....	10
4.5.2. Uso da cal como estabilizante de solo.....	11
4.5.3. Uso de emulsão como estabilizante de solo.....	12
5. MATERIAIS E MÉTODOS	14
5.1. Materiais.....	14
5.1.1. Solo.....	14
5.1.2. Cimento.....	15
5.1.3. Cal.....	16
5.1.4. Emulsão.....	16
5.2. Métodos.....	16
5.2.1. Metodologia de campo.....	16
5.2.2. Metodologia de laboratório.....	16
5.2.2.1. Ensaio de caracterização do solo.....	17
5.2.2.1.1. Análise granulométrica.....	17
5.2.2.1.2. Determinação da massa específica.....	17
5.2.2.1.3. Limites de consistência.....	18
5.2.2.1.4. Classificação dos solos.....	18
5.2.2.1.5. Sistema unificado de classificação dos solos...	19
5.2.2.1.6. Classificação TRB.....	20
5.2.2.1.7. Classificação MCT.....	20
5.2.2.2. Preparação de amostras para base granular.....	21

5.2.2.3.	Determinação da umidade natural e higroscópica...	24
5.2.2.4.	Processo de mistura solo-estabilizantes químicos..	25
5.2.2.4.1.	Adição de cimento ao solo.....	26
5.2.2.4.2.	Adição de cal ao solo.....	26
5.2.2.4.3.	Adição de emulsão ao solo.....	27
5.2.2.5.	Ensaio de comportamento mecânico.....	29
5.2.2.5.1.	Ensaio de compactação.....	29
5.2.2.5.2.	Ensaio Índice de Suporte Califórnia.....	31
5.2.2.5.3.	Ensaio Resistência à Compressão Simples.....	33
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
7.	CONCLUSÃO	47
8.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

RESUMO

ARRIVABENI, Breno Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Alternativas para estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais.** Orientador: Carlos Cardoso Machado. Coorientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

O presente estudo teve por objetivo avaliar a resistência mecânica de solos para base granular com e sem o uso de aditivos químicos, inferindo na viabilidade de aplicação de tais estabilizantes em solos de estradas florestais. As amostras coletadas foram submetidas à padronização granulométrica apresentada pelo DNIT (2006), atendendo especificamente as faixas A, C e F. As amostras foram trabalhadas em sua constituição original e em sua adequação às faixas supracitadas, sendo que a estas foram adicionados cimento, cal e emulsão, separadamente, como estabilizantes químicos. Empregou-se cimento Portland CP II E-32 no teor de 4%, cal hidratada nos teores de 4% e 8% e a combinação de emulsão RR-1C com teores de 4% de cimento. Inicialmente caracterizou-se o cascalho e posteriormente procedeu-se à compactação, ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia e ao ensaio de Resistência à Compressão Simples em conformidade com as normas específicas para cada aditivo. Para o solo com estabilizantes, os resultados de RCS se apresentaram superiores aos dos solos sem tratamento químico, ainda que abaixo do sugerido pela norma dos ensaios. Os resultados CBR evidenciaram que o uso de cal, cimento ou emulsão ao solo apresentou valores de suporte muito superiores aos dos solos sem tratamento com estabilizantes, o que comprova a eficácia do uso de aditivos no aumento das propriedades mecânicas do solo. O cimento apresentou o melhor resultado dentre os aditivos, atingindo capacidade de suporte 3 vezes superior ao CBR padrão, no qual comumente se emprega a brita graduada. Portanto, a estabilização combinada granulométrica e quimicamente apresenta-se como uma solução viável frente à falta de selamento asfáltico das estradas rurais e florestais, inferindo em bons resultados quanto à estabilização e ao desgaste causado pelo tráfego.

ABSTRACT

ARRIVABENI, Breno Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2017. **Alternatives for granulometrical and chemical stabilization of soil for forest roads.** Advisor: Carlos Cardoso Machado. Co-advisor: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

The present study was aimed to evaluate the mechanical strength of soils for granular base with and without the use of chemical additives, which implies in the viability of application of those stabilizers at soils for forest roads. The collected samples were submitted to grain size standardization presented by DNIT, attending specifically the bands A, C and F. The samples were used in their original composition and with their adequacy to the mentioned bands, which then were added cement, lime and emulsion as chemical stabilizers. The cement utilized was the Portland CP II E-32 at 4%, hydrated lime at 4% and 8% and the combination of emulsion RR-1C with 4% of Portland's cement. Initially the gravel was defined, then aggregated and finally submitted to the CBR (California Bearing Ratio) test. Following that, it was performed the resistance to single compression test, through the elaboration of specimens and using the data from the material's aggregation. The results from the single compression test for the soil with chemical additives were below from the one suggested by the standard tests, however superiors to the ones from the natural soil and the untreated soil. The results from the CBR showed that the soil, when added with lime, cement and emulsion, presented support numbers far greater than the natural soil and from the ones adequate to the untreated bands, which confirms the effectiveness of the use of additives in the increase of soils mechanical properties. The cement showed the best result between the additives, reaching a support capacity 3 times superior to the standard CBR, which commonly uses the measured gravel. The combined mechanical, grain size and chemical stabilization is presented as a viable solution for the lack of asphaltic sealing in these routes, showing good results in terms of stabilization and deterioration under traffic.

1. INTRODUÇÃO

Diante da importância da rede viária nacional e da necessidade de tráfego em qualidade, a conservação de estradas torna-se algo imprescindível e de atenção constante nos dias atuais.

Levando-se em consideração que uma rede de estradas bem distribuída e de qualidade tem influências diretas na economia de um país, seja pelo escoamento de produtos através do tráfego rodoviário, seja pela locomoção de pessoal de forma generalizada, é de se esperar que investimentos nacionais estejam voltados a essa logística viária, buscando proporcionar maior qualidade a tais vias. E, em se tratando de estradas rurais e florestais, essa atenção deve ser diferenciada, visto que estas são maioria em nosso país e as mais sujeitas à perda de material por intemperismo, tráfego e instabilidade.

Estradas não pavimentadas, também conhecidas popularmente como estradas de terra, geralmente são construídas seguindo o próprio relevo local, não obedecendo a nenhum projeto geométrico específico, sendo muitas vezes também construídas através de terraplanagem utilizando-se do solo local. Geralmente tais vias estão ligadas à infraestrutura municipal ou mesmo a empresas florestais, sendo também muitas vezes originadas pela necessidade da população local de se locomover.

Segundo Visser and Hudson (1983), as estradas rurais são classificadas como detentoras de baixo volume de tráfego e por esse motivo não se justifica a sua pavimentação. Atrelado a isso, muitas vezes prefeituras e estado não possuem o suporte financeiro necessário para sua manutenção, acarretando assim em um maior descuido de tais estradas e as posicionando como vias de menor importância, quando na verdade não o são.

Segundo o Sistema Nacional de Viação (SNV, 2016) e a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2016), o Brasil possui 1.720.643 km de rodovias, porém com apenas 210.618 km pavimentados, o que corresponde a 12,2% da malha rodoviária nacional (Tabela 1).

Tabela 1. Malha rodoviária nacional total, pavimentada e não pavimentada.

MALHA RODOVIÁRIA NACIONAL (em Km)	
Planejada	157.560,90
Não pavimentada	1.352.463,50
Pavimentada	210.618,80
TOTAL	1.720.643,20

Fonte: CNT (2016).

Devido à extensão territorial de nosso país e à larga predominância de estradas não pavimentadas, torna-se crucial assegurar a qualidade das mesmas. O que implica em benefícios à logística socioeconômica rodoviária nacional além de prevenir ou minimizar riscos e desgastes físicos às estradas.

Dessa forma, torna-se necessário o conhecimento acerca das propriedades do solo para se evitar a erosão visto que esta, além de causar a desestruturação do mesmo, acarreta a consequente perda de material e inviabiliza o tráfego em estradas rurais e florestais. E para garantir a estabilidade dos agregados, o uso de intervenções no solo tem papel fundamental na dinâmica rodoviária.

A adição de estabilizantes ao solo como método de intervenção tem o intuito de modificar as propriedades físicas e químicas do mesmo, proporcionando melhoria ao material. Segundo Gondim (2008), esses fatores de estabilização podem ser de natureza química, granular ou mesmo de energia dinâmica aplicada.

Ainda segundo o autor, para escolha adequada do método de estabilização a ser utilizado, é importante enfocar quais as propriedades do solo que precisam ser modificadas e os propósitos aos quais se destinam o processo de estabilização.

De uma maneira geral, as técnicas de estabilização de pavimentos visam melhorar propriedades mecânicas, seja no que se refere à expansibilidade e compressibilidade, seja no aumento da durabilidade e da permeabilidade do solo. Entende-se, entretanto, que os processos de

estabilização não melhoram todas as propriedades de maneira simultânea (GONDIM, 2008).

2. JUSTIFICATIVA

As estradas florestais por não possuírem uma camada selante (ex: asfalto, concreto), padecem de sérios riscos de desgaste, entaves e até mesmo inviabilização do tráfego.

A extensa rede viária não revestida atrelada ao baixo volume de tráfego, muitas vezes inviabiliza os investimentos nessas vias, levando o poder público ou privado, responsáveis por tais estradas, a buscar soluções alternativas.

Dessa forma, justifica-se a utilização da estabilização para aumentar os índices de suporte e resistência mecânica.

Os métodos de combinação granulométrica direcionam a mesclagem do solo em níveis granulares distintos conferindo-lhes uma estrutura mais estável. Porém, muitas vezes isso não é suficiente para aumentar a resistência, sendo necessário associar-se a outros tipos de estabilização, como por exemplo a química e a mecânica.

O presente estudo, ao trabalhar o solo granular com cimento, cal e emulsão, abrange os dois tipos de estabilização como alternativa à não pavimentação de estradas rurais e florestais.

3. OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi avaliar a resistência mecânica de solos para base granular atendendo às faixas granulométricas A, C e F da norma DNIT com e sem o uso de aditivos químicos, analisando-se os efeitos desses aditivos nas propriedades físicas e mecânicas do solo.

Como objetivo específico destaca-se a viabilidade do uso de estabilizantes químicos no reforço de solos de estradas rurais e florestais, como alternativa frente à erosão e ao desgaste causado pelo tráfego de veículos.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Estradas não pavimentadas

Por razões, econômicas, sociais, religiosas ou militares, a construção de estradas remonta às origens da humanidade. A necessidade de circulação de pessoas e cargas tornou essencial a adequação da sociedade à preocupação viária, tanto na qualidade quanto na quantidade de vias, pavimentadas ou não.

As primeiras vias pavimentadas datam à época do império romano e foram as primeiras a terem especificações técnicas de execução, sendo modelo ao longo da história, inclusive nas primeiras obras de pavimentação no Brasil (BALBO, 2007).

O primeiro sistema de transporte que prevaleceu no Brasil foi o da navegação costeira, passando pelo ferroviário e, finalmente, chegando ao predomínio das rodovias na matriz de transportes do país. Este último foi resultado, entre outros, do incentivo à indústria automobilística e da política de subsídios concedidos ao transporte rodoviário a partir da década de 1950 (CNT, 2013).

Atualmente, quase 90% da malha rodoviária brasileira são compostas de estradas não pavimentadas, sendo uma minoria aquelas com planejamento e pavimentação efetiva. Dentre as estradas pavimentadas, a maioria está sob a jurisdição de governos estaduais, enquanto que as estradas não pavimentadas estão sob a jurisdição de governos municipais (CNT, 2016).

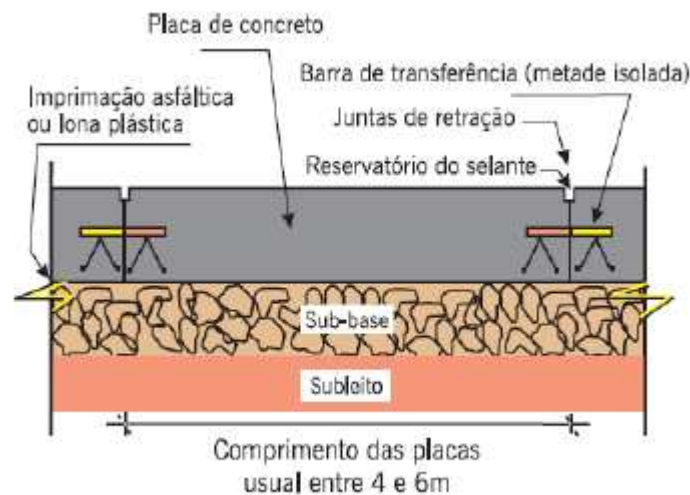
Nesse universo, segundo Lopes (2002), esses tipos de superfície são classificados da seguinte forma:

- Estrada pavimentada: é aquela revestida com concreto betuminoso ou concreto, permitindo o tráfego de veículos durante o ano todo;
- Estrada com revestimento primário: é aquela revestida com material granular (saibros, cascalhos, entre outros), o que permite o tráfego de veículos durante o ano todo e,

- Estrada sem revestimento: é aquela que não apresenta qualquer tipo de revestimento, portanto, geralmente o tráfego de veículos durante a época chuvosa é dificultado ou pode não ocorrer.

Estradas não pavimentadas ou estradas de terra normalmente são construídas usando-se o solo natural local na camada final (de rolamento). Já as estradas com revestimento primário são rodovias revestidas com uma camada de material que tenha uma capacidade de suporte maior do que o solo local natural (OLIVEIRA, 2005).

As estradas pavimentadas são constituídas de um pavimento de múltiplas camadas (Figura 1). São construídas sobre uma superfície em que fora realizada a terraplanagem e que se destina a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima e também deve garantir ao usuário conforto adequado, economia e segurança (BERNUCCI et al. 2006).



Fonte: Bernucci et al. (2006).

Figura 1. Pavimento de concreto em corte longitudinal.

Já as estradas não pavimentadas não apresentam a camada asfáltica que sela a estrutura. Desse modo, sua base e/ou sub-base destina-se a resistir diretamente aos esforços oriundos do tráfego. Dessa forma, por não serem impermeabilizadas com a capa asfáltica, estão mais sujeitas a riscos de erosão, o que justifica o tratamento dessas vias com estabilizantes ou alternativas que minimizem tais riscos e aumentem sua durabilidade.

A degradação oriunda de processos erosivos é um dos principais problemas que afetam a trafegabilidade das estradas não pavimentadas, segundo Griebeler et al. (2005), provocando prejuízos aos mais variados setores da economia e da sociedade, uma vez que o homem depende diretamente desses meios.

4.2. Erosão

É o desgaste do solo e das rochas causado em geral pelo intemperismo. A erosão, além de levar os nutrientes e sais minerais existentes para as partes mais baixas do relevo, desestrutura os componentes do solo (areias, argilas, óxidos e húmus).

Nesse sentido, a estabilização através do uso de meios químicos, mecânicos e/ou granulométricos visa mitigar os efeitos erosivos em solos de interesse viário.

4.3. Estabilização mecânica

A estabilização mecânica é aquela cujos procedimentos e técnicas mudam o arranjo entre as partículas do solo ou sua granulometria, tais como a compactação, a qual implica na expulsão de ar dos espaços vazios, conferindo ao solo uma nova organização em sua estrutura (GONDIM, 2008).

É um método sempre utilizado na execução das camadas do pavimento, sendo complementar a outros métodos de estabilização. Desse modo, a compactação por si só não estabelece um processo de estabilização, e sim, é um artifício integrante das técnicas que utilizam mistura com algum agente estabilizante.

O processo de compactação fornece ao solo aumento na resistência ao cisalhamento e na capacidade de suporte, além de diminuir índices de permeabilidade, compressão e contração, uma vez que o processo relaciona densificação máxima, energia de compactação específica e umidade ótima.

4.4. Estabilização granulométrica

A estabilização granulométrica consiste em se obter um material de estabilidade maior que os solos de origem e de porcentagem limitada de partículas finas, com a mistura íntima homogeneizada de dois ou mais solos e sua posterior compactação (VIZCARRA, 2010). Ou seja, consiste na alteração das propriedades do solo através da adição ou retirada de partículas do mesmo, procurando-se obter como produto final um material adequado para a aplicação em cada caso particular.

Todos os solos, em sua fase sólida, contêm partículas de diferentes tamanhos em proporções as mais variadas. A determinação do tamanho das partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrência permitem obter a função distribuição de partículas do solo e que é denominada distribuição granulométrica.

Vogt (1971) exemplifica tal conceito com uma mistura de areia e argila em proporção definida e compactada na umidade ótima. Porém, existem materiais naturais que podem ser utilizados sem mistura ou adição. Mesmo assim, as especificações do DNER/ DNIT de materiais para base ou sub-base recebem o nome de “base estabilizada granulometricamente” (MEDINA e MOTTA, 2005).

Os fatores que influenciam no comportamento da composição granulométrica são: (i) a natureza da partícula, pois a mesma deve apresentar resistência suficiente e não sofrerem alterações indesejáveis e, (ii) a estabilização da composição deve ser levada a densificação ótima, que pode ser entendida como o melhor arranjo das partículas aprimorando a distribuição dos esforços.

Nesse sentido e segundo especificações do DNIT (2006), para solos a serem utilizados como base granular para pavimentação, a composição dos mesmos deve atender faixas de granulometria em proporções específicas. Assim, porcentagens de agregado grosso, médio e fino são então combinadas obedecendo a uma das seis faixas de distribuição granulométrica do DNIT (Tabela 2).

Tabela 2 – Granulometria para base granular (% em peso passando)

PENEIRA		A	B	C	D	E	F
	mm						
2"	50,8	100	100	100	100	100	100
1"	25,4	100	75-90	100	100	100	100
3/8"	9,53	30-65	40-75	50-85	60-100	100	100
Nº 4	4,80	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº 10	2,09	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº 40	0,42	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº 200	0,075	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25

Fonte: DNIT (2006)

Existem três métodos de correção granulométrica (MACHADO, 2013):

- Método de Rothfuchs: plota-se uma curva média de especificação de serviço ou da faixa de material desejado como diagonal de uma figura retangular e representa-se a porcentagem que passa no eixo das ordenadas em escala aritmética de 0 a 100%. Define-se uma escala de peneiras no eixo das abscissas a partir da curva plotada e traçam-se, no mesmo gráfico, as curvas granulométricas dos materiais disponíveis. A partir de considerações geométricas, definem-se os quantitativos de cada um dos materiais de empréstimo de modo a se produzir um novo material que atenda as especificações de serviço;
- Método Analítico: a determinação das frações constituintes do solo obtido pela composição de outros disponíveis processa-se pela solução de um sistema de equações onde as variáveis são as frações procuradas e as constantes são as quantidades dos vários solos disponíveis e,
- Método do Triângulo: se conhecendo as porcentagens de área e pedregulho, silte e argila, é possível representar os diferentes solos

disponíveis e aquele referente ao material desejado, pontualmente, em um gráfico triangular. A partir desse gráfico, determinam-se os percentuais de cada solo de modo a reproduzir outro material que atenda às exigências do material desejado.

4.5. Estabilização química

A estabilização química é definida como qualquer procedimento no qual um material químico, seja ele cimentante ou não, é adicionado ao solo gerando melhorias em suas propriedades do ponto de vista da engenharia (PATRICIO, 2015).

Para atuar como estabilizante químico de um solo, modificando as suas propriedades físicas e químicas, o material a ser adicionado reage como agente impermeabilizante, dispersante, floculante ou agregante dos materiais presentes no solo (SILVA, 1968).

Lambe e Michaels (1954) *apud* Emmert (2010) citam três mecanismos essenciais para um estabilizante químico modificar as propriedades físicas do solo:

- (i) A retirada da água adsorvida e eliminação da carga superficial dos solos, tornando, assim, as partículas hidrofóbicas. Estes compostos são chamados de agentes impermeabilizantes (ex: betume);
- (ii) O aumento da característica eletronegativa da superfície da partícula ou da espessura da membrana de água, aumentando a repulsão interpartícula. Esses compostos são chamados dispersantes (ex: soda cáustica) e,
- (iii) A eliminação das forças de repulsão eletrostática ou atuação das moléculas-pontes entre partículas, facilitando a coesão interparticular. Esses compostos são chamados agentes agregantes ou floculantes (ex: cal).

4.5.1. Uso do cimento como estabilizante de solo

A estabilização solo-cimento tem como objetivos básicos a resistência mecânica e a durabilidade (ABCP, 1989b apud FRANÇA, 2003).

O processo de endurecimento das partículas de cimento proporcionado pela hidratação, aliado aos produtos resultantes das reações pozolânicas ocorridas entre as partículas do solo, faz com que a mistura de solo-cimento sofra cimentação. Entretanto, o que mais contribuirá para a resistência final da mistura são as reações de hidratação do cimento (SILVA, 1968 apud FRANÇA, 2003).

Para Lima et. al. (1993) o efeito do cimento nos solos granulares, destina-se, principalmente, a criar ligações nos contatos intergranulares, de modo a garantir um aumento da parcela resistente relativa à coesão. Nos solos finos, os grãos de cimento comportam-se como núcleos, aos quais aderem às partículas que o rodeiam formando regiões de material floculado que apresentam ligações oriundas dos fenômenos de cimentação.

Segundo Portelinha (2008), nos solos granulares o cimento proporciona ligações intergranulares que garantem a resistência mecânica do material através do aumento da partícula resistente relacionada à coesão. Assim, o cimento tem a função de desenvolver uma estrutura capaz de minimizar as variações de umidade do solo, que desenvolvem grandes forças de tração e compressão no interior de massas porosas (LIMA et. al.,1993).

A escolha do teor de cimento mínimo, capaz de assegurar a estabilidade necessária e de garantir à mistura a permanência de suas características, é, antes de tudo, uma imposição do critério de economia (LOPES, 2002). Nos solos finos os mecanismos de estabilização levam ao surgimento de matrizes hexagonais, similares a um favo de mel, geradas pelas ligações químicas entre as partículas de solos e os grãos de cimento (PITTA, 1995).

4.5.2. Uso da cal como estabilizante de solo

A estabilização solo-cal é uma técnica empregada na área de pavimentação que visa principalmente a melhoria permanente das características dos solos, obtendo um aumento na resistência à ação da água, em seu poder de suporte e na trabalhabilidade de solos argilosos. E quando comparada ao emprego de cimento Portland, cimento asfáltico ou materiais mais nobres, a estabilização de solos finos através do uso de cal pode ser uma alternativa de custo relativamente baixo (KLINSKY et al., 2012).

Porém, Guyer (2011) defende o uso e as vantagens do cimento Portland como agente cimentante, evidenciando assim alternativas químicas além da cal para estabilização de pavimentos.

A cal viva, também conhecida como cal virgem, geralmente se apresenta na forma de grãos, e seus tamanhos podem variar dependendo do processo de fabricação a que foi submetida (OLIVEIRA, 2011). A produção da cal dá-se pelo processo conhecido como calcinação, que consiste na extração e moagem do calcário e sua submissão a altos fornos industriais, resultando no óxido de cálcio.

No Brasil, a área de estabilização de solos vem se mostrando bastante promissora para a utilização da cal em inúmeros tipos de aplicações, com destaque para a construção de sub-bases e bases rodoviárias (FERRAZ, 1994 e PEREIRA, 2005 citados por OLIVEIRA et al., 2009). Além disso, segundo Araujo et al. (2016), a cal além de atuar como estabilizante de solos em camadas granulares, pode atuar também como filer em misturas asfálticas como melhorador da adesividade.

As principais reações que ocorrem na estabilização de um solo na presença de cal podem ser agrupadas em quatro categorias: troca de íons, floculação, carbonatação e reação pozolânica ou cimentação (BAPTISTA, 1976).

Nesse sentido, Alcântara (1995) e Pereira (2005), citados por Oliveira et al., (2009), afirmam que as alterações que ocorrem nos solos após a adição de cal se devem a reações de troca catiônica, de carbonatação e, as mais importantes, pozolânicas. A ocorrência da reação pozolânica, que é a

reação entre a sílica e a alumina do solo com a cal, resulta na formação de vários tipos de agentes cimentantes que são considerados como a maior causa do aumento de resistência mecânica percebida nas misturas solo-cal.

Seguindo o mesmo raciocínio, o tratamento de solos reativos com adição de cal hidratada melhora substancialmente a resistência dos mesmos (KLINSKY et al., 2014).

4.5.3. Uso de emulsão como estabilizante de solo

Uma emulsão é definida como uma dispersão estável de dois ou mais líquidos imiscíveis. No caso da emulsão asfáltica os dois líquidos são o asfalto e a água (BERNUCCI et al., 2006).

Por essa razão, as emulsões asfálticas são produzidas a partir de cimentos asfálticos de petróleo (CAP), adicionados água e agente emulsificante em pequenas proporções (0,2% a 1%), sendo a água a fase contínua, e a fase descontínua formada por pequenos glóbulos de asfalto de diâmetro de 1 micrômetro a 20 micrômetros (ABEDA, 2003), que se encontram em movimento desordenado em meio a fase contínua da emulsão.

Uma das principais características das emulsões é a rapidez com que se dá a sua ruptura ao serem misturadas com o solo ou agregado, distinguindo-se três tipos de emulsões com base nessa característica:

- Ruptura Rápida (RR): emulsões asfálticas de ruptura rápida;
- Ruptura Média (RM): emulsões asfálticas de ruptura média e,
- Ruptura Lenta (RL): emulsões asfálticas de ruptura lenta.

A estabilização com solo-betume ocorre quando a um solo qualquer é acrescentado um ligante asfáltico, conferindo à mistura resultante uma melhora em seu comportamento mecânico e um efeito impermeabilizante, tornando-a mais resistente tanto a esforços de tráfego quanto a efeitos de variação de umidade (MICELI JUNIOR, 2006).

Gondim (2008) também afirma que a estabilização com emulsão asfáltica ou outros tipos de materiais betuminosos consiste em aumentar a coesão e reduzir a penetração da água pela presença de um filme de betume.

Segundo Ingles e Metclaf (1972) apud Gondim (2008) a impermeabilização pode ocorrer através da criação de uma capa na superfície das partículas ou por meio do preenchimento dos vazios do solo. O aumento de resistência se dá com aumento de coesão, que por sua vez se deve à presença de filme contínuo de betume sobre as partículas do solo.

O ligante asfáltico a ser utilizado depende principalmente do tipo de solo e do tipo de mistura a ser feita, e sua escolha acompanha a evolução da tecnologia de produção de ligantes disponível.

Segundo Lucena et al. (1982) em solos granulares, a utilização desta técnica proporciona um aumento de coesão enquanto em solos plásticos é visto um aumento da impermeabilização, resultante do efeito do asfalto na proteção das partículas de argila.

Em geral, existe uma resistência máxima obtida com um teor ótimo de emulsão, sendo que maiores valores tendem a prejudicá-la. Para solos arenosos, esse teor é baixo, enquanto para solos coesivos, esse teor é maior, o que serve para justificar em parte que a estabilização de solos argilosos e silto-argilosos é antieconômica (LUCENA et al., 1982).

O aumento da resistência à compressão de solos estabilizados com emulsão deve ser cuidadosamente avaliado, pois em geral é encontrado um ganho no valor deste parâmetro sem qualquer acréscimo de emulsão, apenas com a perda de umidade do solo puro por tempos determinados (7 e 28 dias). Segundo Lucena (2012), solos arenosos são estabilizáveis com baixos teores e solos argilosos necessitam de teores mais altos para serem estabilizados satisfatoriamente.

Segundo confirma Soliz (2007), a adição de emulsão em diferentes teores (1%, 2% e 3% para 7 e 28 dias de cura) no tratamento de diferentes tipos de solo, proporciona a todos eles ganho de resistência à compressão simples. Micelli Junior (2006) afirma que para solos granulares a interação solo-emulsão é benéfica, aumentando a coesão da mistura e promovendo

uma melhoria de todos os parâmetros, pois forma-se uma espécie de areia-asfalto a frio.

Conforme Yoder & Witczak (1975), se os objetivos do uso de emulsão forem de maximizar a resistência, são necessários teores mais altos de material asfáltico, mostrando-se antieconômico para rodovias de baixo volume de tráfego, onde se associa a ideia de um pavimento de custo reduzido. Tal fato justifica a necessidade de se trabalhar alternativas para estradas florestais, as quais se enquadram como detentoras de tráfego reduzido. E para minimizar custos de aquisição de grandes quantidades de emulsão, optou-se por associá-la ao cimento, conferindo maior resistência à mistura.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. MATERIAIS

5.1.1. Solo

O solo estudado nesta pesquisa foi coletado na cascalheira localizada no município de Cajuri, Minas Gerais, na localidade denominada “Gomide”. A escolha deste material levou em consideração o solo de jazida, muito utilizado para o revestimento primário das estradas florestais da região.

Com o uso do software *Google Earth* encontraram-se as coordenadas aproximadas do ponto de coleta, sendo estes: 20°46'46,23” S e 42°49'12,68” O (Figura 2).



Fonte: *Google Earth*.

Figura 2. Localização da cascalheira Gomide.

Na Figura 3 exemplificam-se a área de coleta na jazida e o solo coletado (a e b respectivamente).



Figura 3. Área de coleta do solo (a) e tipo de solo coletado (b).

5.1.2. Cimento

Foi utilizado cimento Cauê uso geral CII E-32, que apresenta secagem rápida e maior versatilidade de aplicação. É produzido pela *InterCement*, empresa que atua no Brasil e considerada a 5ª maior concreteira do país. A designação CP II E-32 do cimento em questão indica que tal produto é composto por cimento Portland puro e adição de escória granulada de alto forno, apresentando valores de resistência exigidos para a classe conforme a norma NBR 11578.

5.1.3. Cal

Foi utilizada cal hidratada do tipo CH III, fabricada pela Empresa *Dical*, localizada no município de Montes Claros, MG. A designação CH III está em conformidade com a ABNT (2003), onde são estabelecidos os teores de carbonatos e óxidos não hidratados presentes na cal.

5.1.4. Emulsão

Foi utilizada emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida (RR-1C), a qual é constituída pela dispersão de uma fase asfáltica em uma fase aquosa, apresentando partículas carregadas positivamente.

São classificadas de acordo com a sua velocidade de ruptura e pela carga das partículas, atendendo requisitos como viscosidade, residual asfáltico, desemulsibilidade. A emulsão utilizada neste trabalho foi fornecida pelo laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ), campus Alto Paraopeba, localizado em Ouro Branco, MG.

5.2. MÉTODOS

5.2.1. Metodologia de campo

Para a execução do estudo, o solo foi coletado manualmente na jazida e armazenado em embalagens plásticas devidamente identificadas, sendo posteriormente transportadas ao Laboratório de Engenharia Civil, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

5.2.2. Metodologia de laboratório

A amostra de solo coletada foi seca ao ar, destorroada com soquete, homogeneizada e quarteada para melhor trabalhabilidade, sendo o restante do solo armazenado em tambor.

5.2.2.1. Ensaio de caracterização do solo

Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa foram abordados métodos e procedimentos de trabalho contidos em normas correntes, para análises dos resultados a partir dos ensaios realizados em laboratórios.

Na Tabela 3 são apresentados os ensaios e suas respectivas normas para a caracterização física do solo estudado.

Tabela 3. Ensaio de caracterização

Ensaio	Norma
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181/1984
Determinação da massa específica dos sólidos	ABNT NBR 6508/1984
Determinação do limite de liquidez	ABNT NBR 6459/1984
Determinação do limite de plasticidade	ABNT NBR 7180/1984

5.2.2.1.1. Análise granulométrica

Consiste na determinação da distribuição granulométrica do solo, isto é, na percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa seca total utilizada para o ensaio.

A distribuição granulométrica dos materiais granulares, areias e pedregulhos, foi obtida através do processo de peneiramento de uma amostra seca em estufa, enquanto que, para siltes e argilas se utilizou à sedimentação dos sólidos no meio líquido. Para solos que tem partículas tanto na fração grossa (areia e pedregulho) quanto na fração fina (silte e argila) torna-se necessária a análise granulométrica conjunta.

De posse dos resultados dessa análise, constrói-se uma curva de distribuição granulométrica, essencial na caracterização geotécnica do solo.

5.2.2.1.2. Determinação da massa específica dos sólidos

Neste ensaio determina-se a densidade real dos sólidos presentes na amostra, ou seja, seu peso específico. Após os ensaios de caracterização,

todo solo que passa pela peneira 4,8 mm tem sua massa específica determinada. Também se repete o ensaio para os sólidos passantes na peneira de 2 mm.

5.2.2.1.3. Limites de consistência

O Limite de Liquidez (LL) se refere à umidade limite do estado líquido para o plástico e o Limite de Plasticidade (LP) se refere à umidade do estado plástico para o semissólido.

O limite de liquidez é determinado pelo aparelho denominado Casagrande, no qual, para dados valores de umidade, são aplicados golpes como metodologia de ensaio. Finalizado o ensaio, procede-se à confecção da curva de liquidez, sendo que a umidade correspondente a 25 golpes é a que determina o limite de liquidez propriamente dito.

O limite de plasticidade é realizado passando-se o material de interesse pela peneira de 0,42 mm e trabalhando-se com a parte passante. O teor de umidade necessário para fazer com que tal porção fina do solo umedecido role sobre uma placa de vidro e forme um pequeno cilindro de 3 mm de diâmetro até que se rompa ou forme trincas, é o que se denomina limite de plasticidade. Obtido esse rompimento ou trincamento, determina-se a umidade correspondente.

O índice de plasticidade (IP) é a diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP):

$$IP = LL - LP$$

5.2.2.1.4. Classificação dos solos

Segundo os sistemas geotécnicos de classificação dos solos, os resultados dos ensaios de caracterização são as bases dos dois principais mecanismos de classificação: o Sistema unificado de classificação dos solos (SUCS) e a Classificação da Transportation Research Board (TRB). Ambas tem sua origem direcionada aos solos de regiões temperadas, segundo Machado (2013).

Porém, os solos presentes no Brasil por pertencerem ao clima tropical, muitas vezes encontram discrepâncias e dificuldades de se enquadrar nas classificações desenvolvidas para solos temperados. Dessa forma, Nogami e Villibor (1981) desenvolveram uma metodologia a qual se baseia em propriedades mecânicas e hídricas, específica para solos compactados tropicais; a Metodologia MCT (Miniatura Compacta Tropical).

5.2.2.1.5. Sistema unificado de classificação dos solos (SUCS)

Esta classificação representa cada solo por duas letras, sendo uma delas um prefixo ligado ao tipo, e um sufixo ligado às características granulométricas e à plasticidade (Figura 4).

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA Mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia e ped com pouco ou nenhum fino
			GP	Pedregulho mal graduado ou misturas de areia e ped. com pouco ou nenhum fino
		Pedreg. Com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped areia e silte
			GC	Pedregulhos argilosos, ou misturas de ped. areia e argila
	Areias: mais de 50% da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas, ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino
			SP	Areias mal graduadas, ou areias pedregulhosas com pouco ou nenhum fino
		Areias com finos	SM	Areias siltosas – misturas de areia e silte
			SC	Areias argilosas – misturas de areia e argila
SOLO DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS Com LL ≤ 50	ML	Siltos inorgânicos – areias muito finas – areias finas siltosas e argilosas	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas	
		OL	Siltos orgânicos – argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade	
	SILTES e ARGILAS Com LL > 50	MH	Siltos – areias finas ou siltos micáceos – siltos elásticos	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade	
	Solos altamente Orgânicos	PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos	

Fonte: DNIT (2006).

Figura 4. Sistema unificado de Classificação de Solos.

5.2.2.1.6. Classificação da *Transportation Research Board* (TRB)

A classificação AASHTO é a mais empregada na classificação de solos para fins rodoviários e nela dividem-se os solos em grandes grupos e subgrupos de materiais granulares (Figura 5). Determina-se o solo por eliminação, da esquerda para a direita, no quadro de classificação. O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir, será a classificação correta (DNIT, 2006).

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Límite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia		Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT (2006).

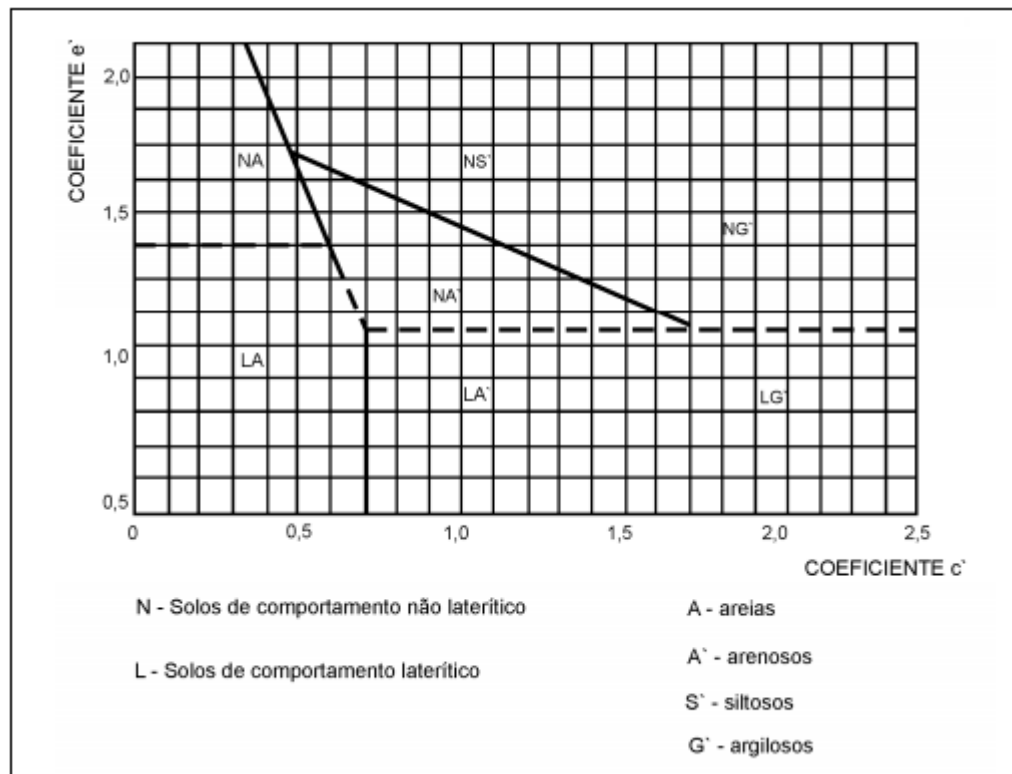
Figura 5. Classificação TRB.

5.2.2.1.7. Classificação Miniatura Compactado Tropical (MCT)

O sistema classificatório MCT foi desenvolvido por Nogami e Villibor (1981) com a finalidade básica de melhor classificar os solos tropicais, uma vez os mesmos apresentam resultados não condizentes com o desempenho real quando classificados através dos métodos tradicionais de solos SUCS e HBR.

Para a classificação dos solos tropicais através dessa metodologia, são realizados ensaios de compactação Mini-MCV (Moisture Condition Value) e ensaios de Perda de Massa por Imersão (Pi) com corpos de prova de dimensões reduzidas e com diferentes teores de umidade. Permite-se, assim, retratar as peculiaridades do solo quanto ao comportamento laterítico ou saprolítico, quantificando propriedades importantes para uso em serviços rodoviários.

Segundo DNIT (2006), a metodologia MCT considera duas classes distintas de solo, isto é, de comportamento laterítico (L) e não laterítico (N) e sete subclasses correspondentes, conforme Figura 6.



Fonte: DNIT (2006).

Figura 6. Ábaco para classificação MCT.

5.2.2.2. Preparação de amostras de solo para base granular

Para atender a distribuição granulométrica nas faixas de granulometria sugerida pelo DNIT (2006), a qual trabalha com porcentagens

de solo passante, primeiramente adaptaram-se tais valores para porcentagens de solo retido.

Em seguida, levando-se em consideração as limitações de tempo e volume de trabalho, no intuito de se englobar todas as faixas granulométricas de interesse, escolheram-se como base de pesquisa as faixas A, C e F, isto é, as duas mais extremas (Faixas A e F) e uma mais intermediária (Faixa C).

As porcentagens adaptadas de peso retido por peneiras e as faixas de interesse trabalhadas são evidenciadas na Tabela 4.

Tabela 4. Base granular em porcentagem de peso retido por peneiras.

PENEIRA		A	B	C	D	E	F
	mm						
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1"	25,40	0,00	17,50	0,00	0,00	0,00	0,00
3/8"	9,53	52,50	25,00	32,50	20,00	0,00	0,00
4	4,80	7,50	12,50	17,50	12,50	22,50	15,00
10	2,09	12,50	12,50	12,50	12,50	7,50	7,50
40	0,42	13,50	10,00	15,00	20,00	35,00	27,50
200	0,075	14,00	22,50	22,50	35,00	35,00	50,00
Total	-	100	100	100	100	100	100

Fonte: Adaptação de DNIT (2006).

O solo foi submetido à sequência de peneiras evidenciadas na Tabela 4, isto é, passando primeiramente pela peneira de 2 polegadas (50,80 mm) e terminando na de número 200 (0,075 mm). Garantiu-se assim que todo o material passasse pela sequência de malhas da norma DNIT; desde aquela mais aberta até a mais fechada. Uma vez passando por cada peneira, a quantidade de solo retida foi separada até se atingir a porcentagem especificada na faixa em questão.

Após ser atendida tal quantidade, a mesma foi ensacada, pesada e identificada. Entre cada peneira o solo retido foi submetido ao soquete, no intuito de desagregar e facilitar a passagem de material às outras peneiras. Tal procedimento, além de assegurar que o material passasse por todas as

malhas, permitiu que fossem retidas apenas as porções de solo que realmente não podiam ser desagregadas.

Através do processo de peneiramento e utilizando-se de cálculo proporcional, evidenciou-se que as peneiras 3/8" e a número 4 da sequência não reteriam as quantidades suficientes de solo exigidas pela norma, devido à natureza granulométrica do solo coletado.

Dessa forma, para suprir a necessidade de material nessas faixas granulométricas, adotou-se como alternativa o uso de brita 1 em substituição ao retido na peneira 3/8" e brita 0 para o retido na peneira número 4 (ambas provenientes da pedreira de Ervália, em Ervália, MG), uma vez que a granulometria de tais britas muito se assemelha àquelas do solo que seriam retidas pelas peneiras. Utilizando-se dessa alternativa, as quantidades de solo retido obtidas em cada peneira obedeceu aos valores percentuais estabelecidos categoricamente para as faixas granulométricas A, C e F da norma DNIT (2006).

Ao fim do processo de peneiramento, obteve-se então uma sequência de sacos identificados contendo as porções de solo retidas em cada peneira, os quais foram armazenados em segurança e salvos de umidade (Figura 7).

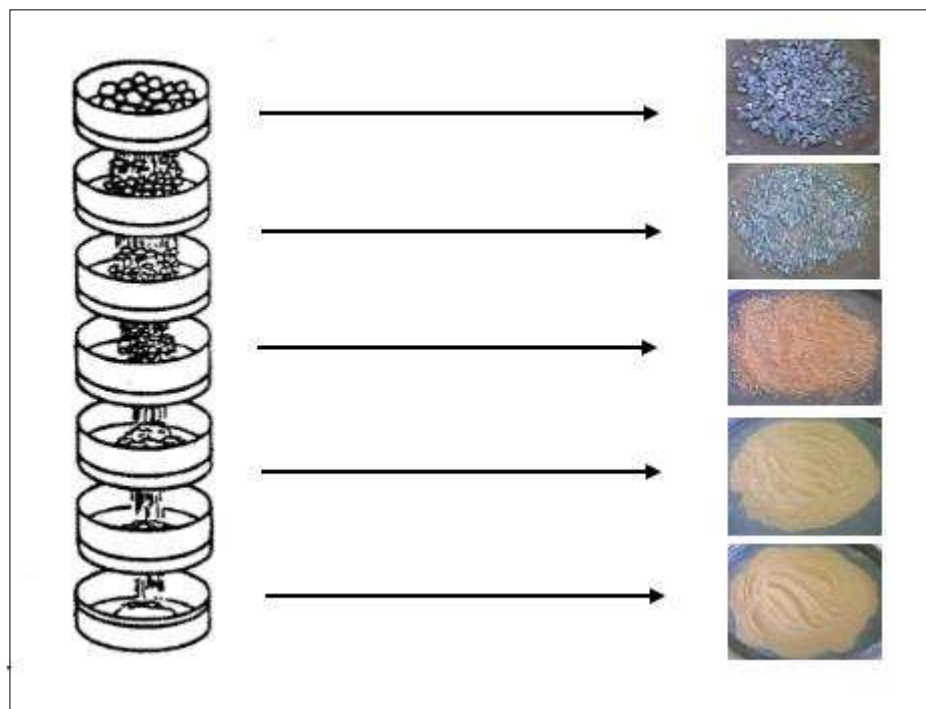


Figura 7. Granulometria retida por peneira, segundo a norma DNIT (2006).

As amostras secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas, quarteadas, peneiradas e separadas em sacos por granulometria, passaram então à fase de mistura para composição das faixas granulométricas A, C e F (Figura 8).

Tal montagem obedeceu aos percentuais indicados na Tabela 4, isto é, utilizaram-se quantidades de solos proporcionais às porcentagens indicadas. Após a montagem do solo, nas referidas faixas procederam-se à adição dos aditivos químicos estabilizantes.

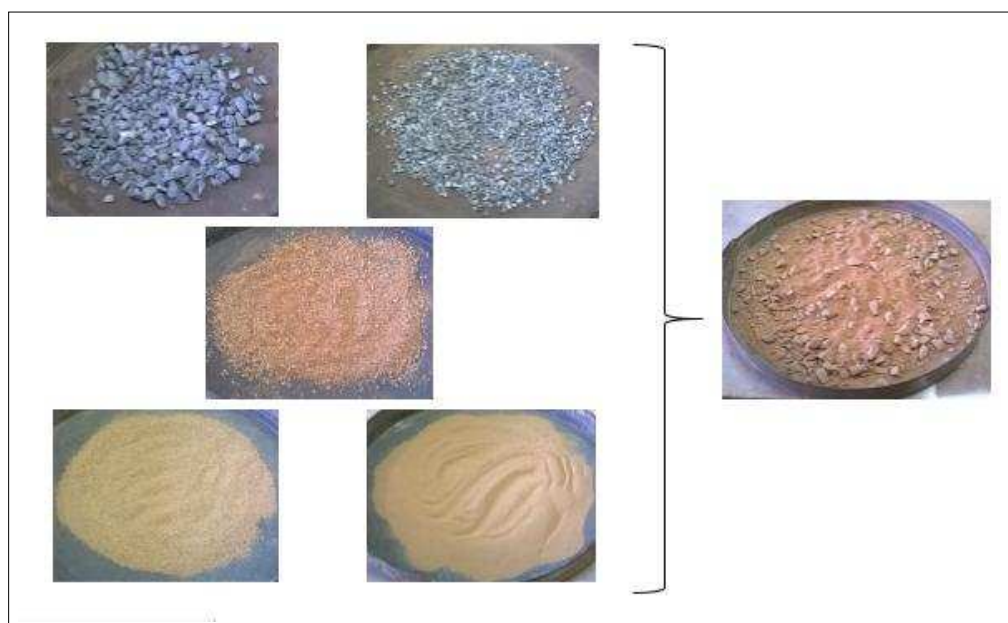


Figura 8. Composição das faixas granulométricas de interesse.

5.2.2.3. Determinação da umidade natural e higroscópica

A umidade natural de um solo é a quantidade de água que o mesmo apresenta uma vez encontrado na natureza. Pode-se definir tal umidade pela razão entre o peso da água existente no solo (P_a) e o peso do solo seco (P_s), isto é, apenas o peso dos grãos.

$$h = \frac{P_a}{P_s} \times 100$$

Já a umidade higroscópica é aquela que o solo apresenta quando seco ao ar, isto é, quando ao ser seco, reduz-se sua umidade natural a um

ponto mínimo, o qual, ainda que se mantenha sob secagem por longo período, sempre apresentará uma umidade residual, denominada higroscópica.

O teor de umidade higroscópica tende a ser maior quanto mais argiloso for o solo. Nos solos de granulação grossa (areias e pedregulhos) ela é praticamente desprezível.

O procedimento de determinação do teor de umidade dos solos está contido na norma NBR 6457/2016 – ABNT.

Para tais análises foram separadas 3 cápsulas do solo de interesse (natural e combinado nas três faixas A, C e F). Os seguintes dados foram coletados para cada determinação de umidade: número e peso da cápsula; peso da cápsula mais solo úmido e peso da cápsula mais solo seco.

As cápsulas após serem pesadas foram então levadas à estufa por um tempo mínimo de 12 horas, a partir das quais as mesmas tiveram as suas umidades higroscópicas determinadas, como citado anteriormente. Para cada cápsula, calcula-se a umidade do solo através da fórmula:

$$h = \frac{P_a}{P_s} \times 100 = \frac{P_{\text{cápsula mais solo úmido}} - P_{\text{cápsula mais solo seco}}}{P_{\text{cápsula mais solo seco}} - P_{\text{cápsula}}} \times 100$$

Para cada faixa (A, C e F, além do solo natural), trabalhou-se com a média dos valores encontrados das cápsulas. A partir de tais umidades, procedeu-se aos cálculos de adição de água às amostras para a realização dos ensaios mecânicos.

5.2.2.4. Processo de mistura solo-estabilizantes químicos

Antes de qualquer adição, para fins comparativos, prepararam-se os corpos de prova baseados no solo em seu estado natural, isto é, como foi coletado em campo, sem ter sido submetido aos peneiramentos para composição granulométrica. Também foram preparadas amostras de solo sem qualquer tipo de aditivo estabilizante, ou seja, com o solo apenas peneirado e combinado granulometricamente.

Para adição dos estabilizantes químicos ao solo foram utilizados os procedimentos de separação e pesagem de solo seco de interesse e adição de cimento, cal e cimento-emulsão separadamente ao mesmo, em forma de ensaios individuais.

5.2.2.4.1. Adição de cimento ao solo

Optou-se pela adição de cimento Portland CP II E-32, por possuir melhor ação neste tipo de material. Foi utilizado o teor de 4% de cimento, tomados em relação à massa de solo seco, para a análise do comportamento mecânico das amostras de solo-cimento, seguindo vasta literatura.

As misturas foram preparadas adicionando-se o cimento ao solo e realizando-se a homogeneização da mistura. Em seguida adicionou-se água à mistura solo-cimento e o conjunto foi novamente homogeneizado. Finalmente foram compactados os corpos de prova para os ensaios mecânicos, em um intervalo de tempo inferior a uma hora devido às reações químicas envolvidas.

5.2.2.4.2. Adição de cal ao solo

Quanto à cal foram realizados dois tipos de ensaios: quando adicionada ao solo a cal em concentração de 4% e quando adicionada a 8% tomados em relação à massa de solo seco. Dessa forma, a análise de duas dosagens de cal tem o intuito de verificar o comportamento mecânico da mistura, além da viabilidade econômica de se empregar uma quantidade duas vezes maior de material.

As misturas foram preparadas adicionando-se cal ao solo e realizando-se a homogeneização da mistura. Adicionou-se água à mistura solo-cal e o conjunto foi novamente homogeneizado. Após um repouso de duas horas, buscando aproximar o ensaio da realidade do método de execução em campo, compactaram-se os corpos de prova a serem utilizados nos ensaios mecânicos.

5.2.2.4.3. Adição de emulsão ao solo

A emulsão RR 1-C foi adicionada ao solo combinada com cimento no teor de 4% em relação à massa de solo seco. A adição de cimento junto à emulsão teve como intuito potencializar os efeitos da emulsão, fato este já evidenciado em estudos anteriores presentes na literatura. Os teores de emulsão adicionados substituíram as quantidades de água que seriam necessárias ao umedecimento da mistura. Dessa forma, foi inclusa a emulsão em função dos cálculos de umidade higroscópica da massa de solo seca utilizada.

As misturas foram preparadas adicionando-se o cimento ao solo e realizando-se a homogeneização da mistura. Em seguida, adicionou-se a emulsão à mistura solo-cimento e o conjunto foi novamente homogeneizado. Finalmente, em um intervalo de tempo inferior a uma hora devido à presença de cimento e suas reações químicas, foram compactados os corpos de prova para os ensaios mecânicos.

A Figura 9 ilustra a adição dos três aditivos químicos ao solo, ainda que tenham sido realizados individualmente.



Figura 9. Adição de cimento, cal e cimento-emulsão, respectivamente e em ensaios separados, ao solo de interesse.

A análise do comportamento mecânico das misturas solo-estabilizante foi realizada por meio de ensaios de resistência mecânica: compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR) e resistência à compressão simples (RCS).

A Tabela 5 traz uma síntese dos ensaios realizados: compactação, CBR, RCS e suas respectivas normas.

Tabela 5 - Matriz de ensaios realizados e respectivas normas.

AMOSTRAS	COMPACTAÇÃO NBR 7182/2016	CBR DNIT – ME 172/2016	RCS NBR 12025/2012
Solo NATURAL *	X	X	X
Solo Faixa A	X	X	X
Solo Faixa C	X	X	X
Solo Faixa F	X	X	X
Solo Faixa A + 4% cimento	X	X	X
Solo Faixa C + 4% cimento	X	X	X
Solo Faixa F + 4% cimento	X	X	X
Solo Faixa A + 4% cal	X	X	X
Solo Faixa C + 4% cal	X	X	X
Solo Faixa F + 4% cal	X	X	X
Solo Faixa A + 8% cal	X	X	X
Solo Faixa C + 8% cal	X	X	X
Solo Faixa F + 8% cal	X	X	X
Solo Faixa A + 4% cimento + emulsão	X	X	X
Solo Faixa C + 4% cimento + emulsão	X	X	X
Solo Faixa F + 4% cimento + emulsão	X	X	X

*Situação do solo na forma como foi coletado em campo, ou seja, sem ser peneirado para adequação a determinada faixa granulométrica.

5.2.2.5. Ensaios de comportamento mecânico

5.2.2.5.1. Ensaio de compactação

A adição de água a um solo pouco úmido colabora no processo de compactação, uma vez que aumenta a densidade final do material compactado.

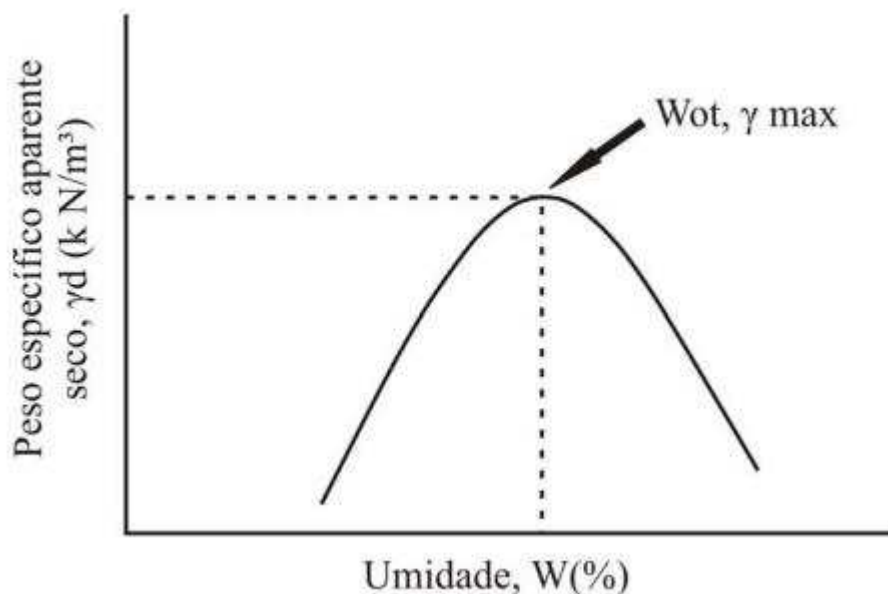
Porém, segundo afirma Kormann (1997), esse aumento de água ao solo só é benéfico até determinado teor de umidade, o qual é chamado de umidade ótima. Quando a adição de água eleva a umidade a pontos superiores à umidade ótima, a densidade do material compactado tende a se reduzir com o acréscimo de umidade.

Dessa forma, são objetivos do ensaio de compactação: determinar a umidade ótima do solo para dada energia de compactação e determinar o peso específico aparente seco máximo associado à umidade ótima.

Realizaram-se ensaios de compactação com amostras de solo puro, solo natural nas faixas granulométricas em estudo e solos nessas faixas estabilizados com cimento, cal e emulsão, separadamente. Os mecanismos para execução desses objetivos obedecem à norma NBR 7182/2016 – ABNT.

Para realização do ensaio de compactação, uma vez tendo em mãos o solo homogêneo com os estabilizantes de interesse, separa-se tal solo em 5 quantidades iguais. Adiciona-se a cada um deles um teor de água conhecido, oriundo dos cálculos de umidade higroscópica, de forma que a curva de compactação defina-se em 5 pontos: dois crescentes no ramo seco e três decrescentes no ramo úmido.

Dessa forma, utilizam-se as cinco amostras aumentando-se a cada uma delas 2% de umidade, a fim de que o primeiro dos pontos esteja geralmente com 5% de umidade abaixo da ótima, para que assim, ao serem acrescidos de 2% em 2%, os três últimos pontos decresçam. Com esses dados, plotou-se uma curva parabólica denominada curva de compactação a partir da qual se consegue determinar a umidade ótima (Figura 10).



Fonte: Trindade (2008)

Figura 10. Curva típica de compactação.

Nesse ensaio trabalhou-se na energia Proctor intermediária, energia de compactação esta onde se aplicam 26 golpes por camada, em 5 camadas, utilizando-se do soquete padrão de 4,54 kg e do cilindro Califórnia. Essa energia foi escolhida com base no tráfego e nos materiais estudados, uma vez que as normas DNIT-ES 139/2010 permitem a escolha da energia de acordo com os parâmetros de projetos.

Após as misturas solo-estabilizante serem umidificadas em teores conhecidos, retirou-se 3 cápsulas de cada uma delas a fim de que, uma vez levadas à estufa por no mínimo 12 horas, se permitisse determinar sua umidade e densidade seca.

Em seguida, procedeu-se à confecção dos corpos de prova dos CBR de 5 pontos utilizando-se dos cilindros CBR, como demonstrado na Figura 11, para posterior compactação. Nessa parte do ensaio, a amostra foi posta dentro de cada cilindro em 5 camadas, uma de cada vez, sendo que cada camada recebe 26 golpes de um soquete de 4,5 Kgf, quantidade de golpes esta normatizada para a energia Proctor intermediária.



Figura 11. Soquete e cilindro Califórnia; equipamentos utilizados no ensaio de compactação.

5.2.2.5.2. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR ou ISC)

O ensaio de CBR, método este desenvolvido nos Estados Unidos pelo Departamento de Estradas de Rodagem da Califórnia, avalia a capacidade de suporte dos solos. Nesse ensaio é medida a resistência à penetração de uma amostra saturada, compactada segundo o método Proctor.

O ensaio CBR ou ensaio de Índice de Suporte Califórnia, foi realizado de acordo com a norma DNIT-ME 172/2016, e se incorpora ao ensaio de compactação, uma vez que se torna sequência do mesmo.

Utilizou-se, portanto, os mesmos corpos de prova do ensaio de compactação, isto é, moldados em umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, utilizando-se a energia intermediária.

Uma vez compactados, os cinco (5) corpos de prova foram levados a uma câmara úmida para o processo de cura, o qual variou conforme o estabilizante utilizado. Para as amostras de solo-cimento e solo-cimento-emulsão, o tempo de cura utilizado foi de sete dias e para as amostras solo-cal esse tempo foi de 14 dias.

Após passarem pelo período de cura, os cilindros CBR foram levados à imersão por um tempo determinado de 96 horas, tempo durante o qual se

mediu a expansão, conhecida como Expansão-CBR, das amostras de solo (Figura 12).



Fonte: Laboratório de Engenharia Civil – UFV

Figura 12. Corpos de prova em imersão no ensaio CBR.

Decorridas as 96 horas, os corpos de prova foram submetidos ao teste de resistência à penetração. Para tal, eles foram retirados da imersão, colocados inclinados para a retirada do excesso de água e levados a uma prensa provida de um pistão que penetra no corpo de prova à medida que são obtidos os valores de resistência (Figura 13).



Fonte: Laboratório de Engenharia Civil – UFV

Figura 13. Ensaio de penetração CBR.

O ensaio de CBR é calculado para as penetrações de 2,5 e 5,0 mm; sendo utilizado o maior valor encontrado. O CBR_{2,5} e o CBR_{5,0} foram obtidos a partir do uso das seguintes Equações, respectivamente:

$$\text{CBR}_{2,5} = (\text{carga} * 100) / 1350$$

$$\text{CBR}_{5,0} = (\text{carga} * 100) / 2050$$

Onde, carga diz respeito à leitura realizada no anel dinamométrico multiplicada pela constante de calibração do referido anel.

Quando da utilização da Prensa Marshall CBR automatizada, a leitura obtida com a célula de carga já representava a própria carga, não necessitando portanto a multiplicação pelo valor da constante do anel.

Com os dados obtidos através desse ensaio, plota-se uma curva CBR relacionando-se os valores de pressão com os valores de penetração, conforme exemplifica a Figura 14.

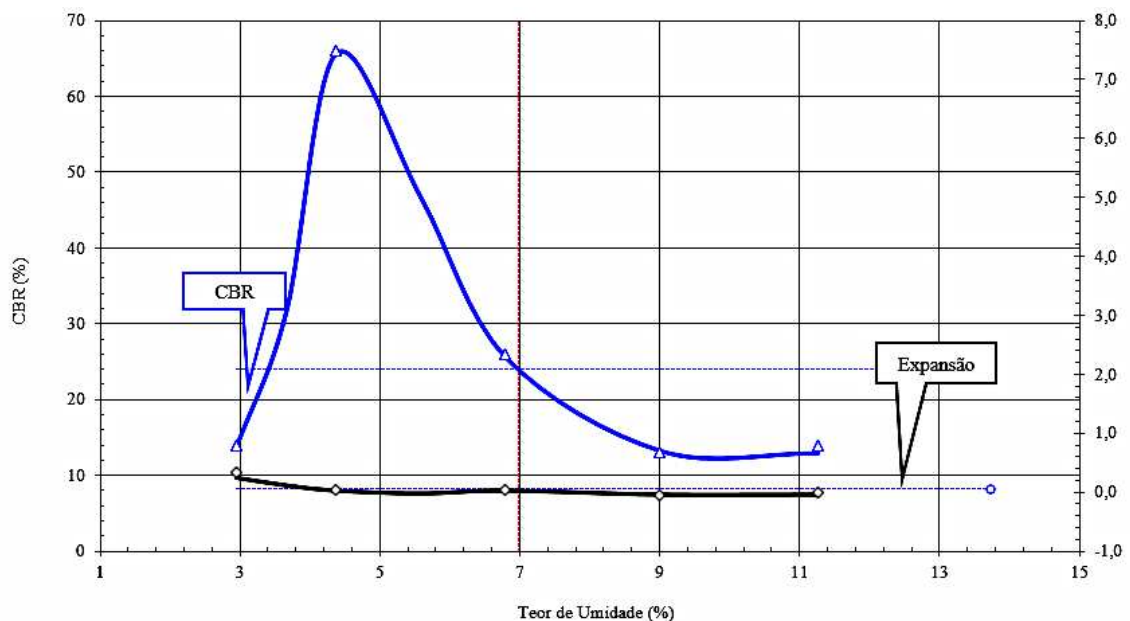


Figura 14. Exemplificação de curva CBR.

5.2.2.5.3. Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado de acordo com a norma NBR 12025/2012. Os corpos de prova foram moldados em cilindro próprio, Proctor, menor que o utilizado nos ensaios anteriores, em

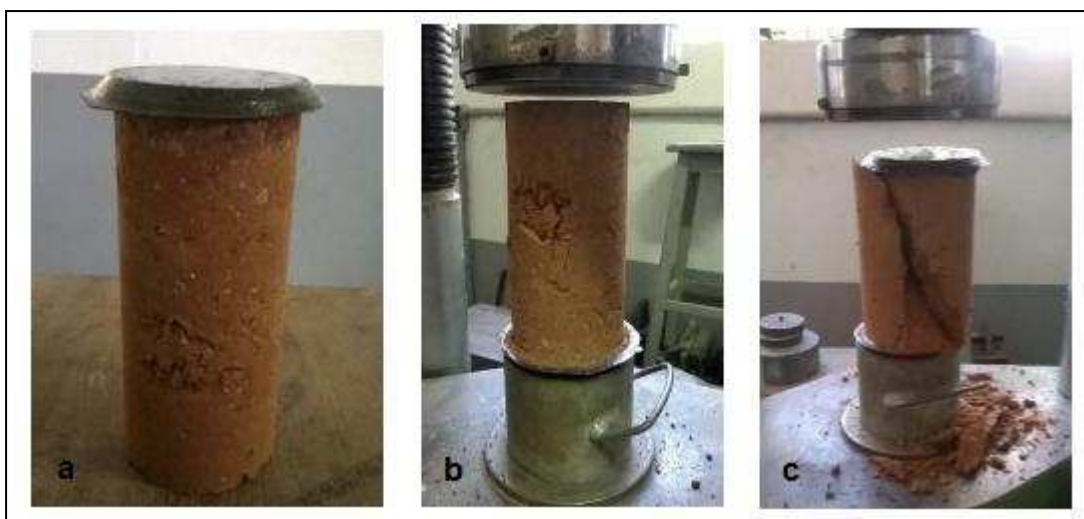
umidade ótima e peso específico aparente seco máximo; determinados no ensaio de compactação, utilizando-se a energia intermediária.

Os ensaios foram realizados com amostras de solo puro e solo natural nas faixas granulométricas em estudo e solos nessas faixas estabilizados com cimento, cal e cimento-emulsão, separadamente.

Para cada composição foram compactados três corpos de prova, os quais, assim como nos ensaios anteriores, foram levados à câmara úmida para o processo de cura após a compactação. Obedeceu-se aos mesmos períodos de cura aplicados aos ensaios CBR, ou seja, sete dias quando da presença de cimento e 14 dias quando da presença de cal.

Decorrido esses tempos, os corpos de prova tiveram suas bases niveladas com o emprego de enxofre para melhor ajuste à prensa, conforme Figura 15 (a), e então foram levados à mesma para rompimento, conforme indica a Figura 15 (b) e (c).

À medida que as amostras sofriam compressão, obtinham-se os valores de pressão aplicados sobre elas. Com posse de tais dados, trabalhou-se com as médias dos valores dos três corpos de prova por estabilizante.



Fonte: Laboratório de Engenharia Civil – UFV

Figura 15. Corpo de prova nivelado com enxofre (a); submetido à prensa no ensaio RCS (b) e após seu rompimento (c), respectivamente.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do cascalho em seu estado natural apresentou a seguinte granulometria: 13% de pedregulho, 63% de areia, 13% de argila e 11% de silte (Tabela 6).

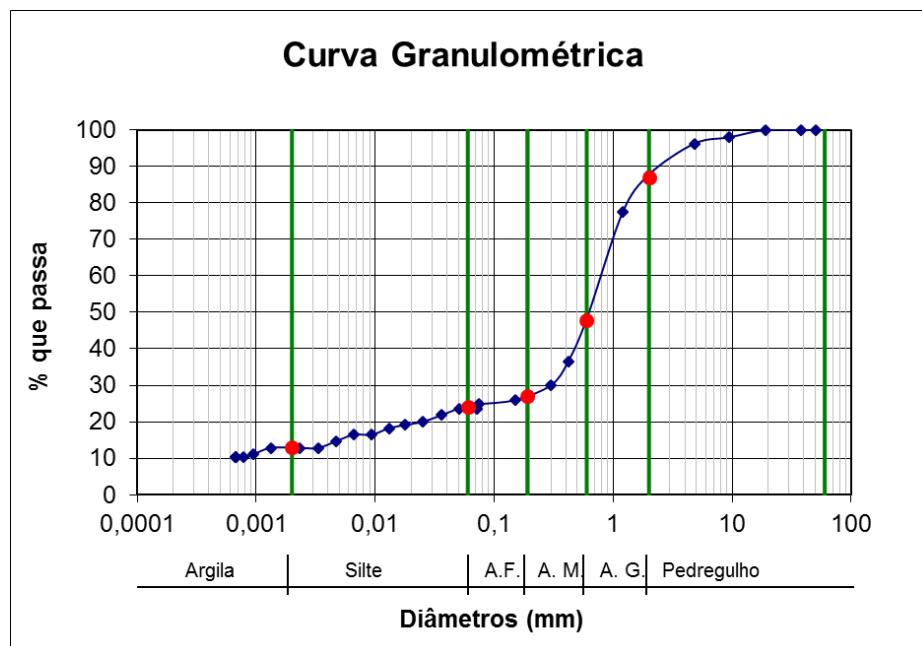
Tabela 6. Caracterização do solo da jazida em seu estado natural, na escala ABNT.

Composição Granulométrica (%)			
Argila	Silte	Areia	Pedregulho
13 %	11 %	63 %	13 %

O solo estudado apresentou quantidade considerável de finos, uma vez que os valores de argila e silte somam-se em 24%. A parte de granulometria mais grossa, no caso os pedregulhos, reforça a origem do solo, isto é, proveniente de uma jazida de cascalho onde naturalmente esperam-se grandes porções de pedras e material grosso para atender as funções comerciais a que se destina a cascalheira.

Dessa forma, segundo a norma da ABNT, o solo em questão pode ser classificado como sendo pedregulho-areno-argilo-siltoso.

A análise granulométrica do solo é apresentada em seguida, conforme a Figura 16.



A.F – Areia Fina; A.M – Areia Média; A.G – Areia Grossa

Figura 16 – Curva granulométrica do solo em estudo.

Os resultados dos ensaios de limite de consistência (limite de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade) e ensaio de massa específica dos sólidos foram compilados na Tabela 7.

Tabela 7. Limites de consistência e massa específica dos sólidos para o solo em seu estado natural.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Massa específica dos sólidos (g/cm ³)
Gomide	37	23	14	2,664

Com base nos dados granulométricos, limites de consistência e propriedades plásticas do solo estudado, procedeu-se às classificações do mesmo, apresentadas na Tabela 8 de forma comparativa.

Tabela 8. Classificação SUCS, TRB e MCT do solo coletado.

SOLO	CLASSIFICAÇÃO SUCS	CLASSIFICAÇÃO TRB	CLASSIFICAÇÃO MCT
Gomide	SC	A-2-6	NA'

Com base na classificação SUCS, o solo foi enquadrado como SC, isto é, areia argilosa (mistura de areia e argila), apresentando porção graúda e presença de finos. Pela classificação TRB, comumente mais utilizada para estradas, baseado em sua granulometria passante e nos limites de liquidez e plasticidade apresentados, o solo se mostrou pertencente ao grupo A-2-6, que representaria um solo com bom funcionamento para sub-base de pavimentos. Já quanto à metodologia MCT, o solo foi classificado como NA', ou seja, solo arenoso não-laterítico, que de uma forma geral são misturas de areais quartzosas com finos de comportamento não-laterítico.

Após a classificação do solo procedeu-se aos resultados do ensaio CBR. Uma vez submetidas à prensa Marshall foram dados os resultados para as penetrações do pistão nos corpos de prova às profundidades de 2,5 mm e de 5 mm. Tanto para o solo sem quanto para o solo com aditivos químicos, trabalhou-se com o maior valor encontrado entre essas penetrações para determinação do índice de suporte CBR final das misturas.

Em decorrência do tipo de aditivo, quando a resistência se apresentava muito alta, por vezes a prensa atingia seu limite de leitura (300% ou mais). Nesses casos, não foi possível atingir a penetração de 5,0 mm como ocorrido para os demais ensaios, devido à “Prensa Marshall-CBR” ter se desligado automaticamente ao atingir a carga máxima registrada pela célula de carga.

Em virtude de tal fato, ocorreram duas possibilidades: consideração do CBR obtido na penetração de 2,5 mm ou, quando essa não era atingida, considerava-se “Carga Máxima”.

Esse procedimento justificou a necessidade de se ensaiar posteriormente os materiais segundo suas especificações, ou seja, empregar o ensaio de resistência à compressão simples para um período de cura de sete dias para a mistura sol-cimento e solo cimento-emulsão e de 14 dias para solo-cal.

Dessa forma, a Tabela 9 apresenta os resultados obtidos em relação aos ensaios de compactação, de CBR e de RCS para as amostras estabilizadas com cimento, cal e cimento-emulsão separadamente.

Tabela 9. Resultados dos ensaios de compactação, de CBR e de RCS.

AMOSTRAS	COMPACTAÇÃO		CBR		RCS
	W _{ót} (%)	Y _{dmáx} ³ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão CBR (%)	(MPa)
Solo NATURAL (CG)	11,6	1,99	56,4	0,16	0,26
Solo FAIXA A	6,99	2,21	24	0,07	0,075
Solo FAIXA C	8,21	2,23	8,2	0,07	0,075
Solo FAIXA F	11	2,02	31,8	0,96	0,17
Solo FAIXA A + 4% Cimento	6,99	2,24	>300	0,07	1,15
Solo FAIXA C + 4 % Cimento	7,99	2,24	>300	0,07	1,244
Solo FAIXA F + 4 % Cimento	10,91	2,04	>300	0,07	1,433
Solo FAIXA A + 4 % Cal	6,77	2,12	>300	0,07	0,294
Solo FAIXA C + 4 % Cal	7,63	2,13	207	0,07	0,413
Solo FAIXA F + 4 % Cal	12,05	1,91	181	0,07	0,429
Solo FAIXA A + 8 % Cal	6,77	2,12	109,4	0,07	0,423
Solo FAIXA C + 8 % Cal	7,63	2,13	169	0,07	0,41
Solo FAIXA F + 8 % Cal	12,05	1,91	158,9	0,07	0,475
Solo FAIXA A + 4 % Cimento + Emulsão	3,89	2,11	97,6	0,07	0,213
Solo FAIXA C + 4 % Cimento + Emulsão	3,24	2,12	109,7	0,07	0,266
Solo FAIXA F + 4 % Cimento + Emulsão	3,5	1,88	108,4	0,07	0,094

(CG – Cascalheira Gomide)

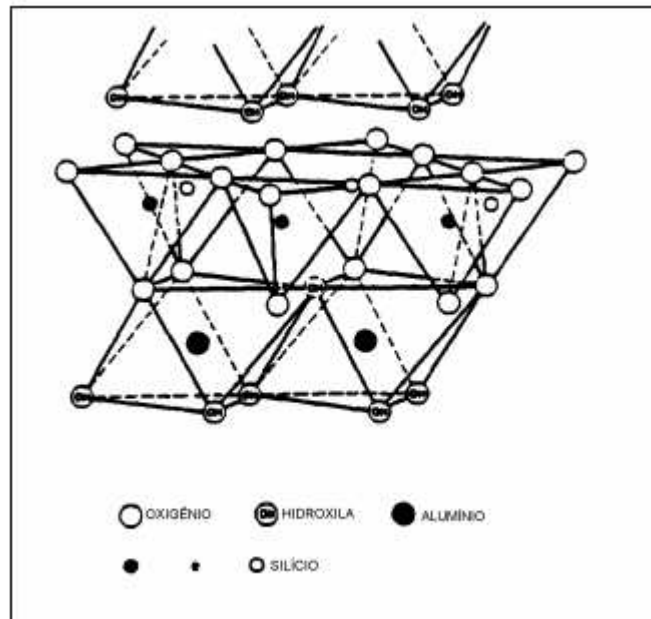
Atentando-se aos resultados descritos acima, constata-se que o solo natural, isto é, na forma em que foi coletado em campo sem passar por peneiramento de adequação a qualquer faixa, apresentou uma capacidade de suporte (CBR) de 56,4%.

Tal valor pode ser associado à composição granulométrica do solo da cascalheira que apresentou grande porção de finos, tendo 13% de argila e 11% de silte. A presença desses finos compõe a mineralogia do solo em questão e justifica a ocorrência de argilominerías do tipo caulinita.

A caulinita é o argilomineral mais comum em solos residuais maduros, considerada o principal mineral dos solos desenvolvidos sob condições tropicais úmidas (MELO et al., 2001b).

Possuindo a fórmula estrutural (OH)₈Al₄Si₄O₁₀, é um argilomineral que apresenta camadas do tipo 1:1, com estrutura filossilicatada, resultantes de

uma folha tetraédrica combinada com uma octaédrica que se superpõe indefinidamente (GRIM 1968), conforme Figura 17.



Fonte: Grim (1962).

Figura 17. Arranjo estrutural da caulinita.

Suas propriedades, juntamente com as propriedades dos óxidos secundários de Fe e Al, são em grande parte responsáveis pelo comportamento da fração argila desses solos. Devido às suas características estruturais, como a distância reticular muito pequena e a baixa adsorção superficial, não ocorre hidratação de suas camadas, o que explica o fato desse argilomineral, além de ser muito estável na presença de água, apresentar baixa expansividade e plasticidade (CARVALHO, 1997).

Seguindo-se a norma que rege os ensaios de compactação de camadas de sub-base e base granulares, quanto a expansão e suporte devem ser atendidas as seguintes especificações (TRINDADE, 2008):

- A expansão determinada no ensaio CBR deverá ser inferior a 0,5%;
- O CBR do material a ser utilizado em camadas de sub-base deverá ser igual ou superior a 20%, e do material a ser utilizado em camadas de base, superior a 60%. Para rodovias em que o tráfego previsto ultrapasse o valor de $N = 5 \times 10^6$, o CBR do material da camada de

base deverá ser superior a 80%; neste caso a energia de compactação será a do ensaio Proctor modificado.

Conforme a Tabela 9, o solo natural em estudo apresentou 0,16% de expansão, se enquadrando dentro da norma e evidenciando que a quantidade de finos característicos de caulinita no solo em estudo possibilitou uma baixa expansibilidade do mesmo.

Ainda segundo a norma de compactação, o valor de CBR apresentado pelo solo natural coletado, de 56,4%, se posicionou muito superior ao exigido para sub-base e aproximado daquele exigido para funções de base. Mais uma vez pode-se ater ao raciocínio proporcionado pelos finos de argilominerais do tipo caulinita, que através de suas interações de estabilidade, expansão e plasticidade, explicam tal valor CBR que evidencia um alto suporte do solo.

Quanto à resistência à compressão simples, o solo sem aditivos apresentou RCS no valor de 0,26 Mpa. Segundo a norma do ensaio RCS para amostras de solo-cimento, o qual é utilizado como parâmetro, resultados significativos devem apresentar-se superiores a 2,1 Mpa. Dessa forma, o solo natural em destaque evidenciou valor abaixo de tal norma.

Quanto ao solo coletado na jazida que foi peneirado e enquadrado nas faixas A, C e F do DNIT, porém sem uso de estabilizantes, verificou-se que todas as faixas analisadas apresentaram valores de CBR e RCS abaixo daqueles apresentados pelo solo em estado natural. Ainda assim, dentre elas, a faixa F, a qual possui maior quantidade de finos em sua composição, apresentou os resultados mais satisfatórios, mesmo com a expansão_{CBR} superior ao recomendado pela norma; o que pode ser corrigido com o acréscimo de baixos teores de cal ou de cimento.

Desse modo, nota-se que o desarranjo natural do solo coletado e sua posterior recombinação granulométrica em faixas desfavoreceram seus índices de resistência e suporte. O valor de 20% de CBR, normatizado para sub-base, de modo geral quase não é atendido, sendo apenas alcançado pela faixa A e F e ainda assim em valores próximos ao limite. Na hipótese do solo em questão ser utilizado para base, os resultados são ainda mais discrepantes, visto que para tal, exige-se um CBR de 60%.

Os resultados descritos para o solo adequado às faixas sem estabilizantes evidenciam que este último não atende satisfatoriamente as especificações do DNIT. Esses baixos valores de suporte e resistência para solos granulares reforçam a ideia de que ditas especificações estão baseadas e direcionadas especialmente às vias pavimentadas, as quais recebem a capa asfáltica ao fim do processo de pavimentação.

Dessa forma, as estradas florestais por não possuírem esse revestimento, acabam por não atender as recomendações do DNIT. Diante disso, se justifica então o tratamento de solos granulares com estabilizantes químicos (neste estudo cimento, cal e emulsão) para compensar os efeitos da não pavimentação, reforçar as camadas de base e se atingir os valores de suporte e resistência especificados pelas normas.

Posto isso, ao se trabalhar o solo agregando-se 4% de cimento Portland como estabilizante químico, notou-se que os valores de CBR atingiram os níveis máximos lidos pela prensa Marshall, igual ou superiores a 300%. Essa elevação brusca nos Índices de Suporte Califórnia apresentou-se 3 vezes superior ao CBR padrão, aquele no qual se emprega a brita graduada.

A expansibilidade dos corpos de provas estabilizados com cimento se manteve em níveis baixos. Já com relação aos ensaios de resistência à compressão simples, os valores encontrados ficaram abaixo daquele recomendado pela norma, ou seja, 2,1 Mpa para amostras com 7 dias de cura. Porém, ainda assim houve melhora nessa característica quando comparado ao solo sem qualquer aditivo químico.

Esse ganho em resistência reafirma a teoria presente na literatura de que nos solos granulares, o cimento proporciona ligações intergranulares que garantem a resistência mecânica.

Segundo Lilley (1973) *apud* Balbo (1996), o cimento pode conferir resistência de diferentes formas dependendo do material utilizado. Essa resistência é resultado dos contatos pontuais gerados pelo cimento no solo, fornecendo coesão aparente. Em matrizes de solo predominantemente finos, o cimento atua como uma pasta, recobrando as partículas e unindo grãos soltos. Em materiais mais granulares, esse efeito ocorre de forma pontual, dependendo do tamanho dos agregados e dos espaços vazios.

Quanto aos tratamentos dos corpos de prova estabilizados com 4% de cal, notou-se que os valores de CBR finais foram bastante superiores aos dos tratamentos de solo sem estabilizantes, chegando a faixa A a apresentar carga máxima na prensa Marshall, desligando-a automaticamente.

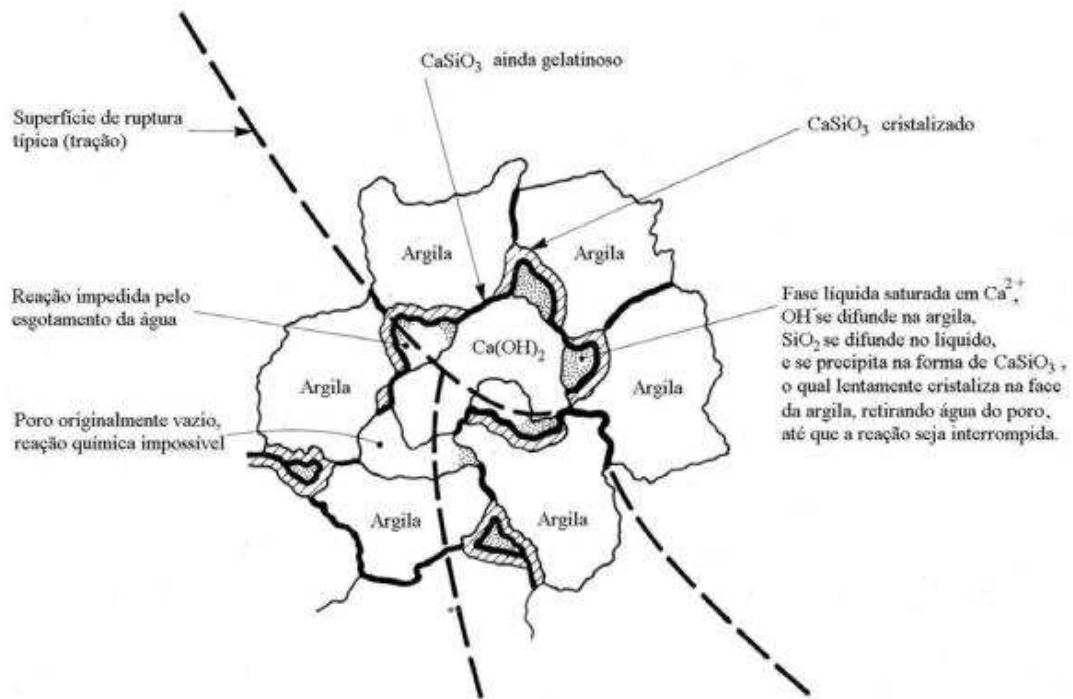
Os valores de expansão permaneceram iguais aos ensaios anteriores, abaixo de 0,5%, e os valores de RCS apresentaram incremento quando comparados aos do solo não tratado.

Já para as amostras com o dobro de cal adicionada, isto é, tratando-as com 8% de cal, os resultados obtidos evidenciaram que houve grande melhora nos índices de CBR quando comparados ao solo sem estabilizantes. Porém, em relação às amostras com 4% de cal, notou-se que os valores de CBR foram mais baixos que estas, inferindo conseqüentemente menor suporte do solo.

Em se tratando de ensaios de resistência à compressão simples para amostras estabilizadas com cal, a norma DNER-ME 180/94, a qual rege tais ensaios, sugere como valor satisfatório 2,17 Mpa para 14 dias de cura.

Baseado nessa regra observou-se que os valores encontrados para o material estabilizado com 8% de cal ficaram abaixo do sugerido pela norma, porém, ainda assim superiores aos apresentados pelo solo sem tratamento estabilizante. Quando comparados às amostras RCS tratadas com 4% de cal, percebeu-se que, de modo geral, a resistência à compressão simples não apresentou diferenças significativas.

O ganho de resistência das amostras tratadas com cal em relação às amostras não tratadas é baseado no comportamento peculiar das interações da cal no solo. Segundo Cristelo (2001), naturalmente as reações pozolânicas, características das interações solo-cal como mostrado na Figura 18, formam o silicato hidratado de cálcio e/ou o aluminato de cálcio hidratado, através de reações entre a cal, a sílica e a alumina livre nas partículas de argila.



Fonte: Ingles e Metcalf (1972).

Figura 18. Esquema de interação solo-cal.

Em um ambiente de pH elevado, a interação entre os íons cálcio e a argila dissolve a sílica e a alumina das partículas do solo, e tais íons dissolvidos combinam-se com os íons de cálcio, formando agentes cimentantes. Esses por sua vez, se interligam nas partículas argilosas e acabam sendo responsáveis por aumentos significativos de resistência mecânica.

Como um dos fatores que influenciam as reações do solo é sua acidez/alcalinidade, o solo estudado foi submetido à análises para determinação de seu pH. Foram realizados dois procedimentos: avaliação do pH do solo na presença de água e na presença de cloreto de potássio, ambos medidos com pHmetro em solução concentrada de 1:2,5.

Os resultados de tais análises evidenciaram pH ácido do solo para os dois métodos, tendo o tratamento com água apresentado pH de 6,14 e com KCl, pH de 4,67. Esse valor de pH revelado pelo cloreto de potássio se explica pelo fato desse composto interagir com os metais presentes no solo

implicando na troca de metais, e dessa forma, haver a tendência de dito pH se apresentar mais baixo que aquele tratado com água.

Dessa forma, o meio alcalino cal uma vez em contato com o solo provoca alteração do pH, fazendo com que a reação cal-solo inicie-se quase imediatamente. Quando a cal é adicionada ao solo, seu pH, em geral entre 4,5 e 6,5, eleva-se para 11-12. São criadas condições alcalinas nas quais os minerais da fração argila e até o próprio quartzo podem reagir com a cal. Reações de floculação e aglomeração acontecem em primeiro lugar, acompanhadas da troca iônica entre as argilas presentes no solo e a cal (GUIMARÃES, 1998).

A resistência evidenciada nos tratamentos com 4% de cal são baseadas, portanto, nessas trocas catiônicas, nas reações de floculação e carbonatação, além das pozolânicas naturais nas interações solo-cal.

Porém, à medida que se aumentou a concentração de cal às amostras, de 4% a 8%, percebeu-se que houve um decréscimo em resistência mecânica.

Ainda que, segundo Thompson (1966), solos mais ácidos necessitem maior quantidade de cal para que a mistura desenvolva um ambiente propício para as reações pozolânicas, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que o aumento do teor de cal nem sempre implica em aumento de resistência. Isso indica que pode haver um teor ótimo para a estabilização dos solos, que, quando ultrapassado propicia redução da taxa de ganho, passando a cal a atuar como finos, reduzindo a resistência da mistura.

Ainda, segundo Klinsky et al. (2014), o incremento em resistência do solo é particular ao tipo de solo e ao teor de cal adicionado

Nesse sentido, associa-se tal comportamento ao fato de que, em concentrações menores, as partículas de cal reagem abundantemente com as partículas de solo, com interação de íons formando material cimentante de forma efetiva.

Uma vez que a concentração de cal no solo dobrou, houve uma quantidade maior de partículas desse aditivo interagindo, e muitas delas passaram a combinar-se não somente com as partículas do solo, mas também entre si. Dessa forma, os íons provenientes da cal que antes interagiam com íons de argila do solo, passaram a ser combinados também

com outros íons de cal, diminuindo assim a formação de material cimentante e conseqüentemente de resistência.

Ainda, amostras de solo trabalhadas com 8% de cal, além de terem evidenciado menor resistência, inferem também em um viés econômico, visto que implica em maior gasto com esse aditivo. Tal fato se mostra desnecessário e inviável, uma vez que o uso de 4% de cal apresenta-se como a alternativa mais econômica e com resultados mais eficazes.

Ao se trabalhar com amostras de solo-cimento-emulsão, os resultados obtidos apresentaram baixa expansibilidade e melhores índices de CBR e RCS se comparados ao solo sem tratamento estabilizante. Esse acréscimo em resistência mecânica confirma a teoria de Woods et. al. (1960), a qual afirma que materiais asfálticos, quando empregados como agentes estabilizantes, conferem efeitos de resistência, impermeabilização e de estabilização ou inibição da umidade contida nos finos dos solos argilosos.

Ao se adicionar emulsão ao solo, dá-se início a uma série de processos físicos e químicos os quais influenciarão o comportamento mecânico do solo. Na estabilização de solos granulares, a adição de mistura betuminosa provoca uma aglutinação das partículas do solo, o que acarreta um aumento na parcela de coesão. Em solos coesivos, a presença de solução betuminosa provoca um bloqueio dos espaços vazios, impermeabilizando assim o solo, além, de manter a umidade do mesmo (KÉZDI e RÉTHÁTI, 1988).

Porém, o efeito impermeabilizante característico da emulsão asfáltica muitas vezes torna os efeitos de seu uso menos efetivos quando comparada a outros aditivos.

Fazendo-se uma comparação entre o desempenho das amostras de solo-cimento-emulsão, solo-cimento e solo-cal no presente estudo, comprovou-se que a combinação solo-cimento-emulsão proporcionou resultados menos satisfatórios quando comparado ao uso de cimento e de cal de forma isolada.

A explicação para o fato dos valores de resistência e suporte caírem em demasia com o uso de emulsão está na natureza desse estabilizante. A emulsão atua como impermeabilizante, impedindo que o cimento reaja

totalmente com o solo e fazendo com que ele reaja entre si, isto é, entre suas próprias partículas.

Assim, a estabilização solo-emulsão é amplamente influenciada pelos elementos formadores da mistura, como tipo de solo, teor de água, de emulsão e de agregantes, além dos processos inerentes aos procedimentos de mistura.

Dessa maneira, combinando-se à emulsão outros aditivos, os efeitos de resistência mecânica tendem a ser potencializados. Nesse sentido, com o intuito de se testar o desempenho isolado da emulsão no solo granular e os efeitos de agregantes combinados a ela, procedeu-se a algumas análises complementares.

Avaliaram-se, para uma faixa granulométrica apenas, os parâmetros de CBR e RCS para as seguintes amostras combinadas, ambas sem presença de cimento: solo Faixa A + Emulsão e solo Faixa A + Água + Emulsão.

Os resultados de tais análises são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Resultados CBR e RCS para uso isolado de emulsão no solo e na presença de água.

AMOSTRAS	COMPACTAÇÃO	CBR		RCS
	$W_{ót}$ (%)	CBR (%)	Expansão CBR (%)	(Mpa)
Solo Faixa A + Emulsão	7,3	20,3	0,07	0,045
Solo Faixa A + Água + Emulsão	6	41,4	0,07	0,036

Em ambas as análises, evidenciou-se uma enorme queda nos índices de suporte e resistência, muito menores que aqueles apresentados pelas amostras originais de solo-cimento-emulsão.

Ao ser adicionada água à mistura solo-emulsão, o valor de CBR se apresentou superior ao tratamento sem o uso de água. Segundo Ferreira (1980), a adição de água à mistura asfáltica impede a ruptura prematura da emulsão e facilita o processo de mistura.

Ainda, na análise solo-emulsão sem presença de água, o baixo desempenho verificado no ensaio de CBR, apresentando-se no valor de

20,3%, enquadra-se no limite exigido para efeitos de sub-base segundo a norma DNIT.

Tais testes complementares evidenciaram que a emulsão combinada ao solo por si só, apresenta resultados totalmente aquém do satisfatório, o que implica na necessidade de que, ao se trabalhar com emulsão asfáltica, ela seja combinada com outro aditivo para melhor ganho de resistência e suporte.

Tal fato justifica, no presente estudo, o uso de cimento em teor de 4% junto à emulsão, o que explica o aumento dos valores de CBR e RCS averiguados. Apesar da junção cimento-emulsão apresentar resultados inferiores à cal e ao cimento, sua combinação apresentou-se como alternativa muito mais efetiva ao uso isolado de emulsão ao solo.

7. CONCLUSÃO

Segundo os ensaios de caracterização do solo e a classificação TRB, o solo estudado, em sua composição original, é indicado como um material de excelente a bom emprego como subleito.

Quando adequado às faixas granulométricas A, C e F sem adição de estabilizantes químicos, o solo apresentou resultados abaixo do esperado para utilização como sub-base em algumas faixas.

O desarranjo e a posterior recombinação granulométrica em faixas desfavoreceram os índices de resistência e suporte do solo natural. Com isso, justificou-se a adição de estabilizantes químicos como reforço para camadas de base e sub-base.

O solo quando acrescido de cal, cimento ou emulsão como estabilizantes apresentou altos e satisfatórios valores de resistência e suporte, o que comprova a eficácia do uso de aditivos no aumento das propriedades mecânicas do solo.

Dentre os três aditivos analisados, o cimento apresentou os melhores resultados, evidenciando índices de suporte superiores a 300%. Destaca-se, assim, esta combinação como sendo a mais efetiva dentre as analisadas.

A utilização de 4% de cal ao solo apresentou resultados superiores ao teor de 8% desse aditivo, comprovando que as interações da cal no solo são efetivas até determinado teor, sendo seu desempenho fragilizado quando do aumento da mesma.

O uso de cimento-emulsão proporcionou melhoria aos índices de suporte e resistência, porém menos efetiva quando comparado ao uso de cal ou cimento. Amostras trabalhadas apenas com emulsão e sem outros aditivos mostraram baixos valores de resistência e suporte, devido à natureza impermeabilizante da emulsão.

Os resultados de resistência à compressão simples para o solo com aditivos químicos se apresentaram abaixo daquele sugerido pela norma dos ensaios. A solução para esse problema está no aumento do teor de aditivo empregado ou na substituição da energia de compactação intermediária pela modificada ou, ainda, na combinação da nova energia com o aumento do teor de aditivo, levando-se em consideração os aspectos técnicos e econômicos.

As normas do DNIT ao proporem o arranjo granulométrico em faixas na utilização de solo para base e sub-base, baseiam-se em solos os quais receberiam pavimentação. Uma vez que as estradas rurais e florestais não levam essa camada asfáltica, é necessário e justificável reforçar tais solos quimicamente para se atingir os valores especificados pelas normas.

Portanto, a estabilização de estradas florestais combinada mecânica, granulométrica e quimicamente apresenta-se como uma solução viável frente à falta de selamento asfáltico dessas vias, inferindo em bons resultados quanto à estabilização e em reduzida perda de material frente à precipitação e desgaste causado pelo tráfego.

8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a metodologia estudada trabalhando-se na energia modificada como alternativa à energia de compactação empregada.

Ampliar a pesquisa com o emprego de diferentes teores de cimento ao solo, enriquecendo assim as análises para esse aditivo.

Avaliação da viabilidade de adequação de trechos experimentais às faixas de estudo e análise econômica dos custos de implantação das mesmas.

Determinar os efeitos dos aditivos nas propriedades hidráulicas do solo através de ensaio de permeabilidade e de resistência à erodibilidade.

Analisar os efeitos da emulsão na melhoria de outras características do solo: abrasão, coesão e permeabilidade, em compensação aos baixos valores de CBR e RCS apresentados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDA, **Manual básico de emulsões asfálticas**. Soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro, 2003.

ARAUJO, V. M. C.; BRANCO, V. T. F. C.; LIMA, D. M.; CAVALCANTE, R. M. **Avaliação ambiental da utilização de solo contaminado por derivados de petróleo (SCDP) em misturas asfálticas**. Revista Transportes, v. 24, n. 2, 2016. Disponível em: < <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/961> > Acesso em: 15/07/2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v24i2.961>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. DNIT – ES 139/2010. **Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT – ME 172/2016. **Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 6457. **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 6459. **Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 6508. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica e os procedimentos para**

determinação do Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7180. **Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7181. **Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7182. **Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 12025. **Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2012.

BALBO, J. T. **Alguns conceitos diferenciadores dos materiais estabilizados com cimento.** 7ª Reunião de Pavimentação Urbana, São José dos Campos, SP, 1996.

_____. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. v.1. 558 p.

BAPTISTA, C. de F. N. **Pavimentação. Compactação de Solos no Campo; Camadas de Base; Estabilização de Solos.** Tomo II, 2. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1976. 178 p.

BERNUCCI, L.B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504 p.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da Mecânica dos Solos.** 1ª edição. Campina Grande-Paraíba, Ed. Marconi, 1997, 310 p.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT de Transportes – Estatísticas Consolidadas 2016 – 2ª tiragem.** Brasília: CNT, 2016.

_____. SEST; SENAT. **Pesquisa CNT de rodovias 2013: relatório gerencial.** 17. ed. Brasília, 2013, 389 p.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 180/94: **Solos Estabilizados com Cinza Volante e Cal Hidratada – Determinação da Resistência à Compressão Simples.** Rio de Janeiro, 1994.

EMMERT, F. **Avaliação do emprego de técnica de estabilização de solo na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia - GO.** Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, UNB, Brasília, 2010.

FERREIRA, A.M. **Estudo de três solos estabilizados com uma emulsão asfáltica catiônica**. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1980.

FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI GRADE 81”**. Viçosa: Imprensa Universitária - Universidade Federal de Viçosa, 2003. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe - CE**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2008.

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; MEHL, H. U.; SILVA, D. D.; OLIVEIRA, L. F. C. **Equipment to determine erodibility and critical shear stress of soil in road channels**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 9, n. 2, 2005, p. 166-170.

GRIM, R.E. **Applied clay mineralogy**. McGraw-Hill. Publ. Company Ltda, New York, 1962.

_____. **Clay mineralogy**. New York: McGraw-Hill, 1968. 596p.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.

GUYER, J. P. **Introduction to soil stabilization in pavements**. 2011. 28f. Continuing Education and Development, New York. Nova Iorque, Estados Unidos, 2011. Notas de aula.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: Principles and Practice**. 1. Ed. Melbourne, AU: Butterworths, 1972.

KÉZDI, A.; RÉTHÁTI, L. **Handbook of soil mechanics**. Soli Mechanics of Earthworks, Foundations and Highway Engineering, Amsterdam, 1988, 3: 277- 317.

KLINSKY, L. M. G.; FABBRI, G. T. P.; FURLAN, A. P. **Efeito da adição de areia de fundição e cal em algumas propriedades de solos argilosos**. Revista Transportes, v. 20, n. 1, 2012. Disponível em: < <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/577> > Acesso em: 27/07/2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4237/transportes.v20i1.577>

KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. S.; FABBRI, G. T. P. **Efeito da adição de areia de fundição residual e cal a solos argilosos no módulo de resiliência**. Revista Transportes, v. 22, n. 2, 2014. Disponível em: < <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/679> > Acesso em: 27/07/2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v22i2.679>

- KORMANN, A. C. M. **Ensaio de compactação e caracterização**. Curitiba, UFPR, 1997. Disponível em: < <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e1/Apostila1.pdf> > Acesso em: 23/09/2016
- LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização de solo II - Técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa-MG**. Viçosa-MG: UFV, 1993, 32p.
- LOPES, W. G. R. **Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas**. Campinas, SP: 2002. 158p. Dissertação de Doutorado. UNICAMP.
- LUCENA, F. B.; FERREIRA, H.C.; ARAÚJO, R.N.A. **Uso de emulsão catiônica na estabilização de solos lateríticos**. In: Anais da 17º Reunião Anual de Pavimentação Anais. Curitiba, PR, 1982.
- LUCENA, L. C. F. L.; SOUZA, J. A.C. **Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e sub-base de pavimentos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil– Universidade Federal de Pernambuco, 2012.
- MACHADO, C. C.; **Construção e conservação de estradas rurais e florestais**. Viçosa: UFV, 2013.
- MELO, V.F.; FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Características dos óxidos de Fe e de Al de diferentes classes de solos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v.25, 2001b, p.19-32.
- MICELI JR, G. et al. **Comportamento de dois solos do Estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica**. Anais da 37º Reunião de Pavimentação, ABPv, Goiânia, GO. [CD-ROM]. 2006.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias**. In Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro. 1981.
- OLIVEIRA, H. M. **Aglomerantes**. In: BAUER, L. A. Falcão. (Coord.). **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 1v. p. 11-34.
- OLIVEIRA, M. J. G. **Classificação para orientar a manutenção de vias não pavimentadas**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. Joinville: 2005.
- OLIVEIRA, T. M.; SANT'ANNA, G. I.; MACHADO, C. C. **Efeito da adição da cal na estabilidade e na resistência à compressão da mistura solo-grits**. Rem: Revista Escola de Minas. Vol.62, n.1, 2009, pp.87-92. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rem/v62n1/a12v62n1.pdf> > Acesso em: 15/07/2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672009000100012>.

PATRICIO, J. D. **Estudo de solos modificados por adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2015.

PITTA, M. R. **Estabilização com solo-cimento.** Revista Techné, n.17, jul./ago. São Paulo: Editora Pini, 1995. 96 p.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica.** Viçosa: Imprensa Universitária - Universidade Federal de Viçosa, 2008. 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

SILVA, D. P. **Estudo do comportamento geológico de solos estabilizados com cimento: processos gerais de estabilização.** Lisboa: Ministério de obras públicas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1968, 343p. (Especialização).

SNV – SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO. SNV 2016 – Atualizado até 16/09/2016: SNV 2016 COMPLETO – **Rede rodoviária sob jurisdição do Ministério dos Transportes.** Disponível em: < <http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao> > Acesso em: 21/09/2016.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils.** *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divisions.* V.92, N. SM5, pp. 67-92. Reston, US: 1966.

TRINDADE, T. P.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A.; SILVA, C. H. C.; MACHADO, C. C. **Compactação dos solos: fundamentos teóricos e práticos.** 1a ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. 95p.

VISSER, A. T. and HUDSON W. R., **Performance, Design and Maintenance Relations for Unpaved Low-Volume Roads,** In: Third International Conference on Low-Volume Roads, Transportation Research Record 898, Washington, D.C., USA. Volume 1, 1983, pp.164 – 174.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano Para Base de Pavimentos.** In: Engenharia Civil. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2010.

WOODS, K. B.; BERRY, D. S. & GOETZ, W. H. **Highway Engineering Handbook.** McGraw-Hill Book Company. New York, 1960.

YODER, E. J. & WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design.** John Wiley & Sons Incorporation, 2nd Edition. Canadá, 1975. 711p.