



**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ALEC MATHEUS MACHETI MACHADO**

**BENEFÍCIO DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM ADIÇÃO DA CAL**

**Rondonópolis/MT**

**2024**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ALEC MATHEUS MACHETI MACHADO**

**BENEFÍCIO DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM ADIÇÃO DA CAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Avaliadora do Departamento de Engenharia Civil, da Faculdade FASIPE de Rondonópolis, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Maria Amelia Rodrigues da Costa

Professor da Disciplina: Maria Amelia Rodrigues da Costa

**Rondonópolis/MT**

**2024**

**ALEC MATHEUS MACHETI MACHADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Avaliadora do Departamento de Engenharia Civil, da Faculdade FASIFE de Rondonópolis, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em

Professor(a) Orientador(a): Maria Amelia Rodrigues da Costa  
Departamento de engenharia civil – FASIFE

Professor(a) Avaliador(a): Heiryadna de Souza Ribeiro  
Departamento de engenharia civil – FASIFE

Professor(a) Avaliador(a): Erik Leonardo Calixto  
Departamento de engenharia civil – FASIFE

Professor(a) Avaliador(a): Maria Amelia Rodrigues da Costa  
Departamento de engenharia civil – FASIFE  
Coordenadora do Curso de engenharia civil

**Rondonópolis/MT**

**2024**

## **RESUMO**

Este trabalho de conclusão de curso traz o tema benéfico do uso da cal em solos na Construção. Destaca a crescente importância da proteção ambiental e da preservação dos recursos naturais no avanço da engenharia civil, especialmente na área de tratamento de solo para estabilização. Com foco na minimização dos impactos ambientais causados pela construção e manutenção de estradas, edifícios e indústrias, são exploradas alternativas inovadoras, como a reutilização de materiais na composição de pavimentos. No Brasil, o desafio é encontrar materiais mais acessíveis que atendam às regulamentações, impulsionando a busca por técnicas de estabilização eficazes, como a adição de cal. A estabilização de solos visa melhorar suas características para a engenharia, tornando-os capazes de suportar as demandas previstas. A evolução tecnológica no setor, com foco no desenvolvimento sustentável, promove a unificação de materiais naturais e alternativos, evolução de eficiência e preservação ambiental. Técnicas como estabilização com cal, cimento e emulsão asfáltica são exploradas para melhorar solos e pavimentação. Uma pesquisa se concentra em como a estabilização de solos com cal pode contribuir para a melhoria da pavimentação urbana, buscando soluções técnicas econômicas e de alta qualidade. A justificativa para esses estudos reside na necessidade de reduzir custos, promover práticas ambientais sustentáveis e reutilizar materiais, garantindo assim a conservação do meio ambiente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solo, cal, tratamento de solo e benefício da cal.

## **ABSTRACT**

his course conclusion work brings up the beneficial topic of using lime in soils in Construction. It highlights the growing importance of environmental protection and the preservation of natural resources in the advancement of civil engineering, especially in the area of soil treatment for stabilization. With a focus on minimizing environmental impacts caused by the construction and maintenance of roads, buildings and industries, innovative alternatives are explored, such as the reuse of materials in the composition of pavements. In Brazil, the challenge is to find more accessible materials that meet regulations, driving the search for effective stabilization techniques, such as adding lime. Soil stabilization aims to improve their engineering characteristics, making them capable of withstanding expected demands. Technological evolution in the sector, with a focus on sustainable development, promotes the unification of natural and alternative materials, evolution of efficiency and environmental preservation. Techniques such as stabilization with lime, cement and asphalt emulsion are explored to improve soils and paving. Research focuses on how soil stabilization with lime can contribute to improving urban paving, seeking high-quality, economical technical solutions. The justification for these studies lies in the need to reduce costs, promote sustainable environmental practices and reuse materials, thus ensuring environmental conservation.

**KEYWORDS:** Soil, lime, soil treatment and benefit of lime.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1 Problematização.....	4
1.2 Justificativa.....	4
1.3 Hipótese.....	4
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo geral.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
2 REVISÃO LITERARIA.....	5
2.1 Estabilização de solos com adição de cal.....	5
2.2 A estabilização do solo-cal.....	7
2.3 Tipos de solos.....	10
2.4 Tipos de solos.....	13
2.5 Classificações dos solos.....	16
2.5 Características essenciais para a boa qualidade do solo.....	17
2.6 Estabilização de solos para camadas de base e sub-base.....	18
2.7 A deformabilidade em misturas asfáltica.....	20
2.8 O comportamento dinâmico de misturas asfálticas.....	21
2.9 O ensaio de tração diametral indireta.....	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1 Metodologia.....	23
3.4 Cronograma.....	24
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
REFERÊNCIAS.....	27

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da engenharia na área de tratamento de solo para estabilização, tem-se preocupado com a proteção ao meio ambiente e a preservação de recursos naturais tem se intensificado, fazendo com que soluções técnicas, preocupando em minimizar impactos ambientais causados pela construção de rodovias, edifícios, casas, indústrias e manutenção delas. Diante da importância da pavimentação e da necessidade de tráfego em qualidade, a conservação de estradas torna-se de grande importância e de atenção redobrada. Alternativas inovadoras começam a ser muito utilizadas, como a reutilização de materiais gerados na manutenção e restauração na composição de bases e/ou sub-bases de novos pavimentos.

O grande desafio encontrado pelos engenheiros no Brasil, é a busca por materiais mais em conta, para camadas de base e sub-base de pavimentos e a estabilização dos solos de forma a atender as regulamentações vigentes no Brasil. Diante desse fato, aumenta-se a procura de materiais alternativos que sejam aceitos nas legislações nacionais e, para isso, é necessário o uso de técnicas de estabilização que atendam às características imprescindíveis dos projetos. Uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para obtenção da estabilidade ou melhoria de solos instáveis é a adição de cal. “O uso da adição da cal acrescenta características estabilizantes aos solos, tornando-o de grande interesse à pavimentação e garantindo maior resistência às cargas dinâmicas”. (ABNT, 1995.)

A estabilização de solos é um dos métodos usados na pavimentação do solo, que consiste na utilização de processos de natureza física, química, físico-química ou mecânica (natural ou artificial), com a finalidade de alterar as características dos solos. Este processo visa melhorar o comportamento do solo em obras de engenharia, tornando-o capaz de responder de forma satisfatória às solicitações previstas.

Na era tecnológica mundial, a evolução dos materiais usados na construção, com foco no desenvolvimento sustentável, tem sido um dos princípios que regem a engenharia civil.

É crescente a unificação de materiais com ou sem mistura aos materiais naturais como a brita, pois a busca constante de soluções inovadoras que sejam de fácil execução e economicamente viáveis, de forma a minimizar os problemas, além de aceitar o solo natural e adequar o projeto às limitações por ele impostas, trazem a eficiência e a preservação do meio ambiente.

Alguns locais não atendem às expectativas técnicas, e por isso, tem-se estudado como alternativa o melhoramento do solo por meio de técnicas de estabilização com o uso de cal, também sendo empregado o cal e a emulsão asfáltica, de modo a retirar o material do seu local

original e substituí-lo por outro de maior qualidade ou modificar as propriedades do solo existente de forma a criar um material capaz de atender os objetivos propostos.

### **1.1 Problematização**

Como a estabilização de solos com adição da cal pode contribuir para melhoria da pavimentação urbana? Faz-se necessário a busca de soluções técnicas que sejam baratas e de fácil efetivação, além da excelente qualidade, pois o custo dos produtos usados em uma obra pode ter valores exorbitantes, em face da realidade econômica do país.

### **1.2 Justificativa**

As novas técnicas usadas para estabilização do solo, já são comuns em obras públicas, sendo conhecidos como solo cimento, porém, devido ao alto custo do produto, busca-se a diminuição do valor e o uso de materiais mais baratos.

Face à preocupação com a sociedade e com a natureza em proporcionar um destino ecologicamente correto aos resíduos gerados pelas manutenções, restaurações e pavimentações, as obras de engenharia foram levadas a aderir novas técnicas de reutilização de materiais visando diminuir os impactos ambientais.

Dessa forma, o reaproveitamento dos resíduos de um solo com cal provenientes das atividades de manutenção e restauração do sistema de pavimentação, permite a conservação do meio ambiente, tanto para a geração atual como para as vindouras.

### **1.3 Hipótese**

Na engenharia civil é comum de tratamento de solo, para melhorar suas propriedades, tornando-o mais adequado para fins de construção, é possível que a adição da cal ao solo resulte em um aumento significativa na resistência e a elasticidade e a tração do solo.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo geral**

Identificar os benefícios e o método da estabilização do solo com adição da cal e os meios mais baratos para obtê-lo, mais acessíveis e rentáveis, porém, dentro dos parâmetros

técnicos utilizados atualmente, exigidos para sua execução de pavimento asfáltico Rondonópolis-MT.

#### 1.4.2 Objetivos específicos

- Analisar os métodos de estabilização de solo para pavimentação urbana.
- Averiguar a os materiais usados na constituição das camadas de bases.
- Verificar os tipos de solos e suas características.

## 2 REVISÃO LITERARIA

### 2.1 Estabilização de solos com adição de cal

Estabilizar um solo significa dar a ele a capacidade de suportar as cargas e os esforços induzidos pelo tráfego normalmente aplicados sobre o pavimento e ainda às ações erosivas de agentes naturais sob as condições mais adversas demonstradas no projeto. Há mais de 3000 anos o melhoramento de solos já era aplicado na construção de templos da antiga Babilônia (CRISTELO, 2001).

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). Segundo o Dicionário Livre de Geociências (2016), 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.

Intervenções no solo são feitas a fim de garantir a estabilidade dos agregados e possui papel fundamental na dinâmica rodoviária. Nesse sentido, a estabilização de determinado solo implica na adição de fatores estabilizantes junto ao mesmo, no intuito de modificar suas propriedades físicas e químicas e proporcionar melhoria ao material. Segundo GONDIM (2008), esses fatores de estabilização podem ser de natureza química, granular ou mesmo energia dinâmica aplicada.

Para que isso ocorra, faz-se necessário um método qualquer para a suplementação da resistência, segundo análises técnicas e econômicas do problema em questão. Desta forma podem ser citados os seguintes tipos de estabilização

**Estabilização Elétrica** é a passagem de uma corrente elétrica pelo solo a ser estabilizado. As descargas sucessivas de alta tensão são usadas no adensamento de solos

arenosos saturados e as de baixa tensão em solos argilosos empregando os fenômenos de eletrosmose, eletroforese e eletroquímica. Porém, não há a utilização em pavimentos.

**Estabilização Térmica** é realizada através do emprego da energia térmica por meio de congelamento, cuja solução normalmente é temporária, alterando-se a textura do solo, por aquecimento, o qual busca rearranjos na rede cristalina dos minerais constituintes do solo ou ter osmose.

O emprego da cal como estabilizante de solos remonta há aproximadamente 5.000 anos atrás, tendo sido encontrados nas Pirâmides de Shersi no Tibete o uso de uma mistura de cal e argila compactadas (GREAVES, 1996 apud SILVA, 2010).

A estabilização de solos consiste no uso de processos de natureza física, química, natural ou artificial, com a finalidade de alterar as características dos solos. O referido processo visa melhorar o comportamento do material quanto à utilização em obras de engenharia.

Ingles & Metcalf (1972) sugerem os tratamentos térmicos e químicos, como o emprego da cal. O processo químico tem se mostrado eficiente em estudos realizados sobre a sua aplicação para o enrijecimento de solos argilosos muito úmidos. O domínio das técnicas de estabilização pode conduzir a sensíveis reduções nos tempos de execução das obras, viabilizando a industrialização do processo construtivo, propiciando uma economia substancial para o empreendimento.

O conjunto de procedimentos que colaboram para o melhoramento geotécnico de solos é, provavelmente, uma das técnicas construtivas mais antigas utilizadas em Engenharia Civil, e ainda está em grande desenvolvimento (SILVA, 2010).

A ação de estabilizar o solo pode ser resumida em transformar o solo em uma massa rígida, cujas partículas, por estarem cimentadas, resistem às pressões de expansão das argilas ou mesmo, restringir a percolação da água dentro do solo, através da obstrução dos poros (CORRÊA, 2008).

A estabilização de solos é um método que concede ao mesmo, maior resistência às cargas, ao desgaste ou à erosão, através da compactação, correção de sua granulometria e plasticidade ou pela adição de substâncias que lhe atribuem coesão, resultante da cimentação ou aglutinação dos seus grãos (VARGAS, 1981 apud SOUZA, 2013).

A aplicação da cal pode consistir numa técnica de melhoria ou de estabilização do solo (CRUZ, 2008, apud SILVA, 2010). No caso de melhoria, os resultados são instantâneos, baseiam-se no melhoramento das propriedades geotécnicas do solo, de forma a garantir temporariamente determinados comportamentos dos materiais em meio a solicitações impostas, quanto ao método de estabilização, serve para modificar as propriedades dos solos,

principalmente os argilosos, a médio e longo prazo.

A estabilização de solos é um tratamento aplicado ao solo, para alterar características do solo natural que são indesejáveis para execução de determinadas obras de engenharia. Pode ocorrer por um processo mecânico, químico ou químico- mecânico. (SOUZA, 2013):

- Mecânico: compactação realizada em camadas, por meio da aplicação de uma energia de compressão no solo e com controle de umidade. O controle tecnológico ocorre por meio de ensaios;
- Químico: acréscimo de um agente químico que produz uma ação cimentante, modificando as propriedades físicas dos grãos do solo, reunidos através do emprego da cal, cimento ou subprodutos da indústria;
- Químico-mecânico: é uma combinação das duas metodologias de estabilização de solos.

A necessidade de estabilizar um solo deve-se a um dos seguintes fatores (CRISTELO, 2001): Fraca capacidade de suporte de carga ou elevada permeabilidade em solos de fundação que, em virtude da sua localização, são difíceis de tratar por outras técnicas que não as injeções e solos naturais pouco apropriados à execução de fundações superficiais, especialmente estradas e aeroportos.

A estabilização e o melhoramento de solos instáveis com o uso da cal é uma técnica muito antiga, sendo registrado seu uso no sul da Itália, na Via Apia, edificada no ano 312 a.C. e, num trecho da muralha da China, datado de 228 a.C. (GUÉRIOS, 2012).

A estabilização de solos com o emprego da cal resulta em melhorias significativas na textura e estrutura do solo, minimizando a plasticidade e gerando uma elevação na resistência mecânica o que não é somente possível como provável (CRISTELO, 2001).

De acordo com estudos, outros solos, no seu modo natural, apresentam baixa resistência e deformações, o que pode dificultar a sua utilização. A compactação e a correção granulométrica, com a utilização da cal hidratada, são as formas mais comuns de estabilização utilizadas atualmente.

## **2.2 A estabilização do solo-cal**

No final da década de 40 do século XX, iniciou-se nos EUA a aplicação de técnicas laboratoriais de Mecânica dos Solos para a análise das misturas solo-cal, sendo amplamente empregada a partir da década de 50, na construção de milhares de quilômetros de autoestradas (SILVA, 2010). A França e a Alemanha empregam a estabilização de solos com cal não apenas visando o aumento da resistência, mas também buscando uma melhoria na trabalhabilidade do

material (AZEVEDO, 2010).

O solo-cal é uma mistura de solo, cal e água em quantidades estabelecidas em ensaios laboratoriais, gerando um produto capaz de ser utilizado em qualquer camada do pavimento, exceto o revestimento asfáltico devido à ausência de solo nesta camada, sendo seu uso para apenas melhorar a adesividade e a granulometria da mistura asfáltica. (AZEVEDO, 2010).

Antes de certa quantidade de cal se misturar ao solo, iniciam-se imediatamente reações químicas que alteram as propriedades geotécnicas do solo, como a plasticidade a granulometria, a quantidade de finos e a capacidade de carga dela, sendo estas características dependentes de outros fatores como o tipo de solo a ser estabilizado, o teor da cal empregado na mistura, o tempo, a temperatura de cura, dentre outros aspectos.

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 da 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.

O uso da adição da cal acrescenta características estabilizantes aos solos, tornando-o de grande interesse à pavimentação e garantindo-lhes maior resistência às cargas dinâmicas. O objetivo visa o melhoramento e estabilização mecânica de um solo fino sob a adição de cal hidratada. Isto com o propósito de atender de forma eficiente a manutenção e construção de estradas no país.

Existem muitos estudos sobre a solo-cal no Brasil, possuindo algumas obras experimentais com o emprego da mistura, datadas entre os anos de 1970 e 2000, das quais podem ser citadas a duplicação da rodovia BR-040, trecho Belo Horizonte – Sete Lagoas e a adição de cal ao subleito da rodovia BR-381 entre Nepomuceno/MG e Três Corações/MG (AZEVEDO, 2010).

Compreender todos os processos naturais e artificiais aplicados ao solo ajuda a melhorar suas características de resistência mecânica, bem como garantir a constância das melhorias no tempo de vida útil das obras.

A estabilização de solos com cal tem-se revelado um método eficaz, mas também ecológico e econômico, na medida em que permite o aproveitamento dos solos existentes no local onde a obra será implementada, ao invés de substituí-los por outros, evitando despesas

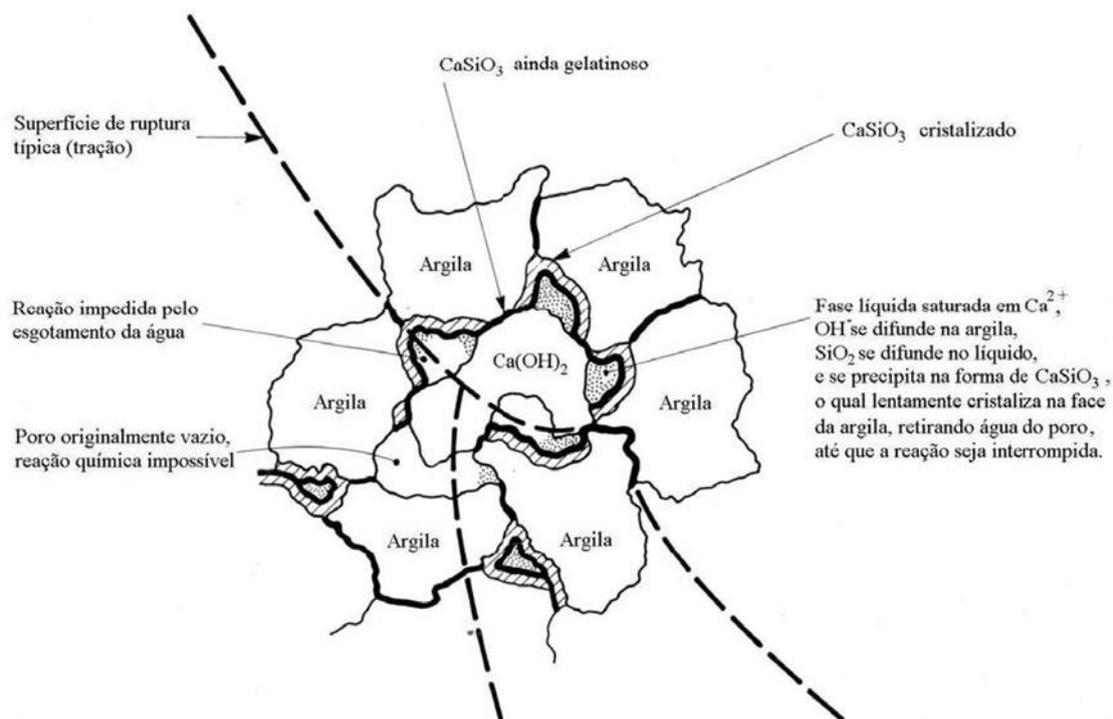
adicionais e impactos ambientais. Em alguns tipos de solo, principalmente solos siltosos e argilosos, a mistura de solo-cal nem sempre atinge as propriedades desejadas como uma maior resistência, mesmo após um longo período de “cura” (OLIVEIRA, F. 2005).

A estabilização química com a utilização de cal é caracterizada por duas fases: a fase inicial rápida (que dura de horas a dias) e a fase lenta (que pode levar meses ou anos). Na fase rápida estão as reações da troca catiônica e floculação. A fase lenta é caracterizada pelas reações cimentantes pozolânicas que proporcionam aumento da resistência, e pela carbonatação (CORRÊA, 2008).

Um estudo realizado por RIZZO e LOLLO (2006) utilizando cal em um solo arenoso siltoso (72% de areia, 10% de silte e 8% de argila) constatou que com o aumento do teor de cal aumenta a umidade ótima e reduz o valor da massa específica aparente seca. 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).

O solo também pode ser misturado com a cal através da utilização de um veículo munido com um equipamento de mistura sendo acrescentada água caso seja necessário (SILVA, 2010). Também pode ser empregada uma usina de mistura de solos (AZEVEDO, 2010).

Figura 1 - Mecanismo de estabilização solo-cal



Fonte: (ARAÚJO, 2009)

Na Figura 1 são mostradas as etapas da estabilização de um solo com emprego da cal. Para executar a mistura do solo com a cal deve ser primeiro distribuir os sacos da cal pela extensão da área a ser estabilizada (1), abrir os sacos de cal e posteriormente lançando sobre o solo (2). Em seguida o solo é homogeneizado com o auxílio de máquinas como uma motoniveladora

### 2.3 Tipos de solos

A cal além de atuar como estabilizante de solos em camadas granulares, pode atuar também como fíler em misturas asfálticas como melhorador da adesividade. (ARAUJO et al 2016). De acordo com Silva (2010) a cal aérea é um aglomerante que resulta da calcinação de uma rocha com porcentagem mínima de 95% de carbonato de cálcio ou de carbonato de cálcio e magnésio, a uma temperatura situada entre 900°C e 1100°C, cujo endurecimento é feito através da reação do gás carbônico do ar em contato com a pasta, num processo chamado de carbonatação. Há dois tipos de cal aérea: a *cal viva* e a *cal hidratada* (SILVA, 2010).

A cal aérea pode ser classificada em *gorda* e *magra* de acordo com a taxa de impurezas presente na rocha calcária. A cal aérea *gorda* provém de calcários quase puros com teores de carbonato não inferiores a 99% e possuem uma coloração branca (MIGUEL *apud* SOUSA, 2013). A cal aérea magra possui teores de argila e demais impurezas compreendidas entre 1% e 5% (COUTINHO *apud* SILVA, 2010). A cal aérea também pode ser classificada de acordo com o teor de óxido de magnésio proveniente da calcinação do carbonato de magnésio presente na dolomita (SILVA, 2010). A cal aérea pode ser classificada conforme o teor de carbonato de magnésio presente na sua composição:

- Cal Teor de Óxido de Magnésio

Cal Calcítica %MgO < 2%

Cal Cálculo-dolomítica 2% < %MgO < 20%

Cal Dolomítica 20% < %MgO < 45%

Fonte: (SILVA, 2010)

- Cal viva ou virgem

A cal viva, que também pode ser chamada de cal virgem, é obtida por meio da cozedura dos calcários a temperaturas compreendidas entre 800°C e 900°C (SOUSA, 2013). Por volta dos 894°C verifica-se uma temperatura cuja pressão de dissociação do carbonato de cálcio (pressão em que o gás carbônico é liberado do calcário) é superior à pressão atmosférica, resultando no óxido de cálcio mais dióxido de carbono em uma relação que podemos expressar

na seguinte equação (SILVA, 2010):  $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2 - 42,5 \text{ cal}$ . “A cal viva possui em geral a forma de grãos de diversos tamanhos, dependendo do processo de fabricação empregado, sendo comuns grãos com várias dimensões tais como 10, 15 ou 20 cm, em média”. (OLIVEIRA, M. 2011).

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). Segundo o DICIONÁRIO LIVRE DE GEOCIÊNCIAS (2016), 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.

- Cal hidratada ou apagada

Segundo (Silva, 2010), “a cal apagada ou hidratada tem origem na extinção por imersão ou aspersão com água da cal viva.”. Este processo de extinção pode ser expresso pela seguinte equação:  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2 + 15,5 \text{ cal}$ . A cal hidratada apresenta-se na forma de pó seco, com 17% a 19% de água associada, enquanto a cal dolomítica normal possui de 24% a 27% de água combinada (OLIVEIRA, F. 2005).

“A pureza do hidróxido de cálcio gera três variedades de cal hidratada, a cal hidratada cálcica, cal hidratada magnésiana e cal hidratada dolomítica”. (SOUSA, 2013). Segundo (Klinsky et al. 2014) é comprovado que, a adição de cal hidratada a solos reativos melhora substancialmente a resistência deles.

- Cal Hidráulica

A cal hidráulica é produzida a partir da cozedura de calcários com porcentagens de argilas normalmente compreendidas entre 5% e 20% a uma temperatura entre 1200 °C e 1500 °C (SILVA, 2010). A cal hidráulica é um produto que enrijece tanto em contato com a água quanto com o ar (COUTINHO, 2006). A cal hidráulica é composta por silicatos de cálcio ( $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$ ) e aluminatos de cálcio ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ ) que, hidratando-se, endurecem na água ou ao ar. É também composta por óxido de cálcio (CaO) – no mínimo 3%, que continua livre e que vai endurecer por carbonatação (COUTINHO, 2006).

As principais características que afetam as reações entre os solos e a cal são: a granulometria, a superfície específica, a reatividade, o peso específico, a solubilidade e o teor em cálcio (SILVA, 2010), conforme segue abaixo:

#### A- Granulometria

A granulometria da cal é um parâmetro físico que induz outras propriedades da cal

quando empregada na estabilização de solos como a velocidade de hidratação e a homogeneidade da mistura (SILVA, 2010). Geralmente a cal hidratada possui uma granulometria mais fina que a cal viva, devido ao processo de hidratação (CRISTELO, 2001).

#### B- Superfície específica

A superfície específica é uma das qualidades mais importantes da cal, devido a sua relação direta com outras propriedades da cal como a homogeneização da mistura e a reatividade com outros elementos (BOYNTON, 1980 *apud* SILVA, 2010). Superfícies de contato maiores propiciam melhores misturas com o solo e a água (SILVA, 2010).

#### C- Reatividade

A reatividade da cal está associada com a eficiência e a rapidez da sua ação estabilizante e está ligada a outras propriedades físicas e químicas, particularmente com a superfície específica (SILVA, 2010). Este parâmetro possibilita prever a duração da reação e, no caso desta ser exotérmica, o aumento da temperatura produzida (CRISTELO, 2001).

#### D- Peso específico

O valor do peso específico da cal viva está compreendido entre 3.200 kg/m<sup>3</sup> e 3.300 kg/m<sup>3</sup>, constatando-se uma redução na densidade da cal viva com a presença de impurezas, enquanto para a cal hidratada essas mesmas impurezas elevam o peso específico (CRISTELO, 2001).

#### E- Solubilidade

A solubilidade da cal diminui com a temperatura e também varia com a composição da cal, sendo que a cal viva é menos solúvel que a cal hidratada e a cal calcítica é mais solúvel que a cal dolomítica (SILVA, 2010).

#### F- Teor de cálcio

Em relação às propriedades químicas da cal, o teor de cálcio é a mais importante,

podendo este aparecer na cal sob a forma livre ou combinada (CRISTELO, 2001). Forma livre: óxido de cálcio presente na cal virgem e o hidróxido de cálcio na cal hidratada. Forma combinada: carbonatos, silicatos, aluminatos ou, mais raramente, sulfatos e fosfatos.

## 2.4 Tipos de solos

A cal além de atuar como estabilizante de solos em camadas granulares, pode atuar também como fíler em misturas asfálticas como melhorador da adesividade. (ARAUJO et al 2016). De acordo com Silva (2010) a cal aérea é um aglomerante que resulta da calcinação de uma rocha com porcentagem mínima de 95% de carbonato de cálcio ou de carbonato de cálcio e magnésio, a uma temperatura situada entre 900°C e 1100°C, cujo endurecimento é feito através da reação do gás carbônico do ar em contato com a pasta, num processo chamado de carbonatação. Há dois tipos de cal aérea: a *cal viva* e a *cal hidratada* (SILVA, 2010).

A cal aérea pode ser classificada em *gorda* e *magra* de acordo com a taxa de impurezas presente na rocha calcária. A cal aérea *gorda* provém de calcários quase puros com teores de carbonato não inferiores a 99% e possuem uma coloração branca (MIGUEL *apud* SOUSA, 2013). A cal aérea *magra* possui teores de argila e demais impurezas compreendidas entre 1% e 5% (COUTINHO *apud* SILVA, 2010). A cal aérea também pode ser classificada de acordo com o teor de óxido de magnésio proveniente da calcinação do carbonato de magnésio presente na dolomita (SILVA, 2010). A cal aérea pode ser classificada conforme o teor de carbonato de magnésio presente na sua composição:

- Cal Teor de Óxido de Magnésio

Cal Calcítica %MgO < 2%

Cal Cálculo-dolomítica 2% < %MgO < 20%

Cal Dolomítica 20% < %MgO < 45%

Fonte: (SILVA, 2010)

- Cal viva ou virgem

A cal viva, que também pode ser chamada de cal virgem, é obtida por meio da cozedura dos calcários a temperaturas compreendidas entre 800°C e 900°C (SOUSA, 2013). Por volta dos 894°C verifica-se uma temperatura cuja pressão de dissociação do carbonato de cálcio (pressão em que o gás carbônico é liberado do calcário) é superior à pressão atmosférica, resultando no óxido de cálcio mais dióxido de carbono em uma relação que podemos expressar na seguinte equação (SILVA, 2010):  $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2 - 42,5 \text{ cal}$ . “A cal viva possui em geral a forma de grãos de diversos tamanhos, dependendo do processo de fabricação

empregado, sendo comuns grãos com várias dimensões tais como 10, 15 ou 20 cm, em média”. (OLIVEIRA, M. 2011).

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). Segundo o DICIONÁRIO LIVRE DE GEOCIÊNCIAS (2016), 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.

- Cal hidratada ou apagada

Segundo (Silva, 2010), “a cal apagada ou hidratada tem origem na extinção por imersão ou aspersão com água da cal viva.”. Este processo de extinção pode ser expresso pela seguinte equação:  $CaO + H_2O = Ca(OH)_2 + 15,5 \text{ cal}$ . A cal hidratada apresenta-se na forma de pó seco, com 17% a 19% de água associada, enquanto a cal dolomítica normal possui de 24% a 27% de água combinada (OLIVEIRA, F. 2005).

“A pureza do hidróxido de cálcio gera três variedades de cal hidratada, a cal hidratada cálcica, cal hidratada magnésiana e cal hidratada dolomítica”. (SOUSA, 2013). Segundo (Klinsky et al. 2014) é comprovado que, a adição de cal hidratada a solos reativos melhora substancialmente a resistência dos mesmos.

- Cal Hidráulica

A cal hidráulica é produzida a partir da cozedura de calcários com porcentagens de argilas normalmente compreendidas entre 5% e 20% a uma temperatura entre 1200 °C e 1500 °C (SILVA, 2010). A cal hidráulica é um produto que enrijece tanto em contato com a água quanto com o ar (COUTINHO, 2006). A cal hidráulica é composta por silicatos de cálcio ( $SiO_2 \cdot 2CaO$ ) e aluminatos de cálcio ( $Al_2O_3 \cdot CaO$ ) que, hidratando-se, endurecem na água ou ao ar. É também composta por óxido de cálcio (CaO) – no mínimo 3%, que continua livre e que vai endurecer por carbonatação (COUTINHO, 2006).

As principais características que afetam as reações entre os solos e a cal são: a granulometria, a superfície específica, a reatividade, o peso específico, a solubilidade e o teor em cálcio (SILVA, 2010), conforme segue abaixo:

#### A- Granulometria

A granulometria da cal é um parâmetro físico que induz outras propriedades da cal quando empregada na estabilização de solos como a velocidade de hidratação e a homogeneidade da mistura (SILVA, 2010). Geralmente a cal hidratada possui uma

granulometria mais fina que a cal viva, devido ao processo de hidratação (CRISTELO, 2001).

#### B- Superfície específica

A superfície específica é uma das qualidades mais importantes da cal, devido a sua relação direta com outras propriedades da cal como a homogeneização da mistura e a reatividade com outros elementos (BOYNTON, 1980 *apud* SILVA, 2010). Superfícies de contato maiores propiciam melhores misturas com o solo e a água (SILVA, 2010).

#### C- Reatividade

A reatividade da cal está associada com a eficiência e a rapidez da sua ação estabilizante e está ligada a outras propriedades físicas e químicas, particularmente com a superfície específica (SILVA, 2010). Este parâmetro possibilita prever a duração da reação e, no caso desta ser exotérmica, o aumento da temperatura produzida (CRISTELO, 2001).

#### D- Peso específico

O valor do peso específico da cal viva está compreendido entre 3.200 kg/m<sup>3</sup> e 3.300 kg/m<sup>3</sup>, constatando-se uma redução na densidade da cal viva com a presença de impurezas, enquanto para a cal hidratada essas mesmas impurezas elevam o peso específico (CRISTELO, 2001).

#### E- Solubilidade

A solubilidade da cal diminui com a temperatura e também varia com a composição da cal, sendo que a cal viva é menos solúvel que a cal hidratada e a cal calcítica é mais solúvel que a cal dolomítica (SILVA, 2010).

#### F- Teor de cálcio

Em relação às propriedades químicas da cal, o teor de cálcio é a mais importante, podendo este aparecer na cal sob a forma livre ou combinada (CRISTELO, 2001). Forma livre: óxido de cálcio presente na cal virgem e o hidróxido de cálcio na cal hidratada. Forma

combinada: carbonatos, silicatos, aluminatos ou, mais raramente, sulfatos e fosfatos.

## 2.5 Classificações dos solos

A principal característica de um solo e o que o distingue, é o tamanho das partículas que o constituem. Alguns solos possuem partículas visíveis a olho nu, como os grãos de pedregulho, já outros solos apresentam partículas tão finas que não podem ser percebidas individualmente e formam uma pasta quando molhadas. (PINTO, 2006).

Muitas organizações utilizaram a granulometria das partículas para classificar os solos como, por exemplo, o Sistema Unificado de Classificação dos Solos adotado pela ASTM - *American Society for Testing and Materials* (DAS, 2007).

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) fundamenta-se na identificação dos solos conforme as suas propriedades de textura e plasticidade, e reúne-os de acordo com o seu comportamento. Esse sistema leva em conta a porcentagem de pedregulhos, areias e finos; a forma da curva granulométrica; a plasticidade e a compressibilidade (SOUSA, 2013).

Originalmente esse sistema foi proposto por Arthur Casagrande em 1942 para o uso nos trabalhos de construção de aeroportos sob a responsabilidade da USACE – *U.S Army Corps of Engineers* – durante a Segunda Guerra Mundial. Neste sistema, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras, como mostra a Tabela 1. As cinco primeiras letras indicam o tipo principal do solo e as quatro restantes correspondem a dados complementares dos solos.

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos agrupa o solo em duas categorias distintas (DAS, 2007):

- a) Solos de granulometria grossa que possuem menos de 50% de suas partículas passando pela peneira N° 200. Os símbolos do grupo iniciam com a letra G ou S. A letra G representa um solo pedregulhoso ou pedregulho enquanto a letra S um solo arenoso ou areia (DAS, 2007).
- b) Solos de granulometria fina são compostos de 50% ou mais de materiais passantes na peneira N° 200. Os prefixos que indicam este grupo são as letras M (que representa silte inorgânico) e C (que indica argila inorgânica). Neste grupo também há a presença de siltes e argilas orgânicas que é identificado pela letra O. Para designar a turfa, terra preta (*muck*) e outros solos altamente orgânicos é empregado o símbolo Pt.

Outro sistema de classificação dos solos é o Sistema da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) também conhecido como Sistema Rodoviário (DAS, 2007).

Sobre o Sistema Rodoviário Pinto (2006) afirma: Neste sistema, também se inicia a

classificação pela constatação da porcentagem de material que passa na peneira nº 200, só que são considerados solos de granulação grosseira os que têm menos de 35% passando nesta peneira, e não 50% como na Classificação Unificada. Estes são os solos dos grupos A-1, A-2, e A-3. Os solos com mais de 35% passando na peneira nº 200 formam os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7.

Para Engenharia Civil, solo é todo material não cimentado ou fracamente cimentado de partículas minerais oriundas da decomposição das rochas (CRAIG, 1992 apud CRISTELO, 2001).

Conforme a NBR 6502/95 – Rochas e solos podem-se definir solo como material oriundo da decomposição das rochas através de agentes físicos e químicos, podendo ou não possuir matéria orgânica em sua composição. A decomposição das rochas é derivada de agentes físicos, químicos, tais como as variações de temperatura e a presença da água, e de agentes biológicos como as ações da fauna e flora, que provocam reações como a hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, entre outros (PINTO, 2006).

O conhecimento do solo é muito importante, pois todas as obras de engenharia se assentam no terreno o qual deve ser capaz de absorver os esforços atuantes nas estruturas.

Os solos podem ser em residuais e transportados, sendo importante destacar que em solos transportados é mais comum encontrar solos finos, que são mais susceptíveis à estabilização com cal (AZEVEDO, 2010). Diferenciam entre si:

- Solos Residuais: “São solos formados através da degradação da rocha original cujas propriedades são semelhantes à rocha de origem, encontrando até mesmo blocos isolados de rochas semi-alteradas”. (AZEVEDO et al, 1998 apud AZEVEDO, 2010). “São solos que permanecem no local da rocha matriz, observando-se uma gradual transição do solo até a rocha”. (CAPUTO, 2007).
- Solos Transportados: são solos provenientes do transporte de materiais decompostos através de um agente transportador, como rios, vento, chuva, etc. Em geral são solos mais finos que os residuais, pois o agente transportador não consegue carregar material muito graúdo devido ao peso deste (AZEVEDO et al, 1998 apud AZEVEDO, 2010).

## **2.5 Características essenciais para a boa qualidade do solo**

Todo solo pode ser estabilizado com cimento, porém os solos arenosos ou granulares são mais eficientes que os argilosos por exigirem baixos teores de cimento, além de outras

características como:

a) Presença no solo de materiais nocivos ao cal - A presença de matéria orgânica no solo afeta a hidratação do cal devido à absorção dos íons de cálcio gerado, resultando uma queda no PH da mistura. Os sulfatos geralmente encontrados nas águas do solo combinam com o aluminato tricálcico do cal hidratada formando o sulfo-aluminato de cálcio (sal de Candlot) que ocupa grande volume, provocando quebra de ligações cimentícias.

b) Teor de cal - A resistência da mistura solo aumenta linearmente com o teor de cimento, para um mesmo tipo de solo. O teor de cal depende do tipo de solo, quanto maior a porcentagem de silte e argila, maior será o teor de cal exigido. Para alcançar o valor ideal do teor de cal para um tipo de solo, é imprescindível recorrer aos procedimentos de dosagem.

c) Teor de umidade da mistura - Assim como nos solos naturais, as misturas exigirão um teor de umidade que conduza a uma massa específica seca máxima, para uma dada energia de compactação. O acréscimo de cal ao solo tende a produzir um acréscimo no teor de umidade e um decréscimo na massa específica seca máxima, devido a ação flocculante do cimento. O teor de umidade ótimo que conduz à máxima massa específica seca não é necessariamente o mesmo para a máxima resistência.

d) Operações de mistura e compactação - A demora de mais de duas horas entre a mistura e a compactação pode trazer significantes decréscimos tanto na massa específica seca máxima quanto na resistência do produto final. O decréscimo na massa específica seca máxima é causado pelo aumento do PH da água quando esta entra em contato com o cimento, causando flocculação das partículas de argila.

e) Tempo e condições de cura - Como no concreto, a mistura ganha resistência por processo de cimentação das partículas durante vários meses ou anos, sendo maior nos 28 dias iniciais. Neste período deve ser garantido um teor de umidade adequado à mistura compactada. Diferente do concreto, a temperatura de cura deve ser elevada para propiciar elevadas resistências

## **2.6 Estabilização de solos para camadas de base e sub-base**

Base é a camada projetada para resistir e distribuir os esforços verticais provindos das cargas dos veículos e sobre a qual o revestimento é edificado, situada acima da sub-base, quando existente, ou sobre o subleito (SOUZA, 2004). As bases podem ser compostas por solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos, entre outros materiais (BALBO, 2007).

Segundo o DNIT (2006) um solo adequado para constituir a base de um pavimento deve possuir um Limite de liquidez  $\leq 25\%$ , Índice de Plasticidade  $\leq 6\%$ , CBR  $\geq 80\%$  e expansão  $\leq 0,5\%$  (medida com uma sobrecarga de 10 lb). Devido à ausência de normas específicas para execução de camadas do pavimento com solo-cal, foi consultada a norma do DNIT 143/2010 – ES: Pavimentação de Base de solo– Especificação de serviço (DNIT, 2010a). De acordo com a norma do DNIT 143/2010 a mistura de solo deve ter aos 7 (sete) dias uma resistência à compressão com o valor mínimo de  $21 \text{ kg/cm}^2$ , ou  $2,1 \text{ MPa}$ .

A norma do DNIT 143/2010 possui algumas exigências para que a mistura solo seja empregada na execução da camada de base rodoviária.

Entretanto, a sub-base é uma estrutura do pavimento, complementar à base e possui as mesmas funções desta, sendo executada sobre o subleito ou reforço do subleito, devidamente compactado e regularizado (DNIT, 2010). Quando a espessura da base necessária para transmitir os esforços para as camadas inferiores for muito elevada, por razões construtivas e econômicas, divide-se a base em duas camadas, criando uma sub-base, que geralmente possui menor custo (BALBO, 2007).

Conforme o DNIT (2006) para compor a camada de sub-base o material deve possuir CBR  $\geq 20\%$ , índice de grupo nulo e expansão  $\leq 1\%$  (medida com uma sobrecarga de 10 lb).

Já o revestimento é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e visa melhorar as condições do tráfego de veículos, propiciando conforto, segurança e durabilidade ao revestimento, devendo resistir ao desgaste. (MARQUES, 2012). Conforme Bernucci *et al* (2010) “os revestimentos das estruturas de pavimento em geral são submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas principalmente à compressão.”

A estabilização de um solo pode ser definida como sendo a alteração de qualquer uma de suas propriedades, de forma a melhorar seu comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Consiste em um tratamento artificial, por um processo físico, químico ou físico-químico, tornando o solo estável para os limites de sua utilização, e ainda fazendo com que a estabilização permaneça sob a ação de cargas exteriores e também sob ações climáticas variáveis.

As propriedades de engenharia que se visa modificar na estabilização de um solo, segundo MEDINA e MOTTA (2004), são: Resistência ao cisalhamento, tornando-a menos sensível às mudanças ambientais, principalmente à umidade, além de torná-la compatível com as cargas que a estrutura vai absorver, Permeabilidade, aumentando-a ou diminuindo-a, Compressibilidade, reduzindo-a.

O pavimento flexível é formado por diferentes tipos de camadas, em que as principais são: revestimento (asfáltico), base, sub-base, reforço do subleito e regularização do subleito conforme a figura 2.3. Em que todas essas camadas são apoiadas sobre o subleito. MARQUES (2007) e NECKEL (2008) apresentam, abaixo, definição das camadas :

- **Revestimento:** é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e serve para melhorar as condições da via, proporcionando conforto e segurança. Deve resistir ao desgaste e aos esforços atuantes;
- **Base:** é a camada que resiste os esforços da superfície de rolamento e distribui ao subleito, devendo ter um ISC maior que 60%;
- **Sub-base:** é a camada que complementa a base, no caso de não ser possível executar a base diretamente no subleito regularizado ou reforço. Deve ter ISC maior que 20%;
- **Reforço de subleito:** é uma camada de espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente que serve para melhorar a qualidade do subleito no caso deste ter ISC menor que 2%;
- **Regularização do subleito:** também é conhecido como nivelamento, é a camada destinada a conformar o leito transversalmente e longitudinalmente. A existência desta camada está relacionada com as condições do subleito.
- **Subleito:** é o terreno onde o pavimento será assentado. Deve-se estudar até onde a profundidade onde as tensões irão atuar.

## 2.7 A deformabilidade em misturas asfáltica

É necessário conhecer as relações entre tensão e deformação de seus materiais constituintes, para se efetuar a análise de deformabilidade de uma estrutura. A partir desse enfoque reside o princípio da mecânica dos pavimentos. Esse módulo de materiais que compõem as camadas do pavimento e do subleito é um dos elementos mais importantes para este fim.

A previsão das tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima que atuam na estrutura de um pavimento é feita por métodos de cálculo que levam em consideração os esforços atuantes e as características de deformabilidade dos materiais que compõem o pavimento. O conhecimento das respostas estruturais dos materiais (misturas asfálticas e solos) às tensões impostas é modernamente obtido pelo Módulo de Resiliência (MR) que pode ser estabelecido por ensaios de laboratório. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA - FACULDADE DE ENGENHARIA – DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE S E

GEOTECNIA TRN 032 - PAVIMENTAÇÃO – Prof. Geraldo Luciano de Oliveira Marques)

Segundo Medina (1997), tanto o pavimento quanto o subleito estão sujeitos a uma solicitação dinâmica provenientes de cargas de diferentes intensidades e variadas frequências ao longo do dia e do ano. Os ensaios de carga repetida procuram reproduzir estas condições (dinâmicas) de campo, com a amplitude e o tempo de pulso do carregamento dependendo da velocidade do veículo e da profundidade que se deseja calcular as tensões e deformações. O Módulo de Resiliência MR é análogo ao módulo de elasticidade E, sendo ambos definidos como relação entre tensão e deformação. A diferença é que o Módulo de Resiliência é determinado em ensaio de carga repetida. Valores de pico das tensões e das deformações recuperáveis que ocorrem nos ensaios são usados para calcular a constante elástica resiliente.

## **2.8 O comportamento dinâmico de misturas asfálticas**

Para FONSECA (1995), existem vários procedimentos de laboratório para se analisar o comportamento dinâmico de misturas betuminosas, podendo-se citar: (a) módulo complexo (dinâmico); (b) o módulo elástico (flexão) e (c) módulo diametral (resiliente ou indireto). Estes procedimentos de testes não produzem valores de módulos equivalentes apesar de definirem de maneira comum o módulo como sendo uma razão entre a tensão dinâmica aplicada e a correspondente deformação recuperável. A determinação do Módulo de Resiliência de concreto asfáltico pode ser feita por vários tipos de ensaios de cargas repetidas. Os ensaios mais comumente usados são os seguintes:

- 1- Ensaio de tração uniaxial
- 2- Ensaio de compressão uniaxial
- 3- Ensaio de flexão em viga
- 4- Ensaio de tração diametral indireta
- 5- Ensaio de compressão triaxial

Segundo Barksdale et al (1997) as camadas constituintes de um pavimento têm seções anisotrópicas nas quais as propriedades nas direções radiais são iguais, mas na direção vertical são diferentes. Daí a variedade de ensaios para tentar avaliar as propriedades mecânicas ao longo da altura das camadas. WALLACE e MONISMITH (1980) dizem que para uma descrição adequada das características resilientes de um material, são requeridos cinco parâmetros:

- 1- Deformação vertical devido a um incremento na tensão vertical
- 2- Deformação radial devido a um incremento na tensão vertical

- 3- Deformação radial devido a um incremento na tensão radial
- 4- Deformação vertical devido a um incremento na tensão radial
- 5- Deformação radial devido a um incremento na tensão radial em uma direção perpendicular à deformação.

## **2.9 O ensaio de tração diametral indireta**

A necessidade de se determinar a resistência à tração do concreto foi inicialmente para pistas de estradas de rodagem, onde o concreto normalmente não é armado e trabalha à tração por flexão. (LOBO CARNEIRO, 1996). No Brasil sempre se adotou para ensaiar o concreto a resistência a compressão de corpos-de-prova cilíndricos, e para o controle da resistência à tração, o ensaio por flexão de vigotas. Este foi usado no controle das pistas de vários aeroportos utilizados para envio de carga e pessoal da América para a Europa durante a 2ª Guerra Mundial, como os de Natal e Recife.

Até 1942 ensaiava-se o concreto a tração unicamente pelo método das vigotas e foi então que surgiu um fato novo, um fato fortuito segundo LOBO CARNEIRO (1996), que se não fosse o caso de uma igreja talvez ele nunca tivesse se preocupado com o problema. Surgiu a necessidade de ser retirada da sua posição original uma igreja que ficava na rua de São Pedro para a construção da atual Avenida Presidente Vargas na cidade do Rio de Janeiro. O eixo da Avenida. Presidente Vargas deveria ser colocado em rigoroso alinhamento com a Av. do Mangue e para isto foi necessário pegar três ruas paralelas a Rua da Alfândega, uma delas era a rua de São Pedro. A igreja ficava na esquina da rua São Pedro com a rua dos Ourives, atual rua Miguel Couto e era chamada igreja de São Pedro dos Clérigos. “Era uma igreja histórica, muito importante, com estilo barroco do século XVIII, a primeira igreja construída no Brasil com planta elíptica, curvilínea, não retangular, a segunda é a Igreja do Rosário dos Pretos em Ouro Preto”. (LOBO CARNEIRO, 1996).

Segundo o relato de LOBO CARNEIRO (1996), a empresa Estacas Franki fez uma proposta de transportar a igreja da rua de São Pedro para a outra esquina, a aproximadamente dez metros, fazendo rolar a igreja sobre rolos de concreto. Como as paredes da igreja tinham em torno de um metro de espessura, a idéia inicial consistia em ir demolindo a parte inferior das paredes e substituindo-as por concreto. Ao final deste processo, toda a base das paredes ficaria com uma fita de concreto debaixo da qual estariam rolos de concreto e a igreja seria empurrada por meio de macacos. A opção por rolos de concreto se deu pelo fato da empresa de estacas já ter feito semelhante serviço na Europa com rolos de aço, mas durante a guerra (1943)

era difícil obter este material, então surgiu a ideia de fazer rolos de concreto, mas não se sabia calcular a capacidade cortante de um rolo de concreto.

Devido a sugestão do professor Dirceu Veloso a empresa de estaqueamento solicitou ao Instituto Nacional de Tecnologia (INT), que fizesse ensaios nesses rolos de concreto. No INT, o professor Lobo Carneiro iniciava sua carreira, e para sua surpresa, o rolo de concreto se abriu em duas metades ao ser submetido ao carregamento na máquina de compressão na posição diametral, e por isso buscou-se então, a compreensão do fato em livros de teoria da elasticidade, pois, a ruptura se dá segundo esse estudo, por tração, e teve-se a ideia de usar os mesmos corpos cilíndricos de concreto, que se usa para determinar a resistência à compressão na condição vertical, colocados deitados sobre a máquina e determinar a resistência da tração. A partir desse fato, criou-se a ideia do ensaio que é hoje em dia conhecido como ensaio de tração indireta ou ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

Segundo Lobo Carneiro (1996) “os franceses chamam de ensaio de fendilhamento, mas em todo o mundo ele é conhecido como “Brazilian test”, ensaio brasileiro”. O professor Lobo Carneiro apresentou este ensaio na 5ª reunião da Associação Brasileira de Normas Técnicas, de 20 a 23 de setembro de 1943. Ele frisa a importância deste evento e conseqüentemente a data de sua realização, porque 10 anos depois foi descoberto que um japonês, chamado Akazawa, tinha apresentado a mesma proposta de ensaio no Japão, dois meses depois em novembro de 1943. Naquela época não havia comunicação entre o Japão e o Brasil.

O método foi adotado pela ASTM em 1966, após ter sido provisório desde 1962. Também foi adotado pelo Comitê Europeu do Concreto em 1964 e pela RILEM em 1966, tornando-se método internacional adotado pela ISO (International Standard Organization) através do método ISO 4108 de 1980. No Brasil este ensaio é regulamentado pelo DNIT por meio do método de ensaio DNER ME138/94.

Este método de ensaio prescreva o modo pelo qual se determina a resistência à tração, de corpos-de-prova cilíndricos de misturas asfálticas, através do ensaio de compressão diametral.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Metodologia**

Para o procedimento das análises, utilizou-se a cal comercial como produto estabilizante. Fez-se uso de peneiras específicas com diferentes aberturas de malhas, e quando necessário, empregou-se frações de brita 1 e de brita 0 a fim de adequar o material estudado às

faixas granulométricas A, C e F propostas pelo DNIT (2006).

O solo utilizado, conforme mostrado na Figura 1, é um solo residual de basalto pertencente à Formação Serra Geral, em uma provável área de contato com o arenito da Formação Botucatu. Possui cor avermelhada e estrutura argilosa, provenientes de alterações do basalto e dos solos característicos da região. Este tipo de solo foi escolhido, pois é o solo predominante na região de realização da pesquisa e abrange extensa área do território do Mato Grosso. Também foi considerada a uniformidade de suas características físicas e boa trabalhabilidade em laboratório. (ABNT NBR 6457/86: Amostras de solo – Preparação para esses ensaios de compactação e ensaios de caracterização). Laboratório fornecido da empresa CONSTRUTORA TRIPOLLO LTDA.

Na seleção das granulometrias, as especificações técnicas definem intervalos que devem ser obedecidos pelos percentuais passantes em cada peneira. Esse tipo de metodologia é adotado tanto em nível nacional quanto internacionalmente (FERREIRA et al., 2016).

As amostras, em laboratório, foram secas à sombra, destorroadas e então peneiradas segundo a sequência de peneiras indicadas nas faixas granulométricas do DNIT (2006), conforme a Tabela 1. Em seguida, foram homogeneizadas, quarteadas e tiveram as suas umidades higroscópicas determinadas. Em consequente, procedeu à compactação do material e aos ensaios CBR (Índice de Suporte Califórnia) e RCS (Resistência à Compressão Simples). Estes ensaios foram realizados para as amostras no estado natural, adequadas às faixas granulométricas em estudo, porém sem estabilizante, e quando estabilizadas com 8% de cal em relação ao peso seco.

Na seleção das granulometrias, as especificações técnicas definem intervalos que devem ser obedecidos pelos percentuais passantes em cada peneira. Esse tipo de metodologia é adotado tanto em nível nacional quanto internacionalmente (FERREIRA et al., 2016).

### **3.4 Cronograma**

<b>Atividade</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>
Escolha do Tema e Definição do Problema	<b>X</b>									
Levantamento bibliográfico e Redação do trabalho	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>					
Formulação do Projeto	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>						
Recolhimento da amostra em Campo				<b>X</b>	<b>X</b>					
Ensaio de compactação e ensaios de caracterização					<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
Análise dos ensaios								<b>X</b>	<b>X</b>	
Revisão completa da monografia									<b>X</b>	<b>X</b>
Entrega versão Final e Banca										<b>X</b>

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho de conclusão de curso trouxe resultados importantes para a área de mecânica de solos, onde ficou claro que em todos os aspectos, houve uma melhora do solo quando acrescido de cal hidratada.

As dosagens de cal não trouxeram os benefícios previstos nas características do solo, no entanto, sem exceções, quando a mistura de solo-cal era de 10% de cal hidratada, elas eram mais evidentes. Quando foram fundidas ao solo puro, as melhoras foram o aumento na tensão de ruptura, coesão, maior teor de umidade, menor peso específico. a Cal pode ser usada para tratar solos em diferentes graus desde uma simples secagem do solo dado que a cal virgem reage quimicamente com a água passando por uma modificação, fazendo solo secar, dando assim oportunidade para continuidade do serviço.

## REFERÊNCIAS

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. DNIT – IPR 719. **Manual de Pavimentação**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.

BARKSDALE, R. D., ALBA, J., KHOSLA, N. P., KIM, R. e RAHMAN, M.S., 1997, **Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design**. In: Project 1-28, Final Report, Georgia Tech Project E20-634, USA.

CARVALHO, Carlos A.B. (1997). **Estudo da Contribuição das Deformações Permanentes das Camadas de Solo na Formação das Trilhas de Roda num Pavimento Flexível**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP. Tese de Doutorado.

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

COSTA, L. F. C. **Estudo de solo de alteração do jurássico superior: Caracterização geotécnica e melhoramento por cal e cimento**. In: Geologia Aplicada - Geologia de Engenharia. Lisboa, 2015.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 049/94. **Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994.

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.

DICIONÁRIO LIVRE DE GEOCIÊNCIAS. **Calcinação**. Disponível em: <  
<http://www.dicionario.pro.br/index.php/Calcina%C3%A7%C3%A3o>>

EMMERT, F. **Avaliação do emprego de técnica de estabilização de solo na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia-GO.** In: Ciências Florestais. Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

**ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.13 n.24; p. 2016

FERREIRA, J. L. S.; SOARES, J. B.; BASTOS, J. B. S. Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente. **Revista Transportes**, v. 24, n. 2.

FONSECA, O. A., **Development of a Time-Dependent model for the Dynamic Modulus of Asphalt Mixes.** Ph.D. dissertation, University of Maryland, Maryland, USA, 1995,.

GUÉRIOS, E. M. **Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para seu uso em pavimento urbano.** 2012. 69 f. In: Engenharia de Produção Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe - CE.** In: Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008

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.

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.

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.

KOLAY, P. K.; AMINUR, M. R.; TAIB, S. N. L.; et al, Stabilization of Tropical Peat Soil from Sarawak with Different Stabilizing Agents. **Geotechnical and Geological Engineering.**

v.29, n.6, p.1135-1141, 2011.

LAMBE, T. W.; MICHAELS, A. Altering soil properties with chemicals. **Chemical Engineering**. n. 6, v. 32, p. 488-492, 1954.

MALANCONI, M. **Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano**. In: Engenharia Urbana. Universidade Federal de São Carlos, 2013.

MARANGON, M., 2004 “**Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência**”. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MARQUES, G. L. O. E MORAIS, W. M. “**Estudos de Deformações Permanentes em Pré-Misturados a Frio Através de Ensaios Estáticos**”. Relatório final de pesquisa FAPEMIG PROC. TEC 1415/97 , 1999.

MARQUES, G. L. O., 2004, *Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MEDINA, J., 1997, **Mecânica dos Pavimentos**. 1ª edição, 380 p. Rio de Janeiro-RJ, Editora UFRJ.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. 2005, **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª edição, 570 p. Rio de Janeiro-RJ, Editora UFRJ.

MINASCAL. **Cal Hidratada**. Vantagens/Utilidades. Disponível em: <<http://www.minascal.com.br/>>. Acesso em: 22/06/2016.

MOTTA, L. M. G., 1998, “**Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas**”. In: 14º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro-RJ.

MOTTA, L. M. G., MEDINA, J., SOUSA, A. M., 2002, “**Características de Fadiga e Resiliência de Concretos Asfálticos Brasileiros**”. *16º Encontro de Asfalto*, IBP 2402, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 03-05 dezembro.

MUKESH, H.; PATEL, A. A Review on Effects of Stabilizing Agents for Stabilization of Weak Soil, **Journal of Civil and Environmental Research**, Vol. 2, No. 6. 2012.

\_\_\_\_\_. NBR 6457. **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. NBR 12025. **Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1990.

OLIVEIRA, H. M. **Aglomerantes**. In: BAUER, L. A. Falcão. (Coord.). *Materiais de Construção*. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 1v. p. 11-34.

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**. v. 62, n. 1, p. 87-92, 2009.

PINTO, S., PREUSSLER, E. S., 1980, **Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens – Instituto Pesquisas Rodoviárias DNER - IPR, Rio de Janeiro.

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, 343p. 1968.

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

SOUSA, A. T. **Estudo de parâmetros de dois tipos de solos característicos do Distrito Federal estabilizados com cal**. 2013. 70 f. in: *Engenharia Civil – Centro*

Universitário de Brasília - UniCEUB, Brasília, 2013.

WALLACE, K., MONISMITH, C. L., 1980, “**Diametral Modulus Testing on Nonlinear Pavement Materials**”. Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 49, Louisville, Kentucky, USA.

VIANNA, A. A. D., 2002, **Contribuição para o Estabelecimento de um Material Padrão e de Metodologia para Calibração de Equipamentos de Ensaios Dinâmicos**. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

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