



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

TAYLOR DIAS BRITO

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA DE SOLO
COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA/CIMENTO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO
URBANA

Palmas-TO

2017



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

TAYLOR DIAS BRITO

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA DE SOLO COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA/CIMENTO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO URBANA

Projeto apresentado como requisito parcial da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do curso de Engenharia Civil, orientado pela Professora M.Sc. Jacqueline Henrique.

Palmas-TO

2017



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

TAYLOR DIAS BRITO

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA DE SOLO COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA/CIMENTO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO URBANA

Projeto apresentado como requisito parcial da disciplina TCC II do Curso de Engenharia Civil, orientado pela Professora M.Sc. Jacqueline Henrique

Aprovado em: 26/05/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.Sc. Jacqueline Henrique
Centro Universitário Luterano de Palmas

Prof. Esp. Kenia Parente Lopes Mendonça
Centro Universitário Luterano de Palmas

Prof. M.Sc. Roberta Mara
Centro Universitário Luterano de Palmas

Palmas-TO

2017

Dedico este trabalho aos meus pais Imar e
Adilene, meu Padrinho Ibânes, minha madrinha
Cleude Maria e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Aos meus pais Imar e Adilene, e meu irmão Adriel Augusto pela oportunidade e por tudo que sempre fizeram por mim.

Aos colegas de curso do CEUP/ULBRA, que sempre me apoiaram e me auxiliaram nesta etapa.

A minha família, amigos e a todos os torceram para que eu conseguisse atingir meus objetivos.

RESUMO

DIAS, Taylor Brito. **ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA DE SOLO COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA/CIMENTO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO URBANA.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas-TO. Professora Orientadora Mestre: Jacqueline Henrique.

O presente trabalho apresenta um estudo sobre estabilização de solo de base utilizando duas técnicas de adição química, sendo elas, com cimento e cal hidratada. Este estudo teve como objetivo exibir as melhorias do solo quando adicionados pequenos percentuais de cimento ou cal hidratada ao solo utilizado nesta pesquisa: amostrado da Jazida 01 - localizada em Palmas – TO próximo a TO 050 entre o Plano Diretor Sul e a Aurenly 4, utilizando o sistema de classificação dos solos TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB) classificado como A-2-4.

Os ensaios de caracterização do solo regido pela ABNT foram realizados no laboratório de solos do CEULP/ULBRA. Após a realização destes ensaios, foram dosadas amostras adicionando cimento e cal hidratada, logo após a cura dos corpos de prova, os mesmos foram rompidos na prensa EMIC DL 30000. Observou-se que o estabilizante que ofereceu melhores resultados de resistência à compressão simples foi o cimento, utilizado nas proporções de 3% e 5%, provocando aumento de respectivamente 219% e 450% aos 28 dias de cura. O comportamento da cal empregada nas proporções 5% e 8%, conferiu um aumento menos significativo da resistência à compressão simples quando comparado ao cimento, de respectivamente de 102% e 182% aos 28 dias de cura. Portanto, este estudo conclui que a adição de cimento à amostra obteve uma maior elevação na resistência à compressão simples, sendo uma boa alternativa para a aplicação na pavimentação, visando uma elevada majoração na resistência à compressão do solo.

Palavras Chave: Estabilização química; Solo; Cimento; Solo-cal; Resistência; Adição.

ABSTRACT

DIAS, Taylor Brito. **ANALYSIS OF SIMPLE COMPRESSION RESISTANCE OF SOIL MIXTURE WITH ADDED HYDRATED CAL / CEMENT FOR URBAN PAVING.** 2017. Completion of a Civil Engineering Course. Lutheran University Center of Palmas. Palmas-TO. Teacher Orientator: Jacqueline Henrique.

The present work presents a study on stabilization of base soil using two techniques of chemical addition, being these, with cement and hydrated lime. This study aimed to show soil improvements when small percentages of cement or hydrated lime were added to the soil used in this research: sampled from Reservoir 01 - using the soil classification system TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB) classified as A-2-4 , Located in Palmas - TO near TO 050 between the Southern Master Plan and Aurenny 4.

The soil characterization tests conducted by ABNT were carried out in the CEULP / ULBRA soil laboratory. After these tests, samples were added by adding cement and hydrated lime, soon after curing of the specimens, they were broken in the EMIC DL 30000 press. It was observed that the stabilizer that offered the best results of resistance to simple compression was the Cement, used in the proportions of 3% and 5%, causing an increase of respectively 219% and 450% at 28 days of cure. The behavior of the lime used in the proportions of 5% and 8%, gave a less significant increase of the resistance to simple compression when compared to cement, respectively of 102% and 182% at 28 days of cure. Therefore, this study concludes that the addition of cement to the sample obtained a higher increase in the resistance to simple compression, being a good alternative for the application in the pavement, aiming a high increase in the resistance to the compression of the soil.

Keywords: Chemical stabilization; Ground; Cement; Soil-lime; Resistance; Addition.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos solos em função do grau de contração.....	23
Tabela 2 - Tabela de classificação dos solos TRB.....	27
Tabela 3 - Tabela da composição química do cimento	31
Tabela 4 - Tabela de normas que padronizam os ensaios.....	42
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de caracterização do solo.....	48
Tabela 6 - Resultados dos rompimentos dos corpos de prova com 7 dias de cura ..	48
Tabela 7 - Resultados dos rompimentos dos corpos de prova com 14 dias de cura	49
Tabela 8 - Resultados dos rompimentos dos corpos de prova com 28 dias de cura	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de curva granulométrica	21
Figura 2 - Ensaio do Limite de liquidez	22
Figura 3 - Ensaio do Limite de plasticidade.....	22
Figura 4 - Prensa para índice de suporte Califórnia (CBR)	25
Figura 5 - Ensaio proctor normal	26
Figura 6 - Gráfico da curva de compactação.....	26
Figura 7 - Esquema de fabricação do cimento	30
Figura 8 – Corte de uma seção típica de pavimento	36
Figura 9 - Localização da jazida 01	40
Figura 10 - Coleta do material da jazida 01	40
Figura 11 - Peneiramento do solo	41
Figura 12 - Coleta do material da jazida 01	41
Figura 13 - Preparação das amostras	42
Figura 14 - Ensaio de granulometria	43
Figura 15 - Ensaio de limite de liquidez.....	43
Figura 16 - Ensaio de limite de plasticidade.....	44
Figura 17 - Ensaio de compactação.....	44
Figura 18 - Índice de suporte Califórnia	45
Figura 19 - Dosagem dos aglomerantes	46
Figura 20 - Moldagem dos corpos de prova.....	46
Figura 21 - Cura dos corpos de prova.....	47
Figura 22 - Rompimento dos corpos de prova	47
Figura 23 - Relação entre resistência x tempo dos corpos de prova rompidos.....	51

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

CBR: *California Bearing Ratio*

CEULP: Centro Universitário Luterano de Palmas

CP: Corpo de prova

DER: Departamento de Estrada e Rodagem

DNER: Departamento Nacional de Estrada e Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

ISC: Índice de Suporte Califórnia

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MPa: Mega Pascal

NBR: Norma Técnica Brasileira

TRB : *Transportation Research Board*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. PROBLEMA	14
1.2 HIPÓTESE	15
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 DEFINIÇÃO DE SOLO.....	19
2.2 ESTRUTURA DOS SOLOS	19
2.3 GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO	19
2.4 CLASSIFICAÇÃO DA CONSTITUIÇÃO DO SOLO	20
2.5 ÍNDICES FÍSICOS.....	21
2.6 LIMITES DE CONSISTÊNCIA	22
2.6.1 Limite de Liquidez	22
2.6.2 Limite de Plasticidade.....	22
2.6.3 Índice de Plasticidade	23
2.7 LIMITE DE CONTRAÇÃO	23
2.8 GRAU DE CONTRAÇÃO.....	23
2.9 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (LEI DE DARCY).....	23
2.10 COMPRESSIBILIDADE DOS SOLOS.....	24
2.11 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CALIFORNIA BEARING RATIO)	24
2.12 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	25
2.13 ENSAIO DE PROCTOR NORMAL	25
2.13.1 Execução do ensaio Proctor normal segundo NBR 7182/84.....	25
2.14 CURVA DE COMPACTAÇÃO	26
2.15 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB.....	27
2.16 CIMENTO	29
2.16.1 Definição	29
2.16.2 Esquema de fabricação do Cimento Portland	30
2.16.3 Composição química do cimento	30

2.16.4 Tipos de Cimento Portland.....	32
2.16.5 Definições:	32
2.16.6 Tipos de Mistura entre Solo e Cimento	33
2.17 CAL	34
2.17.1 Definição	34
2.17.2 Tipos de cal.....	34
2.17.3 Fabricação da cal hidrata	34
2.17.4 Propriedade Química da cal hidratada	34
2.17.5 Mistura Solo - Cal	35
2.18 ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS	35
2.18.1 Estabilização Mecânica.....	35
2.18.2 Estabilização Química.....	35
3.0 PAVIMENTO	36
3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	36
3.1.1 Estrutura do pavimento flexível	37
3.1.2 Subleito	37
3.1.3 Reforço do subleito.....	37
3.1.4 Sub-base	37
3.1.5 Base 38	
4.0 METODOLOGIA	39
4.1 LOCAL DA JAZIDA	40
4.2 COLETA DO MATERIAL	40
4.2.1 Peneiramento dos Solos.....	41
4.2.2 Secagem do Material.....	41
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	42
4.3.1 Preparação da amostra.....	42
4.3.2 Ensaio de granulometria.....	43
4.3.3 Limite de Liquidez	43
4.3.4 Limite de Plasticidade.....	44
4.3.5 Compactação.....	44
4.3.6 Índice de Suporte Califórnia.....	45
4.3.7 Dosagem dos aglomerantes.....	45
4.5 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	46
4.6 CURA DOS CORPOS DE PROVA	47

4.7 RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	48
5.2 RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM 7 DIAS DE CURA	48
5.3 RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM 14 DIAS DE CURA	49
5.4 RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM 28 DIAS DE CURA	50
6 CONCLUSÕES	52
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação consiste em um conjunto de camadas de solo, com espessuras dimensionadas, que tem como objetivo receber e dissipar as tensões provenientes do tráfego de veículos. O sistema básico de um pavimento conta com as camadas: base, sub-base, reforço do subleito e revestimento. A qualidade do material dessas camadas, somada a intempéries e ao volume de tráfego, diz muito sobre a vida útil do pavimento, por isso, é preciso que o dimensionamento seja feito da maneira correta e que a escolha da matéria-prima utilizada seja detalhada.

Em nosso país as rodovias são muito importantes para o escoamento da produção agrícola, porém, conta com uma malha viária com graves problemas de infraestrutura, sem manutenção e investimentos, o que compromete todo o tráfego e causa grandes prejuízos.

Por todos estes fatores, é importante o estudo de novas tecnologias que melhorem o desempenho dos pavimentos, gerando mais conforto e segurança ao usuário, prolongando a vida útil do pavimento e, principalmente, gerando economia, pois necessitará de menos manutenção.

Uma possível solução vem sendo utilizada já há alguns anos, que é a estabilização dos solos, onde tal processo visa atingir um aumento significativo nas suas características, fornecendo maior trabalhabilidade, durabilidade e resistência ao tráfego no pavimento e das ações dos agentes naturais.

Na estabilização granulométrica dos solos a alteração das propriedades consiste na adição e/ou mistura das partículas de solo. Este método é, basicamente, o emprego de um material ou uma mistura, de modo a atender determinada especificação.

Com a estabilização química os solos granulares tendem a atingir uma majoração principalmente na sua resistência mecânica, por meio de adição de um percentual de aglomerantes no material desejado. Os aglomerantes mais utilizados são o Cimento Portland, Cal hidratada, materiais betuminosos, etc.

Além de adequar solos não qualificados, reduzir o custo da obra, a estabilização proporciona a praticidade de utilizar o solo local, e diminuir os impactos ambientais reduzindo necessidade de extração de solo de jazidas de outras regiões e reduzindo bota-foras.

O estudo consistirá em experimentar dois tipos de estabilização, sendo eles com cimento e com cal hidratada, caracterizando o solo de jazida, e seus efeitos para a melhoria dos mesmos. Serão utilizados dois teores de cimento e cal hidratada, testando seus efeitos, a fim de concluir qual percentual de aglomerante apresentará maior acréscimo de resistência ao solo.

1.1. PROBLEMA

Qual mistura será mais eficiente para atingir uma maior resistência à compressão simples do solo com a menor porcentagem de aglomerante?

1.2 HIPÓTESE

O cimento é um ligante muito eficiente para solucionar o problema com a resistência, porém o seu alto valor tende a deixar a obra com um custo mais elevado, com isso a cal hidratada entra como uma possível solução para majorar a resistência do solo e possui um valor mais acessível, pois a matéria prima do aglomerante é abundante em nosso país, trazendo uma economia significativa para obra.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento geotécnico dos solos com adição de cimento ou cal hidratada, para servir de base no processo de execução na pavimentação urbana.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar as jazidas de material granular;
- Análisar a resistência à compressão simples da mistura solo-cal nas proporções de 5 e 8%;
- Avaliar a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento nas proporções de 3 e 5%;

1.4 JUSTIFICATIVA

O solo é um material muito utilizado na maioria das obras de engenharia, mas as vezes é preciso adaptá-lo às condições de uso de cada obra. Para as obras de pavimentação, o solo é a principal matéria prima, e, muitas vezes, ele não apresenta capacidade de suporte suficiente ou outras propriedades importantes para sua aplicação nesse tipo de obra. Dentre as diversas técnicas existentes para a melhoria das condições das vias de tráfego de veículos, destaca-se a estabilização química que será estudada no presente trabalho.

Os pavimentos são estudados como um sistema em camadas que estão sujeitas a cargas dos veículos, intempéries e outras ações. Para que essa estrutura se comporte da maneira desejável, dependendo dos materiais presentes na região para compor estas camadas, é preciso que se façam com materiais de qualidade, a fim de prolongar a vida útil do pavimento, proporcionar conforto aos usuários, dar segurança ao tráfego e reduzir custos de execução e manutenção. Por isso, este trabalho tem a preocupação de trazer duas soluções para melhoria do solo da base do pavimento, apresentando os benefícios sociais, já que as boas condições das vias evitam acidentes e demais prejuízos (UFJF, 2009).

Na área de pavimentação, um dos aspectos de grande importância para viabilidade da obra é a disponibilidade de material qualificado próximo ao trecho a ser executado. A ausência de materiais granulares que atendam aos critérios mínimos para pavimentação como, elevados limite de liquides e de plasticidade, vem sendo uma das principais dificuldade encontrada para os engenheiros da área.

Para vencer essa carência surgiu algumas técnicas que alcançam um acréscimo significativo nas principais propriedades para utilização na pavimentação, a mais requisitada para solucionar tal problema é a estabilização química com cimento e/ou cal hidratada (DNER, 1996).

A cal hidratada apresenta propriedade aglomerante assim como o cimento, porém o enrijecimento e endurecimento do cimento, ocorre por meio das reações de hidratação do compostos, já a cal por meio da reação de recarbonatação, ambos na adição de água (DNER, 1996).

O processo de estabilização utilizando cimento Portland visa à ação físico-química do cimento sobre o solo, em que as melhoria incorporadas por esta mistura favorecem na estabilização e na resistência (DNER, 1996).

O presente trabalho vem como aliado para a melhora dos pavimentos, já que apresentará duas formas de estabilização de solo de base, contribuindo, assim, para o maior conhecimento do método de estabilização de solos tanto com cimento quanto com cal hidratada, enriquecendo o acervo bibliográfico desta área da engenharia. Torna-se muito importante a realização de pesquisas que apresentam alternativas para a melhoria da trafegabilidade de estradas pavimentadas ou não, possibilitando a descoberta de materiais e técnicas alternativas, que barateie custos e facilite a execução de obras de pavimentação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DEFINIÇÃO DE SOLO

A palavra solo pode ser definida como um material formado por agentes naturais, que ocorre pela sedimentação de diferentes tipos de rochas. É utilizado na construção civil com o intuito de suportar e dissipar as cargas exercidas sobre ele nos mais diversos tipos de aplicação. O conhecimento prévio de suas características é de suma importância para prever como será seu comportamento quando for solicitado.

Os solos resultam da deterioração das rochas por agentes naturais ou químicos (Caputo, 1983).

2.2 ESTRUTURA DOS SOLOS

Para Caputo (1988), chama-se estrutura ao arranjo das partículas constituintes do solo. Consideram-se os seguintes tipos principais:

- Estrutura granular simples – é característica das areias e pedregulhos, predominando as forças da gravidade na disposição das partículas, que se apoiam diretamente umas sobre as outras.
- Estrutura alveolar ou em favo de abelha – é o tipo de estrutura comum nos siltes mais finos e em algumas areias.
- Estrutura floculenta – nesse tipo de estrutura, que só é possível em solos cujas partículas componentes sejam todas muito pequenas, as partículas, ao se sedimentarem, dispõem-se em arcos, os quais, por sua vez, formam outros arco.
- Estrutura em esqueleto – nos solos onde, além de grãos finos, há grãos mais grossos, estes dispõem-se de maneira tal a formar um esqueleto.

2.3 GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO

De acordo com o DNIT (2006) toma-se uma amostra de solo úmida aproximadamente 1500 g. Passa-se toda a amostra na peneira nº 10. A fração retida será lavada na peneira nº 10, para eliminar todo o material fino aderente às partículas de solo. Transfere-se o solo lavado para uma cápsula e seca-se a temperatura de 105 °C a 110 °C. Faz-se, então o peneiramento do solo até a peneira nº 10. Da fração que passa na peneira nº 10 toma-se cerca de 100 g para o peneiramento fino (da peneira nº 10 à de nº 200), e cerca de 50 g para determinação

da umidade higroscópica. Lava-se a amostra destinada ao peneiramento fino na peneira nº 200, seca-se a parte retida, em estufa a 105 °C a 110 °C, procedendo-se, então, ao peneiramento entre as peneiras nº 10 e nº 200.

Segundo Caputo (1988), as partes constituintes dos solos recebem designações de acordo com os tamanhos de suas partículas. Essas frações vão de acordo com a escala granulométrica:

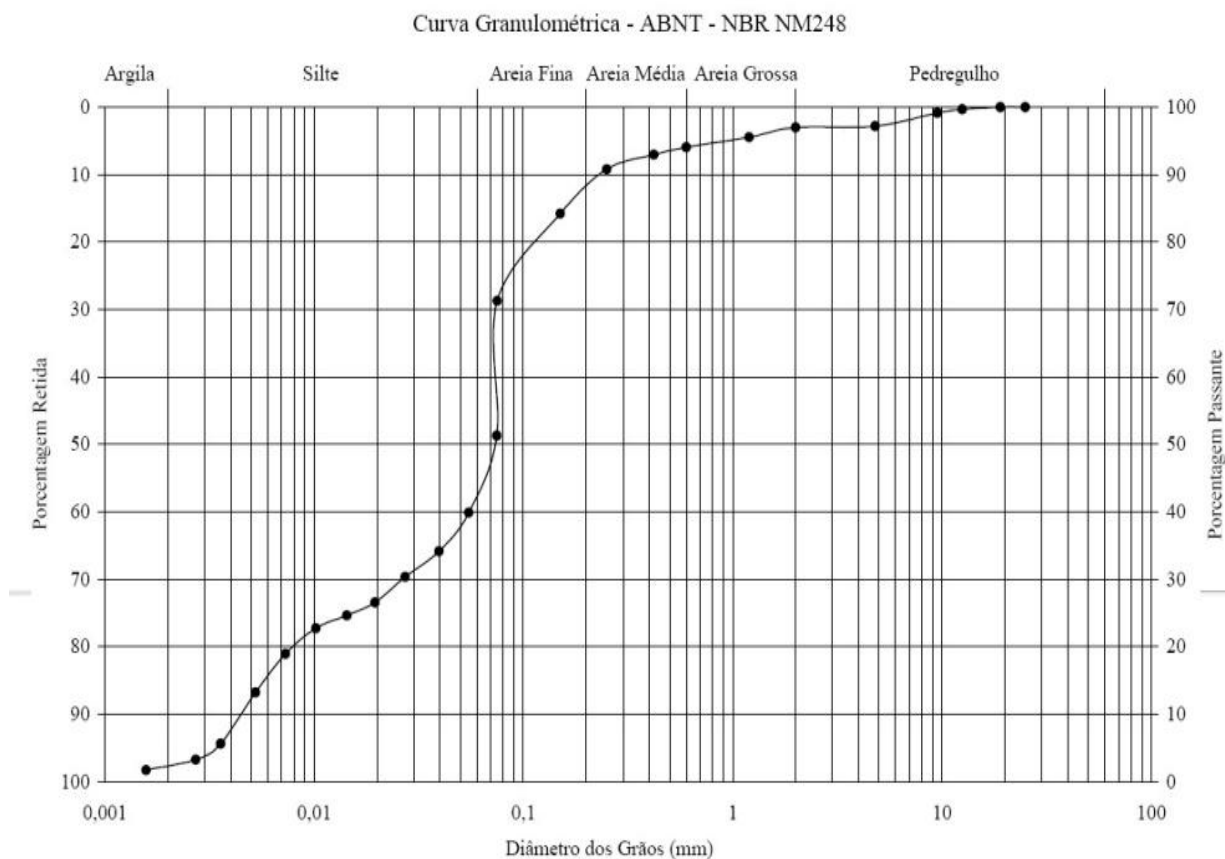
- Pedregulho: no intervalo de 7,6 a 4,8 mm;
- Areia: no intervalo de 4,8 a 0,05 mm;
- Silte: no intervalo de 0,05 a 0,005 mm;
- Argila: inferior a 0,005 mm.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DA CONSTITUIÇÃO DO SOLO

Segundo DNER (1996) a constituição de um solo determina o melhor método de compactação a ser utilizado. Cada tipo de solo se comporta diferentemente com respeito à densidade máxima e umidade ótima. Os tipos de solo são comumente classificados pelo tamanho do grão, determinado pela passagem do solo através de uma série de peneiras para separar os diferentes tamanhos de grão (análise granulométrica).

- Pedregulho: é a fração do solo que passa na peneira de (3") e é retida na peneira 2,00mm(nº10);
- Areia: é a fração do solo que passa na peneira de 2,00(nº10) e é retida na peneira de 0,075mm(nº200);
- Areia grossa: é a fração compreendida entre as peneiras de 2,00 mm (nº 10) e 0,42 mm (nº40);
- Areia fina: é a fração compreendida entre as peneiras de 0,42 (nº40) e 0,075 mm(nº 200);
- Silte: é a fração com tamanho de grão entre a peneira de 0,075 mm(nº 200) e 0,005 mm;
- Argila: é a fração com tamanho de grãos abaixo de 0,005 (argila coloidal é fração com tamanhos de grãos abaixo de 0,001 mm). Os solos são classificados pela sua granulometria de acordo a figura 1.

Figura 1 - Gráfico de curva granulométrica



Fonte: Google imagens

2.5 ÍNDICES FÍSICOS

Para CAPUTO (1988) os índices e as relações exibidas a seguir realizam um papel de suma importância no estudo das propriedades dos solos:

- ✓ Índice de vazios: razão entre o volume de ar e o volume ocupado pelo solo.
- ✓ Porosidade: é a razão entre o volume de vazios e o volume total da massa de solo amostrada.
- ✓ Grau de saturação: é a razão volumétrica de água existente pelo volume de vazios de um solo.
- ✓ Umidade: razão entre o peso da água contida no solo úmido e o peso do material sólido.
- ✓ Peso específico aparente seco: relação entre o peso total da amostra seca e seu volume.
- ✓ Peso específico aparente: é definido pela razão entre o peso da amostra e seu volume.

2.6 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

2.6.1 Limite de Liquidez

De acordo com CAPUTO (1983) A determinação do limite de liquidez (LL) é determinada pelo ensaio de Casagrande (figura 2), que é executado em um prato de latão, sobre um suporte de ebonite. Imprime-se ao prato repetidamente, quedas de altura de 1 cm constante.

Figura 2 - Ensaio do Limite de liquidez



Fonte: Google imagens

2.6.2 Limite de Plasticidade

Limite de plasticidade é verificado pelo porcentual de umidade para a qual o solo começa se trincar quando se tenta moldar em forma de cilindro, como mostra a figura 3 (Caputo, 1988).

Figura 3 - Ensaio do Limite de plasticidade



Fonte: Google imagens

2.6.3 Índice de Plasticidade

É a diferença entre o limite de plasticidade e o limite de liquidez de um solo. Quanto mais alto o ip, o solo será mais plástico (Caputo, 1983).

2.7 LIMITE DE CONTRAÇÃO

O limite de contração (LC) corresponde ao teor de umidade do solo a partir do qual este não mais se contrai, não obstante continue a perder peso, em função da perda de água por secamento (Fiori, 1950).

2.8 GRAU DE CONTRAÇÃO

Para Fiori (1950) o grau de contração de um solo é uma medida dada pela razão da diferença entre os volumes inicial (V_i) e o final (V_f) após a secagem da amostra, para o volume inicial, e é expresso em porcentagem.

$$C = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100 \quad (1)$$

Em função dessa propriedade, os solos podem ser classificados segundo o quadro abaixo (Caputo, 1988):

Tabela 1- Classificação dos solos em função do grau de contração

Denominação	Grau de contração
Solos bons	$C < 5\%$
Solos regulares	$5\% < C < 10\%$
Solos sofríveis	$10\% < C < 15\%$
Solos péssimos	$C > 15\%$

Fonte: Caputo, 1988.

2.9 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (LEI DE DARCY)

A permeabilidade é a propriedade do solo de permitir o escoamento da água através dele. Seu conhecimento é importante para prever problemas corriqueiro da engenharia, tais como: drenagem, recalque rebaixamento do nível da água, (CAPUTO, 1988).

2.10 COMPRESSIBILIDADE DOS SOLOS

Definido pela redução do volume sob a ação de cargas aplicadas. É uma característica comum entre os materiais de se deformarem quando submetidos a forças externas.

2.11 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CALIFORNIA BEARING RATIO)

De acordo com a NBR 9895/16 o índice de suporte Califórnia consiste na definição da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração num solo, e a pressão necessária para produzir uma pressão equivalente a do solo numa brita padronizada.

O valor dessa relação, expressa em percentagem. Segue adiante a execução do ensaio.

- ✓ Compacta-se o material no molde.
- ✓ Em função dos estudos econômicos e ambientais poderá ser proposta no projeto uma energia de compactação adequada às características geotécnicas dos material a ser utilizado na execução de camada do pavimento, após aprovação do DNIT.
- ✓ Remove-se o cilindro complementar. Com uma régua tígida biselada rasa-se o material na altura exata do molde e determina-se, com aproximação de 5 g, o peso do material úmido compactado.
- ✓ Retira-se uma amostra de 100 g do material excedente para determinação da umidade.
- ✓ Repetem-se as operações anteriores para os teores crescentes de umidade.
- ✓ A penetração dos corpos-de-prova é feita numa prensa de acordo a figura 4, a uma velocidade constante.
- ✓ O índice de suporte Califórnia (CBR), em percentagem, para cada corpo-de-prova é obtido pela fórmula:

$$CBR = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \quad (2)$$

Figura 4 - Prensa para índice de suporte Califórnia (CBR)



Fonte: Google imagem

2.12 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

A compactação dos solos tem como principal objetivo aumento da resistência mecânica e de agentes da natureza, como: erosões e recalques. Entende-se por compactação de um solo o processo que busca diminuir significativamente o volume de seus vazios, seja manual ou mecânico (Caputo, 1983).

2.13 ENSAIO DE PROCTOR NORMAL

Segundo CAPUTO (1983) o ensaio original para determinação da umidade ótima e do peso específico máximo de um solo é o ensaio de Proctor, proposto em 1933 pelo engenheiro americano Ralph Proctor.

2.13.1 Execução do ensaio Proctor normal segundo NBR 7182/84

- Adiciona-se água à amostra até se verificar uma certa consistência. Deve-se atentar para uma perfeita homogeneização da amostra;
- Compacta-se a amostra no molde cilíndrico em 3 camadas iguais (cada uma cobrindo aproximadamente um terço do molde), aplicando-se em cada uma delas 25 golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada, com o soquete caindo de 0,305m;
- Remove-se o colarinho e a base, aplaina-se a superfície do material à altura do molde e pesa-se o conjunto cilindro + solo úmido compactado;

- Retira-se a amostra do molde com auxílio do extrator, e partindo-a ao meio, coleta-se uma pequena quantidade para a determinação da umidade;
- Desmancha-se o material compactado até que possa ser passado pela peneira no .4 (4,8mm), misturando-o em seguida ao restante da amostra inicial (para o caso de reuso do material);
- Adiciona-se água à amostra homogeneizando-a (normalmente acrescenta-se água numa quantidade da ordem de 2% da massa original de solo, em peso). Repete-se o processo pelo menos por mais quatro vezes. Conforme a figura 5.

Figura 5 - Ensaio proctor normal

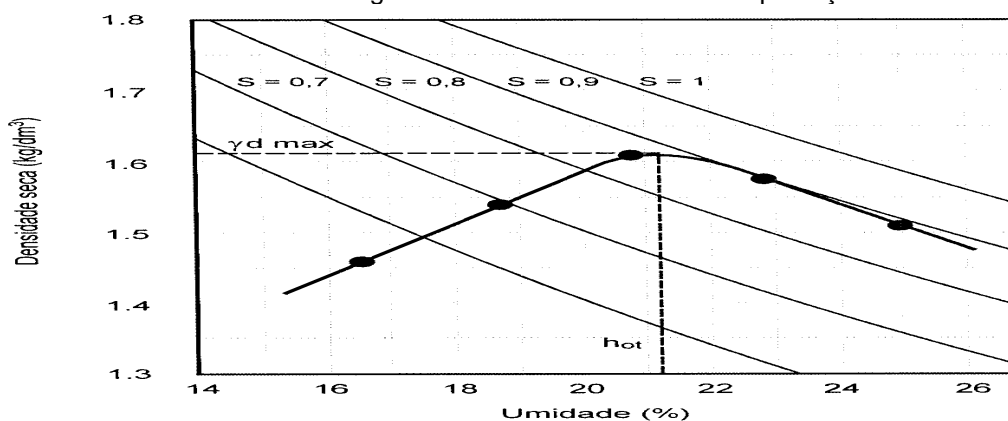


Fonte: Google imagens

2.14 CURVA DE COMPACTAÇÃO

Os dados obtidos no ensaio de compactação são representados na curva de compactação, onde o ramo ascendente representa o ramo seco e o ramo descendente representa o ramo úmido, como mostra a figura 6.

Figura 6 - Gráfico da curva de compactação



Fonte: Caputo, 1988.

2.15 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB

De acordo com DNIT (2006) esta classificação fundamenta-se no limite de liquidez, granulometria e índice de grupo.

Na tabela 2 a seguir, são listadas as características dos solos de cada um dos grupos e subgrupos deste sistema de classificação, relacionadas a sua utilização em pavimentação.

Tabela 2 - Tabela de classificação dos solos TRB

<u>CLASSIFICAÇÃO GERAL</u>	MATERIAIS GRANULARES (35% OU MENOS PASSANDO NA PENEIRA N.º 200)							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS (MAIS DE 35% PASSANDO NA PENEIRA N.º 200)			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
Classificação em Grupos	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria: % passando na peneira: N.º. 10 (2,0 mm.) N.º. 40 (0,42 mm.) N.º. 200 (0,074mm.)	50 máx.	30 máx.	51 mín.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Característica da fração passando na peneira no. 40: Limite de Liquidez (%) Índice de Plasticidade (%)	6 máx.	6 máx.	NP	40 máx. 10máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.
Índice de Grupo (IG)	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia		Areia fina	Pedregulhos ou areia siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT, 2006.

Solos granulares ou de granulação grossa são os que contêm 35% ou menos de material passando na peneira nº 200.

- Grupo A-1 - O material típico deste grupo é constituído de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina e um aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico. No entanto, este grupo inclui também fragmentos de pedra, pedregulho, areia grossa, cinzas vulcânicas, etc., que não contêm aglutinantes de solo.

- Subgrupo A-1-a - Inclui os materiais contendo, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante.
- Subgrupo A-1-b - Inclui os materiais constituídos, principalmente, de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.
- Grupo A-2 - Este grupo inclui grande variedade de materiais que se situam entre os grupos A-1 e A-3 e também entre os materiais constituídos de mistura silte-argila dos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. Inclui todos os solos com 35% ou menos passando na peneira nº 200, mas que não podem ser classificados como A-1 ou A-3, devido ao teor de finos que contêm, ou a plasticidade, ou ambos excedendo os limites estabelecidos para os citados grupos. Subgrupos
- A-2-4 e A-2-5 - Incluem solo contendo 35% ou menos, passando na peneira nº 200, com uma porção menor retida na peneira nº 40, possuindo as características dos grupos A-4 ou A-5. Estes grupos abrangem os materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o Grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico excedendo os limites do Grupo A-3.
- Subgrupos A-2-6 e A-2-7 - Incluem solos semelhantes aos descritos nos subgrupos A-2-4 e A-2-5-, exceção feita da porção de finos que contem argila plástica com características dos grupos A-6 ou A-7. Os efeitos combinados dos índices de plasticidade maiores que 10 e percentagem passando na peneira nº 200, maiores que 15, estão refletidos nos valores dos índices do grupo de 0 a 4.
- Grupo A-3 - O material típico deste grupo é areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena quantidade de silte não plástico. O grupo inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositados pelas correntes.
- Grupo A-4 - O solo típico deste grupo é siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais passando na peneira nº 200. Inclui também misturas de solo fino siltoso com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 8, as percentagens crescentes de material grosso, dando origem a valores decrescentes para os índices de grupo.

- Grupo A-5 - O solo típico deste grupo é semelhante ao que foi descrito no A-4, exceto que ele é, geralmente, de caráter diatomáceo ou micáceo, altamente elástico, conforme indica seu elevado limite de liquidez. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 12; esses valores crescentes revelam o efeito combinado do aumento dos limites de liquidez e das percentagens decrescentes de material grosso.
- Grupo A-6 - O solo típico deste grupo é argiloso, plástico, tendo, geralmente, 75% ou mais de material passando na peneira n^o 200. O grupo inclui também misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira n^o 200. Os solos deste grupo comumente sofrem elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 16, esses valores crescentes mostram o efeito combinado do aumento dos índices de plasticidade e diminuição dos materiais grossos.
- Grupo A-7 - O solo típico deste grupo é semelhante ao descrito no grupo A-6, com a diferença que possui as características de alto limite de liquidez do grupo A-5, podendo ainda ser elástico e estar sujeito a elevada mudança de volume. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 20; este aumento indica o efeito combinado de crescimento dos limites de liquidez e dos índices de plasticidade, bem como a diminuição dos materiais grossos.
- Subgrupo A-7-5 - Encerra materiais com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume.
- Subgrupo A-7-6 - Inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

2.16 CIMENTO

2.16.1 Definição

Aglomerante obtido pela pulverização do clínquer resultante da calcinação até fusão incipiente, 20% a 30% de fase líquida, de uma mistura íntima e convenientemente proporcionada de materiais calcário e argilosos, sem adição, após a calcinação, de outras substâncias a não ser água e gesso, (Senço, 1929).

Para NEVILLE (1997) cimento pode ser considerado todo o material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos e minerais entre si de modo a formar um todo compacto.

Segundo Senço (2001) em 1845 Johnson iniciou a produção do cimento Portland, material pulverulento, resultante da moagem do clínquer, constituído principalmente de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre.

2.16.2 Esquema de fabricação do Cimento Portland

Figura 7 - Esquema de fabricação do cimento



Fonte: Google imagens

2.16.3 Composição química do cimento

De acordo com Senço (2001) os principais componentes do cimento que podem ser determinados em um análise química são:

- Cal – CaO
- Sílica – Si. O₂
- Alumina – Al₂. O₃
- Óxido de Ferro – Fe₂ O₃
- Magnésia – MgO
- Álcalis – Na₂O e K₂O
- Sulfatos – SO₃

As porcentagens desses componentes são previstas nas especificações, embora não haja total coincidência quanto aos valores. Na tabela a seguir serão apresentados valores da especificação nacional, inclusive comparando os valores da especificação original com as alterações previstas na revisão de 1977 e os valores das especificações americanas.

Tabela 3 - Tabela da composição química do cimento

Componente	Cimentos brasileiros (%)		Cimentos americanos (%)
	em 1941	em 1977	
CaO	61 - 67	58,9 - 66,8	60,0 - 67,5
SiO ₂	20 - 23	19 - 24,2	19 - 25,5
Al ₂ O ₃	4,5 - 7	3,9 - 7,3	2,5 - 8
Fe ₂ O ₃	2 - 3,5	1,8 - 5	0 - 5,5
MgO	0,8 - 6	0,5 - 6,3	0 - 5
SO ₃	1 - 2,3	0,9 - 3	1,2 - 3
Álcalis	0,3 - 1,5	0,3 - 1,5	

Fonte: Senço, 1929.

- ✓ A cal, CaO, é o componente essencial e provém, em sua maior parte, da decomposição do carbonato de cálcio. A sílica, Si₂O, provém geralmente das argilas e, com a cal, resulta nos compostos mais importantes do cimento Portland.
- ✓ A alumina, Al₂O₃, provém da argila e combinada com a cal acelera a pega do cimento.
- ✓ O óxido de ferro, Fe₂O₃, também trazido pela argila, tem papel fundente e, juntamente com a alumina, em teores altos, pode converter toda sílica em silicato tricálcico, sem aparecimento de quantidade inconveniente de cal livre.
- ✓ Os sulfatos, SO₃, provém principalmente do sulfato de cálcio e podem retardar a pega do cimento.
 - ✓ A magnésia, MgO, provém do calcário ou da argila, pode funcionar como expansivo e afetar a estabilidade das argamassas.
 - ✓ Finalmente, os álcalis podem funcionar como aceleradores da pega do cimento.

Os componentes do cimento são encontrados nos produtos minerais, que são as matérias-primas para fabricação: calcário, argila e gesso.

2.16.4 Tipos de Cimento Portland

Segundo o manual de pavimentação do DNER (1996), dentre as categorias de cimentos produzidos no país, destacam-se os do tipo Portland comum, composto, de alto-forno, pozolânico, de alta resistência inicial, e resistente a sulfatos. Assim, tem-se:

- Cimento Portland comum - CP I e CP I - S;
- Cimento Portland composto - CP II - E, CP II - Z e CP II - F;
- Cimento Portland de alto-forno - CP III;
- Cimento Portland pozolânico - CP IV;
- Cimento Portland de alta resistência inicial - CP V;
- Cimentos Portland resistente à sulfatos - RS.

2.16.5 Definições:

De acordo com DNIT (2006) os cimentos são definidos da seguinte maneira:

- a) Cimento Portland comum - é o aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.
- b) Cimento Portland composto - é definido de modo semelhante ao descrito em a), sendo que, durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura, matérias pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e/ou materiais carbonáticos.
- c) Cimento Portland de alto-forno - é o aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e escória granulada de alto-forno, moídos em conjunto ou em separado.
- d) Cimento Portland pozolânico: é o aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou em separado.
- e) Cimento Portland de alta resistência inicial: é o aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

f) Cimento Portland resistente a sulfatos: é definido de modo semelhante ao descrito em a), desde que atenda à condição de resistência aos sulfatos. São considerados resistentes:

- cimentos cujo teor de C3A do clínquer seja igual ou inferior a 8% e cujo teor de adições carbonáticas seja igual ou inferior a 5% da massa do aglomerante total e/ou;
- cimentos Portland de alto-forno (CP - III) cujo teor de escória granulada de altoforno esteja entre 60% e 70% e/ou;
- cimentos Portland pozolânicos (CP - IV) cujo teor de materiais pozolânicos esteja entre 25% e 40%, e/ou;
- cimentos que tenham antecedentes com base em resultados de ensaios de longa duração, ou referências de obras que comprovadamente indiquem resistência a sulfatos.

A homogeneização de cimento com água e sua transformação em massa compacta compreende duas etapas distintas: a pega e o endurecimento. A pega do cimento, etapa inicial da transformação citada, processa-se em poucas horas e é caracterizada pelo aumento de viscosidade da pasta. Considera-se pega terminada (final de pega) quando a pasta não se deforma sob a pressão de esforços moderados, definidos em ensaio-padrão.

Terminada a pega, inicia-se a etapa de endurecimento, que corresponde ao aumento crescente da resistência da pasta de cimento, sob condições favoráveis. Esse processamento se desenvolve por vários anos.

Os compostos químicos C3S e o C2S são os responsáveis pela pega do cimento, durante a qual ambos se combinam com a água para formar o silicato inferior hidratado de cálcio. O C3S responde pela resistência inicial e o C2S pela resistência final. O C3S desenvolve maior calor de hidratação que o C2S.

2.16.6 Tipos de Mistura entre Solo e Cimento

De acordo com MARQUES (2003 apud FELTRIN, 2008) existem três diferentes tipos de misturas de solo estabilizado com cimento, sendo o solo cimento, apenas uma delas: mistura solo cimento, solo corrigido ou tratado com cimento, solo cimento plástico. Sua estabilização sendo influenciada por fatores como o tempo, condição de cura e dosagem, presença de materiais nocivos ao cimento, teor de cimento e tipo de solo.

Para Senço (1997) a obtenção de uma base de solo-cimento com características adequadas requer a elaboração de um teor de cimento Portland conveniente quando misturado ao solo. A umidade ótima também se mostra como um requisito essencial para que essa mistura funcione de maneira satisfatória, pois, antes da hidratação do cimento, o solo pode ser devidamente compactado.

2.17 CAL

2.17.1 Definição

Cal é um termo utilizado para identificar produtos derivados do calcário. É um aglomerante resultante da calcinação de rochas calcárias e recebe o nome de cal virgem ou cal viva.

2.17.2 Tipos de cal

- Cal Aérea;
- Cal Virgem;
- Cal Hidratada;
- Cal Hidráulica.

De acordo com DER/SP (2006) a cal utilizada em pavimentação para estabilização de solo é a cal hidratada.

2.17.3 Fabricação da cal hidrata

A cal hidrata é o resultado da hidratação da cal virgem. A hidratação ocorre da seguinte maneira:

- Mói a cal viva;
- Adiciona a quantidade ideal de água;
- Peneira as impurezas.

2.17.4 Propriedade Química da cal hidratada

Massa molecular - 74.093 g/mol

Densidade - 2.211 g/cm³

2.17.5 Mistura Solo - Cal

Segundo DNIT (2006) é uma mistura de solo, cal e água. O teor de cal mais freqüente é de 5% a 6%, e o processo de estabilização ocorre:

- por modificação do solo, no que refere à sua plasticidade e sensibilidade à água;
- por carbonatação, que é uma cimentação fraca;
- por pozolanização, que é uma cimentação forte.

Quando, pelo teor de cal usado, pela natureza do solo, predominam os dois últimos efeitos mencionados, tem-se as misturas solo-cal, consideradas semi-rígidas.

2.18 ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS

Estabilização de solos é o procedimento que confere ao solo uma majoração na resistência às cargas aplicadas, um aumento na permeabilidade e resistência para suportar aos agentes naturais.

2.18.1 Estabilização Mecânica

Processo de melhoria da capacidade resistente de materiais “in natura” ou mistura de materiais, mediante emprego de energia de compactação adequada, de forma a se obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade, DNER - ES 303/97 (2009).

2.18.2 Estabilização Química

A estabilização química altera as de característica um solo através de um acréscimo de determinada quantidade ligante, modificando as propriedades físicas e químicas do solo, melhorando principalmente sua resistência ao cisalhamento por meio do atrito entre as partículas produzido pela adição do ligante. Os ligantes mais é o cimento Portland, cal, pozolanas, materiais betuminosos e resinas, (Senço, 1929).

3.0 PAVIMENTO

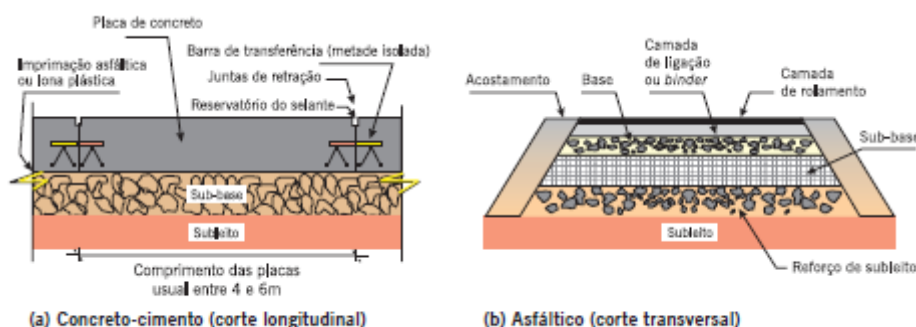
Souza (1976) define o pavimento como uma superestrutura composta por camadas de materiais distintos com uma complexa interligação de suas propriedades, como resistência e deformabilidade, calculadas de acordo com as tensões e deformações solicitadas. Tudo isto é sobreposto no terreno (fundação), considerado como infra-estrutura, preparada, denominada subleito.

Ainda segundo Souza (1976), esta superestrutura tem o objetivo de resistir, distribuir e repassar ao subleito as cargas solicitadas à vida para qual é dimensionada, melhorando as condições de tráfego quanto à comodidade e segurança do usuário.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

De acordo com Medina (1997) *apud* Pereira (2012) tradicionalmente os pavimentos são classificados em duas estruturas, rígidos e flexíveis, porém há outra modalidade de pavimentos sendo usada atualmente, o semi-rígido, como mostra a figura 8.

Figura 8 – Corte de uma seção típica de pavimento



Fonte: DNIT (2006)

- Flexível: pavimento projetado para receber e distribuir as cargas entre as camadas de solo, sobretudo, as camadas mais próximas do revestimento, são mais resistentes. Ex.: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica.

- Semirrígido: possui a base cimentada por processo químico. Ex.: Camada de solo cimento, revestida por uma camada asfáltica.
- Rígido: o revestimento é feito por lajes de concreto Portland, sendo altamente rígido, devendo absorver todas as tensões do tráfego unicamente pelo seu revestimento, que é mais resistente às camadas inferiores.

3.1.1 Estrutura do pavimento flexível

As camadas típicas de um pavimento devem possuir subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento (SENÇO, 2007).

3.1.2 Subleito

O subleito é o solo em estado natural, conhecido também como terreno de fundação. Há dois casos de subleito, uma com terraplanagem recente, onde o terreno se encontra regularizado, e outra nas estradas de terra em uso por um determinado tempo, neste, o terreno tem extensão irregular (SENÇO, 2007).

A resistência do subleito é variável dependendo do método analisado. No método CBR, a resistência do subleito é obtida através de análise laboratorial onde se mede a resistência à penetração a partir de uma amostra de solo do subleito. A técnica de Francís Hveem, determina a resistência a partir do ensaio triaxial no aparelho chamado Esíabilômetro de Heveem. No método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem a resistência é o resultado da média aritmética entre o CBR e o outro índice (derivado do índice de Grupo), gerado através dos ensaios de caracterização do solo do subleito (SENÇO, 2007).

3.1.3 Reforço do subleito

O reforço do subleito é utilizado em pavimentos espessos, tem a finalidade de reduzir a espessura da sub-base (DNER, 1996). Esta camada possui espessura constante, seu material deve ter características geotécnicas inferiores ao material utilizado na camada superior, porém melhores que o material do subleito (DNIT, 2006).

3.1.4 Sub-base

A sub-base é a camada de complemento da base, construída quando não puder executar a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito por

motivos técnicos e econômicos (DNIT, 2006). O material utilizado na sub-base deve ter características superiores às do material de reforço (SENÇO, 2007).

3.1.5 Base

A base é a parte da estrutura que tem o objetivo de resistir e distribuir os esforços ocasionados pelo tráfego, camada onde será assentado o revestimento (DNIT, 2006).

3.1.6 Revestimento

O revestimento é a capa de rolamento do pavimento, sendo impermeável e designada a aumentar o conforto e segurança ao usuário, melhorando a superfície de rolamento (SENÇO, 2007). A camada de revestimento tem espessura adotada por critérios próprios ou em função do tráfego previsto. Para vias com duas faixas de tráfego e duas mãos de direção, é habitual a espessura de 3 a 5 cm. Para rodovias duplicadas, o revestimento chega entre 7,5 e 10 cm (SENÇO, 2007).

4.0 METODOLOGIA

A abordagem do problema é tanto quantitativa, qualitativa e estudo de caso, uma vez que tem por objetivo além de analisar os resultados, compará-los entre si, de modo a identificar o de melhor desempenho.

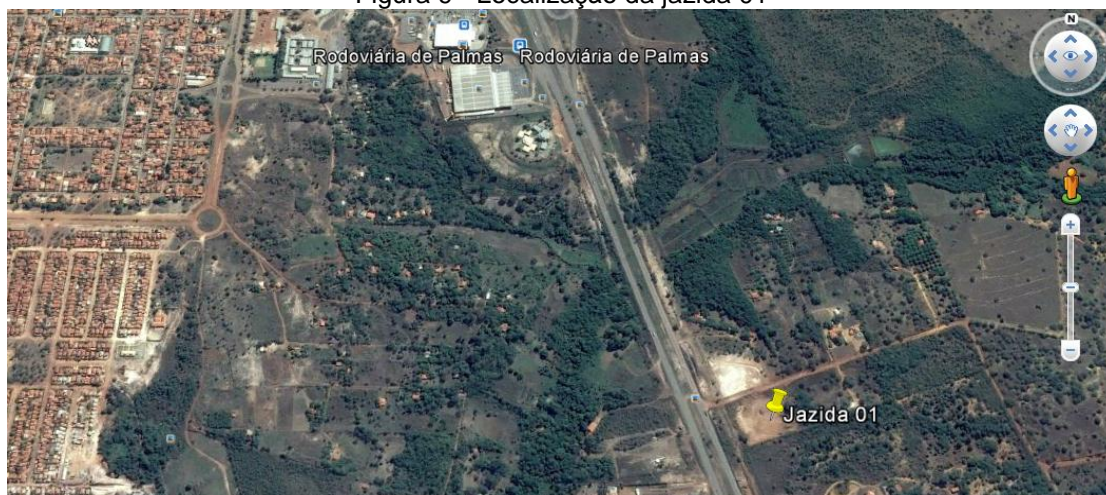
No presente trabalho foram realizados os seguintes processos, que vai da coleta do material até a comparação dos resultados obtidos através dos ensaios.

- ✓ Coleta e armazenamento de material;
- ✓ Peneiramento do solo;
- ✓ Secagem do material;
- ✓ Caracterização do solo;
- ✓ Definição de dosagem de cimento/cal para os CPs;
- ✓ Moldagem dos CPs com adição de cimento/cal;
- ✓ Cura dos CPs;
- ✓ Ruptura à compressão simples aos 7 dias dos corpos de prova;
- ✓ Ruptura à compressão simples aos 14 dias dos corpos de prova;
- ✓ Ruptura à compressão simples aos 28 dias dos corpos de prova;
- ✓ Análise dos resultados, verificação das resistências a compressão simples dos corpos de prova com teores de cimento/cal.
- ✓ Comparação entre os resultados de resistência dos corpos de prova moldados com solo cimento, e os corpos de prova moldados com solo-cal;

4.1 LOCAL DA JAZIDA

A jazida se localiza na cidade de Palmas TO, próximo a TO-050 entre o Plano Diretor Sul e a Aurenny 4, conforme a figura 9.

Figura 9 - Localização da jazida 01



Fonte: Google Earth, adaptada pelo autor

Coordenadas geográficas

Latitude: 10°15'56.33"S

Longitude: 48°18'22.73"O

4.2 COLETA DO MATERIAL

O material utilizado no presente trabalho foi retirado no estado natural com o auxílio de uma inchada, e acondicionado em sacos plásticos, em quantidade suficiente para realização dos ensaios previstos, totalizando 68 kg de solo, conforme a figura 10.

Figura 10 - Coleta do material da jazida 01



Fonte: autor

4.2.1 Peneiramento dos Solos

Passagem do material na peneira 4,8 mm, na 19 mm e pesagem do material, para verificar a porcentagem de material grosso e fino da amostra, como é indicado pela NBR 6457, de acordo com a figura 11.

Figura 11 - Peneiramento do solo



Fonte: autor

4.2.2 Secagem do Material

A secagem do solo foi feita ao ar livre, sem a incidência do sol para não perder a umidade higroscópica, como recomenda a NBR 6457, como mostra a figura 12.

Figura 12 - Coleta do material da jazida 01



Fonte: autor

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O solo foi caracterizado pelos ensaios determinados pela associação brasileira de normas técnicas. Segue abaixo a tabela 4 com os ensaios e as normas que os regem.

Tabela 4 - Tabela de normas que padronizam os ensaios

Ensaio de caracterização	Normas ABNT
Preparação das amostras de solo	NBR 6457/86
Granulometria	NBR 7181/84
Limite de Liquidez	NBR 6459/84
Limite de Plasticidade	NBR 7180/84
Compactação	NBR 7182/86
Índice de Suporte Califórnia	NBR 9895/16

Fonte: autor

Os ensaios que caracterizam o solo foram realizados de acordo as normas regulamentadoras de cada um e descritos anteriormente no referencial teórico.

4.3.1 Preparação da amostra

O material coletado foi seco ao ar livre até atingir umidade próxima a umidade higroscópica, passado na peneira 4,8 mm, dividido em amostras de 5 kg (para os ensaios de compactação e CBR), 1 kg (para o ensaio de análise granulométrica) e guardado em sacos plástico para evitar a perda da umidade como é determinado pela NBR 6457, conforme a figura 13.

Figura 13 - Preparação das amostras



Fonte: autor

4.3.2 Ensaio de granulometria

A amostra utilizada para o ensaio de granulometria foi lavada na peneira 10 e na 200 para retirar o material siltoso e seca em estufa, como indicado pela NBR 7181, de acordo com a figura 14.

Figura 14 - Ensaio de granulometria

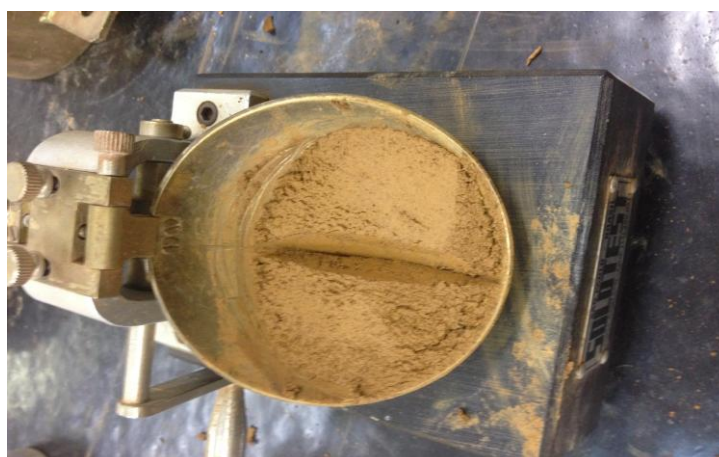


Fonte: autor

4.3.3 Limite de Liquidez

Foi retirado cerca de 80 g do material passado na N^o 40 e adicionado na cápsula para ser misturado com água, adicionado água em pequenas quantidades até a obter uma mistura homogênea consistente. Dividido a massa do solo em duas partes iguais com o emprego do cinzel e acrescentando a quantidade de solo de modo que para o fechamento da canelura seja necessários aproximadamente o número de golpes de 10, 20, 30, 40 e 50 golpes, como é requerido pela NBR 6459, representado na figura 15.

Figura 15 - Ensaio de limite de liquidez



Fonte: autor

4.3.4 Limite de Plasticidade

Foi retirado cerca de 150 g do material passado na Nº 40 e colocado parte da amostra no recipiente de porcelana e adicionando água até a homogeneização da mistura; Moldou-se uma quantidade de aproximadamente de 10 g de massa em forma cilíndrica, rolando-a em seguida sobre a placa de vidro, até que fissurou quando a mesma atingiu dimensões de 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento; Coletou-se alguns fragmentos fissurados para a determinação da umidade; Repetiu o processo por mais quatro vezes, conforme indicado pela NBR 7180, de acordo a figura 16.

Figura 16 - Ensaio de limite de plasticidade



Fonte: autor

4.3.5 Compactação

Foi adicionado água ao solo até se verificar perfeita homogeneização da amostra com uma certa consistência. Compactou-se a amostra no molde cilíndrico em 3 camadas cada uma ocupando um terço do molde, aplicando-se em cada uma delas 25 golpes com a energia do método B, distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada, com o soquete caindo de aproximadamente 30 cm, de acordo a NBR 7182, como mostra a figura 17.

Figura 17 - Ensaio de compactação



Fonte: autor

4.3.6 Índice de Suporte Califórnia

Relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um solo, e a pressão necessária para produzir uma pressão equivalente numa brita padronizada, regido pela NBR 9895, como mostra a figura 18.

Figura 18 - Índice de suporte Califórnia



Fonte: autor

4.3.7 Dosagem dos aglomerantes

A adição de cimento à amostra de solo foram de 3% e 5%, de acordo com a norma do DNIT 142/2010- ES. Essa é a porcentagem usual para solo melhorado com cimento.

O solo estabilizado com cal recebeu um acréscimo de 5% e 8% do aglomerante, que é mais usual de acordo ao DER/SP.

A mistura de solo com aglomerante foi homogeneizada com a umidade ótima do solo, conforme mostrado na figura 19.

Figura 19 - Dosagem dos aglomerantes



Fonte: autor

4.5 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Posteriormente realizar a homogeneização da mistura solo cimento/cal foram moldados os corpos-de-prova na energia do método B, como se recomenda pelo DNER, conforme figura 20.

Figura 20 - Moldagem dos corpos de prova



Fonte: autor

4.6 CURA DOS CORPOS DE PROVA

Conforme a figura 21, os CPs foram colocados em local propício, sem incidência do sol respeitando-se o tempo de cura de 7, 14 e 28 dias para serem rompidos. A temperatura (t) ambiente estava dentro do intervalo de $0^{\circ}\text{C} \leq t \leq 40^{\circ}\text{C}$.

Figura 21 - Cura dos corpos de prova



Fonte: autor

4.7 RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA

Os ensaios de compressão simples foram realizados na prensa modelo EMIC DL 30000 e conduzido de acordo diretrizes da norma NBR 12025, com velocidade de carregamento de 1 mm/min, de acordo a figura 22.

Figura 22 - Rompimento dos corpos de prova



Fonte: autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A tabela 5 apresenta os resultados obtidos com os ensaios de caracterização da jazida de solo.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de caracterização do solo

LL (%)	IP (%)	GRANULOMETRIA - % QUE PASSA									COMPACTAÇÃO		CBR	
		3/4"	Nº 4	Nº 10	Nº 16	Nº 30	Nº 40	Nº 50	Nº 100	Nº 200	UMID.HOT. (%)	DENS. MAX. (g/cm ³)	EXP. (%)	I.S.C (%)
27,0	6,1	98,77	79,69	51,07	38,49	36,62	34,95	29,74	20,77	18,84	11,8	1,82	0,05	61,1

Fonte: autor

Utilizando o sistema de classificação dos solos TRB, o material granular da jazida 01 foi classificado como A-2-4.

5.2 RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM 7 DIAS DE CURA

A tabela 6 mostra os resultados obtidos com os rompimentos dos corpos de prova com 7 dias de cura.

Tabela 6 - Resultados dos rompimentos dos corpos de prova com 7 dias de cura

Resistência à compressão simples (MPa)				
Solo com umidade ótima	Solo + 3% de cimento	Solo + 5% de cimento	Solo + 5% de cal	Solo + 8% de cal
0,176	0,423	0,827	0,234	0,453

Fonte: autor

Observações:

- o corpo de prova com adição de 3% da massa de cimento aos 7 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão de 140,34% em comparação ao solo natural.
- o corpo de prova com adição de 5% da massa de cimento aos 7 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão 369,88% em comparação ao solo natural;
- o corpo de prova com adição de 5% da massa de cal aos 7 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão 32,95% em comparação ao solo natural;
- o corpo de prova com adição de 8% da massa de cal aos 7 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão 157,38% em comparação ao solo natural;

- O solo com adição de 3% de cimento teve um aumento de aproximadamente 2,4 vezes na sua resistência à compressão simples, ou seja, mais que dobrou sua resistência.
- O solo com adição de 5% de cimento teve um aumento de aproximadamente 4,7 vezes na sua resistência à compressão simples.
- Já solo com adição de 5% de cal hidratada teve um aumento de aproximadamente 0,3 vezes na sua resistência à compressão simples.
- O solo com adição de 8% de cal hidratada teve um aumento de aproximadamente 2,6 vezes na sua resistência à compressão simples.

Como mostra os resultados, o solo com adição de 8% de cal hidratada obteve um resultado mais significativo que o solo com adição de 3% de cimento.

5.3 RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM 14 DIAS DE CURA

A tabela 7 mostra os resultados obtidos com os rompimentos dos corpos de prova com 14 dias de cura.

Tabela 7 - Resultados dos rompimentos dos corpos de prova com 14 dias de cura

Resistência à compressão simples (MPa)			
Solo + 3% de cimento	Solo + 5% de cimento	Solo + 5% de cal	Solo + 8% de cal
0,540	0,912	0,274	0,480

Fonte: autor

Observações:

- a) o corpo de prova com adição de 3% da massa de cimento aos 14 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão de 206,82% em comparação ao solo natural;
- b) o corpo de prova com adição de 5% da massa de cimento aos 14 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão 418,18% em comparação ao solo natural;
- c) o corpo de prova com adição de 5% da massa de cal aos 14 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão 55,68% em comparação ao solo natural;
- d) o corpo de prova com adição de 8% da massa de cal aos 14 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão 172,73% em comparação ao solo natural;

- O solo com adição de 3% de cimento teve um aumento de aproximadamente 3,1 vezes na sua resistência à compressão simples, ou seja, mais que dobrou sua resistência.
- O solo com adição de 5% de cimento teve um aumento de aproximadamente 5,2 vezes na sua resistência à compressão simples.
- Já solo com adição de 5% de cal hidratada teve um aumento de aproximadamente 0,5 vezes na sua resistência à compressão simples.
- O solo com adição de 8% de cal hidratada teve um aumento de aproximadamente 2,7 vezes na sua resistência à compressão simples.

5.4 RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM 28 DIAS DE CURA

A tabela 8 mostra os resultados obtidos com os rompimentos dos corpos de prova com 28 dias de cura.

Tabela 8 - Resultados dos rompimentos dos corpos de prova com 28 dias de cura

Resistência à compressão simples (MPa)			
Solo + 3% de cimento	Solo + 5% de cimento	Solo + 5% de cal	Solo + 8% de cal
0,562	0,968	0,356	0,497

Fonte: autor

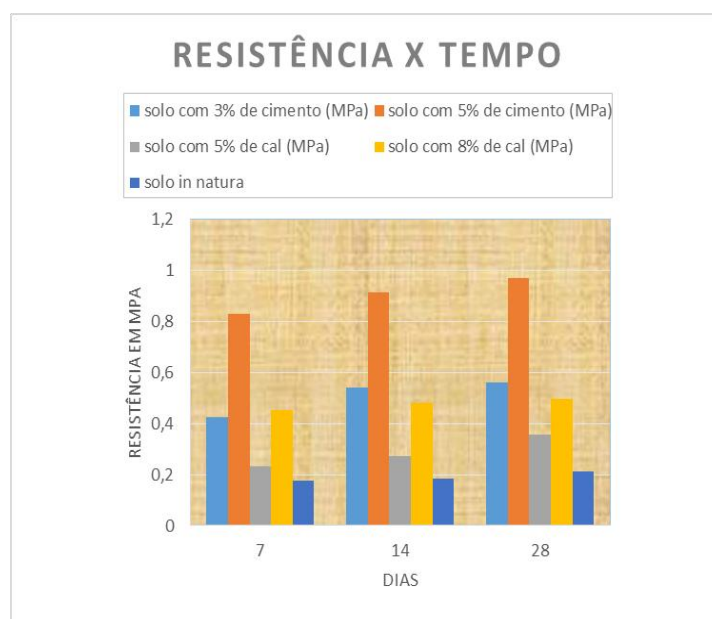
Observações:

- a) o corpo de prova com adição de 3% da massa de cimento aos 28 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão de 219,32% em comparação ao solo natural;
- b) o corpo de prova com adição de 5% da massa de cimento aos 28 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão 450% em comparação ao solo natural;
- c) o corpo de prova com adição de 5% da massa de cal aos 28 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão 102,27% em comparação ao solo natural;
- d) o corpo de prova com adição de 8% da massa de cal aos 28 dias de cura obteve um acréscimo na resistência à compressão 182,38% em comparação ao solo natural;

- O solo com adição de 3% de cimento teve um aumento de aproximadamente 3,2 vezes na sua resistência à compressão simples, ou seja, mais que dobrou sua resistência.
- O solo com adição de 5% de cimento teve um aumento de aproximadamente 5,5 vezes na sua resistência à compressão simples.
- Já solo com adição de 5% de cal hidratada teve um aumento de aproximadamente 2 vezes na sua resistência à compressão simples.
- O solo com adição de 8% de cal hidratada teve um aumento de aproximadamente 2,7 vezes na sua resistência à compressão simples.

A figura 23 mostra a relação entre a resistências dos corpos de provas moldados com adição de aglomerantes versus o tempo de cura dos corpos de prova.

Figura 23 - Relação entre resistência x tempo dos corpos de prova rompidos



Fonte: autor

6 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou os resultados obtidos das misturas de solo puro com proporções de cal ou cimento para a possibilidade de adequação da resistência à compressão simples, a fim de ser utilizado em camada de base em pavimento urbano, de modo a utilizar uma técnica alternativa e econômica para solucionar o problema de material não-utilizável.

Através do levantamento de informações obtidas com os ensaios laboratoriais, foi possível determinar as características do solo de jazida a fim de se conhecer a fundo suas propriedades, podendo, assim, definir se a amostra apresenta características suficientes para ser utilizada em camada de base de um pavimento. Com os dados obtidos com os ensaios de caracterização podemos classificar o material segundo o sistema de classificação TRB como aceitável para servir na camada de base, pois seu CBR atingiu o requisito de resistência que é de 60% (DNIT, 2006).

Para a Jazida 01 o estabilizante que ofereceu melhores resultados de resistência à compressão simples foi o cimento, utilizado nas proporções de 3% e 5%, provocando aumento de respectivamente 219% e 450% aos 28 dias de cura. A cal, empregada nas proporções 5% e 8%, conferiu um aumento menos significativo da resistência à compressão simples quando comparado ao cimento, de respectivamente de 102% e 182% aos 28 dias de cura.

Os resultados obtidos sugerem que a adição de cimento é benéfica para a estrutura do pavimento, já que aumenta sua resistência, como foi observado com o aumento considerável do valor da resistência à compressão simples do solo.

Os resultados apresentados sugerem que a adição de cal hidratada ao solo está relacionada principalmente ao tipo de solo, suas propriedades químicas, reações obtidas, com o método de cura, tipo de ensaio e modo de mistura do material ao solo.

Recomenda-se ensaiar as amostras com outros teores de cal hidratada, realizando o ensaio de compressão simples com cura adequada, além de ensaiar a cal hidratada, para se conhecer uma adição de água mais precisa, que é provável que auxilie para atingir melhores resultados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Aplicações Solo-Cimento. São Paulo, 2004. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento/> Acesso em: 06 outubro de 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NM 248** - Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 6457**: Amostras de solos - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 12023** – Solo-cimento: ensaio de compactação. Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 12025** – Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 12253** – Solo-cimento: Dosagem para o emprego como camada de pavimento. Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2008.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 6. ed. 234 p.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983. 5. ed. 488 p.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 560 p. il.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). **Manual de Pavimentação**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DOS TRANSPORTES (DNIT). **Revisão da Norma DNER-ME 049/94**. 14 p, Rio de Janeiro, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DOS TRANSPORTES (DNIT). **Revisão da Norma DNER-ES 304/97**. 10 p, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DOS TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo 04/06. **Pavimentação: Base de solo-cal**. São Paulo, 2006. Disponível em: ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-005_A.pdf

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas**. Curitiba: UFPR, 2009.

FELTRIN, Maikon Gonçalves. **Desenvolvimento de blocos vazados de solo cimento visando à autoconstrução de habitações populares**. 2008. 98 f.

JUIZ DE FORA. **Materiais Asfálticos: Noções Gerais**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009.

Monografia (Curso de Engenharia Civil) Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

____. **NBR 6490** – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

____. **NBR-7180**: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

____. **NBR-7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

____. **NBR-7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1984.

____. **NBR-9895**: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

MARQUES, Geraldo L. de Oliveira. **Pavimentação**. 2006. 210 p. Notas de Aulas – Pavimentação TRN 032 - Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2006.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. Notas de Aula 4: O Pavimento Rodoviário. **Net**. Juiz de Fora, jun. 2005. Disponível em: Acesso em: 18 de setembro de 2016.

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

PEREIRA, Kiev Luiz de Araújo. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentação**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

SENÇO, De Wlastermiler. **Manual de técnicas pavimentação, volume II**. São Paulo: Pini, 2001.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1997. 1 v.

SENÇO, W. (2007). **Manual de Técnicas de Pavimentação. (2 ed., Vol. 1).** São Paulo: Pini.

SOUZA, Murillo Lopes de. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** 2 ed. rev. E atual. Rio de Janeiro, IPR., 1976.

TISCOSKI, Douglas. **Análise da resistência à compressão simples da mistura solo cimento e perma-zyme® para fins rodoviários.** 2009. 93 f. Monografia (Curso de Engenharia Civil) Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.