



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM ADIÇÃO DE CAL E CIMENTO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO NA REGIÃO DE UBERLÂNDIA

Aluno: Felipe Melo Cabral

Matrícula: 11211ECV015

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Giovana Bizão Georgetti

Uberlândia, julho de 2018.

“Realmente, o mundo está cheio de perigos, mas ainda há muita coisa bonita, e embora atualmente o amor e a tristeza estejam misturados em todas as terras, talvez o primeiro ainda cresça com mais força”

J.R.R. Tolkien, A Sociedade do Anel.

RESUMO

Cabral, F. M. Estabilização de solos com adição de cal e cimento para fins de pavimentação na cidade de Uberlândia. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

Visando o melhor aproveitamento de solo locais nas obras de engenharia, considerando seu fácil acesso, este trabalho teve o intuito de avaliar os efeitos da adição de cal e cimento em um solo, coletado no Campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia, sob a perspectiva de melhorar suas características para ser utilizado em camadas de pavimento como sub-base e base por exemplo. O critério utilizado para avaliar a aplicabilidade do solo estabilizado quimicamente foi o valor de CBR obtido após realização de ensaios em cada uma das amostras, já que esta é a base do método de dimensionamento proposto pelo DNIT atualmente. O solo estudado se trata de um solo argiloso laterítico de acordo com a metodologia MCT. Para estabilização química deste solo, utilizou-se a cal hidratada do tipo CH-1 nos teores de 3%, 5% e 7% e o Cimento Portland IV nos teores de 9%, 11% e 13%. Observaram-se alterações, em relação à amostra de solo natural, na umidade ótima e massa específica seca. Em todos os casos houve aumento nos valores de CBR chegando a melhorias de até 1692% em relação à amostra não estabilizada.

Palavras-chave: estabilização química de solos, CBR, cal, cimento, pavimentação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical	10
Figura 2- Fluxograma de ensaios e dados da classificação MCT.....	11
Figura 3- Gráfico de classificação do método MCT	12
Figura 4 – Trocas catiônicas.....	14
Figura 5 – Esquematização das deformações sofridas pelo material.	18
Figura 6 – Fluxograma com a sequência experimental do trabalho.	19
Figura 7 – Ponto de coleta do solo no Campus Glória.	20
Figura 8 – Extração e coleta da amostra de solo.	20
Figura 9 – Curva granulométrica.....	21
Figura 10 – Limite de liquidez.	22
Figura 11 – Amostras de solo em repouso.	23
Figura 12 – Aparelho utilizado no ensaio de compactação Mini-MCV.....	24
Figura 13 - (a) Cal Hidratada e (b) Cimento CP IV.	25
Figura 14 – Ensaio de compactação: (a) preparação da amostra; (b) compactação na energia normal; (c) extração do corpo de prova; (d) coleta de amostra para determinar umidade.	26
Figura 15 – Corpos de prova imersos no tanque.	28
Figura 16 – Ensaio CBR.....	28
Figura 17 – Classificação MCT do solo.	29
Figura 18 – Curvas de compactação do solo natural e do solo-cal.....	30
Figura 19 – Curvas de compactação do solo natural e do solo-cimento.	30
Figura 20 – Variação do teor de umidade ótima.	31
Figura 21 – Curvas dos ensaios CBR do solo natural e do solo-cal.....	32
Figura 22 – Curvas dos ensaios CBR do solo natural e do solo-cimento.....	33
Figura 23 – Dados do ensaio Mini-MCV e Perda por imersão.	40
Figura 24 – Curva de deformabilidade.	41
Figura 25 – MEAS x Teor de umidade.....	41
Figura 26 – Perda de massa por imersão x Mini - MCV	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação de solos segundo o método MCT.....	11
Tabela 2 – Tipos de cal.....	13
Tabela 3 – Limite de plasticidade.....	22
Tabela 4 – Características do solo para base de solo-cimento em relação às porcentagens passantes nas peneiras.	22
Tabela 7 – Valores de CBR dado em porcentagem.....	33
Tabela 8 – Aplicação do solo quimicamente estabilizado.....	35
Tabela 9 – CBR da amostra de solo natural.	43
Tabela 10 – CBR da amostra de solo com adição de 3% de cal.	43
Tabela 11 - CBR da amostra de solo com adição de 5% de cal.	43
Tabela 12 - CBR da amostra de solo com adição de 7% de cal.	43
Tabela 13 - CBR da amostra de solo com adição de 9% de cimento.	44
Tabela 14 - CBR da amostra de solo com adição de 11% de cimento.	44
Tabela 15 - CBR da amostra de solo com adição de 11% de cimento.	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Solos lateríticos e classificação MCT	9
2.2 Solos estabilizados quimicamente.....	12
2.2.1 Estabilização de solos com cal	12
2.2.2 Reações solo-cal	13
2.2.3 Estabilização de solos com cimento	15
2.2.4 Reações solo-cimento	16
2.3 Propriedades dos solos para projetos de pavimentação	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 Solo	19
3.2 Classificação MCT	23
3.3 Aditivos e dosagens.....	24
3.4 Compactação	26
3.5 CBR.....	27
4 RESULTADOS E ANÁLISES	29
4.1 Classificação MCT	29
4.2 Compactação	29
4.3 CBR.....	32
5 CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
APÊNDICE A – DADOS DA CLASSIFICAÇÃO MCT	40
APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DO ENSAIO CBR.....	43
FOLHA DE ASSINATURAS	45

1 INTRODUÇÃO

Um projeto que envolva a utilização de solos como componente estrutural, por exemplo uma estrutura de pavimento, além de garantir desempenho e durabilidade que atendam às exigências das normas brasileiras, deve também se atentar para a racionalização dos custos de forma que a obra se torne viável do ponto de vista econômico. Uma solução racional é fazer uso dos solos locais de fácil disponibilidade, porém, nem sempre os materiais presentes na natureza atendem às especificações mínimas exigidas. Desta forma é necessário melhorar suas características a fim de viabilizar essa utilização. Ademais, mesmo que o solo seja inicialmente adequado como camada de subleito ou sub-base, a melhoria de suas características pode ampliar as possibilidades de aplicação deste material na estrutura do pavimento.

Os solos lateríticos, cuja formação e ocorrência é favorecida pelo clima predominantemente tropical no Brasil, são muitas vezes o material de subleito ou estão disponíveis nas jazidas de empréstimo das obras de construção rodoviária. Na formação destes solos, os compostos químicos mais leves são transportados pela intensa percolação de água no solo, restando principalmente óxidos de ferro e alumínio, que proporcionam a coloração típica do solo latéritico, avermelhada ou amarelada (SILVA, 2016). Este processo de formação é reconhecidamente favorável para o uso do solo em obras de pavimentação (NOGAMI; VILLIBOR, 1995), sendo que a aplicação de técnicas de melhoramento pode tornar solos laterizados ainda mais atrativos para a construção de bases e sub-bases de estradas em detrimento da utilização de outros materiais granulares produzidos com o mesmo propósito. Isso pode significar um impacto econômico positivo na execução de pavimentos.

A estabilização química do solo é um tipo de melhoria realizada por aditivos químicos, dentre os quais são comumente empregados o cimento e a cal. A adição de cimento Portland por exemplo, confere maior resistência e melhor qualidade plástica ao solo, no caso da cal, formam-se compostos cimentantes por meio de reações pozolânicas entre a cal, água e sílica ou alumina presentes no solo (PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999). Tais técnicas de melhoria do desempenho mecânico dos solos têm se mostrado adequadas para uso em solos lateríticos e não lateríticos (MONTE, 2012; SILVA, 2016). Os efeitos da estabilização do solo podem ser facilmente verificados por ensaios mecânicos.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é verificar o melhoramento das propriedades mecânicas de um solo laterítico coletado na cidade de Uberlândia, estabilizado quimicamente utilizando-se diferentes teores de cal e de cimento. Por meio de um comparativo entre os diferentes teores de cal e cimento de cada amostra, com os respectivos ganhos de resistência verificados em ensaio de Índice de Suporte Califórnia, busca-se a situação mais racionalizada na utilização destes aditivos. De posse dos dados de CBR verifica-se a possibilidade de utilizar o solo em questão em camadas de sub-base e base de pavimentos.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo trata da introdução e objetivos do tema estudado. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica que abrange os tipos de solos que ocorrem em clima tropical, a classificação Miniatura, Compactado, Tropical (MCT) para os solos tropicais, as propriedades do solo para uso na pavimentação e a estabilização química do mesmo. O terceiro capítulo compreende a escolha dos materiais, os procedimentos de caracterização, ensaios de compactação e CBR. No quarto capítulo é realizada a apresentação e discussão dos resultados experimentais e da comparação entre eles. O quinto capítulo compreende as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos lateríticos e classificação MCT

Quando se trata da utilização de solos para estruturas de pavimento, saber identificar e classificar o solo disponível na natureza é crucial para que se elabore um projeto viável. A classificação geotécnica dos solos exerce importante papel nas obras viárias, pois permite o estudo e compreensão da utilização do solo em camadas como bases e sub-bases por exemplo. Através da classificação é possível avaliar de forma preliminar a qualidade do solo; ordenar os tipos de solo quanto à suas propriedades e prováveis finalidades; estabelecer relação de cada classe de solo com o seu desempenho em campo.

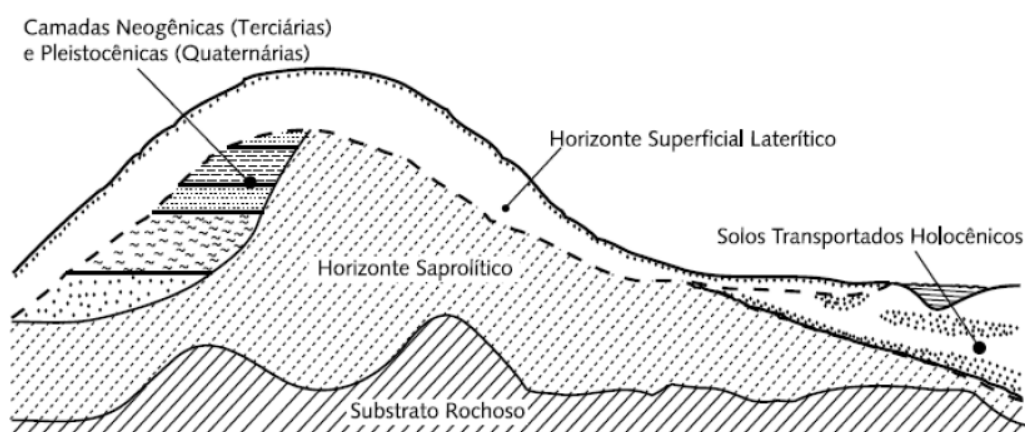
Atualmente existem diversos métodos internacionais normatizados pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para a classificação dos solos, sendo os mais utilizados o sistema da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), *Highway Research Board* (HRB) e o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). Estes sistemas baseiam-se nos limites de consistência e na granulometria, e são classificações eficientes para solos de clima frio e temperado. No entanto não apresentam resultados satisfatórios e condizentes com o desempenho real de solos tipicamente tropicais. Apesar de serem considerados inapropriados para serem utilizados como base de pavimentos pelos sistemas tradicionais, foi constatado um bom desempenho dos solos finos lateríticos e solo agregado com alta porcentagem de finos nesta aplicação (Nogami e Villibor, 1995). Desta forma surgiu a necessidade de se desenvolver uma classificação específica que atendesse satisfatoriamente às características dos solos tropicais.

Dentre os solos que ocorrem em regiões tropicais úmidas, distinguem-se dois grandes grupos: os solos lateríticos e os solos saprolíticos. De acordo com Nogami e Villibor (1983) os solos lateríticos são característicos de áreas bem drenadas, ocupam a parte mais superficial do perfil de subsolo, e sofreram extensivo processo de intemperismo. Os solos lateríticos possuem cores predominantes dos matizes vermelho e amarelo, apresentando macroestrutura homogênea e isotrópica na maioria dos casos. A constituição mineralógica é caracterizada principalmente pela presença de poucos minerais resistentes à ação do intemperismo tropical; a fração areia é caracterizada pela presença de magnetita, ilmetita, zircão e outros minerais resistentes química e mecanicamente. A

fração argilosa é composta de argilo-minerais da família da caulinita e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio.

Ainda segundo Nogami e Villibor (1983) os solos saprolíticos são solos originados da decomposição de uma rocha consolidada mantendo de maneira nítida a estrutura da rocha original. Encontram-se, em suas condições naturais, subjacentes à camada de solo laterítico, ou eventualmente de outro tipo genético de solo superficial (Figura 1). Nos solos saprolíticos é bastante comum a presença de manchas herdadas da rocha originária ou desenvolvidas pela ação do intemperismo. Sua constituição mineralógica é bastante variada, podendo ser muito simples ou extremamente complexos dependendo do grau de intemperismo e do tipo de rocha matriz, contendo minerais ainda em fase de decomposição. Também são chamados de solos residuais jovens.

Figura 1 - Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical



Fonte: Villibor et al (2009).

Partindo do princípio que os sistemas tradicionais normatizados pela ASTM não apresentaram resultados satisfatórios e compatíveis com o desempenho real de solos de climas tropicais, Nogami e Villibor desenvolveram o método Miniatura, Compactado, Tropical (MCT), específico para os solos compactados tropicais. Na caracterização do solo, este método baseia-se nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos, desconsiderados nos sistemas tradicionais, de corpos de prova de tamanho reduzido ensaiados em laboratório. Essa metodologia separa os solos tropicais nos grupos mostrados na Tabela 1.

O método MCT é composto por uma série de ensaios feitos em laboratório com corpos de prova compactados de tamanho reduzido. Estes ensaios visam determinar e avaliar

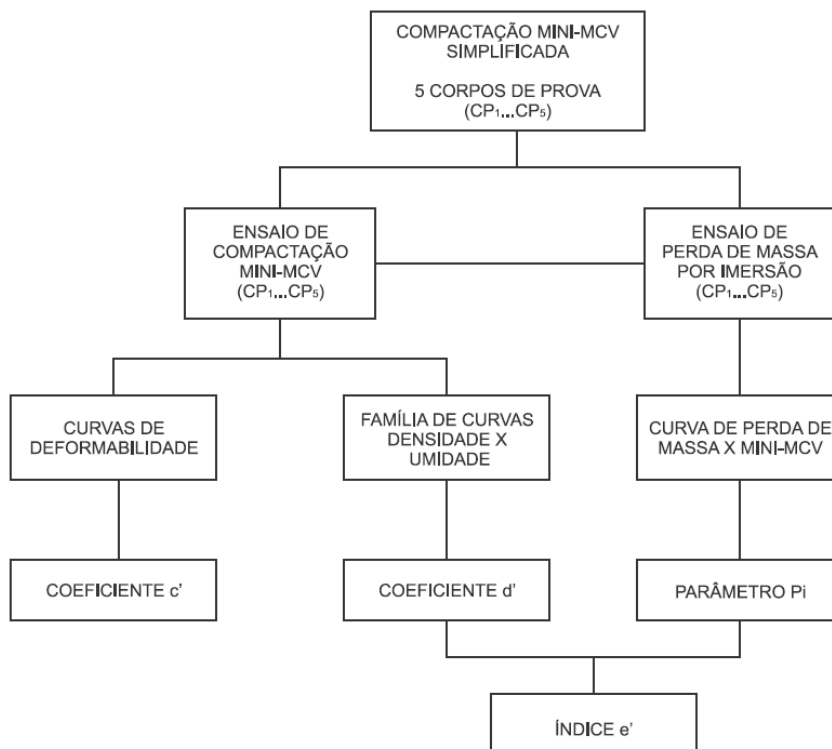
parâmetros e propriedades dos solos tropicais e é aplicada a amostras de solos finos, ou seja, que apresentem no mínimo 95% do material passando pela peneira de abertura 2,00 mm. A obtenção da classificação de um solo pelo método MCT fundamenta-se nos parâmetros obtidos pelas curvas geradas no ensaio Mini-MCV e na Perda de Massa por Imersão. A Figura 2 ilustra o fluxograma dos ensaios realizados no método MCT.

Tabela 1- Classificação de solos segundo o método MCT

Solos lateríticos	Solos não-lateríticos (saprolíticos)
LA : areia laterítica quartzosa	NA : areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico
LA' : solo arenoso laterítico	NA' : misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solos arenosos)
LG' : solo argiloso laterítico	NS' : solo siltoso não laterítico
	NG' : solo argiloso não laterítico

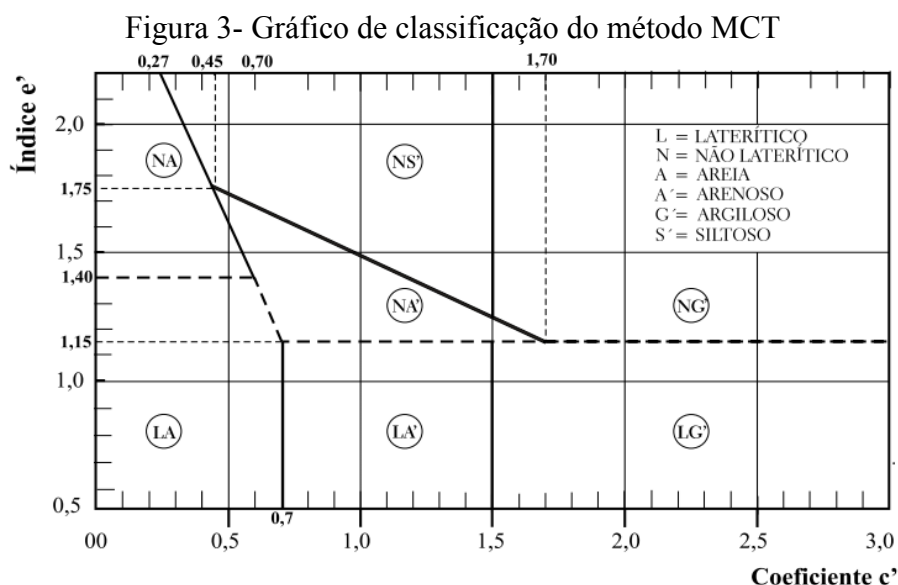
Fonte: Nogami e Villibor (1983).

Figura 2- Fluxograma de ensaios e dados da classificação MCT



Fonte: Villibor e Alves (2015).

Do ensaio Mini-MCV são geradas as curvas de compactação, onde obtém-se o coeficiente c' , e a curva de deformabilidade, onde obtém-se o coeficiente d' . Do ensaio de Perda de Massa por Imersão obtém-se o parâmetro P_i . Com o coeficiente d' e parâmetro P_i é calculado o índice e' . A Figura 3 mostra o gráfico de classificação MCT de acordo com os coeficientes e índice obtidos.



Fonte: Villibor e Alves (2015).

2.2 Solos estabilizados quimicamente

2.2.1 Estabilização de solos com cal

A cal é produto resultante da calcinação de rochas constituídas por carbonatos de cálcio e/ou carbonatos de cálcio e magnésio. Segundo Guimarães (2002), estas rochas passam por processo de decomposição térmica, também chamada de calcinação, pela qual a cal é obtida. As reações de calcinação e hidratação da cal estão mostradas nas equações 1 e 2 respectivamente.



O óxido de cálcio produzido pela calcinação das rochas carbonatadas de cálcio é denominado de cal virgem (C_aO). Quando hidratada a cal virgem dá origem a cal

hidratada $Ca(OH)_2$, liberando calor. Rochas que possuem carbonatos de cálcio e magnésio também são calcinados produzindo a cal dolomítica ($CaO.MgO$). A Tabela 2 apresenta os tipos de cales obtidos.

Tabela 2 – Tipos de cal

Composição	Nomeclatura
CaO	Cal cálcica virgem
CaO.MgO	Cal dolomítica virgem
Ca(OH) ₂	Cal cálcica hidratada
Ca(OH) ₂ .MgO	Cal dolomítica mono-hidratada
Ca(OH) ₂ .MgO(OH) ₂	Cal dolomítica bi-hidratada

Fonte: Autor (2018).

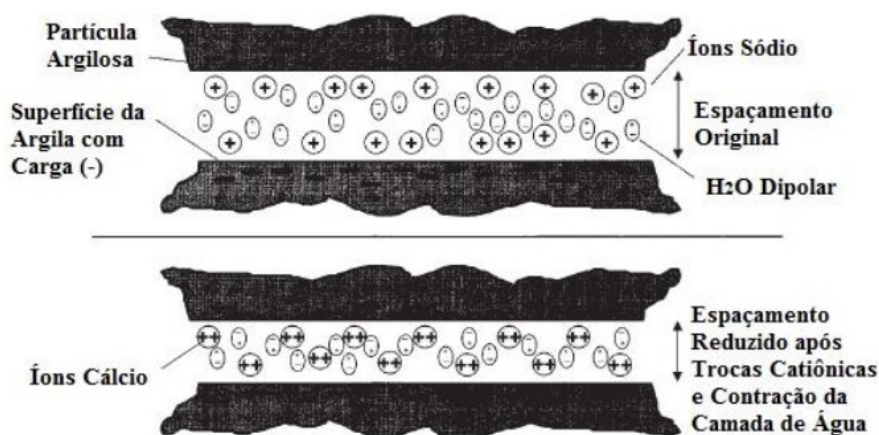
A técnica de melhorar as propriedades do solo utilizando cal é amplamente difundida, sendo feita pesquisas e aplicações em todo o mundo. No Brasil, trechos experimentais foram construídos e estudados, demonstrando a viabilidade desta técnica, como o segmento que liga o município de Limoeiro do Norte ao distrito de Flores, estado do Ceará, estudados por Loiola e Nobre (2001). Os autores afirmam que em uma análise realizada um ano após a construção, a via apresentou um comportamento excelente, motivando assim o Departamento de Edificações Rodoviárias e Transporte do Estado do Ceará a utilizar novamente esta técnica em um trecho de 40 km da rodovia CE-377. A camada de base dessa rodovia foi feita utilizando um teor de 5% de cal em relação ao peso do solo para a estabilização (LOIOLA e BARROSO, 2007).

2.2.2 Reações solo-cal

Ao adicionar e misturar a cal no solo, inicia-se uma série de reações químicas que resultam em alterações imediatas, como no caso das reações de trocas catiônicas e floculação-aglomeração. Outras reações como as pozolânicas são processadas mais lentamente e garantem melhora na resistência e durabilidade da mistura. Portanto à estabilização de solo com cal atribui-se uma parcela de ganho de resistência de imediato e outra a longo prazo. Vale ressaltar que a estabilização de solos com cal não apresenta boa eficiência em solos com muita matéria orgânica nem em solos com baixos teores de argila.

As trocas catiônicas acontecem, segundo Prusinski e Bhattacharja (1999) pela superfície da argila ser deficiente em carga, de forma que cátions são atraídos para neutralizar essa deficiência. Com a adição suficiente de cal no solo, cria-se uma concentração de cátions C_a^{2+} livres que irão substituir cátions metálicos de menor valência adsorvidos na superfície coloidal, obedecendo a série $M_g^{2+} > C_a^{2+} > K^+ > N_a^+$ (GRIM, 1953 apud THOMÉ, 1994). Este mecanismo faz com que a camada difusa de água seja reduzida e as partículas de argila fiquem mais próximas. A Figura 4 esquematiza o fenômeno das trocas catiônicas.

Figura 4 – Trocas catiônicas



Fonte: Prusinski e Bhattacharja (1999).

A floculação e aglomeração causam mudanças imediatas visíveis no solo devido a aglutinação de partículas finas do solo que originam agregados de maiores tamanhos (TRB, 1987). De acordo com Herzog e Mitchell (1963) apud Prusinski e Bhattacharja (1999), a floculação ocorre devido à elevação da concentração eletrolítica da água intersticial e à redução do espaçamento da camada desta.

O ganho de resistência mecânica ao longo do tempo é atribuído às reações pozolânicas, que podem ser descritas como reações entre a água, cal, sílica e/ou alumina presentes no solo natural. A adição de cal ao solo natural eleva o seu pH pela liberação de íons hidroxila, causando uma alcalinização do solo. Este aumento de pH faz com que a sílica e a alumina presentes no solo se tornem solúveis e portanto fiquem disponíveis para reagir com os cátions C_a^{2+} livres (TRB, 1987; GUIMARÃES, 1997). As reações pozolânicas podem ser resumidamente representadas pelas equações:





Os produtos das reações pozolânicas, CSH e CAH, são formas simplificadas para silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado. Estes compostos consolidam-se e obstruem vazios, cimentando as partículas adjacentes de argila. Contanto que o pH se mantenha alcalino e cátions C_a^{2+} estejam disponíveis, as reações pozolânicas continuarão a acontecer de forma contínua.

Os principais fatores que influenciam o processo de estabilização de solo com a cal são: teor de matéria orgânica do solo, disponibilidade de sílica e alumina para as reações pozolânicas, pH do solo, excesso de sódio para as trocas catiônicas, drenagem natural e temperatura.

2.2.3 Estabilização de solos com cimento

Segundo dados da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) o Brasil possui mais de 25.000 km de estradas constituída por bases e/ou sub-bases de solo-cimento, sendo a rodovia que liga Caxambu-Areia em Minas Gerais, datada de 1942, a primeira rodovia federal a se utilizar esta técnica.

Na estabilização do solo com cimento é comum fazer a distinção entre duas categorias: o solo-cimento e o solo melhorado com cimento. O solo-cimento é caracterizado pela utilização de teores mais elevados de cimento, suficientes para melhorar a durabilidade e aumentar a resistência do solo. No solo melhorado com cimento utiliza-se baixas dosagens de cimento com objetivo principal de melhorar sua plasticidade e sensibilidade a água, sem cimentação acentuada. Segundo o DNIT (2006), os teores usuais de cimentos adotados para o solo-cimento ficam entre 6% e 10%, já para o solo melhorado com cimento os teores variam de 2% a 4%.

Diferentemente do concreto onde há gel de cimento suficiente para envolver toda a superfície do agregado, no solo-cimento a pasta, ou gel, de cimento é insuficiente, formando assim núcleos cimentantes interligados e espalhados pelo solo. De acordo com Pitta (1995), nos solos finos há o surgimento de matrizes hexagonais geradas pela ligação química entre as partículas de solo e o cimento. Esta matriz envolve as partículas aglomeradas e ligam-se com outras matrizes adjacentes promovendo o travamento de

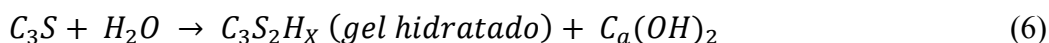
uma sobre a outra. Lopes (2002) afirma que a estabilização de solos finos consome mais cimento em comparação com solos granulares por terem uma maior superfície específica.

2.2.4 Reações solo-cimento

Para entender os mecanismos de reações que acontecem na estabilização química por adição de cimento ao solo, primeiro faz-se necessário entender sua constituição. De acordo com Mehta e Monteiro (1994) os principais componentes do cimento em hidratação são:

- Silicato tricálcico ($3C_aO.S_iO_2 = C_3S$) é o principal responsável pelo ganho de resistência da mistura nas idades iniciais, especialmente no primeiro mês, despreendendo grande quantidade de calor;
- Silicato bicálcico ($2C_aO.S_iO_2 = C_2S$) tem papel mais importante em idades mais avançadas, cerca de um ano ou mais, com baixa liberação de calor;
- Aluminato tricálcico ($3C_aO.Al_2O_3 = C_3A$) contribui de forma modesta para o ganho de resistência, especialmente no primeiro dia, responsável por grande liberação de calor;
- Ferroaluminato tetracálcico ($4C_aO.Al_2O_3.Fe_2O_3 = C_4AFe$) possui desenvolvimento lento e pouquíssimos ganhos de resistência.

De acordo com Moh (1965), as reações de hidratação que envolvem o silicato tricálcico podem ser representadas pelas seguintes equações:



As reações de hidratação do cimento podem ser chamadas de primárias e são as principais responsáveis pelo ganho de resistência da mistura. As reações pozolânicas subsequentes são ditas reações secundárias, elas ocorrem devido a liberação de cal no solo como produto da hidratação do silicato tricálcico e são semelhantes às reações provenientes da estabilização com cal. O silicato de cálcio hidratado ($C_3S_2H_X$) é o maior responsável pelo ganho de resistência da mistura solo-cimento.

2.3 Propriedades dos solos para projetos de pavimentação

Conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) estabelece, os materiais que compõem as camadas de pavimento subjacentes ao revestimento superficial, devem apresentar as seguintes características:

- Materiais para camada de subleito:
 $\text{CBR} \geq 2\%$;
 $\text{Expansão} \leq 2\%$.
- Materiais para camada de sub-base:
 $\text{CBR} \geq 20\%$;
 $\text{Expansão} \leq 1\%$.
- Materiais para camada de base:
 $\text{CBR} \geq 80\%$ para $N \geq 5 \times 10^6$;
 $\text{CBR} \geq 60\%$ para $N \leq 5 \times 10^6$;
 $\text{Expansão} \leq 0,5\%$;
 $\text{Limite de Liquidez} \leq 25\%$;
 $\text{Índice de plasticidade} \leq 6\%$.

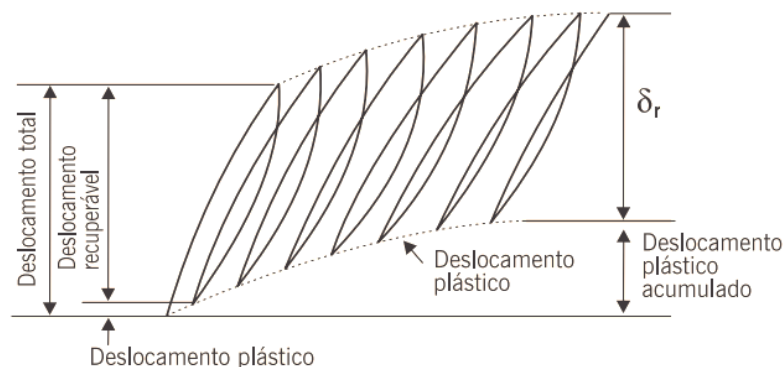
Segundo relata Bernucci et al (2008), o Índice de Suporte Califórnia (ISC), em português, ou *California Bearing Ratio* (CBR) em inglês, é um ensaio que foi desenvolvido na Califórnia na década de 1920 para avaliar a resistência à ruptura de bases, sub-bases e subleito. O índice é expresso em porcentagem e consiste na relação entre a pressão necessária para penetrar um pistão em um corpo de prova e a pressão necessária para se penetrar o mesmo pistão no material de referência. Este ensaio é normatizado no Brasil pela norma do DNER-ME 049/94 e é bastante popular em todo o território nacional pela facilidade de execução e baixo custo dos equipamentos.

Ainda segundo os referidos autores, no entanto, o ensaio de CBR não corresponde ao real efeito da ação de cargas repetidas sobre a estrutura de um pavimento. Onde geralmente são aplicadas cargas dinâmicas, com frequência e intensidade variadas. De acordo com Seed et al (1955) apud Bernucci et al (2008), solos com o mesmo CBR podem se comportar de maneiras diferentes pela ação das cargas repetidas, portanto, a relação entre o CBR e o desempenho real do pavimento são apenas aproximadas. Em adição a

estes fatos, o ensaio de CBR foi concebido para ser usado em regiões de clima temperado, que diferem das regiões de clima tropical principalmente quanto à temperatura e pluviosidade.

Nos Estados Unidos o ensaio de CBR foi progressivamente caindo em desuso e substituído pelo Módulo de Resiliência (MR), sendo este utilizado em definitivo para dimensionamento de pavimentos asfálticos a partir de 1986. Na década de 70 o conceito de resiliência no estudo dos materiais empregados no pavimento foi introduzido no Brasil para efetuar uma abordagem mais realista (DNIT, 2006). Quando o pavimento está sujeito às cargas dinâmicas das rodas dos veículos chama-se de deflexão os deslocamentos verticais que ocorrem; após a solicitação ser cessada, uma parte deste deslocamento é permanente, deformação plástica, e uma parte é recuperável, dita resiliente (BERNUCCI et al., 2008). Obtém-se o MR com a aplicação de cargas cíclicas em equipamento triaxial onde registram-se os deslocamentos com transdutores mecânicos eletromagnéticos (MEDINA, 1997). A Figura 5 ilustra os deslocamentos registrados no ensaio de carga repetida.

Figura 5 – Esquematização das deformações sofridas pelo material.



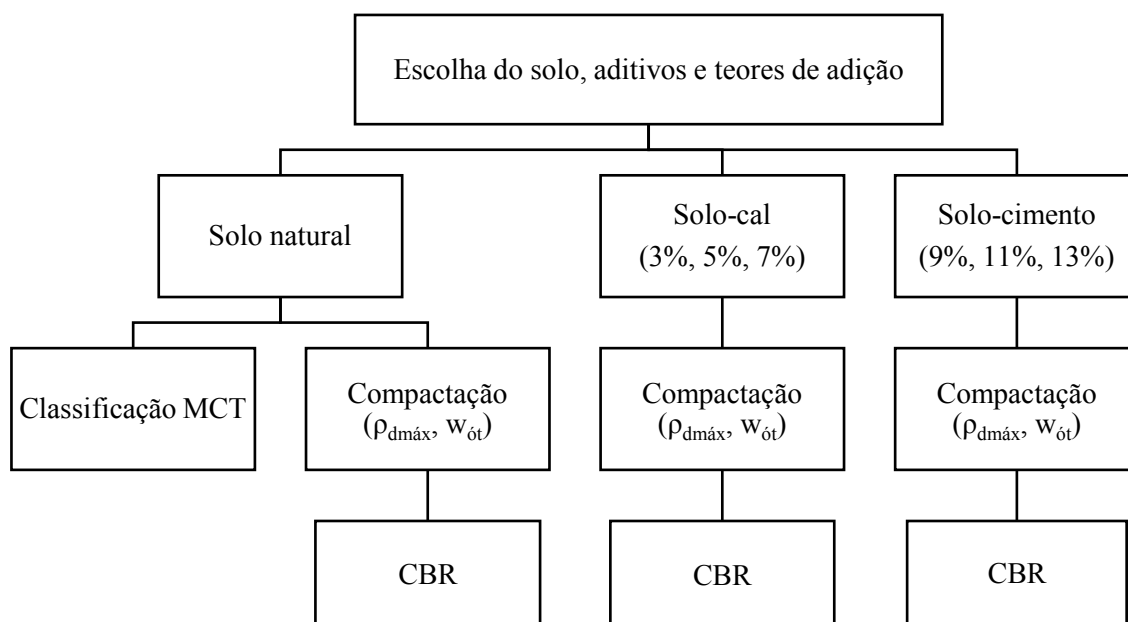
Fonte: Bernucci et al. (2008).

O MR permite estimar o comportamento tensão-deformação dos materiais das camadas do pavimento, portanto os efeitos de trincas por fadiga podem ser previstos, garantindo uma maior vida útil para o pavimento. Embora o MR seja o parâmetro recomendado pelo AASHTO na avaliação das estruturas de camada dos pavimentos flexíveis, no Brasil o ensaio de CBR ainda é o mais utilizado devido à facilidade e e baixo custo dos equipamentos (BERNUCCI et al., 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para verificar experimentalmente os efeitos da estabilização química no solo, foi necessário selecionar e classificar o solo, selecionar os aditivos a serem utilizados e seus respectivos teores. Então foi realizado um ensaio de compactação para o solo natural (sem aditivo) e uma série de ensaios de compactação para cada tipo de aditivo, visando obter valores de massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima ($w_{\acute{o}t}$). Os dados dos ensaios de compactação foram usados como referência na preparação de amostras para ensaios de CBR. Esta sequência de atividades experimentais são apresentadas em forma de fluxograma na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma com a sequência experimental do trabalho.



Fonte: Autor (2018).

3.1 Solo

As amostras de solo argiloso ensaiadas foram do tipo deformada e coletadas no Campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia. O local da coleta está mostrado na Figura 7.

Para a extração da amostra de solo fez-se o uso de um trator com trado mecânico acoplado, que foi disponibilizado pela própria Universidade. Dado o início da perfuração, a camada mais superficial do solo foi descartada e coletou-se apenas o solo com

aproximadamente 1,50 m de profundidade (Figura 8). O solo estava moderadamente compactado e não apresentou grande resistência ao trado mecânico. No laboratório a umidade média calculada foi de 31,25%. No total foram coletados aproximadamente 160 kg de solo.

Figura 7 – Ponto de coleta do solo no Campus Glória.



Fonte: Google Earth (2018).

Figura 8 – Extração e coleta da amostra de solo.

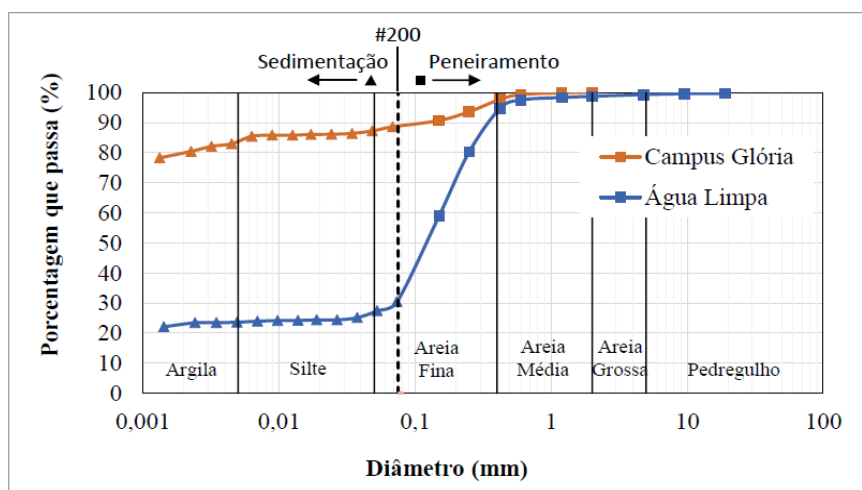


Fonte: Autor (2018).

O material foi então transportado para o laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Uberlândia e separado em bandejas, onde foi deixado na sombra para ser parcialmente seco ao ar.

Os dados apresentados a seguir compreendem os ensaios de caracterização do solo, como o ensaio de granulometria (Figura 9), limite de liquidez (Figura 10), limite de plasticidade (Tabela 3) realizados por Almeida (2017) em seu estudo sobre o solo argiloso coletado no Campus Glória. Vale notar que o solo coletado no presente estudo foi do mesmo ponto de coleta realizado por Almeida, que também caracterizou um solo arenoso da Fazenda Água Limpa, porém apenas os dados do solo do Campus Glória serão considerados aqui.

Figura 9 – Curva granulométrica.

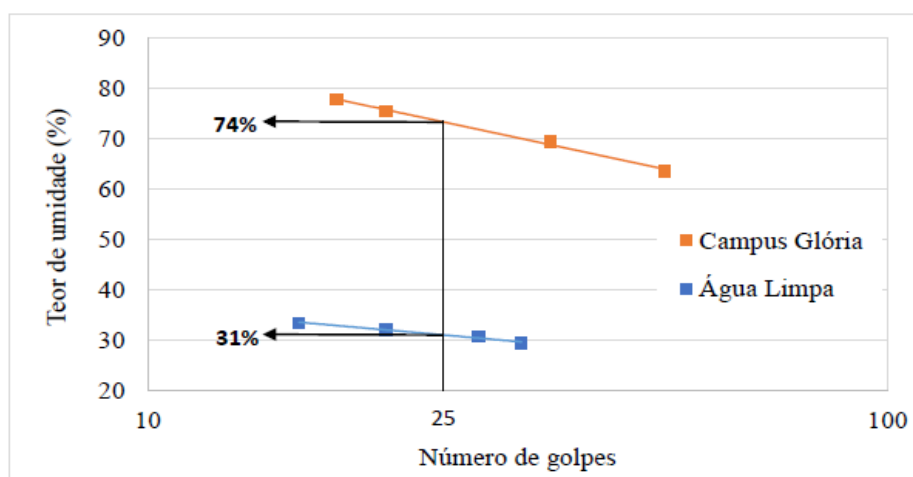


Fonte: ALMEIDA (2017).

Da curva granulométrica tem-se que o solo possui 83% de argila, 4% de silte, 9% de areia fina e 4% de areia média, se tratando portanto, de uma argila arenosa. O índice de plasticidade (IP) do solo é 32%, resultando em um índice de atividade (IP/porcentagem de argila) de 0,39. Solos com índice de atividade menor que 0,75 são considerados inativos, o que está de acordo com o comportamento esperado para um solo laterítico.

Para uso de solos em bases de solo-cimento, a norma DNIT 143/2010-ES, recomenda as porcentagens de granulometria e os limites de consistência mostrados na Tabela 4. Nota-se que a argila arenosa não se enquadra em tais recomendações, no entanto, as análises que são realizadas neste trabalho podem ser usadas para sua verificação. Já no que se refere ao solo-cal, o DER-SP (2006) sugere o uso de solo argiloso, que é o caso do solo em estudo.

Figura 10 – Limite de liquidez.



Fonte: ALMEIDA (2017).

Tabela 3 – Limite de plasticidade.

Limite de plasticidade						
Cápsula (nº)	173	194	206	118	276	197
Amostra + Tara + Água (g)	15,48	15,44	15,61	16,91	16,3	16,52
Amostra + Tara (g)	15,2	15,18	15,37	16,64	16,05	16,22
Água (g)	0,28	0,26	0,24	0,27	0,25	0,3
Tara (g)	14,5	14,56	14,78	16	15,47	15,55
Amostra seca (g)	0,7	0,62	0,59	0,64	0,58	0,67
Umidade (%)	40,0	41,9	40,7	42,2	43,1	44,8
Umidade média (%)	41		41		44	
Limite de plasticidade (%)	42					

Fonte: ALMEIDA (2017).

Tabela 4 – Características do solo para base de solo-cimento em relação às porcentagens passantes nas peneiras.

Peneiras	Porcentagem	Tolerância
2½"	100 %	-
Nº 4	50 a 100 %	± 5%
Nº 40	15 a 100 %	± 2%
Nº 200	5 a 35 %	± 2%
Limite de liquidez	máximo 40%	
Índice de plasticidade	máximo 18%	

Fonte: DNIT 143/2010-ES.

3.2 Classificação MCT

Para realizar a classificação do solo com base na metodologia MCT foi necessário realizar primeiramente o ensaio de compactação Mini-MCV. Este ensaio é normatizado pelo DNER-ME 258/94 e consiste em indicar o abatimento (Δh) dos corpos de prova de 50 mm de diâmetro, preparados em diferentes umidades, relacionado com um número n de golpes. A partir dos dados obtidos nos ensaios realizado em laboratório, traçou-se um gráfico com as curvas de compactação tornando possível o cálculo dos índices físicos propostos por esta metodologia.

A amostra de solo foi previamente destorroada de forma que todo o solo passasse pela peneira de 2 mm de abertura e então foram separadas em porções de 500 g de solo onde foi adicionada quantidades fixas de água variando em torno de 3% para cada amostra. Para o ensaio, as amostras umedecidas foram acondicionadas em sacos de polietileno (Figura 11) e deixados em repouso por 24 horas. Posteriormente foram compactados cinco corpos de prova com 200 g do solo umedecido nas diferentes umidades. Utilizou-se o soquete pequeno de 2,270 kg e o extensômetro fixo no topo do aparelho registrou o abatimento para cada sequência de golpes. A Figura 12 mostra a aparelhagem utilizada no ensaio de compactação Mini MCV.

Figura 11 – Amostras de solo em repouso.



Fonte: Autor (2018).

Figura 12 – Aparelho utilizado no ensaio de compactação Mini-MCV.



Fonte: Autor (2018)

Para completar a classificação do solo determinou-se o coeficiente P_i , que indica a porcentagem de massa desprendida de solo em relação a massa total compactada quando submetida a imersão em água. Após terminada a compactação, os corpos de prova foram extraídos parcialmente com a ajuda do extrator de forma a ficar apenas 10 mm de solo para fora do cilindro. Em seguida foram imersos na água, em posição horizontal, com coletores em baixo para recolher a parte desprendida. Passadas 24 horas os coletores foram retirados e encaminhados para a estufa para poder determinar a massa da parte desagregada. Obtém-se o coeficiente P_i pela expressão da massa seca desprendida em relação à massa seca extrudada.

3.3 Aditivos e dosagens

O Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia Civil disponibilizou os aditivos para este trabalho. A cal fornecida (Figura 13) continha todas as informações necessárias conforme a NBR-7175 e era do tipo CH-I. Esta cal hidratada em comparação com a CH-II e CH-III é a que possui maior grau de pureza e, portanto, de melhor qualidade.

Figura 13 - (a) Cal Hidratada e (b) Cimento CP IV.



(a)

(b)

Fonte: Autor (2018)

O teor de cal a ser adicionada no solo é fixado experimentalmente, de modo que a mistura resultante atenda aos parâmetros mínimos exigidos pelo projeto. Como prescreve o DER/PR ES-P 15/05 e a especificação técnica de sub-base ou base de solo-cal do DER/SP, o teor mínimo de cal é de 3% para possibilitar uma homogeneização e incorporação adequada da cal ao solo. Partindo disso, optou-se por variar em 2% o teor de cal em relação ao teor inicial de 3%. Sendo assim os teores de cal ensaiados foram: 3%, 5% e 7%.

O cimento disponível no laboratório e utilizado nos ensaios de solo-cimento foi o CP IV (Figura 13), também chamado de Cimento Portland pozolânico. Este cimento possui baixo calor de hidratação e apresenta aumento de resistência à compressão em idades avançadas. Embora o manual do DNIT de 2006 preveja que o teor de cimento no solo-cimento varie entre 6% a 10%, optou-se pelos teores de 9%, 11% e 13% com base no tipo de solo coletado para os ensaios. Por se tratar de uma argila laterítica, portanto um material fino, a superfície específica a ser revestida pelo cimento é maior, desta forma optou-se por teores mais elevados de cimento.

3.4 Compactação

A fim de se obter a umidade ótima e a massa específica máxima para cada amostra de solo, natural e estabilizado quimicamente, foi realizado o ensaio de compactação conforme normatizado pela ABNT NBR 7182:2016, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Ensaio de compactação: (a) preparação da amostra; (b) compactação na energia normal; (c) extração do corpo de prova; (d) coleta de amostra para determinar umidade.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autor (2018)

As amostras foram compactadas utilizando o cilindro pequeno (1000 cm³), sendo divididas em 3 camadas com 26 golpes em cada camada, com o cilindro de 2,5 kg caindo a uma altura de cerca de 30 cm. Esta configuração é a de energia normal. A principal vantagem de se utilizar o cilindro pequeno foi a economia de material necessário nos ensaios e a possibilidade de fazer a compactação sem o reuso de material.

Para cada ponto da curva de compactação foi preparada uma amostra de solo já seco e destorroado, passante na peneira de abertura 4,8 mm. Para cada ponto cerca de 3kg de solo foram homogeneizados com o aditivo e em seguida umedecidos e homogeneizados novamente. Os demais pontos da curva foram umedecidos adicionando-se cerca de 3% a mais de água para cada um.

3.5 CBR

O ensaio de CBR foi feito para as amostras de solo natural, solo-cal e solo-cimento na umidade ótima obtida dos ensaios preliminares de compactação. Os procedimentos seguiram a ABNT NBR 9895:2016. Os corpos de prova foram moldados utilizando o cilindro grande na energia normal. Após feita a compactação, os corpos de prova foram submetidos a uma sobrecarga de 4540 g que consiste em discos anelares de aço para simular o peso das camadas superiores do pavimento. Em seguida os corpos de prova foram imersos no tanque de água junto de um extensômetro ligado à haste de expansão do prato perfurado (Figura 15). Foram feitas medidas a cada 24 horas e o resultado da expansão é dado em porcentagem dividindo-se a leitura final do extensômetro pela altura inicial do corpo de prova.

Passada as 72 horas de expansão, os corpos de prova foram retirados do tanque e deixados por 15 minutos a fim escoar a água para então serem levados para a prensa do CBR. A prensa utilizada neste ensaio consiste em um prato de apoio para o molde, que é elevado por uma prensa hidráulica, e um pistão de penetração fixo a um anel dinamométrico de aço. A aparelhagem é mostrada na Figura 16.

O prato de suporte foi elevado a uma velocidade constante de 1,27 mm/min de forma a pressionar o corpo de prova contra o pistão. Devido à resistência do solo a penetração, o anel dinamométrico foi deformado e o deslocamento radial foi registrado pelo extensômetro acoplado a ele. Outro extensômetro foi apoiado no cilindro do corpo de prova e este mediu a penetração do pistão. Com os dados anotados foi possível calcular a carga exercida durante a penetração multiplicando-se o valor da leitura do extensômetro

do anel pela constante do anel (12,9293 N/div); sendo cada divisão igual a 10^{-3} mm. Por fim calculou-se a pressão pela divisão da carga (N) pela área do pistão de penetração (cm^2). O memorial de cálculo do ensaio encontra-se no Apêndice B.

Figura 15 – Corpos de prova imersos no tanque.



Fonte: Autor (2018).

Figura 16 – Ensaio CBR.



Fonte: Autor (2018).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Classificação MCT

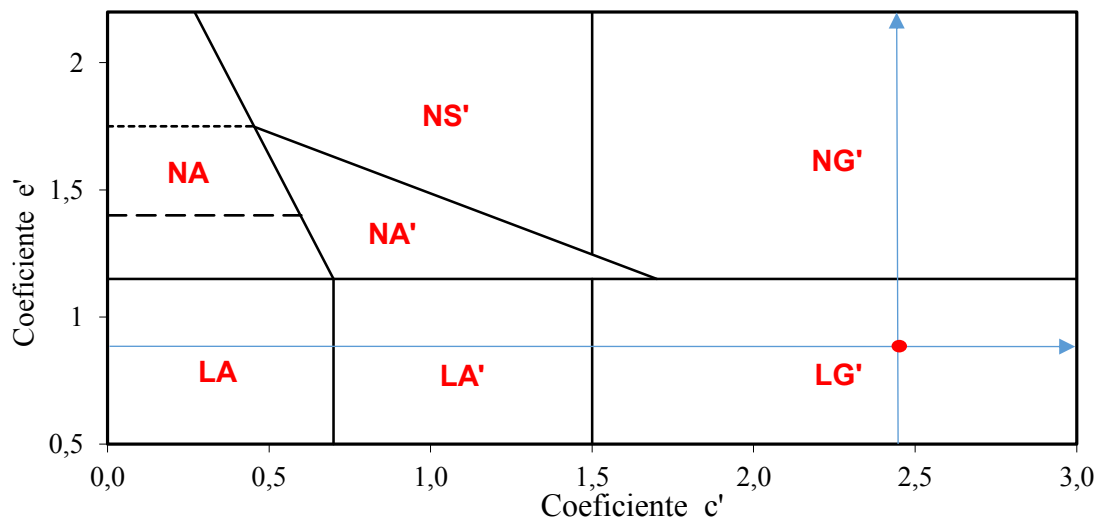
Dos resultados dos ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão, que são apresentados no Apêndice A, foram calculados os coeficientes apresentados na Tabela 5. A partir dos valores de c' e e' , o solo foi classificado como argiloso laterítico (LG'), de acordo com a Figura 17. Tem-se então que o solo se trata de uma argila de comportamento laterítico.

Tabela 5 – Valores dos coeficientes da classificação MCT.

$c' =$	2,47
$d' =$	63,50
$Pi (\%) =$	42,7
$e' =$	0,905

Fonte: Autor (2018).

Figura 17 – Classificação MCT do solo.



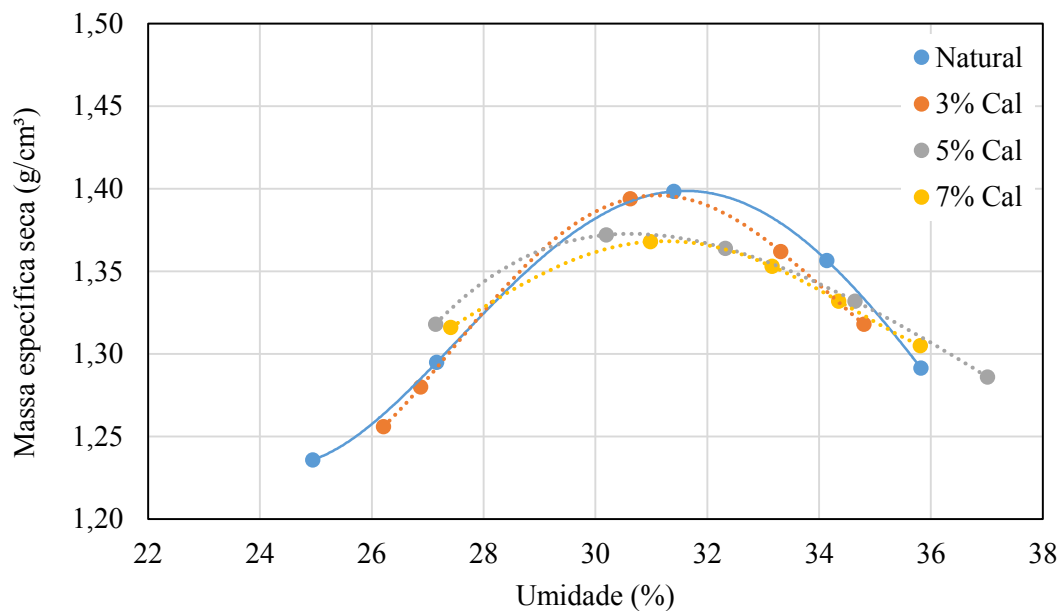
Fonte: Autor (2018).

4.2 Compactação

A adição de porcentagens de cimento e de cal no solo LG' resultou em alterações nas propriedades físicas, massa específica seca máxima e umidade ótima, confirmando tendências de estudos anteriores (SILVA, M. F, 2016; THOMÉ, 1994).

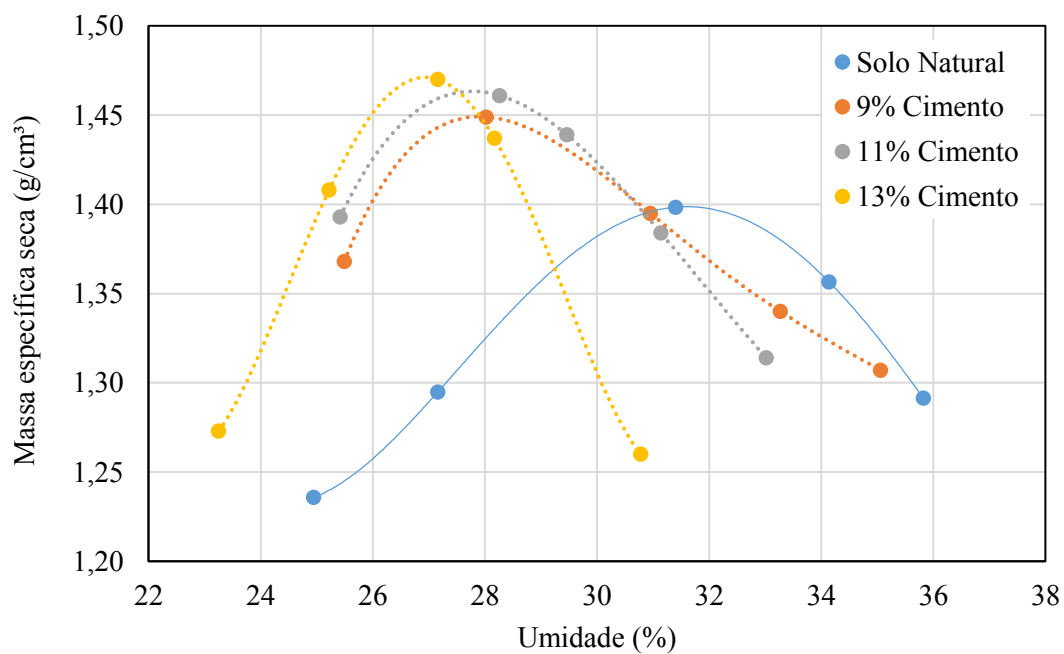
Nas Figuras 18 e 19 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compactação do solo natural na energia normal em comparação com o solo estabilizado com cal e cimento, respectivamente.

Figura 18 – Curvas de compactação do solo natural e do solo-cal.



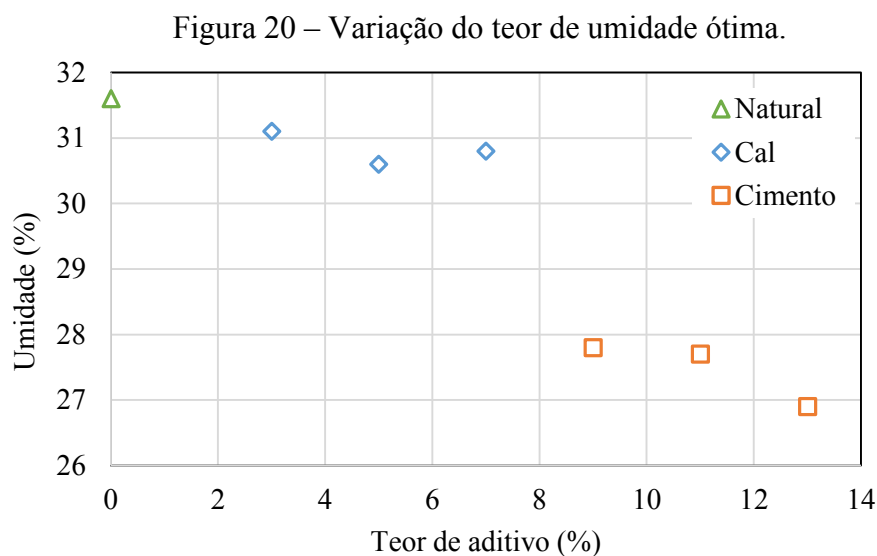
Fonte: Autor (2018)

Figura 19 – Curvas de compactação do solo natural e do solo-cimento.



Fonte: Autor (2018)

Considerando os valores da curva de compactação do solo natural como referência, notou-se que no solo estabilizado com cal houve uma diminuição da massa específica seca, bem como uma leve diminuição do teor de umidade ótima do solo. Já no solo-cimento houve um aumento da massa específica seca e a redução do teor de umidade foi mais proeminente que no solo-cal. Estas informações estão ilustradas na Figura 20.



Fonte: Autor (2018).

Em comparação com a literatura, Núñez (1991) apud Specht (2000) notou uma falta de padrão nas curvas de compactação do solo-cimento na energia Proctor Normal, contudo nos estudos de Kézdi (1979) apud Specht (2000), foi observado que a umidade ótima e o peso específico do solo são afetados de acordo com o tipo de solo: o peso específico aumenta em solos arenosos, não se altera nas argilas de baixa e média plasticidade e aumenta nos casos de argilas plásticas. O solo em estudo se enquadra nesta última categoria.

Na estabilização de solos argilosos utilizando cal, conforme estudo americano publicado pelo *Transportation Research Board* (TRB) em 1987, a densidade máxima tende a ser reduzida em relação ao solo não tratado, sendo continuamente reduzida com o aumento dos teores de cal, o que de fato ocorreu no presente estudo. No entanto, ainda segundo o TRB (1987), era de se esperar um sutil aumento da umidade ótima da mistura, porém notou-se que no solo ensaiado o que ocorreu foi uma leve queda no valor da umidade ótima, entre 0,5% a 1%.

4.3 CBR

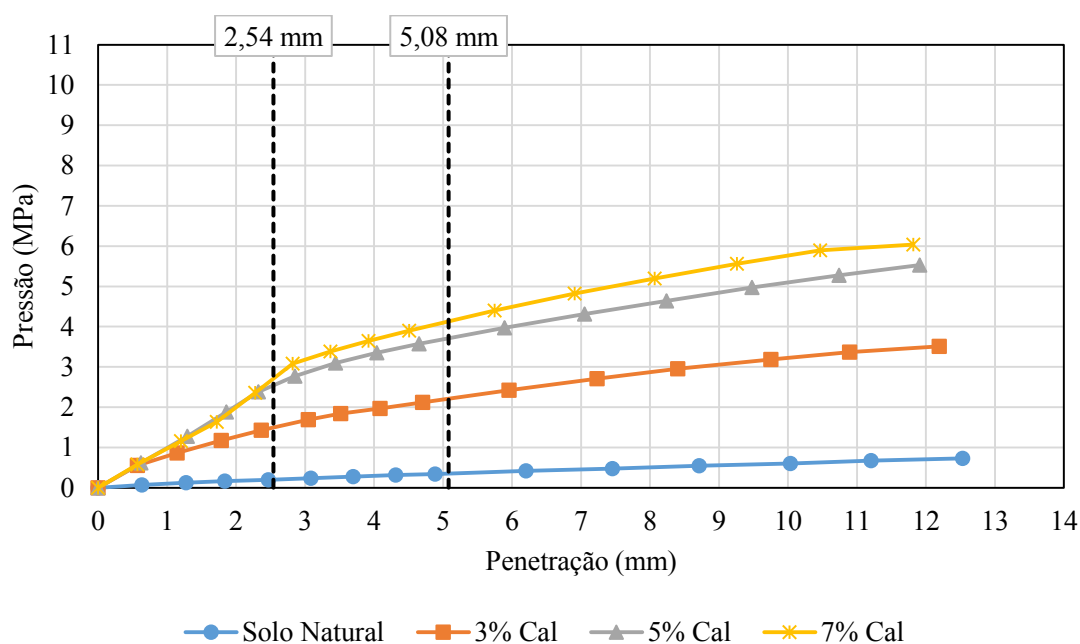
Após realizar os ensaios de CBR para o ponto ótimo de cada uma das curvas de compactação, foram calculados as expansões durante a saturação dos corpos de prova e os valores das pressões para cada valor de penetração. Na Tabela 6 estão mostrados os valores de expansão para os solos ensaiados. As curvas pressão x penetração são mostradas nas Figura 21 e 22. O memorial de cálculo encontra-se no Apêndice B.

Tabela 6 – Valores de expansão para o solo natural e solo estabilizado.

Expansão (%)						
Solo natural	3% Cal	5% Cal	7% Cal	9% Cimento	11% Cimento	13% Cimento
0,21	0,12	0,06	0,05	0,03	0,01	0

Fonte: Autor (2018)

Figura 21 – Curvas dos ensaios CBR do solo natural e do solo-cal.



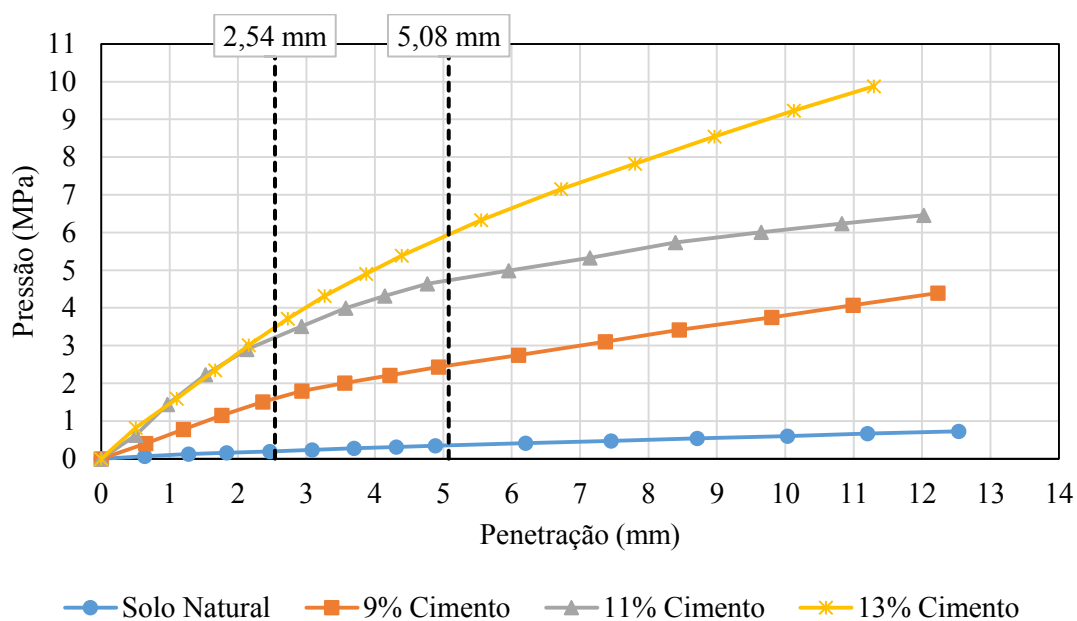
Fonte: Autor (2018).

Para calcular o CBR das amostras foi necessário relacionar as pressões obtidas no ensaio com as pressões da amostra de brita padrão. Os valores padrões de pressão são de 6,90 e 10,35 MPa para os valores de penetração de 2,54 e 5,08 mm respectivamente. Após feitos os cálculos, usando as equações 8 e 9, o CBR da amostra foi tomado como o de maior valor.

$$CBR_{2,54} = \frac{\text{Pressão calculada}}{6,90} \times 100\% \quad (8)$$

$$CBR_{5,08} = \frac{\text{Pressão calculada}}{10,35} \times 100\% \quad (9)$$

Figura 22 – Curvas dos ensaios CBR do solo natural e do solo-cimento.



Fonte: Autor (2018).

Os valores de CBR do solo natural, solo-cal e solo-cimento calculados para 2,54 mm e 5,08 mm estão mostrados na Tabela 7, sendo que as células sombreadas correspondem aos valores finais de CBR.

Tabela 5 – Valores de CBR dado em porcentagem.

Amostra	CBR 2,54 mm	CBR 5,08 mm
Solo natural	2,87%	3,39%
3% Cal	21,59%	21,33%
5% Cal	36,81%	35,85%
7% Cal	39,22%	39,92%
9% Cimento	23,17%	23,87%
11% Cimento	46,55%	45,69%
13% Cimento	50,51%	57,39%

Fonte: Autor (2018).

A amostra de solo natural apresentou um CBR inicial inferior a 4% e com apenas 3% de cal houve um aumento de 636% passando a apresentar um CBR de 21,59%. Para 5% de cal o aumento foi de 1085%, com CBR de 36,81%; utilizando 7% de cal a amostra de solo apresentou uma melhora de 1177%, com CBR de 39,92%. Na estabilização química com cimento foi necessário utilizar teores elevados para apresentar melhorias consideráveis no solo, sendo que a adição de 9% de cimento causou uma elevação de 704%, CBR de 23,87%, muito próxima dos valores obtidos com adição de apenas 3% de cal. Para 11% de cimento houve uma melhora de 1373%, com CBR de 46,55% e por fim a adição de 13% de cimento gerou uma melhora de 1692% com CBR de 57,39%.

No XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica realizado em 2016, foram apresentados dois estudos onde foram feitas estabilização química com solo e cimento. No primeiro estudo de Darym Júnior et al. (2016), com um solo de Brasília com características muito semelhantes ao deste estudo, foi feita a estabilização química com 2%, 3% e 4% de cal obtendo-se valores de CBR de 13%, 19% e 26% respectivamente; sendo compatível com os resultados obtidos no presente estudo. No segundo estudo, de Azevedo et al. (2016), uma areia siltosa foi estabilizada com 3%, 5% e 7% de cimento, obtendo grandes melhorias no CBR, atingindo valores de 174,35%, 235,78% e 290,22% respectivamente, demonstrando assim uma melhor eficiência de estabilização química em solos mais arenosos quando comparado aos resultados obtidos na estabilização do solo laterítico argiloso. Dessa forma a estabilização química mostra-se potencialmente menos efetiva para os solos muito finos, como no caso do solo laterítico argiloso ensaiado, visto que devem revestir uma área superficial muito maior.

No contexto da pavimentação, conforme mencionado no item 2.3, o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) fixa as características que os materiais utilizados nas camadas de subleito, sub-base e base devem apresentar. Na realização deste estudo apenas o valor de expansão e a capacidade de suporte de cada camada do pavimento foram considerados. Sendo assim pode-se constatar se há ou não a possibilidade de utilizar o solo estudado em cada uma das camadas do pavimento como aponta a Tabela 8.

Diante dos resultados apresentados, o solo argiloso laterítico do Campus Glória estabilizado com cal e cimento apresentou resultados satisfatórios para ser utilizado como camada de sub-base, porém sendo necessários altos teores de aditivo (13% de cimento) para poder compor a camada de base comprometendo assim uma possível redução de custos em relação aos métodos tradicionais de estabilização.

Tabela 6 – Aplicação do solo quimicamente estabilizado.

CBR para a camada		Solo Natural	3% Cal	5% Cal	7% Cal	9% Cimento	11% Cimento	13% Cimento
Subleito $\geq 2\%$		X	X	X	X	X	X	X
Sub-base $\geq 20\%$			X	X	X	X	X	X
Base	$\geq 60\%$							X
	$\geq 80\%$							

Fonte: Autor (2018).

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado neste trabalho visou analisar alternativas de estabilização química de uma camada superficial de solo no Campus Glória, objetivando sua utilização em camadas estruturais de um pavimento. As alternativas apresentadas para estabilização do solo justificam a importância de estudos visando o melhor aproveitamento do solo local e possível diminuição de custos da obra com relação aos métodos de estabilização tradicionais, como o granulométrico por exemplo.

O solo usado foi classificado como laterítico argiloso (LG') seguindo a metodologia MCT. Para sua estabilização com cal, adotaram-se os teores de 3%, 5% e 7%, sendo observada uma redução da massa específica seca e da umidade ótima com o aumento deste teor. Para os três teores foram registradas melhoras do CBR de forma a poder ser utilizado como sub-base em um pavimento. Na estabilização com cimento, foi utilizado teores de 9%, 11% e 13%. Observou-se que a massa específica seca aumentou e que houve uma redução mais acentuada da umidade ótima a medida que a quantidade de cimento no solo foi aumentada. Também neste caso foram registradas melhoras no CBR de forma a possibilitar o uso do solo como camada de sub-base para o solo com 9% e 11% de cimento, e como camada de base quando adicionado 13% de cimento.

A partir dos estudos realizados, nota-se o potencial que a estabilização química possui e abre-se novas possibilidades de pesquisas na área. Algumas sugestões são de realizar ensaios de CBR do solo-cal e do solo-cimento para 7, 14, 21 e 28 dias a fim de analisar a influência do tempo de cura na amostra; fazer ensaios triaxiais nas amostras para determinação do módulo de resiliência; analisar a influência da utilização de outros tipos de cimento (CP II, CP II, CP V) e de cal hidratada (CH-II e CH-III).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. M. **Energias para compactação de solos destinados a estruturas de pavimentos asfálticos**, 2017, 104p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Disponível em: < <http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento/>>. Acesso em: 24 mar. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2016.

AZEVEDO, G.; CHRUSCIAK, M.; MATOS, A. Análise Da Mistura De Solo Mole Do Campus Paricarana Da UFRR Com Cimento Para Melhoria De Seus Parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, XVIII, 2016, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte: ABMS, 2016. Disponível em:< <https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/>>. Acesso em: 03 jul. 2018.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro, 2008.

CROFT, J. B. The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. **Geotechnique**, n.17, p.119-135, 1967.

DARYM, JR., NOGUEIRA, J.; SOUZA, A. Análise Experimental de Solos Característicos do Distrito Federal Estabilizados com Cal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, XVIII, 2016, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte: ABMS, 2016. Disponível em:< <https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/>>. Acesso em: 03 jul. 2018.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DE SÃO PAULO (DER/SP). **Especificação de Serviços e Materiais para Execução de Base de Solo-Cal**. Publicação ET-DE-P00/005. Departamento de estradas e rodagem de São Paulo, 2006. Disponível em: < ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-005_A.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de pavimentação**. Publicação IPR – 179. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2018.

GUIMARÃES, J. E.P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª ed, São Paulo: PINI, 2002.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. 1. ed, New York: McGraw Hill, 1953.

LOIOLA, P. R. R.; BARROSO, S. H. A. Aplicação da Técnica de Solo Cal na Construção da Rodovia do Melão no Estado do Ceará. In: ANAIS DA REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 37., 2007, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2007.

LOIOLA, P. R.R; NOBRE JÚNIOR, E. F. **Trecho Experimental Utilizando Mistura de Solo-Cal no Município de Limoeiro do Norte-Ceará**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, VI, 2001, Brasília. **Anais...** Brasília, 2001.

LOPES, W. G. R. **Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas**. 2002. 158p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.

MOH, Z.C. **Reactions of soil minerals with cement and chemicals**. Highw. Res. Rec. 86, p. 39-61. 1965. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1965/86/86-004.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2018.

MONTE, M. A. V. **Aplicação de solo-cimento em pavimentos flexíveis**. 2012. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Os Solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos e a Pavimentação**. In: 18ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1983, Porto Alegre.

_____. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995.

PITTA, M. R. Estabilização com solo-cimento. **Revista Techne**, Editora Pini, São Paulo, n. 17, Julho/Agosto, 96p., 1995.

PRUSINSKI, J.R.; BHATTACHARJA. **Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils**. Transportation Research Record, Washington D.C. 1999.

SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. 2016. 118p. Tese (Doutorado) - Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. 2000. 151p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Rio Grande do Sul, 2000.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. 1994. 150p. Dissertação (Mestrado) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1994.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD **Lime Stabilization: Reactions, Properties, design and Construction. State of the Art Report 5**. Washington, US, 1987.

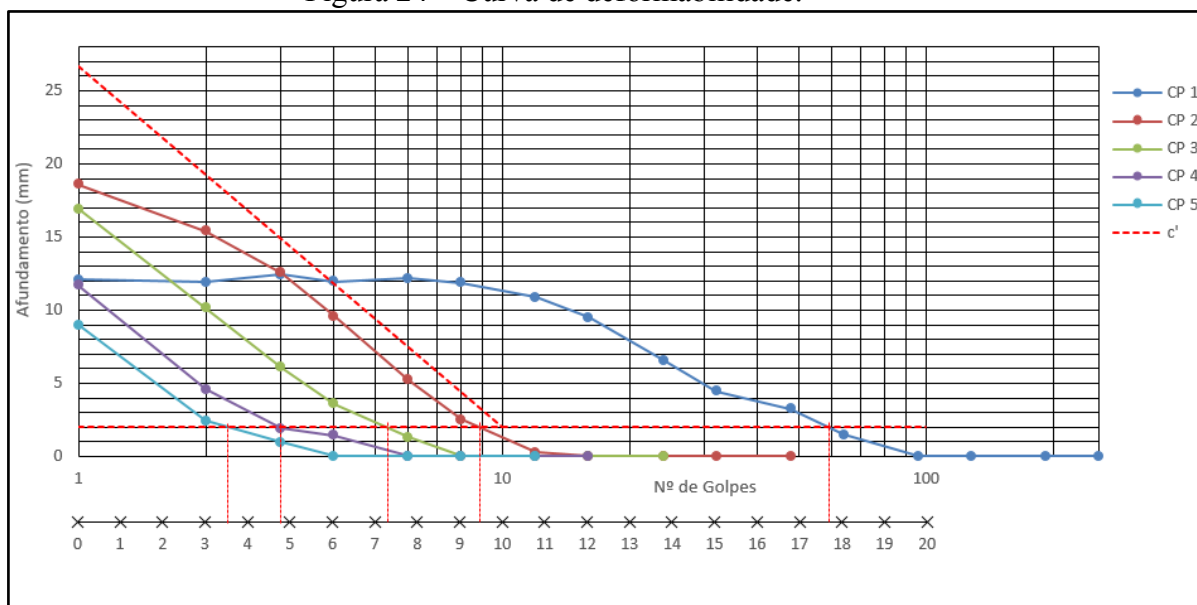
APÊNDICE A – DADOS DA CLASSIFICAÇÃO MCT

Figura 23 – Dados do ensaio Mini-MCV e Perda por imersão.

Ensaio de Mini-MCV																				
Cilindro	1				2				3				4				5			
Massa solo úmido à compactar (g)	200,00				200,00				200,00				200,00				200,00			
Massa solo seco compactado (g)	158,77				154,93				151,54				148,42				147,36			
Umidade (%)	25,97				29,09				31,98				34,75				35,72			
Constante Ka	Ac (mm)	50	La (mm)	3,15	Ac (mm)	50	La (mm)	3	Ac (mm)	50	La (mm)	3,26	Ac (mm)	50	La (mm)	3,11	Ac (mm)	50	La (mm)	3,22
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Leitura (mm)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)
1	36,96	83,81	12,1	0,965	34,63	81,63	18,58	0,967	25,88	72,62	16,93	1,063	19,23	66,12	11,72	1,143	16,93	63,71	8,98	1,178
2	30,87	77,72	11,9	1,040	24,22	71,22	15,39	1,108	16,24	62,98	10,13	1,225	11,38	58,27	4,57	1,297	9,91	56,69	2,44	1,324
3	28,55	75,4	12,45	1,072	19,08	66,08	12,57	1,194	11,81	58,55	6,1	1,318	8,56	55,45	1,93	1,363	8,31	55,09	0,96	1,362
4	24,86	71,71	11,98	1,128	16,05	63,05	9,58	1,251	8,95	55,69	3,58	1,386	7,51	54,4	1,44	1,390	7,95	54,73		1,371
6	21,51	68,36	12,16	1,183	11,65	58,65	5,24	1,345	6,55	53,29	1,32	1,448	6,91	53,8		1,405	7,72	54,5		1,377
8	18,97	65,82	11,88	1,228	8,83	55,83	2,51	1,413	6,11	52,85		1,460	6,81	53,7		1,408	7,47	54,25		1,383
12	16,1	62,95	10,88	1,285	6,51	53,51	0,27	1,475	5,71	52,45		1,471	6,63	53,52		1,412	7,35	54,13		1,386
16	12,88	59,73	9,49	1,354	6,47	53,47		1,476	5,37	52,11		1,481	6,07	52,96		1,427				
24	9,35	56,2	6,58	1,439	6,41	53,41		1,477	5,23	51,97		1,485								
32	7,09	53,94	4,44	1,499	6,32	53,32		1,480												
48	5,22	52,07	3,27	1,553	6,24	53,24		1,482												
64	3,39	50,24	1,47	1,609																
96	2,77	49,62		1,630																
128	2,65	49,5		1,634																
192	1,95	48,8		1,657																
256	1,92	48,77		1,658																
Perda por Imersão																				
Nº Cápsula	1				16				19				15				199			
Comprimento Saliente (mm)	10				10				10				10				10			
Peso da cápsula (g)	20,42				24,52				32,35				21,51				27,66			
Peso solo seco + cápsula (g)	28,41				46,51				59,22				45,15				54,42			
Peso solo seco (g)	7,99				21,99				26,87				23,64				26,76			
Altura do Cp	48,77				53,24				51,97				52,96				54,13			
Massa Seca Compactada (Ms)	158,77				154,93				151,54				148,42				147,36			
Fator de Correção	1				0,5				0,5				0,5				0,5			
Coeficiente Pi (%)	24,54				37,78				46,08				42,18				49,15			

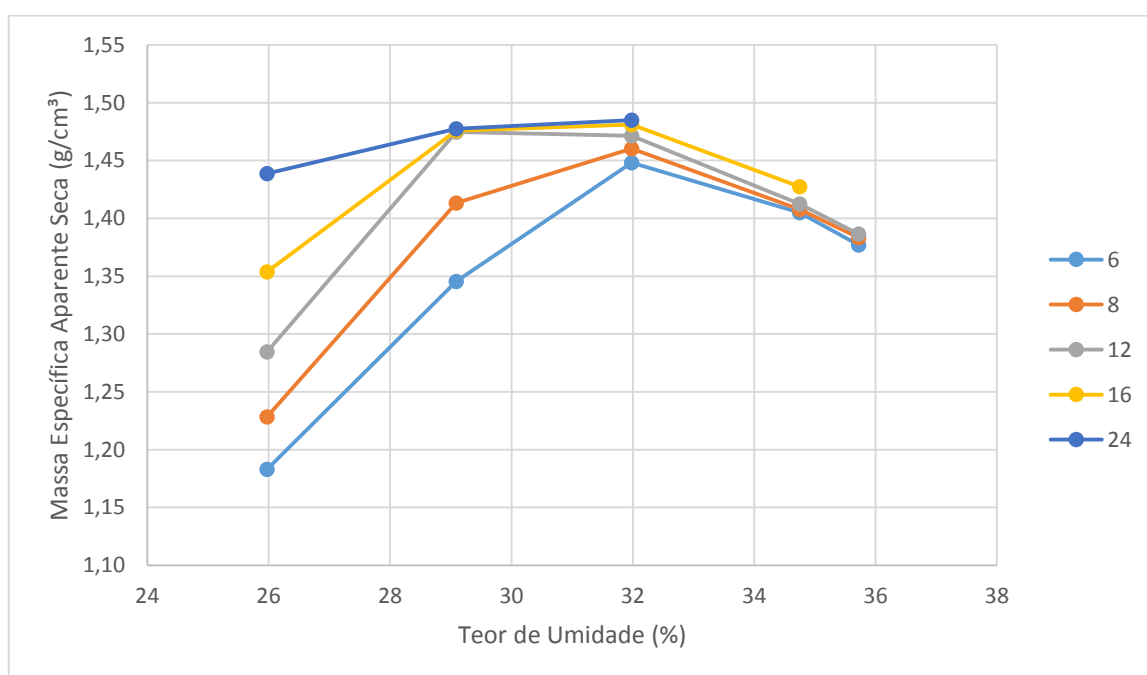
Fonte: Autor (2018).

Figura 24 – Curva de deformabilidade.



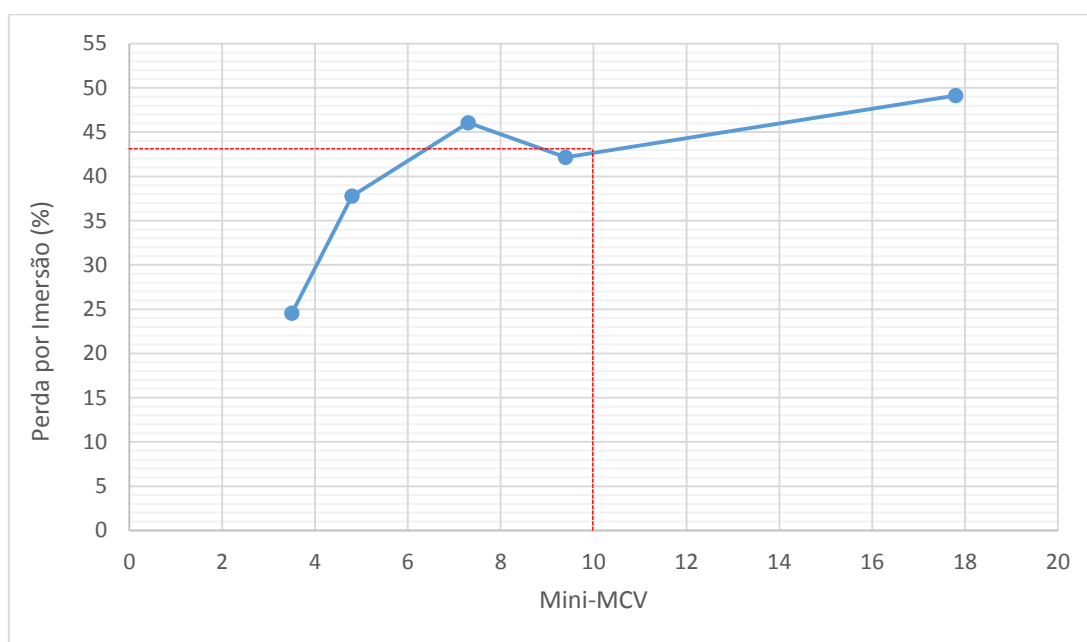
Fonte: Autor (2018).

Figura 25 – MEAS x Teor de umidade.



Fonte: Autor (2018)

Figura 26 – Perda de massa por imersão x Mini - MCV



Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DO ENSAIO CBR

Tabela 7 – CBR da amostra de solo natural.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0	0	0	0	0
0,5	0,635	0,010	129,293	0,067
1	1,275	0,018	232,727	0,120
1,5	1,835	0,024	310,303	0,160
2	2,465	0,029	374,95	0,194
2,5	3,085	0,035	452,526	0,234
3	3,695	0,041	530,101	0,274
3,5	4,315	0,047	607,677	0,314
4	4,885	0,051	659,394	0,341
5	6,205	0,062	801,617	0,414
6	7,455	0,071	917,98	0,474
7	8,715	0,081	1047,27	0,541
8	10,035	0,090	1163,64	0,601
9	11,205	0,100	1292,93	0,668
10	12,535	0,109	1409,29	0,728

Fonte: Autor (2018)

Tabela 8 – CBR da amostra de solo com adição de 3% de cal.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0	0	0	0	0
0,5	0,57	0,083	1073,13	0,555
1	1,145	0,129	1667,88	0,862
1,5	1,785	0,176	2275,56	1,176
2	2,365	0,214	2766,87	1,430
2,5	3,045	0,253	3271,11	1,690
3	3,515	0,275	3555,56	1,837
3,5	4,085	0,295	3814,14	1,971
4	4,705	0,317	4098,59	2,118
5	5,955	0,362	4680,41	2,418
6	7,235	0,405	5236,37	2,706
7	8,405	0,442	5714,75	2,953
8	9,755	0,476	6154,35	3,180
9	10,895	0,504	6516,37	3,367
10	12,195	0,525	6787,88	3,507

Fonte: Autor (2018).

Tabela 9 - CBR da amostra de solo com adição de 5% de cal.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0	0	0	0	0
0,5	0,621	0,092	1189,50	0,615
1	1,291	0,191	2469,50	1,276
1,5	1,861	0,282	3646,06	1,884
2	2,321	0,356	4602,83	2,378
2,5	2,851	0,415	5365,66	2,773
3	3,441	0,464	5999,20	3,100
3,5	4,041	0,502	6490,51	3,354
4	4,651	0,535	6917,18	3,574
5	5,891	0,594	7680,00	3,968
6	7,051	0,646	8352,33	4,316
7	8,241	0,694	8972,93	4,636
8	9,481	0,744	9619,40	4,970
9	10,741	0,789	10201,22	5,271
10	11,911	0,828	10705,46	5,532

Fonte: Autor (2018).

Tabela 10 - CBR da amostra de solo com adição de 7% de cal.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0	0	0	0	0
0,5	0,569	0,086	1111,92	0,575
1	1,199	0,173	2236,77	1,156
1,5	1,719	0,245	3167,68	1,637
2	2,279	0,353	4564,04	2,358
2,5	2,819	0,461	5960,41	3,080
3	3,369	0,506	6542,23	3,380
3,5	3,919	0,546	7059,40	3,648
4	4,509	0,584	7550,71	3,902
5	5,749	0,659	8520,41	4,403
6	6,909	0,722	9334,95	4,824
7	8,069	0,778	10059,00	5,198
8	9,259	0,832	10757,18	5,558
9	10,469	0,882	11403,64	5,892
10	11,819	0,904	11688,09	6,039

Fonte: Autor (2018).

Tabela 11 - CBR da amostra de solo
com adição de 9% de cimento.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0	0	0	0	0
0,5	0,652	0,061	788,69	0,408
1	1,202	0,117	1512,73	0,782
1,5	1,762	0,172	2223,84	1,149
2	2,362	0,226	2922,02	1,510
2,5	2,932	0,269	3477,98	1,797
3	3,562	0,301	3891,72	2,011
3,5	4,222	0,331	4279,60	2,211
4	4,932	0,364	4706,27	2,432
5	6,102	0,411	5313,94	2,746
6	7,372	0,464	5999,20	3,100
7	8,452	0,512	6619,80	3,421
8	9,802	0,561	7253,34	3,748
9	10,992	0,609	7873,94	4,069
10	12,232	0,658	8507,48	4,396

Fonte: Autor (2018).

Tabela 12 - CBR da amostra de solo
com adição de 11% de cimento.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0	0	0	0	0
0,5	0,507	0,094	1215,35	0,628
1	0,967	0,216	2792,73	1,443
1,5	1,527	0,334	4318,39	2,231
2	2,127	0,434	5611,32	2,899
2,5	2,927	0,525	6787,88	3,507
3	3,577	0,598	7731,72	3,995
3,5	4,147	0,646	8352,33	4,316
4	4,767	0,694	8972,93	4,636
5	5,957	0,747	9658,19	4,991
6	7,147	0,798	10317,58	5,331
7	8,397	0,859	11106,27	5,739
8	9,647	0,899	11623,44	6,006
9	10,827	0,934	12075,97	6,240
10	12,027	0,967	12502,63	6,460

Fonte: Autor (2018).

Tabela 13 - CBR da amostra de solo
com adição de 11% de cimento.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0	0	0	0	0
0,5	0,506	0,123	1590,30	0,822
1	1,106	0,238	3077,17	1,590
1,5	1,666	0,352	4551,11	2,352
2	2,156	0,451	5831,11	3,013
2,5	2,726	0,556	7188,69	3,715
3	3,266	0,646	8352,33	4,316
3,5	3,876	0,734	9490,11	4,904
4	4,396	0,806	10421,02	5,385
5	5,556	0,947	12244,05	6,327
6	6,726	1,071	13847,28	7,155
7	7,806	1,171	15140,21	7,823
8	8,966	1,279	16536,57	8,545
9	10,126	1,382	17868,29	9,233
10	11,296	1,479	19122,43	9,881

Fonte: Autor (2018).

FOLHA DE ASSINATURAS

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Giovana Bizão Georgetti

Aluno: Felipe Melo Cabral

Uberlândia, 24 de julho de 2018.