

ESTABILIZAÇÃO DE SOLO ARGILOSO COM ADIÇÃO DE CAL NA CIDADE DE SINOP-MT

VANESSA CRISTINA STRAPAZZON¹
LETÍCIA REIS BATISTA ROSAS²

RESUMO: O solo é uma das matérias-primas mais utilizadas no ramo da Engenharia Civil, e sua abundância é um dos fatores que contribuem para isso. Deve ser dotado de algumas características físicas e químicas que são encontradas através de ensaios específicos. A função do solo é resistir aos esforços aos quais será submetido, porém, pode ocorrer de o material disponível no local não possuir as características necessárias. Um método corretivo para esse problema é a estabilização, que visa a melhorar as propriedades do material. Ao analisar esse contexto, percebe-se como estudos sobre estabilização são importantes. Portanto, o presente trabalho relata uma experiência de estabilização com a adição de cal em solo argiloso na cidade de Sinop-MT, em porcentagens de 2%, 4% e 6%. Após a estabilização, foi realizado o ensaio de compressão simples, para se analisar as resistências dos solos e poder comparar as amostras estabilizadas com as amostras em sua forma natural. Com os resultados obtidos nesta pesquisa, observou-se que os teores de 2% e 6% de cal adicionados ao solo aumentaram significativamente a resistência à compressão do mesmo, demonstrando que o método de estabilização tem uma boa funcionalidade.

Palavras-chave: Estabilização de solos; solo-cal; pavimentação.

STABILIZATION OF CLAYY SOIL WITH LIME ADDITION IN THE CITY OF SINOP-MT

ABSTRACT: Soil is one of the most used raw materials in the field of Civil Engineering, and its abundance is one of the factors that contribute to this. It must be endowed with some physical and chemical characteristics that are found through specific tests. The function of the soil is to resist the efforts to which it will be submitted, however, it may happen that the material available at the site does not have the necessary characteristics. A corrective method for this problem is stabilization, which aims to improve the properties of the material. When analyzing this context, one realizes how important studies on stabilization are. Therefore, the present work reports a stabilization experience with the addition of lime in clayey soil in the city of Sinop-MT, in percentages of 2%, 4% and 6%. After stabilization, a simple compression test was performed to analyze soil resistance and to be able to compare stabilized samples with samples in their natural form. With the results obtained in this research, it was observed that the contents of 2% and 6% of lime added to the soil significantly increased its compressive strength, demonstrating that the stabilization method has a good functionality.

Keywords: Soil stabilization; soil-lime; paving.

¹ Acadêmica de Graduação, Curso de Engenharia Civil, UNIFASIPE Centro Universitário, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: vanessa_strapazzon@outlook.com;

² Professora Mestre, em Engenharia Civil, Curso de Engenharia Civil, UNIFASIPE Centro Universitário, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: eng.leticiarosas@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O solo é a camada superficial da Terra. A formação dele inclui sua origem, relevo, organismo, clima e tempo. Tais fatores agem diretamente nas suas características. Solo é um recurso natural utilizado nas atividades produtivas dos seres humanos, tendo grande importância na Engenharia Civil, pois faz parte de qualquer tipo de construção, determinando propriedades fundamentais no projeto.

Por ser uma matéria-prima universalmente utilizada e que possui baixo custo, apresenta uma vasta utilização no ramo da engenharia. No entanto, devido a sua grande utilização, não é incomum que o solo de uma determinada localidade não cumpra, parcial ou totalmente, os requisitos necessários para seu uso em projeto.

Ao se deparar com um solo escasso de matéria boa, muitos problemas aparecem nas construções, principalmente envolvendo os gastos que serão necessários para resolvê-los. Com um solo ruim, tem-se um maior custo nas fundações, tratando-se de construções de casa, prédios, obras comerciais e, ao envolver o ramo da pavimentação, há um maior custo na confecção das bases e sub-bases. Assim, o aproveitamento do solo presente no local da obra é uma alternativa para a redução dos custos e dos impactos gerados ao ambiente.

Tratando-se de pavimentação, quando há a oportunidade de utilizar o solo localizado na obra, a economia gerada é de suma importância. Muitas vezes, ao lidar com um solo que não forneça as características desejadas para bases e sub-bases de pavimentos, opta-se pela retirada do solo existente e utiliza-se solo vindo de outro lugar, porém, essa não é a única alternativa.

Com a necessidade diária de se ter um solo de qualidade, tornou-se essencial o estudo de novas técnicas que incrementassem a resistência dele, ou seja, que melhorassem suas propriedades e características. São muitas as perspectivas do uso de agentes estabilizadores, e a cal é um material de baixo custo, fácil de ser adquirida e que possui uma fácil aplicação. Com isso, ela se torna uma boa alternativa de estabilizante. A estabilização com a adição da cal é, principalmente, empregada na área da pavimentação, visando a melhorar as características dos solos, obtendo, com isso, em seu suporte e trabalhabilidade, um aumento da resistência.

O estado de Mato Grosso tem grande contribuição na economia do Brasil, pois é uma região que passa por um considerável crescimento econômico. Segundo a Secretaria de Planejamento e Gestão (SEPLAG, 2019) em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019) o Produto Interno Bruto (PIB) do estado cresceu cerca de 12,1% no ano de 2017. Sua produção agrícola tem boa participação no desenvolvimento do estado, e isso envolve o escoamento dos grãos. Entretanto, para tal atividade ser realizada, é necessário que se tenha estradas em boas condições de uso. Estudos relatam que a utilização da cal para estabilização de solos tem resultado positivo em regiões quentes, o que é uma vantagem para ser utilizada no território mato-grossense.

A aplicação da referida técnica permite a utilização do solo do próprio local, tendo, como função, o melhoramento de suas características, para que atenda às exigências de projeto. Portanto, ao optar-se pelo sistema de estabilização na construção, pode-se ter uma diminuição nos impactos ambientais, baratear a construção e dar mais agilidade nas obras, ou seja, diminuir seu tempo de construção. Quando a estabilização é bem executada, ela pode suportar grandes cargas de compressão, assim possuindo uma durabilidade boa.

Nessa pesquisa, foi realizada a estabilização de um solo da cidade de Sinop-MT com a adição da cal, em teores de 2%, 4% e 6%. O material foi compactado em sua forma natural e, com as porcentagens de estabilizantes adicionados posteriormente, foi feito o ensaio

de resistência a compressão simples. Foram rompidos os corpos de provas aos 7 e 28 dias e, com isso, foi possível conhecer as melhorias que a cal gera quando usada como estabilizante.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O estado de Mato Grosso

O Estado de Mato Grosso possui área territorial de 903.357 km². Segundo a Secretaria de Planejamento e Gestão (SEPLAG, 2019), em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), a economia de Mato Grosso cresceu cerca de 12,1% no ano de 2017, possuindo, com isso, a maior taxa de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) em relação às outras unidades da Federação. O estado ocupa também o décimo primeiro lugar, tratando-se do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) (IBGE, 2010).

As principais atividades que giram em torno da economia mato-grossense são a pecuária e a agricultura. O estado é conhecido como um dos maiores exportadores de soja do mundo, sendo o maior do Brasil, no ano de 2019, segundo a Secretaria de Comércio Exterior (SECEX).

As estradas são de suma importância para o escoamento de grãos. Em 2010, a Confederação Nacional de Transporte (CNT) classificava cerca de 77% das estradas do estado como regulares ou péssimas, o que é um empecilho para o transporte da produção agropecuária.

A cidade de Sinop-MT, localizada a cerca de 500 quilômetros da capital Cuiabá, é a principal cidade do Norte de Mato Grosso, pois integra o Portal do Agronegócio, tendo, com uma de suas principais atividades, a agropecuária. Segundo a prefeitura de Sinop, em 2014, a cidade contava com um PIB de R\$33.807,60 por pessoa.

Analisando o contexto existente na região, fica notável a importância das manutenções e das construções de pavimentos, tanto para vias rurais como urbanas. Em muitos casos, a falta de material local que forneça as características necessárias para uso como base e sub-base do pavimento exige o transporte de materiais vindos de outras áreas, o que causa impactos ambientais e gera um custo considerável. Portanto, a realização da estabilização química pode ser viável, tanto economicamente, como também ambientalmente.

2.2 Pavimentos

Dados da CNT (2017) mostram que o Brasil é constituído por uma extensão de cerca de 1,7 milhões de quilômetros de rodovias, desses, apenas 200.000 quilômetros pavimentados. Inúmeros problemas impossibilitam um bom desempenho nesse ramo, mesmo com a significativa importância do modal rodoviário sobre a infraestrutura de transporte.

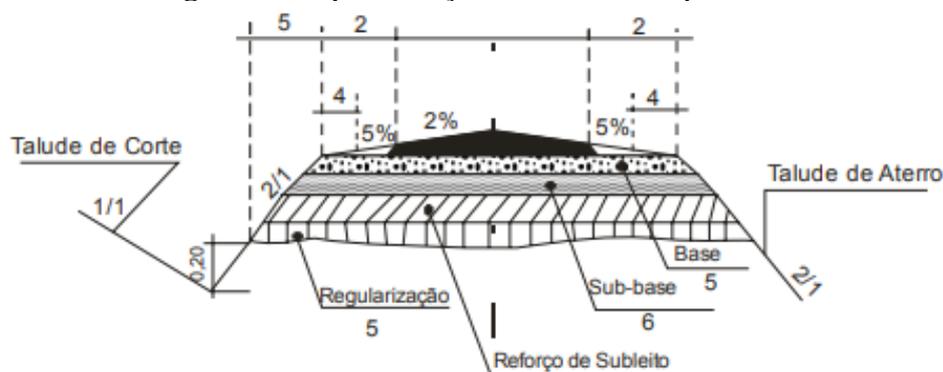
Segundo a NBR 7207/82: Terminologia e classificação de pavimentação, o pavimento é uma estrutura constituída por várias camadas, e sua finalidade é resistir aos esforços vindos do tráfego de veículos e do clima. O pavimento deve resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelas ações do tráfego, dar boas condições de rolamento, tratando-se de comodidade, segurança e conforto e resistir aos esforços horizontais, para se ter um pavimento mais durável (ABNT, 1982).

Pavimento é uma estrutura composta de camadas em que cada uma delas possui materiais com diferentes deformabilidades e resistências. Eles são colocados em contato e tal ação resulta em um elevado grau de complexibilidade. Os pavimentos são classificados em: flexível, semirrígido e rígido (DNIT, 2006).

Em seção transversal, os constituintes do pavimento, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), são:

- Subleito: solo de fundação do pavimento;
- Leito: a superfície conquistada pela terraplanagem ou obra-de-arte;
- Greide do leito: perfil do eixo longitudinal do eixo;
- Regularização: camada sobre o leito, que possui a finalidade de conformar o mesmo longitudinalmente e transversalmente de acordo com as especificações;
- Reforço do subleito: camada com espessura constante, acima da regularização, possui características geotécnicas melhores que a presente no subleito. Tal reforço é utilizado por uma questão técnica-econômica;
- Sub-base: camada que serve como um complemento para a base, utilizado quando, por questões de projeto, não é aconselhável pôr a base diretamente sobre a regularização;
- Base: camada que possui a função de resistir e distribuir os esforços vindos do tráfego;
- Revestimento: camada que recebe a ação do rolamento dos veículos, destinada a melhorar o conforto e segurança, como também a resistir aos desgastes vindos das ações dos veículos. Tal constituinte deve ser, o máximo possível, impermeabilizada.

Figura 1: Esquema seção transversal do pavimento



Fonte: DNIT (2006).

Pode-se dizer que a área de construções de estradas é um dos ramos da engenharia que envolve o maior número de variadas categorias de solos dentro de uma mesma obra. Por isso, é de suma importância determinar suas características, pois elas possuem um fundamental papel na qualidade e custo ao final da obra.

2.3 Solo

A NBR 6502/95: Rochas e solos-Terminologia, define o solo como material gerado da decomposição das rochas por ações químicas ou físicas, podendo ser orgânico ou inorgânico, ou simplesmente produto gerado da decomposição da rocha pela ação de intempéries (ABNT, 1995). É um material resultante da degradação das rochas, de modo que diversos fatores contribuem para as suas características, sendo os principais: o clima, o tempo, o relevo, os organismos e o material de origem.

A classificação do solo, segundo o DNIT (2006), é dada pela sua granulometria, sendo classificado em: pedregulho, solo retido na peneira de 2 mm (n.º 10); areia, solo retido na peneira de 0,075 mm (n.º 200); areia grossa, trata-se da fração do solo entre as peneiras de 2,0 mm (n.º 10) e 0,42 mm (n.º 40); areia fina, trata-se da fração do solo retido entre as peneiras de 0,42mm (n.º 40) e 0,075mm (n.º 200); silte, trata-se da fração do solo retido entre as peneiras

de 0,075mm (n.º 200) e 0,005 mm; e argila, fração do solo com granulometria menos que 0,005 mm.

Na natureza, normalmente, o solo se apresenta com mais de um tipo de granulometria. Dependendo da categoria de fração presente no solo, este pode influenciar de modo significativo o comportamento do material, por isso, há a necessidade de levar em consideração todas as propriedades e forma granulométrica encontradas no insumo (DNIT, 2006).

As principais características físicas e químicas do solo são: sua granulometria, índice de vazios, massa volumétrica, teor de umidade, ângulo de atrito interno, coeficiente de coesão e determinação dos minerais. O solo é parte fundamental de qualquer tipo de construção, pois ele determina características fundamentais de projeto e sustenta o peso da obra futura. Os critérios, em geral, para a escolha do insumo, envolvem a relação granulometria/plasticidade/retração/compacidade (SILVA, 2016).

O solo é um material muito variável, que possui um grande emprego na construção civil, e é o principal material granulométrico utilizado para a regularização de camadas de bases e sub-bases de pavimentos. Em alguns casos, o material local não atende às especificações para poder ser usado, então, fazem-se adaptações como: trocar o material por outro melhor; dimensionar o pavimento seguindo os limites do solo presente; fazer correção do solo para deixá-lo em conformidade com as especificações, esse processo é denominado estabilização (MAKUSA, 2013).

2.4 Estabilização dos solos

A estabilização dos solos trata-se basicamente de uma técnica que consiste em adicionar um novo material ao solo, que fará com que ele tenha alterações em suas propriedades de maneira positiva. Tais alterações podem ser químicas, físicas e biológicas (CRISTELO, 2001).

Quando se opta pela estabilização na área da pavimentação, esta técnica busca gerar um melhoramento no comportamento e na qualidade do solo, visando a deixá-lo capacitado para receber as cargas vindas do tráfego, resistir às ações climáticas e prepará-lo para construções de vias. As mais frequentes técnicas de melhoramento são: o método de estabilização mecânica, método de estabilização física e método de estabilização química (CRISTELO, 2001; FRANÇA, 2003).

Os métodos da estabilização mecânica e química são os mais utilizados e indicados, tratando-se da estabilização para solos de pavimentos e estradas. Há inúmeros aditivos químicos que podem ser utilizados como estabilizadores, e os mais comuns são a adição do cimento e da cal (FRANÇA, 2003).

A estabilização mecânica visa ao melhoramento das características do solo, através da arrumação das suas partículas, por correções na composição granulométrica. Esse tipo de estabilização trata-se, basicamente, de fazer a estabilização granulométrica ou a variação da energia de compactação, através da adição de materiais. Tem como objetivo, fornecer ao solo as mínimas condições necessárias para seu uso, pois, com o solo em seu estado natural, elas não seriam alcançadas (CRISTELO, 2001; TEIXEIRA, 2014).

A estabilização física trata-se da modificação das propriedades do solo pela eletricidade, calor, entre outras maneiras de alterações. Quando a taxa de consolidação é lenta nos solos, com uma reduzida permeabilidade, opta-se por técnicas para acelerar esse processo. A estabilização física não tem um relevante valor quando se trata de economia, porém, quando outros métodos não são eficazes para alcançarem elevados valores de resistência e rigidez do solo, opta-se por ela (CRISTELO, 2001).

A estabilização química altera permanentemente as características e propriedades dos solos por meio da introdução de aditivos. Estabilização química constitui-se de fazer

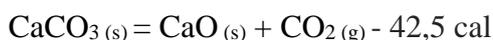
alterações na estrutura do solo pela adição de um certo agente estabilizador, em quantidade suficiente para produzir o melhoramento das propriedades mecânicas e físicas do solo, assim, possibilitando que seja empregado para fins de projetos (FRANÇA, 2003).

Na presente pesquisa, a técnica utilizada foi a estabilização química, que consiste na adição de agentes químicos que agem como estabilizadores. Tais produtos, ao entrarem em contato com o solo, quando solidificados ou reagirem às partículas do material, aglomeram-se e, com essa ação, tem-se a diminuição dos índices de vazios (DNIT, 2018).

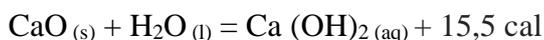
2.4.1 Estabilização com cal

Cal refere-se a uma variedade de produtos derivados do calcário. Há inúmeros tipos de cal. Para fim de estabilização de solos, podem ser utilizadas tanto a cal aérea viva, como a cal aérea hidratada, sendo essa em pó ou leite de cal. Para critério de escolha da categoria de cal que virá a ser utilizada, é necessário se atentar a algumas características, como o fato de o material precisar ter um elevado teor de cálcio, entretanto, os óxidos e hidróxidos de magnésio do cálcio, não devem exceder os 5% (SILVA, 2010).

As reações químicas da cal viva e cal hidratada são, respectivamente:



e



A execução da estabilização solo-cal, refere-se basicamente a uma mistura composta de solo, cal e água. Esse método de estabilização trata-se de um processo físico-químico que é gerado através da adição de uma certa quantidade de cal ao solo, promovendo permanentemente a alteração e o aumento das propriedades mecânicas dos solos (DNIT, 2019).

A adição da cal ao solo visa ao aumento da rigidez, trabalhabilidade e redução da expansão. O incremento da cal no solo é usado principalmente em solos argilosos, tendo seu uso, após estabilizado, normalmente no reforço de subleito e/ou sub-bases (SALES; RIBEIRO; NERY, 2017). Para solos argilosos, tanto a cal quanto o cimento são eficazes na sua melhoria. O que torna mais viável o uso da cal é seu preço, pois, em relação ao cimento, ela possui um preço menor (ROSAS e RIVA, 2014).

A mistura solo-cal gera uma sequência de reações químicas que resultam em alterações nas propriedades e características dos solos. Algumas reações ocorrem de forma imediata, já outras ocorrem com um prazo mais longo, resultando em ganhos de resistência imediatos, e outra parcela da resistência é adquirida com o tempo (SILVA, 2016).

A estabilização de solos com a introdução da cal tem-se mostrado eficaz, além de ser viável ecológica e economicamente, pois, à medida que esse método permite o uso do solo existente no local, ao invés de substituí-lo por outro, evitam-se custos adicionais e grandes impactos ambientais (SILVA, 2010).

Simioni (2011), demonstra que a adição da cal ao solo de Sinop/MT em porcentagens de 2%, 4% e 6% é eficaz. A cura aos 28 dias, para os teores de 2% e 4%, apresentaram um ganho de resistência à compressão maior que aos 7 dias. Já com 6%, a cura aos 28 dias decresceu em relação aos 7 dias.

2.4.1.3 Mecanismos de reação Solo-Cal

No processo de estabilização, ocorrem várias alterações permanentes ao solo. Segundo o DNIT (2006), essas alterações podem ser: por modificação do solo: essa modificação interfere diretamente na plasticidade e na sensibilidade à água do material; por carbonatação: esse processo trata-se de uma fraca cimentação; e por pozolanização: quando a modificação ocorre por pozolanização, ocorre uma forte cimentação.

Com a mistura dos materiais envolvidos nesse tipo de processo de estabilização, inúmeras reações imediatas ocorrem, como: reações de troca catiônica, adsorção pelas superfícies dos argilominerais e reações de neutralização ácido-base (DNIT, 2019).

Segundo Portelinha (2008), os solos finos apresentam, com o incremento da cal, uma melhoria na sua trabalhabilidade, plasticidade e na variação do seu volume, entretanto, nem todos os tipos de solo exibem melhoria em sua durabilidade e resistência. Existem variedades que influenciam diretamente o resultado, como: tempo de cura, tipo e teor de cal e as características do solo que virá a ser melhorado (JÚNIOR, 2007).

Ao se tratar da granulometria, com natureza físico-química, a inserção da cal ao solo gera floculação e aglomeração. Sendo isso uma resultante da troca catiônica processada pelas partículas da argila que reagem, modificando a granulometria do material e, quando combinadas com as alterações dos limites de consistência, interferem consideravelmente no comportamento da mistura solo-cal (PORTELINHA, 2008).

Lovato (2004) demonstrou, em pesquisa, que a adição de cal ao solo aumenta a umidade ótima de compactação e diminui o peso específico aparente seco do material. Ele analisa, também, que os valores de resistência são alterados, dependendo da quantidade de cal utilizada e o tempo de cura disposto.

Júnior (2007) evidenciou que a quantidade de cal tem influência direta na resistência final do solo. Em sua pesquisa, ele relatou que ao aumentar o teor de cal de 3% para 11%, a resistência à compressão simples aumentou cerca de 40%. Ao se tratar da porosidade da mistura, quando compactada, esse fator tem grande influência sobre a resistência à compressão simples. Em qualquer teor de cal utilizado, a redução da porosidade causa um aumento considerável na resistência.

A utilização da cal como material estabilizante mostra-se eficaz para fins de bases e sub-bases de pavimentos, porém, é necessário ter alguns cuidados na execução. A perda de resistência constatada com tempo de cura demonstra que as camadas de solo estabilizadas desta forma, demandam uma correta e atenta construção, desde sua mistura. Para um bom resultado, é fundamental garantir que a mistura exiba reações pozolânicas, pois essa evita a formação de compostos que prejudiquem a resistência (LOVATO, 2004).

O estudo de Simioni (2011) demonstra que, com a adição de 2% de cal ao solo de Sinop-MT, o ISC pode melhorar a ponto de o solo estabilizado poder ser usado como sub-base de pavimentação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Materiais

Na realização deste estudo, foi utilizada amostra de solo retirada, a uma profundidade de 50 cm, do bairro Jardim das Nações, na cidade de Sinop-MT. Visto que segundo Simioni (2011) o solo de Sinop-MT é, em geral, classificado como argiloso, e estudos demonstram que a cal tem bom funcionamento em solos deste tipo, acreditou-se que teriam um resultado de estabilização satisfatório.

A cal hidratada utilizada foi do tipo CH-III, visto que essa categoria está em conformidade com a NBR 6473/03: Cal virgem e cal hidratada-Análise química (ABNT, 2003), seguindo os requisitos necessários para teor de óxidos e hidróxidos presentes na cal, e possui também uma produção mais econômica, quando comparada aos outros tipos de cal. Com isso,

o custo gerado é menor quando em comparação à cal hidratada CH-I e CH-II. Considerando esses fatores, optou-se, então, pela cal hidratada CH-III.

A água utilizada foi a disponibilizada pelo laboratório do centro universitário UNIFASIPE.

3.2 Metodologia

Foram realizadas as amostragens de solos para a execução do ensaio. As amostras foram retiradas de forma manual e guardadas em embalagens, sendo, assim, devidamente armazenadas.

Já em laboratório, as amostras foram espalhadas, para o processo de secagem ser mais rápido. Para isso, foi usada uma lona, onde o solo foi espalhado e sua secagem aconteceu em ar livre. Após o processo de secagem do solo, o material precisou ser destorroado e peneirado, passando na peneira de 4,8 mm.

Em laboratório, o solo precisa passar por processo de caracterização, sendo os ensaios necessários para essa pesquisa o de umidade ótima e de peso específico aparente seco. Neste trabalho, foram utilizados os dados laboratoriais obtidos por Simioni (2011), pois usou o solo com as mesmas características, no qual a umidade ótima e o peso específico aparente seco dos materiais foram:

Tabela 1: Parâmetros de compactação do solo

Solo	Umidade Ótima (%)	γ_d (kN/m ³)
Natural	23,4%	14,89
Cal	25%	14,89

Fonte: Simioni (2011).

O processo de moldagem dos corpos-de-prova (CP's) foi feito nas seguintes etapas: pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura. Segundo o DNIT, os teores de cal recomendados variam de 2% a 10%. Neste trabalho, optou-se pelos teores de 2%, 4% e 6%, sendo moldados 6 corpos de prova para cada teor e mais 6 corpos de prova com o solo em sua forma natural, para ser usado como comparativo. Destes corpos de provas, 3 de cada tipo foram rompidos aos 7 dias, e o restante com rompimento aos 28 dias.

O processo de pesagem consiste na separação adequada dos materiais, todos nas proporções corretas estabelecidas para este trabalho. As misturas de solo com os teores de cal foram preparadas e homogeneizadas, depois foi adicionada água na mistura e, novamente, os materiais foram homogeneizados. Em seguida, as misturas foram compactadas em 6 corpos-de-prova para cada teor de cal. Ao final, foram gerados 24 corpos-de-prova, sendo 6 com o solo em seu estado natural, 6 com teor de 2% de cal adicionada, 6 com teor de 4% de cal adicionada e 6 com 6% de cal adicionada ao solo. A compactação foi feita seguindo a NBR 7182/16: Solo ensaio de compactação. Para este procedimento, foi utilizado o cilindro pequeno e energia de compactação normal (ABNT, 2016).

Logo após a confecção dos corpos-de-prova, estes foram desmoldados e passados pelo processo de cura. A cura dos CP's foi realizada em temperatura ambiente, em câmara úmida e com o tempo de 7 e 28 dias. Após a cura, com o ensaio de resistência à compressão, foram conhecidos os resultados da resistência de cada tipo de amostra.

O ensaio de resistência à compressão não confinada, como já descrito acima, foi realizado aos 7 e 28 dias, de acordo com as recomendações da NBR 12770/92: Solo coesivo-Determinação da resistência à compressão não confinada (ABNT, 1992). Para a execução do ensaio, o solo é compactado ou moldado em um corpo-de-prova cilíndrico, e após essa fase, o molde é submetido a um esforço que tende a provocar a ruptura da amostra e, com isso, tem-se conhecimento da resistência dele.

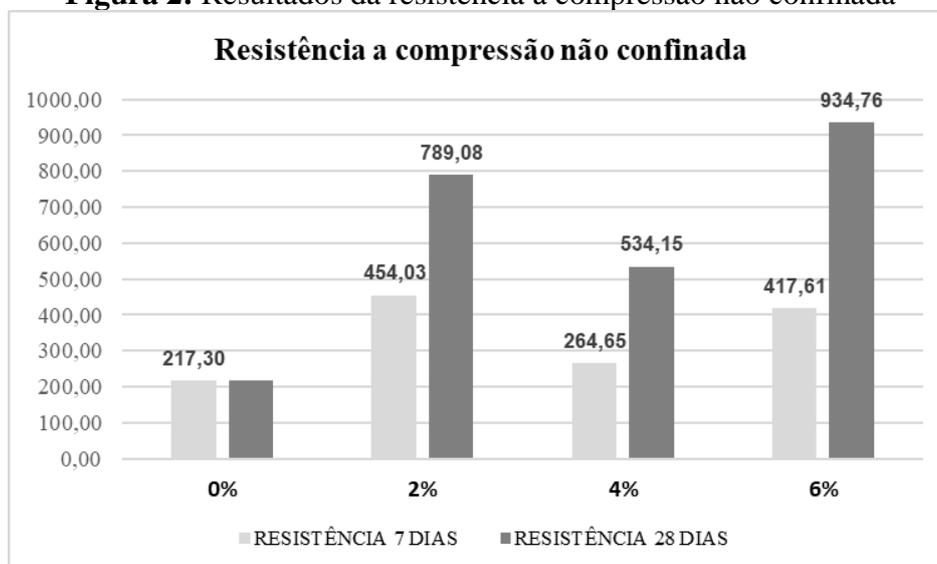
Para a realização do ensaio de compressão não confinada, é utilizado um anel dinamométrico, acoplado a uma prensa, chamado de prensa hidráulica. A sensibilidade do aparelho deve estar de acordo com as resoluções indicadas na NBR 12770/92 (ABNT, 1992).

Com os resultados obtidos a partir do ensaio de compressão, realizou-se uma análise comparativa via planilhas eletrônicas. Utilizando as amostras sem adição de cal e as amostras que possuem cal, foram analisados os ganhos de resistência do solo, avaliando a influência do teor de cal e do tempo de cura utilizado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados adquiridos através do ensaio de resistência à compressão não confinada estão demonstrados na figura 3, que apresenta a diferença de resistência com 7 e 28 dias de cada tipo de solo.

Figura 2: Resultados da resistência à compressão não confinada



Fonte: Própria (2020).

Verifica-se que o ganho de resistência do solo com 2% e 6% adquiriu em relação ao solo natural com 7 dias de cura foi considerável, sendo um aumento de 108% e 92%, respectivamente. Após 28 dias de cura, observou-se que o valor da resistência evoluiu com o passar dos dias, pois, com 2% de cal, o solo passou de 454,03 kPa de resistência à compressão para 789,08 kPa, com 4% de adição de cal, o solo passou de 264,65 kPa de resistência à compressão para 534,15 kPa e, com 6% de cal, o solo passou de 417,61 kPa de resistência à compressão para 934,76 kPa.

Para o tempo de cura de 28 dias, o ganho de resistência em relação ao solo natural foi de aproximadamente 263%, 145% e 330% para os teores de 2%, 4% e 6%, respectivamente. Visto que as reações solo-cal são mais lentas, os resultados obtidos estiveram em consonância com as bibliografias consultadas.

Simioni (2011) demonstra que a resistência à compressão com 2% foi aproximadamente 10% maior que o solo estabilizado com 4% de adição de cal. Os resultados

obtidos nessa pesquisa também demonstraram que o ganho de resistência com o teor de 2% foi maior quando em comparação ao teor de 4% de adição de agente estabilizador.

Cristelo (2001) demonstra que a adição de cal em solo argiloso é eficaz, e que isso se dá pela troca iônica entre os minérios argilosos e a cal, permitindo, então, uma diminuição no tamanho da solução micelar, o que tem como resultante uma maior proximidade entre as partículas e em sua floculação. Assim, a fração argilosa do solo tem comportamento de um solo siltoso. Tal fato explica por que a cal se adaptou de maneira positiva ao solo estabilizado, visto que, segundo Simioni (2011), o solo utilizado nessa pesquisa era um solo argiloso.

Independentemente do teor de cal utilizado, o ganho de resistência já era esperado. Júnior (2007) afirma que a cal proporciona redução de porosidade no material e, consequentemente, o aumento da resistência.

Com os resultados obtidos nos testes laboratoriais, o teor de 2% teve o maior aumento de resistência à compressão não confinada, aos 7 dias, e o teor de 6% o maior aumento com rompimento, aos 28 dias.

5. CONCLUSÃO

Visto que o ramo de estabilização possui inúmeros métodos e formas, esse trabalho propôs demonstrar que a estabilização química com uso da cal é eficiente, o que foi comprovado com os resultados obtidos ao longo da pesquisa, pois em ambos os fatores os resultados foram positivos e se mostraram eficazes para serem utilizados na estabilização.

Os valores obtidos na resistência aos 28 dias, possuíram um considerável aumento em relação ao rompimento dos moldes com 7 dias, isso se dá pelo fato das reações solo-cal acontecerem de uma forma mais lenta, demonstrando então que o tempo de cura deve ser considerado e devidamente aplicado.

Com os resultados analisados, pode-se dizer que o solo estabilizado com a adição de 2% de cal em sua composição foi o mais eficaz, quando em comparação aos teores de 4% e 6%. Apesar de o teor de 6% ter adquirido uma resistência maior aos 28 dias, o teor de 2% pode ser considerado o mais adequado, porque seu ganho de resistência foi considerável e seu custo será menor quando comparado aos outros teores, por utilizar uma quantidade menor de cal.

Conclui-se que o uso da cal como agente estabilizador de um solo argiloso na cidade de Sinop-MT é uma opção vantajosa na melhoria da capacidade de suporte do material. Tal método aumentou consideravelmente a resistência à compressão do material, possibilitando seu uso na engenharia rodoviária, além de poder proporcionar diminuição nos impactos ambientais e nos custos, em comparação com outras soluções.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada.** Rio de Janeiro, RJ, 1992.

_____. **NBR 6473: Cal virgem e cal hidratada–Análise química.** Rio de Janeiro, RJ, 2003.

_____. **NBR 6502: Rochas e solos–Terminologia.** Rio de Janeiro, RJ, 1995.

_____. **NBR 7182: Solo–ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, RJ, 2016.

_____. **NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação.** Rio de Janeiro, RJ, 1982.

CNT – Confederação Nacional de Transportes. **Pesquisa CNT de rodovias 2010 – relatório gerencial.** Disponível em: <https://www.cnt.org.br/>. Acesso: 15 abr. 2020.

CNT – Confederação Nacional de Transportes. **Pesquisa CNT de rodovias 2017 – relatório gerencial.** Disponível em: <https://www.cnt.org.br/>. Acesso: 17 abr. 2020.

CRISPIM, Flavio Alessandro. **Compactação de solos: influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos.** 2007. 98 f. Dissertação de Pós-Graduação - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007. Versões impressa e eletrônica.

CRISTELO, Nuno. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** 2001. 57 f. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2001. Versões impressa e eletrônica.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 181/2018 – ME: **Pavimentação – Material estabilizado quimicamente – Determinação do modulo de resiliência – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, 2018. 16 f.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 419/2019 – ME: **Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, 2019. 8 f.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT: **Manual de Pavimentação.** 3 ed. Rio de Janeiro, RJ, 2006. 278 f.

FRANÇA, Fabrício Carlos. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “rbi grade 81”.** 2003. 104 f. Tese de Doutorado, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003. Versões impressa e eletrônica.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Índice de Desenvolvimento Humano.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ac/pesquisa/37/30255?tipo=ranking>. Acesso em: 16 abr. 2020.

JÚNIOR, Luizmar da Silva Lopes. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada.** 2007. 148 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Versões impressa e eletrônica.

- LOVATO, Rodrigo Silveira. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. 164 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Versões impressa e eletrônica.
- MAKUSA, Gregory Paul. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: state of the art review**. 2013. 38 f. Luleå tekniska universitet, 2013. Versões impressa e eletrônica.
- MARTINS, Marcos Paulo Borba. **Estabilização de solos para fins de pavimentação**. 2018. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Fundação Educacional de Ituverava, Ituverava, 2018. Versões impressa e eletrônica.
- PINTO, Carlos de Souza. **Fundações: teoria e prática**. 2. Ed. São Paulo: Editora Pini, 1998. 751 f. Versões impressa e eletrônica.
- PORTELINHA, Fernando Henrique Martins. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**. 2008. 189 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Viçosa, Viçosa, 2008. Versões impressa e eletrônica.
- ROSAS, Letícia Reis Batista; RIVA, Rogério Dias Dalla. **Resistência à tração de solos estabilizados com cal e cimento em Sinop-mt**. 2014. 8 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Mato Grosso, Sinop, 2014. Versões impressa e eletrônica.
- SALES, Andrei Wickroski; RIBEIRO, Daniel Donadi; NERY, Kaio Dias. **Efeitos da adição de cimento e de cal em um solo da região de Curitiba para fins de pavimentação**. 2017. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Versões impressa e eletrônica.
- SECEX – Secretaria do Comércio Exterior. **Mato Grosso é o estado que mais exportou soja neste ano**. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/index.php/auditorias/3531-secretaria-de-comercio-exterior-secex>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- SEPLAG – Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão. **Economia de Mato Grosso tem a maior taxa de crescimento no país**. Disponível em: <http://www.seplan.mt.gov.br/-/13285483-economia-de-mato-grosso-tem-a-maior-taxa-de-crescimento-no-pais>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- SILVA, Mariana Fernandes da. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal**. 2010. 113 f. Tese de Doutorado - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2010. Versões impressa e eletrônica.
- SILVA, Matheus Francisco da. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. 2016. 142 f. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Versões impressa e eletrônica.

SIMIONI, Cássio Fernando. **Estudo da estabilização de solos com cal na região de Sinop-MT para fins de pavimentação**. 2011. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Mato Grosso, Sinop, 2011. Versões impressa e eletrônica.

SINOP. Prefeitura. **A economia**. Disponível em: <https://www.sinop.mt.gov.br/A-Cidade/Economia/>. Acesso: 20 abr. 2020.

TEIXEIRA, Ivonei. **Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento**. 2014. 137 f. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Campinas, 2014. Versões impressa e eletrônica.

TRINDADE, Tiago Pinto da; et al. **Compactação dos solos**. 1 ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. 95 f. Versões impressa e eletrônica.