

ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DE SINOP-MT COM ADIÇÃO DE CIMENTO

MATEUS PEREIRA DE OLIVEIRA¹
LETICIA REIS BATISTA ROSAS²

RESUMO: A constante demanda por obter tecnologias inovadoras e materiais com qualidade, baixo custo e alta confiabilidade, para solução de problemas em regiões onde o solo possui baixa resistência a compressão e precisa ser melhorado, faz com que a estabilização de solos através da adição de cimento Portland, se torne uma alternativa capaz de atender a demanda para o melhoramento de solos. Essa pesquisa visa mostrar e comprovar para os demais leitores que é possível fazer o melhoramento de solo siltoso do tipo A-4, através da adição de cimento para a estabilização do mesmo, e que a técnica de melhoramento de solos é uma alternativa de grande importância, por se tratar de uma técnica que causa poucos impactos ambientais. Essa técnica permite a utilização de parte do solo local, bem como o custo benefício da estabilização, em relação a total substituição do solo, pode ser mais vantajoso, visto que a resistência à compressão obtida com o solo estabilizado, tende a alcançar altos valores de resistência com baixo teor de cimento adicionado a mistura, quando executado de maneira correta. Dentre os resultados obtidos, o que alcançou a maior resistência foi com 4% de cimento aos 28 dias de cura; chegando a 278,77% da resistência do solo natural. Com isso ficou comprovado que é possível realizar este procedimento para os solos com as mesmas características.

Palavras-chave: argila, compactação, grau de resistência, melhoramento de solos.

STABILIZATION OF A SINOP-MT SOIL WITH ADDITION OF CEMENT

ABSTRACT: The constant demand for obtaining innovative technologies and materials with quality, low cost and high reliability, for problem solving in regions where the soil has low resistance to compression and needs to be improved, makes the soil stabilization through the addition of Portland cement, becomes an alternative capable of meeting the demand for soil improvement. This research aims to show and prove to the other readers that it is possible to improve silt soil type A-4, by adding cement to stabilize it, and that the soil improvement technique is a very important alternative, as it is a technique that causes few environmental impacts. This technique allows the use of part of the local soil, as well as the cost benefit of the stabilization, in relation to the total replacement of the soil, it can be more advantageous, since the compression resistance obtained with the stabilized soil, tends to reach high values of resistance with low cement content added to the mixture, when performed correctly. Among the results obtained, the one that achieved the greatest resistance was 4% cement after 28 days of curing; reaching 278.77% of the resistance of the natural soil. This proved that it is possible to perform this procedure for soils with the same characteristics.

key words: clay, compaction, degree of resistance, soil improvement.

¹ Acadêmico de Graduação, Curso de Engenharia Civil, UNIFASIPE Centro Universitário, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: mateus111pereira@gmail.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

Desde o início das civilizações quando começaram as primeiras construções, o solo está presente no dia a dia das pessoas, como as casas feitas de barro; tijolos são fabricados a partir do barro, a telha de barro é exemplo de material feito do solo e que também é utilizado até os dias atuais. Para a engenharia civil o solo é importante, podendo até ser o elemento mais decisivo na hora de projetar qualquer que seja a estrutura, pois é ele que irá receber toda a carga de uma estrutura e o responsável por suportar todos os esforços provenientes dessa estrutura.

De acordo com Santos (2017), o processo de compactação do solo pode ser manual ou mecânico, sendo que a compactação mecânica é mais bem aproveitada por se tratar de máquinas com capacidade de compactação mais elevada do que as máquinas que são utilizadas manualmente. O autor ainda relata que os principais objetivos de fazer a compactação de um solo é para diminuir a quantidade de vazios, com isso a resistência do solo aumenta de acordo com o nível de compactação que for estabelecido em projeto proporcionando a estabilização do mesmo.

Constituído por melhoramento das propriedades mecânicas do solo está toda a parte que envolve a modificação das características atuais de um determinado solo com a adição de outro material ou produto químico, para que este solo que possui baixa resistência a compressão, tenha um ganho de resistência após passar pelo processo de melhoramento. Segundo estudos e pesquisas realizados por Vitali (2008), entre os materiais que podem ser utilizados para melhoramento de um determinado solo encontra-se: cimento Portland, a cal e o asfalto, sendo que o cimento Portland é o material mais utilizado, por ser o aglomerante hidráulico que traz um ganho maior de resistência para a mistura.

Existem diversos tipos de materiais que podem ser utilizados no melhoramento do solo. Um fator muito importante na hora de fazer a escolha do material a ser utilizado, sem sombra de dúvidas é o custo benefício que esse material irá trazer para aquela ocasião.

Este estudo tem como objetivo alcançar o melhoramento das características mecânicas de solo silteoso do tipo A-4 localizados em Sinop-MT, tornando-o mais resistente à compressão, com vista a serem utilizados como base e sub-base em pavimentações. Também tem o objetivo de identificar as vantagens de alterar as propriedades mecânicas do solo melhorado com cimento em comparação com o solo sem adição de cimento, e assim determinar qual é o teor de cimento mais adequado à mistura. Para isso foi adicionado cimento Portland pozolânico CP-II-Z na proporção de 4% ao solo silteoso, água potável para hidratar, e compactado com energia de compactação de Proctor normal, aumentando a sua resistência a compressão em 278,77% aos 28 dias de cura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O solo

O solo é formado basicamente por acumulação de partículas não cimentadas ou pouco cimentada de minerais que se formam a partir de decomposição de rochas onde as fendas formadas pela decomposição é preenchida por água e/ou ar. Uma das formas de se entender os princípios e mecanismo durante o processo de estabilização de um solo é através do estudo aprofundado sobre o mesmo para se obter um conhecimento adequado (CRISTELO, 2001). O solo é um material que possui baixa resistência a tração se comparado a resistência a

compressão ou cisalhamento, sendo a mesma desprezível, e para um entendimento completo do processo de secagem de um solo, é preciso de estudos aprofundados sobre a resistência a tração, bem como a relação com os teores de umidade e grau de saturação, (VILLAR, 2007). Para Nogami e Villibor (1981), no que se refere aos solos tipicamente tropicais (solos lateríticos e solos saprolíticos) tendo uso para fins rodoviários, a classificação de solos de modo tradicional traz vantagens em tal empregabilidade. Várias são as diferenças de propriedade mecânica entre os dois tipos de solos. Solos lateríticos tem uma perda de capacidade de suporte muito baixa, quando totalmente submerso em água, bem como pouca expansão, até mesmo em solos com limite de liquidez relativamente auto. Os autores enfatizam que esta característica não se altera mesmo por apresentarem expansões e permeabilidade baixa.

2.1.1 Compactação de solos

De acordo com Crispim (2007), a partir construção de laboratórios de solos, a engenharia teve um grande avanço em suas pesquisas na parte de fundações, uma vez que para realizar os processos de compactação e testes em campo aumenta o custo da obra bem como o tempo para realização desse estudo preliminar; já nos laboratórios os ensaios são em menor escala, baixo custo para realização do mesmo e ainda permite resultados muito próximo da realidade. Existem quatro tipos de compactação: compactação por impacto, que é caracterizado pela queda de um soquete sobre uma camada de terra; compactação estática, que é caracterização por uma pressão constante exercida sobre uma camada de solo; compactação por amassamento, onde são desferidos golpes através de um pistão com mola e a compactação por vibração que se caracteriza pela energia de vibração que é aplicado sobre uma camada de solo, podendo esta ter uma carga adicional ou não. O ensaio mais utilizado para compactação dinâmica dos solos é o desenvolvido por Proctor, sendo este normatizado pela ABNT e sua norma regente é a NBR 7182 (2020) sendo que DNIT, DNER-ME 129/94 também é uma norma brasileira que rege ensaios de compactação (CRISPIM, 2007). Estudos e pesquisas realizados por Vitali (2008) indica que de acordo com o nível de compactação, a quantidade de massa que é perdida em amostras submetidas a ensaios de durabilidade é menor, principalmente em solos siltosos e argilosos. Já no ensaio de compressão uniaxial, demonstrou um aumento exponencial de resistência com o aumento da densidade da mistura, bem como que a taxa de crescimento da resistência é maior de acordo com o aumento da massa volúmica do solo; esse crescimento indica que quanto menor a porosidade, maior será a efetividade da cimentação, chegando a uma proporção de 8% na redução da porosidade, para 2,6 vezes o aumento no ganho de resistência de compressão uniaxial.

2.2 Estabilização de solos

Cruz (2010), mostra em sua pesquisa que para engenharia civil o solo é o material mais antigo já utilizado e que desde o início de sua utilização já havia necessidade de fazer a sua estabilização; porem logo após a segunda guerra mundial foi que aconteceu um avanço no processo de estabilização dos solos com o intuito de construir pavimentos rodoviários. A tentativa de expandir cada vez mais as rodovias existentes foram frustradas devido ao grande aumento no volume de tráfegos e veículos que transportam uma carga cada vez maior por eixo, fazendo com que parte dos pavimentos construídos viesse a ruína antecipada. Para Almeida (2018), a natureza da matéria prima, (sílte, areia e/ou pedregulho), é fundamental para determinação das propriedades dos materiais estabilizados com cimento; as características do solo que precisa ser melhorado, é de fundamental importância na determinação do estabilizante adequado para o mesmo, bem como na resistência do produto final resultante da mistura. Para Thomas (2016), a estabilização de um solo é o ato de fazer com que o mesmo venha atingir a resistência necessária para que ele não se deforme com a aplicação de cargas durante seu

período de vida útil; ainda segundo o mesmo autor, um solo estabilizado deve melhorar suas características de modo a resistir os esforços de cisalhamento, compressão e deformação, quando sujeito a essas tensões que são provocadas pelo tráfego de veículos, de modo que o solo não venha a ruptura. O principal objetivo de fazer a estabilização de rodovias é a obtenção de melhorias das propriedades mecânicas dos solos com o decorrer do tempo, proporcionando um solo de maior resistência e durabilidade, tornando assim pavimentos melhores e com baixo índice de manutenção diz, (CRUS, 2010). Atualmente o (DNIT), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes tem como base uma porcentagem de cimento na proporção de 6% a 10% na mistura solo-cimento na camada de base e sub-base para pavimentos flexíveis, bem como uma porcentagem de cimento de 2% a 4% na mistura solo-cimento com intuito de modificar a plasticidade e a sensibilidade dos solos em contato com a água, sem ocorrer a cimentação do solo, deixando o mesmo com características flexíveis, (PORTELINHA, 2008). Para Rosas (2013), a aplicação de métodos como a estabilização de solos com finalidade construtiva de pavimentação de rodovias, traz vantagens significativas por se tratar de uma técnica que causa poucos impactos ambientais, uma vez que não necessita fazer a completa substituição de um solo onde suas características não atendem as necessidades de projeto. Basta retirar parte desse material e fazer o melhoramento do mesmo deixando assim resistente o bastante para atender as necessidades de projeto.

2.2.1 Estabilização mecânica

A modificação das propriedades mecânicas dos solos é uma técnica construtiva utilizada internacionalmente na construção de rodovias desde a antiguidade. Estudos realizados por Portelinha (2008), mostram que no Brasil a estabilização dos solos vem sendo utilizadas desde a década de 30 no século passado, com finalidade construtiva de pavimentação de rodovias; porem a associação Brasileira de Cimento Portland só começou a desenvolver as pesquisas nessa área a partir de 1941. Pereira (2012) define como estabilização mecânica, o ato de uma simples compactação de solo até um rearranjo de suas partículas, onde há uma diminuição de porosidade, reduzindo assim o volume de vazios bem como, proporcionando um aumento da resistência ao mesmo. O autor cita em seu estudo que na prática é feito o estudo de estabilização mecânica, com a adição de um ou mais solos ao solo atual, e em seguida é feito a compactação de ambos os materiais a fim de obter um material mais compacto com uma menor deformabilidade. O princípio básico para uma fundação de qualidade começa pela compactação do solo com intuito de diminuir a quantidade de vazios através de uma força mecânica denominada por energia de compactação bem como a diminuição do índice de percolação do solo aumentando assim a resistência do mesmo. Para Crispim (2007), a resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade são características importantes nas obras de terra; características essas que em geral depende do índice de vazios para a obtenção da mesma. Portanto a compactação dos solos é a parte principal para se obter uma fundação de qualidade e com a resistência mínima estimada em projeto. De acordo com Almeida (2018), o desempenho mecânico dos solos estabilizados com cimento, depende: da quantidade e tipo do cimento, das características do solo, do método utilizado para estabilização, da umidade e grau de compactação, da qualidade de mistura dos materiais e da cura do cimento. O autor comenta ainda sobre a importância de manter o teor de umidade ótimo, para garantir a máxima densidade seca, bem como, atingir altas resistências. De acordo com Pereira (2012), a estabilização física se dá pela modificação da textura do solo; podendo para isso ser utilizados algumas técnicas bem conhecidas como a estabilização por correção granulométrica e/ou por adição de fibras; metálicas, minerais, vegetais e sintéticas. A estabilização química acontece quando é feito a adição de uma ou mais substâncias químicas ao solo. Com a adição dessas substâncias é feita as mudanças de características do mesmo com intuito de aumentar a resistência e estabilidade

atual; essas mudanças podem ainda influenciar na permeabilidade e deformabilidade do solo afim de atingir as necessidades de projeto (PEREIRA, 2012).

2.3 Cimento

De acordo com Thomas (2016), o processo de fabricação do cimento Portland consiste em moer a matéria prima, misturando-a em proporção adequada, e em seguida levar ao forno a fim de obter o clínquer, que também é moído; após esse procedimento é adicionado gesso na mistura para obter o controle do endurecimento adequado do cimento, podendo também ser feita a adição de outros materiais, como: escória de alto forno e cinzas volantes se assim for conveniente. Definido como ligante hidráulico ou aglomerante hidráulico, tendo em vista o uso em pavimentação, o cimento é um material utilizado para unir as partículas de solo. Essa junção das partículas se dá através do contato com a água para ativação do material, podendo apresentar fissurações durante o processo de cura, devido à falta de hidratação do mesmo. Sua característica de não depender das reações químicas com os minerais do solo, permiti a estabilização de praticamente todo tipo de solo (PAULA, 2013). O mesmo autor afirma ainda em sua pesquisa, que o solo terá um aumento de resistência depois de concluído o processo de hidratação do cimento. Esse processo de ganho de resistência é proporcional a quantia de cimento que é adicionado ao solo, sendo que teores de cimento a partir de 2% adicionado ao solo já é capaz de alterar as propriedades físicas do mesmo. Tendo em vista a empregabilidade para pavimentos, pode ser utilizado qualquer tipo de cimento para o melhoramento do solo, porem o mais recomendado é o cimento Portland comum. O cimento Portland de alta resistência deixa de ser recomendado para essas finalidades por demonstrar menores resistências a agentes agressivos como o sulfato que há nos solos, (VITALI, 2008). Thomé (1999) cita em sua pesquisa, resultados de dois ensaios realizados; um com solo argiloso e outro com solo siltoso estabilizados com cimento tendo como corpo de prova uma placa redonda e uma placa quadrada. Após realizar os testes chegaram à conclusão que a camada estabilizada com cimento altera as propriedades mecânicas do subsolo, distribuindo de forma organizada as tensões e aumentando a resistência do mesmo. Os recalques para as tensões de 140 kPa e 180 kPa variaram de 3 a 6 vezes menos, para os solos estabilizados com cimento em uma camada de 1,5 m de espessura; chegando a uma quantia de 5 a 11 vezes menos, em uma camada de solo estabilizado com cimento com espessura de 2 m. Portelinha (2008) definiu em seu estudo o cimento como o aglomerante hidráulico retido através da moagem do clínquer Portland. Durante o procedimento é adicionado uma quantia mínima de sulfato de cálcio, com o intuito de regular o tempo de hidratação ou tempo de início de pega. O autor comenta em sua pesquisa que a cimentação dos grãos de solo, é obtida através das reações pozolânicas, que formam os produtos cristalinos; o processo de reação é o principal responsável pela cristalização do gel, que é feita através da troca de cátions. Para Belusso (2018), a quantidade de cimento adicionado no solo a ser estabilizado, fez uma grande diferença na resistência a compressão simples, que foi obtido a partir de experimentos laboratoriais. Aumentando o teor de cimento na proporção de 10% ao solo, houve um ganho de resistência quase que o dobro da resistência do solo sem adição do cimento.

2.4 Água

2.4.1 Efeitos do teor de umidade

A água potável satisfaz a necessidade de hidratação da mistura solo cimento, sendo sua dosagem determinada pela quantidade requerida para uma boa compactação do solo; tendo em vista que a quantidade de água necessário para a hidratação do cimento é de aproximadamente metade do peso do mesmo (VITALI, 2008). A água é um elemento fundamental para fazer a hidratação dos materiais, bem como fazer a compactação deles. A proporção de água inserida nos materiais conhecida como (teor de umidade), juntamente com

o grau de compactação é um dos fatores principais na determinação da resistência da mistura. Se não houver uma hidratação correta desses materiais juntamente com o grau de compactação ideal, a mistura solo-cimento não alcançará seu máximo desempenho na resistência (VITALI, 2008). De acordo com Belusso (2018), é de fundamental importância que os solos estabilizados seja compactado na umidade ótima para a obtenção da máxima massa específica aparente seca, no entanto, há estudos que comprovam que para certos tipos de solos, não é preciso aplicar o máximo teor de umidade, para obter a máxima resistência e durabilidade ao solo estabilizado.

2.5 Solo-cimento

Estudos e pesquisas realizados por Cunha (2014), apontam que a utilização do cimento para estabilização de solos começou a ser mais utilizado em 1936, quando a ABCP (associação brasileira de cimento Portland) regularizou seu uso; inicialmente na confecção de base e sub-base de pavimentos. O autor cita que as primeiras construções no Brasil, foi utilizado no aeroporto de Petrolina (PE) e residências em Petrópolis (RJ) no início da década de 1940. De acordo com Vitali (2008), existe dois tipos de misturas resultantes da adição de cimento ao solo. A categoria designada como solo-cimento e a outra é designada como solo tratado com cimento. A diferença entre ambas as misturas está na quantidade de cimento que é adicionada ao solo. Se a quantidade de cimento adicionado ao solo for bastante a ponto de alterar as propriedades mecânicas e de durabilidade as misturas, juntamente com um nível de compactação ideal e teor de água que garanta a hidratação do cimento, então essa mistura é denominada solo-cimento; se a quantidade de cimento adicionada ao solo não for bastante o suficiente para modificar as propriedades mecânicas do solo, mas apenas foi feito o melhoramento desse solo com baixa porcentagem de cimento, esse tipo de mistura fica designado como solo tratado com cimento. A compatibilização do solo com o cimento é ligeiramente parecida com o concreto, diferenciando-se apenas nos agregados. O concreto tem uma granulometria maior, devido ao fato de a pedra brita ser mais grossa que um grão de terra; no concreto o cimento engloba as britas formando assim um maciço único de concreto; já no caso do solo cimento, as partículas de solo é envolvido pelo cimento fazendo que o produto resultante da mistura seja menos resistente (BELUSSO, 2018). Estudos e pesquisas feita por Trindade (2006), revelam que o Brasil se encontra em uma situação crítica com relação as estradas, onde se necessita de uma solução urgente para resolver os problemas relacionados a pavimentação existente; solução esta que demanda uma técnica construtiva economicamente viável e que permita resolver os problemas sem causar muitos danos ambientais. Tendo em vista os resultados obtidos através de amostras envolvendo dois tipos de solos; um solo arenoso e um solo síltoso, Rosas (2013) concluiu que o solo arenoso estabilizado com cimento alcançou uma boa resistência a tração, tendo como base uma quantia de 4%, provocando um aumento de 1.500% chegando a uma resistência de (411,15 kPa), em solos que não foram imerso em água. A mistura teve uma perda de resistência quando submerso em água chegando à quantia de 43%. Já o solo síltoso estabilizado com cimento em uma proporção de 6%, apresentou uma resistência a tração de (286,04 kPa) nos solos que não foram imersos; para os solos submerso, a mistura apresentou uma perda de resistência em ambos os solos. O solo cimentado é um material que tem ampla aplicação para a engenharia geotécnica, como: reforço de pavimentos flexíveis e/ou rígidos, proteção de taludes, revestimentos de canais, base de diques e estabilização de fundações em geral; sua aplicação também pode ser utilizado em caráter ambiental, como no tratamento de solos contaminados (RUYER, 2011). A adição de 10% de cimento para solos argilosos sendo utilizado na confecção de blocos ecológicos, atendem os requisitos previsto nas normas ABNT (associação brasileira de normas técnicas) e DNER (departamento nacional de estradas e rodagens), embora que a proporção seja considerada alta (LIMA et al. 2009). A utilização da menor quantidade de cimento possível, que seja capaz de garantir a resistência e estabilidade desejada em projeto é um dos critérios de economia. Em solos onde sua

granulometria e características mecânicas é considerada fina, o processo de estabilização dos solos faz surgir matrizes hexagonais, formados pelas ligações químicas entre as partículas de solo e cimento (ALEXANDRE et al. 2010). Thomas (2016) conclui que na mistura solo-cimento, o processo de endurecimento das partículas de cimento quando entra em contato com a água, fica definido como cimentação, sendo que a hidratação do cimento é o fator principal para o melhoramento das características do solo.

2.5.1 Dosagem do solo-cimento

A dosagem da mistura é a quantidade mínima de cimento que deverá ser adicionada ao solo a fim de garantir a resistência e a durabilidade do mesmo para a finalidade de destino do projeto. O procedimento é feito por meio de testes que são realizados em laboratório de compressão uniaxial e também através de ensaios de secagem e molhagem, se assim for conveniente (VITALI, 2008). De acordo com Ruver (2011), não é possível fazer a dosagem do solo-cimento, através do fator água/cimento; por não estabelecer uma relação entre as propriedades de resistência do mesmo, devido a impossibilidade de total eliminação do ar presente no solo. O autor cita critérios para dosagens de melhoramento de solos com adição de cimento tendo aplicação em pavimentação. A dosagem consiste em obter as características granulométricas do solo, realização de ensaios de compactação, limite de liquidez e plasticidade; depois de obter as características do solo, deve ser feito uma porção de ensaios de compressão simples com diferentes quantidades de cimento, sendo que todos devem ser realizado com grau de compactação máximo; tendo em vista que o ensaio que apresentar o menor teor de cimento e uma resistência mínima de 2,1 Mpa é o que deve ser utilizado na pratica. Segundo Belusso (2018), há um método de dosagem existente semelhante ao fator água/cimento que é conferido para o concreto; o método consiste em uma curva do fator vazios/cimento que é conferido para a resistência a compressão simples, que se deseja em projeto, sendo a curva descrita por: $\eta / = \text{Fator vazios/cimento}$; $\eta =$ porosidade da mistura compactada; $=$ teor de cimento volumétrico ajustado por um expoente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

Para a realização dessa pesquisa, utilizou-se amostras de solo (figura 1) da cidade de Sinop-MT, do bairro Jardim das Nações, onde se tem um solo com maior concentração de argila (SIMIONI, 2011); de modo que as propriedades ligantes do cimento se rearranjam melhor com esse tipo de solo (ROSAS, 2013).

Figura 1: Solo utilizado na pesquisa, peneirado.



Fonte: Própria (2020)

3.1.2 Cimento

Utilizou-se para estabilização do solo, o cimento Portland pozolânico CP-II-Z, disponível no comércio de materiais de construção de Sinop-MT; por apresentar um baixo calor de hidratação (menor quantidade de calor que é liberado durante a hidratação), bem como o ganho de resistência ser mais lento diminuindo assim o efeito de retração e fadiga. Outro fator para a utilização desse tipo de cimento é devido ao fato de ele ser mais barato em relação aos demais cimentos, influenciando assim no custo/benefício do mesmo.

3.1.3 Água

A água oriunda da rede de abastecimento satisfaz a necessidade de hidratação da mistura solo cimento, sendo sua dosagem determinada pela quantidade requerida para uma boa compactação do solo, sendo ela 26,30% (ROMANINI e CRISPIM, 2014). A água utilizada foi disponibilizada pelo laboratório da universidade UNIFASIPE.

3.2 Métodos

Para realização da pesquisa foi adotado o método de ensaio sugerido pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6457 (2016), versão corrigida 2016. Utilizou-se amostras deformadas de solo para realização dos ensaios, que foram retiradas e armazenadas em embalagens plásticas com 4,5kg cada, sendo etiquetadas para facilitar a conferência das mesmas. Para obter um resultado preciso das características do solo local, escavou-se o solo a uma profundidade de 50 centímetros e após a escavação retirou-se as amostras do solo. Posterior a coleta do solo, o mesmo foi levado até o laboratório e espalhado em uma lona plástica para realizar a secagem do solo ao ar por cerca de sete dias. Posterior ao processo de secagem, ocorreu o destorroamento e peneiramento do solo segundo as recomendações da ABNT NBR 6457 (2016), versão corrigida 2016; tendo em vista que o solo a ser utilizado é o passante na peneira malha quadrada (abertura de 4,8 mm). O processo de caracterização do solo em laboratório é de fundamental importância. Para o solo em questão, foram utilizados os dados de caracterização geotécnica obtidos por Simioni (2011), sendo classificado como solo siltoso do tipo A-4 pelo método TRB. De acordo com o mesmo autor, o solo natural possui teor de umidade ótimo de W_{ot} 23,40%; bem como o peso específico aparente seco máximo é de 14,89 KN/m³. O teor ótimo de cimento e sua curva de compactação foram fornecidos por Romanini e Crispim (2014), sendo utilizado 2%, 4% e 6% de cimento. Ainda segundo Romanini e Crispim (2014), W_{ot} (teor de umidade ótimo) é de 26,30%, e o peso específico aparente seco máximo é de 13,78 KN/m³.

3.2.1 Moldagem dos corpos de prova

As moldagens dos corpos-de-prova (CPs) foram realizadas por etapas sendo elas: pesagem dos materiais, mistura e compactação em molde cilíndrico com 10,1417 cm de diâmetro e 12,753 cm de altura, sendo sua área de 80,7814 cm², com energia de compactação de Proctor normal em conformidade com a ABNT NBR 6457 (2016), versão corrigida 2016; desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura em câmara úmida. Segue figura 2 do solo utilizado na pesquisa, sendo compactado.

Figura 2: Solo utilizado na pesquisa, sendo compactado



Fonte: Própria (2020)

Iniciou-se os ensaios com três corpos de provas em sua forma natural, para obtenção da resistência a compressão do solo local e servir de base para comparação da resistência após a estabilização do mesmo. Os corpos de prova foram moldados e rompidos nas dependências dos laboratórios da Faculdade UNIFASIPE. Tendo em vista os estudos realizados durante o processo de revisão de literatura, a porcentagem de cimento a ser adotado varia de 2% a 10% dependendo da classificação do solo a ser estabilizado. Para este estudo utilizou-se uma porcentagem de cimento de 2%, 4% e 6%, sendo necessária uma quantia de 6 CPs para realização dos testes para cada teor, sendo: 3 CPs para rompimento aos 7 dias e 3 CPs para rompimento aos 28 dias. A pesagem dos materiais consiste na separação adequada dos mesmos, todos na mesma proporção estabelecida neste trabalho. As misturas de solo com os teores de cimento foram preparadas e homogeneizadas, logo após adicionou-se água na mistura para hidratação dos materiais até atingir o teor de umidade ótima, e novamente realizou-se a homogeneização dos materiais. Após a mistura e hidratação dos materiais, realizou-se a compactação dos mesmos em 6 corpos-de-prova para cada teor de cimento gerando um montante de 21 corpos de prova. Após a confecção dos corpos de provas, os mesmos foram desmoldados e pesados, posteriormente os corpos de prova foram armazenados em sacos plásticos, fechado para evitar a perda de umidade para o meio e etiquetados para facilitar a conferência dos mesmos. O processo de cura dos corpos de prova deu-se em câmara úmida e temperatura ambiente, onde permaneceram até o rompimento aos 7 e 28 dias para ensaio de

resistência a compressão e obter o comparativo dos ganhos de resistência em cada etapa de rompimento do solo estabilizado com cimento em relação ao solo em seu estado natural.

3.2.2 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão deu-se aos 7 e 28 dias como já descritos seguindo as recomendações da NBR 12770 (ABNT, 1992). A realização do ensaio ocorreu em uma prensa hidráulica. Posterior ao processo de ruptura, dividiu-se a carga de ruptura pela área de seção transversal dos corpos de prova para obter o valor da resistência a compressão dos mesmos em kgf/cm², e então transformou-se o valor obtido para kPa.

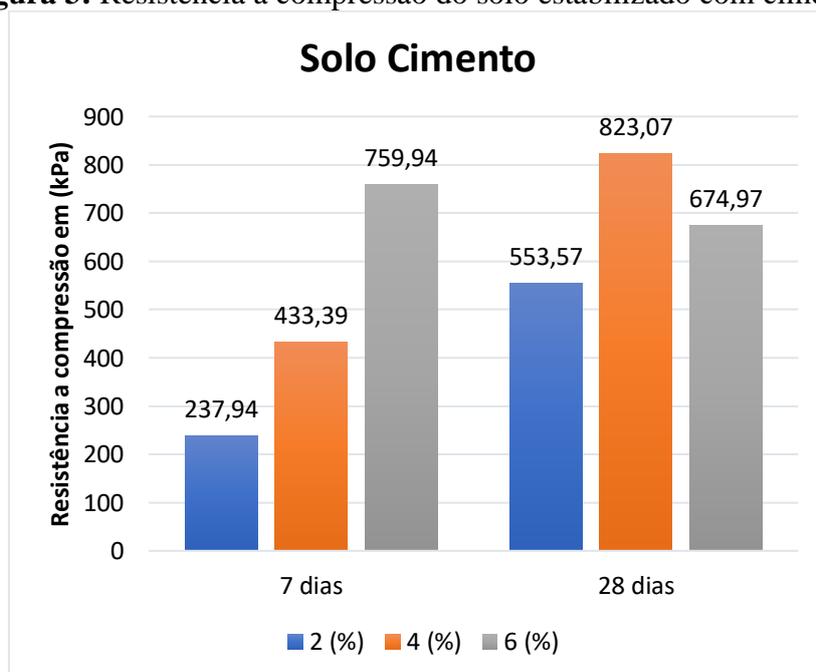
3.2.3 Método comparativo

Após obter os resultados do ensaio de compressão, realizou-se a análise comparativa com as amostras sem adição de cimento, e as amostras que foram adicionado cimento. De acordo com a análise comparativa, montou-se um gráfico, com um objetivo de detalhar os resultados de resistências; obtidas ao longo dos ensaios que foram realizados. Deixando claro os ganhos de resistências obtidas com a adição de cimento no solo estabilizado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos ensaios, foi possível verificar que a resistência à compressão do solo natural é de 217,30 kPa, sendo este, um valor considerado baixo para um solo que irá ser pavimentado e receber altas cargas sobre o mesmo. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão estão detalhados na figura 3; sendo os resultados obtidos do solo estabilizado com cimento aos 7 e 28 dias de cura.

Figura 3: Resistência a compressão do solo estabilizado com cimento.



Fonte: Própria (2020).

De acordo com os dados obtidos, verifica-se que a resistência a compressão do solo estabilizado com cimento, na proporção de 2%, atingiu 237,94 kPa em média, e esta resistência aos 28 dias chegou a 553,57 kPa. A resistência à compressão do solo estabilizado com cimento na proporção de 4% atingiu 433,39 kPa aos 7 dias, bem como 823,07 kPa aos 28 dias, sendo esta, a maior resistência alcançada neste experimento. Já o solo estabilizado com cimento na proporção de 6%, alcançou 759,94 kPa aos 7 dias de cura, sendo que esta resistência chegou a 674,97 kPa aos 28 dias de cura. Através dos dados obtidos verifica-se que a estabilização do solo com a adição de cimento provocou um aumento na resistência a compressão no solo estabilizado com 2%, em cerca de 9,50% aos 7 dias, sendo que o mesmo proporcionou um aumento de 154,75% aos 28 dias de cura. Para o solo estabilizado com cimento na proporção de 4%, houve um ganho de resistência de 99,44% aos 7 dias, sendo que a resistência a compressão do mesmo aos 28 dias atingiu 278,77% da resistência do solo natural. Já para o solo estabilizado com cimento na proporção de 6%, foi possível observar um ganho de resistência cerca de 249,72% em relação ao solo natural aos 7 dias, sendo esta resistência um pouco menor aos 28 dias, atingindo 210,62% da resistência do solo natural. É possível observar que a resistência do solo estabilizado com cimento aumentou cerca de 132,65%, de 7 para 28 dias, sendo este valor para o solo estabilizado com 2% de cimento; o solo estabilizado com 4% de cimento apresentou um aumento de 89,91% em sua resistência, de 7 para 28 dias de cura; com tudo o solo estabilizado com 6% de cimento, apresentou uma queda de 12,59% em sua resistência, de 7 para 28 dias.

5. CONCLUSÃO

Após analisar os resultados obtidos através do experimento, ficou claro que é possível fazer a estabilização de solos, do tipo A-4. A estabilização em questão, foi feita com a adição de cimento para fins de pavimentação. Com os dados em mãos, é possível concluir que o melhor resultado foi obtido pelo solo estabilizado com 4% de cimento, chegando a uma resistência de 823,07 kPa. Esta resistência é 278,77% maior que a resistência do solo natural. Resistência esta, obtida aos 28 dias de cura; sendo que todas as demais resistências obtidas no experimento, são consideradas boas, suprimindo a deficiência do solo natural.

Cada região possui um tipo de solo diferente do outro, sendo que este fator influencia diretamente nos resultados obtidos através do experimento. Com isso se faz necessário que para a utilização do método de melhoramento de solos, realize a análise do solo local, para entender as características e propriedades do mesmo, e então escolher a melhor solução.

Com isso temos que o solo natural de Sinop-MT, utilizado para o experimento; por si só, possui baixa resistência a compressão. sendo que o cimento é capaz aumentar a resistência a compressão do mesmo, fazendo com que seja possível a sua utilização sem precisar substituir a totalidade do solo local, alcançando altas resistências através da estabilização com adição de cimento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me guiado até aqui. Aos meus pais que não mediram esforços para que eu pudesse alcançar essa conquista, ao meu irmão que sempre me deu apoio e incentivo. Agradeço também a minha esposa que sempre esteve do meu lado me

ajudando; A minha orientadora, professora mestre Leticia Reis Batista Rosas que me orientou de forma clara e objetiva para obter êxito neste trabalho. Aos demais professores, do curso de Engenharia Civil, que repassaram seus conhecimentos e muito contribuíram para minha formação e a todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo-Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: Método de ensaio. [s.l.], 2016. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 7182**: Solo- Ensaios de compactação: Método de ensaio. [s.l.], 2020. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 12770**: Solo coesivo-Determinação da resistência a compressão não confinada: Método de ensaio. [s.l.], 1992. 4 p.

ALMEIDA, D. J. **Estabilização de solo tropical argiloso com cimento e zeólito sintético como solução em pavimentação no Amazonas**. Orientador: Nilton de Souza Campelo. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

ALEXANDRE, J; ALVES, M. G.; LIMA, T. V. Estudo da estabilização de um solo argiloso com adição de cimento. **Vértices**, 2010, v. 8, n. 1, p. 7-22.

BELUSSO, A. **Avaliação da influência do teor de cimento Portland na durabilidade e resistência de um solo argiloso**. Orientador: Jaqueline Bonatto. 2018. 66 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.

CRISPIM, F. A. **Compactação de solos: influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos**. Orientador: Dario Cardoso de Lima. 2007. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

CRISTELO, N. M.C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal**. Orientador: Said Jalali. 2001. Cap. 3. 48 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2001.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal**. Orientador: Said Jalali. 2001. Cap. 2. 55 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2001.

CRUZ, M. L.; JALALI, S. Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento com recurso a activadores de baixo custo. **Geotecnia Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, 2010, n. 120, P. 49-64.

CUNHA, V. M. **Avaliação experimental da mistura solo-cimento para aplicação em camadas de base de pavimentação**. Orientador: Jairo Furtado Nogueira. 2014. 90 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília, UNICEUB, Brasília, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNER-ME 129: Solos- compactação utilizando amostras não trabalhadas: Método de ensaio**. [s.l.], 1994. 8 p.

LIMA, T. V.; ALEXANDRE, J.; ALVES, M. G. Estabilização de solos argilosos para a produção de blocos ecológicos. **Revista de Engenharia Civil da Universidade do Minho**, 2009, n. 34, p. 1-12.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. **Anais do Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia**, 1981, n. 1, p. 30.

PAULA, T. M. **Melhoramento de solos: adição de cimento, microsilica e cinza de casca de arroz em um sítio orgânico**. Orientador: Nilo Cesar Consoli. 2013. 81 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto alegre, 2013.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. Orientador: Maria Del Pilar Durante Ingunza. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2012.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**. Orientador: Dario Cardoso de Lima. 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Viçosa, Viçosa 2008.

ROMANINI, A; CRISPIM, F. A. **Estabilização de solos da região norte de Mato Grosso com cimento**. Seminário apresentado no XI ciclo de seminários de iniciação científica. 2014. Universidade do Estado de Mato Grosso. Sinop.

ROSAS, L. R. B. **Resistencia a tração de solos estabilizados com cal e cimento em Sinop-MT**. Orientador: Rogério Dias Dalla Riva. 2013. 26 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Campos Universitário de Sinop-MT, UNEMAT, Sinop, 2013.

RUVER, C. A. **Estudo do arrancamento de fundações em solos tratados com cimento**. Orientador: Fernando Schnaid. 2011. 333 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SANTOS, L. D. F. **Estudo do comportamento do solo melhorado com cimento**. Orientador: Manoel Isidro de Miranda Neto. 2017. 57 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, UFF, Niterói, 2017.

SIMIONI, C.F. **Estudo da estabilização de solos com cal na região de Sinop-MT para fins de pavimentação**. Orientador: Flavio Alessandro Crispim. 2011. 47 f. Dissertação

(Bacharelado em Engenharia Civil) - Campos Universitário de Sinop-MT, UNEMAT, Sinop, 2011.

THOMAS, M. **Avaliação da influência do tempo de cura na estabilização de solos lateríticos com adição de cal e cimento.** Orientador: Jaelson Budny. 2016. 74 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, UNIPAMPA, Alegrete, 2016.

THOMÉ, A. **Comportamentos de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais.** Orientador: Nilo Cesar Consoli. 1999. 238 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 1999.

TRINDADE, T. P. **Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental.** Orientador: Dario Cardoso de Lima. 2006. 271 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2006.

VILLAR, L. F. S.; DE CAMPOS, T.M.P.; ZORNBERG, J.G. Relação entre a resistência a tração obtida via ensaio brasileiro, a sucção e índices físicos de um solo. **Simpósio de Solos não Saturados**, 2007, v. 1, n. VI, p. 1-12.

VITALI, O.P.M. **Efeito da composição de mistura de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência.** Orientador: Antônio Joaquim Pereira Viana da Fonseca. 2008. 152 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, FEUP, Porto, 2008.